



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Thiago Guesser Corrêa

Mitigação da retração autógena de concretos de alto e ultra-alto desempenho pela adição de
resíduo de polimento de porcelanato e microfibras de aço

Florianópolis
2023

Thiago Guessser Corrêa

**Mitigação da retração autógena de concretos de alto e ultra-alto-desempenho pela
adição de resíduo de polimento de porcelanato e microfibras de aço**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Fernando Pelisser, Dr.

Coorientador: Prof. Paulo Ricardo de Matos, Dr.

FLORIANÓPOLIS

2023

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.**

Corrêa, Thiago Guesser

Mitigação da retração autógena de concretos de alto e ultra-alto desempenho pela adição de resíduo de polimento de porcelanato e microfibras de aço / Thiago Guesser Corrêa ; orientador, Fernando Pelisser, coorientador, Paulo Ricardo de Matos, 2023.

136 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Concretos de alto e ultra-alto desempenho. 3. Retração autógena . 4. Resíduo de polimento de porcelanato. 5. Microfibras de aço. I. Pelisser, Fernando. II. de Matos, Paulo Ricardo. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

Thiago Guesser Corrêa

**Mitigação da retração autógena de concretos de alto e ultra-alto-desempenho pela
adição de resíduo de polimento de porcelanato e microfibras de aço**

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 02 de março de 2023,
por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Janaíde Cavalcante Rocha, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Caroline Angulski da Luz, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado
adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Philippe Jean Paul Gleize
Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Fernando Pelisser, Dr.
Orientador

Prof. Paulo Ricardo de Matos, Dr.
Coorientador

Florianópolis, 2023.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e pelo privilégio de estudar.

Aos meus pais, Pedro e Bernadete, todo agradecimento do mundo não é suficiente. Obrigado pela paciência e confiança depositada nestes muitos anos de estudo. Vocês são inspiração para o meu caminho a seguir. À minha irmã Patrícia e a meus sobrinhos queridos, muito obrigado pelo amor dispendido, mesmo à distância acalenta o coração.

À minha companheira Tamila, que nos últimos cinco anos tanto me ensinou durante todos os momentos desta caminhada. O seu apoio em muito contribuiu na manutenção do meu foco nos objetivos, sempre mantendo a minha confiança de que tudo valeria a pena. O meu eterno agradecimento.

Ao Prof. Fernando Pelisser, que ao aceitar me orientar, oportunizou a realização deste trabalho de mestrado do qual tanto me orgulho. Obrigado por sempre se encontrar disponível e presente para conversas esclarecedoras que sempre possibilitaram o avanço da pesquisa. Agradeço todos os conhecimentos transmitidos e a paciência despendida nestes últimos dois anos de pesquisas. Ao Prof. Paulo Ricardo de Matos, por ter aceitado coorientar este trabalho. As suas contribuições, esclarecimentos e correções foram essenciais para a melhor conclusão deste estudo.

Agradeço também aos membros da banca, que dedicaram seu tempo para avaliar esta dissertação.

Aos meus colegas e amigos do programa de pós-graduação, por todo o apoio, suporte e conhecimento compartilhado durante os muitos períodos de conversas. Em especial, Artur, Alamanda, Gena, Made e Lucas, vocês em muito enriqueceram este trabalho, desde as mais pequenas dúvidas até importantes questões conceituais. Muito obrigado pela parceria!

À técnica do NANOTEC, Vanessa que muito me auxiliou na realização dos ensaios.

Aos meus amigos do Instituto Federal de Santa Catarina, em especial Guilherme Hickel e Prof. Alexandre Lima de Oliveira, meu muito obrigado pela minha introdução à pesquisa científica.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC) pelo suporte financeiro. Ao Laboratório de Aplicação de Nanotecnologia em Construção Civil (NANOTEC) e ao Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da UFSC.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

Os concretos de alto desempenho (CAD) e os concretos de ultra-alto desempenho (CUAD) apresentam elevados processos de autodessecação do qual decorre o aumento da pressão capilar e, conseqüentemente, da retração autógena. Este trabalho adotou a substituição do cimento Portland por um material cimentício suplementar (MCS) – mais especificamente o resíduo de polimento de porcelanato (RPP) – e a introdução de restrições à deformação da microestrutura – através da introdução de microfibras de aço – a fim de avaliar a influência individual e combinada destes componentes na mitigação da retração autógena de CADs e CUADs. Para tanto, foram realizados ensaios de retração autógena em concretos com duas relações a/agl distintas – 0,20 e 0,30 – variando os teores de substituição em massa de cimento por RPP – 10% e 20% - e com dois percentuais de microfibras de aço nas misturas – 1% e 2%. Além dos ensaios de retração autógena, realizou-se ensaios em pasta de cimento (calorimetria isométrica, DRX, TG e absorção de água) e de caracterização mecânica em concretos (resistência à compressão, resistência de tração na flexão e módulo de elasticidade dinâmico). As composições de CAD e CUAD (a/agl 0,30 e 0,20, respectivamente) com teores de substituição de cimento por RPP apresentaram comportamentos distintos no desenvolvimento da retração autógena. Os CADs, contendo substituições em massa de 10% e 20% de cimento por RPP apresentaram reduções de 9,7% e 17,3%, respectivamente, frente à retração autógena da amostra referência após 28 dias de medições. Este efeito positivo decorre da redução do calor de hidratação do ligante como um todo e também do aumento da relação a/c relativa (0,3 vs. 0,33 vs. 0,38 de C0,3Ref, C0,3R10 e C0,3R20, respectivamente) que aumentou o percentual de vazios permeáveis destes compósitos. Em contrapartida, os CUADs com teores de substituição de 10% e 20% de RPP apresentaram efeitos negativos sobre a retração autógena, com aumentos de 29,3% e 60,8% sobre o resultado de 28 dias da composição referência. Neste caso, o aumento da relação a/c (0,20 vs. 0,22 vs. 0,25 de C0,2Ref, C0,2R10 e C0,2R20, respectivamente), aumentou a disponibilidade de água por grama de cimento, resultando no crescimento dos calores acumulados e redução dos vazios permeáveis, aumentando a pressão capilar nestas amostras. A introdução volumétrica de até 2% de microfibras metálicas nas misturas resultou em efeitos benéficos, independentemente da relação a/agl, com reduções de até 23% na retração autógena de CADs e CUADs referências. Além disto, ao avaliar a retração autógena desde o momento da moldagem, percebe-se que as misturas contendo fibra auxiliam no combate a deformação enquanto o concreto ainda se apresenta em estado plástico. Por fim, entre os CADs houve uma sinergia positiva dos efeitos de substituição do cimento por RPP e a adição de microfibras metálicas, reduzindo ao máximo a retração autógena dos CADs – 396 $\mu\text{m}/\text{m}$. Entre CUADs com 20% substituição de cimento por RPP, a adição de 2% de microfibras metálicas neutralizou o efeito negativo apresentado pelo RPP.

Palavras-Chave: Concretos de alto e ultra-alto desempenho; Retração autógena; Resíduo de polimento de porcelanato; Microfibras de aço.

ABSTRACT

High-performance concrete (HPC) and ultra-high-performance concrete (UHPC) present high self-desiccation processes, which increases capillary pressure and, consequently, autogenous shrinkage. This essay adopted the replacement of Portland cement by a supplementary cementitious material (MCS) – more specifically porcelain polishing residue (PPR) – and the introduction of restrictions to the deformation of the microstructure – through the introduction of steel microfibers – in order to evaluate the individual and combined influence of these components in mitigating the autogenous shrinkage of HPC and UHPC. For this purpose, autogenous shrinkage tests were carried out in concrete with two different w/b ratios – 0.20 and 0.30 – varying the replacement contents in mass of cement by PPR – 10% and 20% – and with two percentages of steel microfibers in the mixtures – 1% and 2%. In addition to the autogenous shrinkage tests, tests were carried out on cement paste (isometric calorimetry, XRD, TG and water absorption) and mechanical characterization of concrete (compressive strength, flexural tensile strength and modulus of dynamic elasticity). The compositions of HPC and UHPC (w/b 0.30 and 0.20, respectively) with levels of cement replacement by PPR showed different behaviors in the development of autogenous shrinkage. The HPC containing mass replacements of 10% and 20% of cement by PPR showed reductions of 9.7% and 17.3%, respectively, compared to the autogenous shrinkage of the reference sample after 28 days of measurements. This positive effect stems from the reduction in the heat of hydration of the binder as a whole and also from the increase in the relative w/c ratio (0.3 vs. 0.33 vs. 0.38 of C0,3Ref, C0,3R10 and C0,3R20, respectively) which increased the percentage of permeable voids in these composites. On the other hand, the UHPCs with substitution contents of 10% and 20% of PPR showed negative effects on the autogenous shrinkage, with increases of 29.3% and 60.8% on the 28-day result of the reference composition. In this case, the increase in the w/c ratio (0.20 vs. 0.22 vs. 0.25 of C0.2Ref, C0.2R10 and C0.2R20, respectively), increased the water availability per gram of cement, resulting in the growth of accumulated heat and reduction of permeable voids, consequently increasing the capillary pressure in these samples. The volumetric introduction of up to 2% of metallic microfibers in the mixtures resulted in beneficial effects, regardless of the a/agl ratio, with reductions of up to 23% in the autogenous shrinkage of reference HPC and UHPC. In addition, when evaluating the autogenous shrinkage from the moment of molding, it is noticed that the mixtures containing fiber help to combat deformation while the concrete is still in a plastic state. Finally, between the HPC there was a positive synergy of the effects of replacing cement with PPR and the addition of metallic microfibers, reducing the maximum autogenous shrinkage for this strength class – 396 $\mu\text{m}/\text{m}$. Among the UHPC with 20% replacement of cement by PPR, the addition of 2% metallic microfibers neutralized the negative effect presented by PPR.

Keywords: High and ultra-high performance concrete; Autogenous shrinkage; Porcelain polishing residue; Steel microfibers.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Diagrama ternário da química dos materiais cimentícios suplementares | 25 |
| Figura 2: Desenvolvimento da retração autógena nas primeiras horas de hidratação do cimento | 27 |
| Figura 3: Imagens de MEV de partículas de RPP: a) Ampliação 3000x; b) Ampliação 24000x | 40 |
| Figura 4: Fluxograma do Programa Experimental | 49 |
| Figura 5: RPP após processos de secagem, destorroamento e peneiramento..... | 50 |
| Figura 6: Distribuição granulométrica do CP V – ARI e do RPP..... | 51 |
| Figura 7: Difratoograma do RPP | 53 |
| Figura 8: Perda de massa na análise termogravimétrica (TG) e DTG do RPP | 53 |
| Figura 9: Difratoograma do CP V – ARI | 55 |
| Figura 10: Resultado da análise termogravimétrica do CPV-ARI | 56 |
| Figura 11: Microfibras de aço DRAMIX OL 13/20 | 57 |
| Figura 12: Moagem e paralisação do processo de hidratação das pastas de cimento | 59 |
| Figura 13: Calorífico <i>TAM Air</i> | 60 |
| Figura 14: Método tangencial para determinação da perda percentual de massa de CH | 62 |
| Figura 15: Misturador de argamassas de eixo vertical | 64 |
| Figura 16: Mesa para avaliação de índice de consistência | 64 |
| Figura 17: Equipamento para moldagem dos corpos-de-prova prismáticos | 65 |
| Figura 18: Equipamento para medição do Módulo de Elasticidade Dinâmico | 66 |
| Figura 19: Prensa INSTRON adotada para ensaio de resistência à tração na flexão | 66 |
| Figura 20: a) Prensa Shimadzu Universal; b) Adaptação para rompimento à compressão axial de CPs prismáticos | 67 |
| Figura 21: Conjunto de moldes e sensores LVDT | 68 |
| Figura 22: Calorimetria isométrica das pastas de cimento referências | 70 |
| Figura 23: Calorimetria isométrica das pastas de cimento de relação a/agl 0,30..... | 71 |
| Figura 24: Calorimetria isométrica das pastas de cimento de relação a/agl 0,20..... | 71 |
| Figura 25:Difratoograma das pastas de cimento aos 28 dias | 73 |
| Figura 26: Intervalos selecionados dos difratogramas das pastas de cimento aos 28 dias..... | 74 |
| Figura 27: TG e DTG das pastas de cimento aos 28 dias..... | 75 |

| | |
|---|-----|
| Figura 28: a) Absorção de água e b) volume de vazios permeáveis das pastas de cimento aos 28 dias de hidratação. Média e desvio padrões de 3 amostras | 77 |
| Figura 29: Módulo de Elasticidade dos CUADs | 84 |
| Figura 30: Resistência à tração por flexão dos CUADs | 85 |
| Figura 31: Resistência à compressão axial dos CUADs..... | 86 |
| Figura 32: Módulo de Elasticidade dos CADs | 87 |
| Figura 33: Resistência à tração por flexão dos CADs..... | 88 |
| Figura 34: Resistência à compressão axial dos CADs | 89 |
| Figura 35: Relação IIC x Resistência à compressão das amostras sem microfibras | 91 |
| Figura 36: Relação IIC x Resistência à compressão das amostras com microfibras..... | 92 |
| Figura 37: Retrações autógenas dos CADs e CUADs..... | 95 |
| Figura 38: Formação dos picos iniciais de retração autógena nas primeiras 36 horas de hidratação: | 97 |
| Figura 39: Retração autógena dos CADs com microfibras metálicas..... | 102 |
| Figura 40: Detalhe da retração autógena dos CADs nas primeiras 72 horas de ensaio | 103 |
| Figura 41: Retração autógena de CUADs com RPP e microfibras de aço..... | 104 |
| Figura 42: Relações entre Consumo de cimento x Retração Autógena | 107 |
| Figura 43: Relação entre volume de vazios permeáveis x retração autógena | 108 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 1: Valores de retração autógena de concretos em diferentes estudos:..... | 28 |
| Tabela 2: Influência do teor de microfibras de aço na mitigação da retração autógena..... | 32 |
| Tabela 3: Componentes químicos do RPP obtidos por meio de FRX de distintos autores..... | 38 |
| Tabela 4: Retrações Autógena e Total obtidas por Ferrara <i>et al.</i> (2019)..... | 44 |
| Tabela 5: Resultados de ensaio de retração por secagem em argamassas contendo RPP..... | 46 |
| Tabela 6: Caracterização granulométrica, área superficial específica e porosidade do RPP e CPV-ARI..... | 51 |
| Tabela 8: Caracterização do CP V – ARI informada pelo fabricante..... | 54 |
| Tabela 9: Características físico-químicas do aditivo superplastificante..... | 57 |
| Tabela 10: Composições das pastas de cimento..... | 58 |
| Tabela 11: Traços unitários dos concretos (em massa) a serem ensaiados..... | 63 |
| Tabela 12: Resumo dos principais resultados obtidos no Ensaio de Calorimetria Isométrica..... | 69 |
| Tabela 13: Perdas de massa nas faixas de temperatura “a” e “b” e teores calculados..... | 76 |
| Tabela 14: Resultados dos ensaios dos CADs e CUADs no estado fresco..... | 80 |
| Tabela 15: Caracterização mecânica dos CUADs confeccionados..... | 83 |
| Tabela 16: Caracterização Mecânica dos CADs..... | 87 |
| Tabela 17: IIC e IIL em função da resistência à compressão axial..... | 90 |
| Tabela 18: Caracterização dos picos iniciais de retração autógena de CUADs e CADs..... | 99 |
| Tabela 19: IIC e IIL em função da retração autógena..... | 106 |
| Tabela 20: Teor calculado de Hidróxido de Cálcio (CH)..... | 129 |
| Tabela 21: Teor calculado de Água Quimicamente Combinada..... | 129 |
| Tabela 22: Teor de ar incorporado e densidades teóricas dos concretos..... | 130 |
| Tabela 23: Módulo de elasticidade dinâmicos dos concretos aos 28 e 91 dias..... | 131 |
| Tabela 24: Resistências à tração na flexão dos concretos aos 28 e 91 dias..... | 131 |
| Tabela 25: Resistência à compressão axial dos concretos aos 28 dias..... | 132 |
| Tabela 26: Resistência à compressão axial dos concretos aos 91 dias..... | 132 |
| Tabela 27: ANOVA para resultados de módulo de elasticidade de CUADs..... | 133 |
| Tabela 28: ANOVA para resultados de resistência à tração na flexão dos CUADs..... | 134 |
| Tabela 29: ANOVA para resultados de resistência à compressão axial dos CUADs..... | 135 |
| Tabela 30: ANOVA para resultados de módulo de elasticidade de CADs..... | 136 |
| Tabela 31: ANOVA para resultados de resistência à tração na flexão dos CADs..... | 137 |

Tabela 32: ANOVA para resultados de resistência à compressão axial dos CADs 138

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|----------------------------------|--|
| $\mu\text{m/m}$ | <i>Microstrain</i> (deformação de um micrômetro por metro) |
| a/agl | Relação Água/Aglomerante |
| a/c | Relação Água/Cimento |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ACI | <i>American Concrete Institute</i> |
| Al_2O_3 | Óxido de Alumínio |
| AQC | Água Quimicamente Combinada |
| ASTM | <i>American Society for Testing and Materials</i> |
| C_2S | Belita |
| C_3S | Alita |
| CAD | Concreto de Alto Desempenho |
| CaO | Óxido de Cálcio |
| CaCO_3 | Carbonato de Cálcio |
| CAR | Concreto de Alta Resistência |
| CC | Concreto Convencional |
| CH | Portlandita/ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ |
| CP V - ARI | Cimento Portland de alta resistência inicial |
| C-S-H | Silicato de cálcio hidratado |
| CUAD | Concreto de ultra-alto desempenho |
| $\text{C}_x\text{R}_y\text{F}_z$ | Composição de concreto de relação a/agl x, teor de substituição parcial de cimento por RPP y% e teor volumétrico de microfibras de aço z%. |
| DRX | Difração de Raios-X |
| IIC/ IIL | Índice de intensidade do cimento / ligante |
| Kg/m^3 | Quilograma por metro cúbico |
| MCS | Material cimentício suplementar |
| MPa | MegaPascal |
| NBR | Norma Brasileira |
| P_xR_y | Composição de pasta de cimento de relação a/agl x e teor de substituição parcial do cimento por RPP y%. |
| RPP | Resíduo de Polimento de Porcelanato |
| SiO_2 | Óxido de Silício |
| TG | Termogravimetria |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 18 |
| 1.1 | JUSTIFICATIVA | 19 |
| 1.2 | OBJETIVOS | 21 |
| 1.2.1 | Objetivo Geral..... | 21 |
| 1.2.2 | Objetivos Específicos | 21 |
| 2 | REVISÃO DE LITERATURA..... | 22 |
| 2.1 | CAD E CUAD | 22 |
| 2.2 | RETRAÇÃO AUTÓGENA EM CAD E CUAD | 26 |
| 2.2.1 | Fatores influenciadores da retração autógena | 28 |
| 2.2.1.1 | <i>Teores de aglomerante e água.....</i> | 28 |
| 2.2.1.2 | <i>Agregados</i> | 29 |
| 2.2.1.3 | <i>Materiais Cimentícios Suplementares (MCS)</i> | 29 |
| 2.2.1.4 | <i>Aditivos Químicos modificadores de reologia.....</i> | 31 |
| 2.2.1.5 | <i>Fibras.....</i> | 31 |
| 2.2.2 | Métodos de mitigação da retração autógena..... | 33 |
| 2.2.2.1 | <i>Controle da cinética da hidratação do cimento</i> | 33 |
| 2.2.2.2 | <i>Adição de restrições na microestrutura interna.....</i> | 34 |
| 2.2.2.3 | <i>Introdução de forças internas para compensar a tensão induzida pela retração. 34</i> | |
| 2.2.2.4 | <i>Redução da autodessecação por meio do aumento da umidade relativa interna 36</i> | |
| 2.3 | Resíduo de Polimento de Porcelanato (RPP) | 36 |
| 2.3.1 | Características Físico-Químicas do RPP | 38 |
| 2.3.2 | Influência do uso do RPP como MCS em compósitos cimentícios..... | 40 |
| 2.3.3 | Influência do RPP sobre a retração autógena..... | 43 |
| 2.4 | SÍNTESE DA REVISÃO DE LITERATURA..... | 47 |
| 3 | PROGRAMA EXPERIMENTAL..... | 49 |

| | | |
|---------|---|-----------|
| 3.1 | MÉTODOS | 49 |
| 3.2 | ETAPA 1: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS | 50 |
| 3.2.1 | Resíduo de Polimento de Porcelanato (RPP) | 50 |
| 3.2.2 | Cimento Portland..... | 54 |
| 3.2.3 | Microfibras de Aço | 56 |
| 3.2.4 | Agregado miúdo..... | 57 |
| 3.2.5 | Aditivo Superplastificante..... | 57 |
| 3.3 | ETAPA 2: ENSAIOS EM PASTA DE CIMENTO | 58 |
| 3.3.1 | Calorimetria isotérmica | 59 |
| 3.3.2 | Difração de raios-X..... | 60 |
| 3.3.3 | Termogravimetria e calorimetria exploratória diferencial | 61 |
| 3.3.4 | Absorção de água por imersão | 62 |
| 3.4 | ETAPA 3: ENSAIOS EM CAD E CUAD | 62 |
| 3.4.1 | Dosagens dos materiais | 62 |
| 3.4.2 | Ensaio no estado fresco dos concretos e moldagem | 64 |
| 3.4.3 | Ensaio no estado endurecido | 65 |
| 3.4.3.1 | <i>Módulo de elasticidade dinâmico.....</i> | <i>65</i> |
| 3.4.3.2 | <i>Resistências à tração na flexão e à compressão axial</i> | <i>66</i> |
| 3.4.4 | Ensaio de retração autógena..... | 68 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 69 |
| 4.1 | ETAPA 1: ENSAIOS EM PASTA DE CIMENTO | 69 |
| 4.1.1 | Calorimetria de condução isométrica | 69 |
| 4.1.2 | Difratometria de raios-X (DRX)..... | 72 |
| 4.1.3 | Análise termogravimétrica (TG)..... | 75 |
| 4.1.4 | Ensaio de absorção de água..... | 77 |
| 4.1.5 | Conclusões parciais dos ensaios em pasta | 78 |
| 4.2 | ETAPA 2: ENSAIOS EM CAD E CUAD | 80 |

| | | |
|--------------|--|------------|
| 4.2.1 | Avaliação dos concretos no estado fresco | 80 |
| 4.2.2 | Propriedades mecânicas dos concretos | 83 |
| 4.2.2.1 | <i>CUADs.....</i> | 83 |
| 4.2.2.2 | <i>CADs.....</i> | 87 |
| 4.2.2.3 | <i>Índice de intensidade de cimento e ligante em função da resistência à compressão 90</i> | |
| 4.2.3 | Conclusões parciais dos ensaios em CADs e CUADs | 93 |
| 4.3 | RETRAÇÃO AUTÓGENA..... | 95 |
| 4.3.1 | Influência do RPP na Retração Autógena de CADs e CUADs..... | 95 |
| 4.3.2 | Influência das microfibras de aço na Retração Autógena | 101 |
| 4.3.2.1 | <i>Índices de Intensidade do Cimento e de Ligante em função da retração autógena 105</i> | |
| 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 110 |
| 6 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 114 |
| 7 | REFERÊNCIAS..... | 115 |

1 INTRODUÇÃO

Os concretos de alto desempenho (CAD) e os concretos de ultra-alto desempenho (CUAD) são compósitos cimentícios que, graças às suas propriedades mecânicas e durabilidades excepcionais, vem alterando a forma com que grandes estruturas de concreto são projetadas, gerenciadas e mantidas. O CUAD, em especial, apresenta altos níveis de resistência à compressão e tração desde as primeiras idades, além de apresentar comportamento pseudo-dúctil em função da presença de microfibras na sua composição, permitindo atender a quaisquer solicitações de projeto por meio da execução de estruturas esbeltas, duráveis e seguras para o usuário final (TUTIKIAN, ISAIA, HELENE, 2011).

Em contrapartida, as baixas relações água/cimento (a/c) e altas concentrações de cimento e sílica ativa características dos CADs e CUADs provocam um acentuado processo de autodessecação dos poros internos resultando em altas tensões superficiais nos poros capilares e, posteriormente, em retração autógena (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Logo, concretos que são primariamente adotados em obras de grande complexidade, como prédios altos e pontes, podem sofrer deste fenômeno dando origem a fissuras e, posteriormente, patologias que comprometerão a longa durabilidade esperada destes compósitos cimentícios.

O comportamento de CADs e CUADs frente à retração autógena não pode ser traçado sinteticamente em um único perfil uma vez que estes são materiais quimicamente muito complexos contendo adições minerais das mais distintas origens e composições físico-químicas, além de aditivos químicos adotados para beneficiar propriedades no estado fresco e/ou endurecido. Diante deste desafio, muitas pesquisas vêm buscando determinar o nível de influência destes diferentes componentes na retração autógena de CADs e CUADs e quais seriam os métodos mais eficientes para mitigar tal fenômeno (WU, FARZADNIA, SHI, 2017; LIU, SHI e MA, 2018; YANG, SHI e WU, 2019).

Em paralelo a estas pesquisas, a incorporação de adições minerais inovadoras como materiais cimentícios suplementares (MCS) busca possibilitar a produção de cimentos mais ecoeficientes. Com isso, objetiva-se reduzir a demanda de clínquer por quilo de cimento produzido, valorizando os recursos naturais existentes, além de reduzir significativamente a emissão de CO_2 , uma vez que os MCSs não participam do processo de clínquerização. (SNELLINGS, et. al, 2012). Dentre diversas adições minerais que vêm sendo testadas como MCS, estudos recentes demonstram o potencial do resíduo de polimento de porcelanato (RPP) como substituição ao clínquer (PELISSER, et. al, 2012; JACOBY e PELISSER, 2015;

MATOS, 2019; SANTOS, 2019; LI, ZHUO e ZHU, 2019b; LI, LIU e YOU, 2020a). Entretanto, a influência do RPP na retração autógena de concretos foi apenas superficialmente estudada (STEINER *et al.*, 2015; EL-DIEB e KANAAN, 2018; LI, ZHUO E ZHU, 2019), sendo observados resultados positivos na mitigação da retração de concretos com relações água/cimento característicos de concretos convencionais (acima de 0,40).

A introdução de microfibras metálicas em CADs e CUADs também demonstraram reduzir os valores de retração autógena, conforme pesquisas realizadas (ROBERTI, *et al.*, 2021; FANG, *et al.*, 2020; WU, SHI e KHAYAT, 2019; QUASIM, 2018; ZHANG, LIU e WANG, 2017). Isto ocorre em função da transferência parcial das tensões de retração da matriz para as fibras, reduzindo assim os níveis de deformação (YANG, *et al.*, 2019).

Por fim, o referido fenômeno é responsável pelo encolhimento e fissuração de peças restringidas de CAD e CUAD, gerando assim pontos de deterioração de sua durabilidade. Logo, estes concretos devem, necessariamente, possuir altas resistências à retração autógena para manter intactas as suas propriedades mecânicas projetadas (NEVILLE, 2013). Diante disto, este trabalho se propõe a avaliar a influência isolada e combinada do RPP e microfibras de aço na redução da retração autógena de CADs e CUADs.

1.1 JUSTIFICATIVA

A proposta deste estudo destaca a importância do desenvolvimento de concretos de alto e ultra-alto desempenho com baixos níveis de retração autógena e de consumos de cimento Portland; isto será alcançado por meio da adoção do resíduo de polimento de porcelanato (RPP) como MCS e adições de microfibras de aço.

O RPP é um material proveniente do processo de desgaste superficial das peças de porcelanato com a finalidade de garantir o brilho, a impermeabilização e as espessuras corretas conforme especificação normativa (LOPES *et al.*, 2018). A indústria cerâmica brasileira é hoje o terceiro maior produtor de revestimentos cerâmicos no mundo e o segundo maior consumidor (ANFACER, 2021). Segundo o mais recente relatório da referida associação, no ano de 2020 foram produzidos 840 milhões de metros quadrados de revestimento cerâmico; deste total, cerca de 12% foram produzidos pela indústria cerâmica do sul do estado de Santa Catarina (cerca de 100 milhões de m²) (SINDICERAM, 2021). Sendo gerados 100g de RPP por m² de porcelanato (JACOBY; PELISSER, 2015), Matos (2019) estimou que anualmente são produzidos no Brasil 60 mil toneladas de RPP.

Trata-se, portanto, de resíduo abundante, tanto em nível local quanto nacional, que não possui um programa de reciclagem difundido. Além disto, de acordo com a ABNT NBR 10004 (2004), o RPP é um resíduo não inerte da classe II-A que não pode ser depositado em aterros sanitários comuns, elevando significativamente o custo da sua deposição correta.

Além da justificativa ambiental – em função da grande produção de resíduos como subproduto da indústria de porcelanato - existem também razões técnicas que indicam os benefícios do uso do RPP como MCS. Como já referenciado anteriormente, diversos estudos já avaliaram melhorias nas propriedades mecânicas das matrizes cimentícias, como: redução da porosidade e permeabilidade graças ao efeito filler (SILVA, 2005; SOUZA, 2007; JACOBY e PELISSER, 2015; STEINER, et. al; 2015; LI, OUYANG e ZHUO, 2021); aumento da resistência à compressão ao longo do tempo graças às reações pozolânicas (STEINER, 2014; JACOBY e PELISSER, 2015, MATOS *et al.*, 2018); além de maior resistência ao ataque de sulfatos (LI, ZHUO e ZHU, 2019a) e outros agentes nocivos. Além do aspecto técnico, o RPP possui um excelente potencial para confecção de cimentos ecoeficientes (reduzindo a emissão de CO₂), dando origem a compósitos cimentícios de menor custo econômico, reduzindo a necessidade do emprego de altos consumos de cimento para a obtenção de uma dada resistência mecânica.

Sobre o uso de microfibras de aço, diversos estudos já avaliaram e demonstraram os efeitos benéficos advindos da sua adoção a fim de diminuir a retração autógena em concretos de alto desempenho (ROBERTI, 2019; ZHANG; LIU; WANG, 2019; WU; SHI; KHAYAT, 2019). Em contrapartida, STEINER (2014), EL-DIEB *et al.* (2018) e LI, ZHUO e ZHU (2019a) verificaram a redução da retração a partir da adição de RPP em pastas, concretos e argamassas, respectivamente. Diante de ambas observações, este trabalho dará continuidade à investigação, buscando desenvolver concretos de alto e ultra-alto desempenho minimizando a retração autógena por meio da adoção do RPP como MCS e da adição de microfibras de aço.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O Objetivo geral do presente trabalho é investigar o potencial de mitigação da retração autógena de concretos de alto e ultra-alto desempenho pelo uso combinado de RPP e microfibras de aço.

1.2.2 Objetivos Específicos

O presente estudo tem como objetivos específicos os seguintes:

- Avaliar a influência da **concentração** do resíduo de polimento de porcelanato e das microfibras de aço, de forma isolada e combinada, na redução da retração autógena de concretos de alto e ultra-alto desempenho;
- Avaliar a influência da **relação água cimento** na retração autógena de concretos de alto e ultra-alto desempenho contendo resíduo de polimento de porcelanato;
- Contribuir para o desenvolvimento de concretos ecoeficientes e com resultados inferiores de retração autógena.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CAD E CUAD

Os concretos convencionais (CC) foram por muito tempo a única solução tecnológica a ser empregada na construção civil, com resistências mecânicas de concretos com finalidades estruturais atingindo valores entre 25 e 35 MPa. A partir da década de 1970, a introdução do aditivo superplastificante de segunda geração (naftaleno sulfonado) tornou possível a confecção de concretos com relações a/c inferiores à 0,40, graças às suas características como fluidificante e de redutor de água. A partir de então, concretos com resistências mecânicas superiores à 50 MPa foram denominados concretos de alta resistência (CAR). Posteriormente, esta denominação foi alterada para concretos de alto desempenho (CAD), uma vez que estes compósitos apresentam simultaneamente trabalhabilidade, resistência e durabilidade superiores aos concretos convencionais graças à sua porosidade inferior (AÏTCIN, 2004).

No entanto, Tutikian, Isaia e Helene (2011) ressaltam que o CAD é uma evolução simples do CC, uma vez que são utilizadas praticamente as mesmas matérias-primas. Sinteticamente, o CAD apresenta um maior refinamento das dimensões dos poros ao reduzir a relação a/c por meio do uso de aditivos superplastificantes; ao otimizar a granulometria dos agregados – reduzindo o diâmetro máximo dos agregados graúdos adotados e, ao introduzir adições minerais que provocam o refinamento dos poros por meio dos efeitos filer e/ou pozolânico.

Em contrapartida, na década de 1980, Bache (1981) publicou seus estudos nos quais confeccionou microconcreto de relação a/c 0,16 contendo altas doses de superplastificante e um componente ultrafino – sílica ativa – substituindo parcialmente o cimento. Após aplicação de grande vibração externa para compactação e procedimentos especiais de cura, o concreto atingiu resultados de 280 MPa de resistência à compressão. Embora não apresentassem hidratação completa das partículas de cimento, Bache (1981) demonstrou o alto grau de influência da compactação e a porosidade total da matriz cimentícia nos resultados de resistência mecânica e de durabilidade de concretos com baixíssimos teores de relação a/c. Após estes resultados, outros pesquisadores estudaram extensivamente o tema (AÏTCIN, LAPLANTE E BÉDARD, 1985; MORENO, 1987), sendo este compósito posteriormente denominando como concreto de ultra-alto desempenho (CUAD).

Não existe no Brasil uma definição normativa caracterizando os CADs e CUADs, sendo apenas o CAR contemplado com uma definição pela NBR 8953:2009, sendo o seu único critério definidor o fck obtido aos 28 dias (de 55 a 100MPa). No entanto, os CADs e CUADs devem

apresentar simultaneamente trabalhabilidade, resistência e durabilidades superiores aos concretos convencionais e para isso devem adotar uma combinação de componentes e práticas diferenciadas para alcançar o desempenho desejado.

Os CUADs, por exemplo, são usualmente caracterizados na bibliografia (MARVILA, *et al.*, 2021; TUTIKIAN, ISAIA e HELENE, 2011) por apresentarem relações a/c inferiores a 0,25, altos consumos de cimento e sílica ativa – acima de 800 kg/m³, e também pela incorporação de microfibras, com a finalidade de beneficiar a ductilidade do concreto. Para evidenciar ainda mais a densificação da matriz cimentícia e a uniformidade da microestrutura, nos CUADs são utilizados apenas agregados miúdos com diâmetro inferior à 0,5 mm, proporcionando um melhor empacotamento das partículas, além de resultar em zonas de transição interfaciais de menores espessuras (SHI *et al.*, 2015).

Para obtenção de CUADs com ótimos parâmetros de trabalhabilidade, faz-se necessária a utilização de aditivos superplastificantes, sendo os mais adotados aqueles à base de policarboxilatos. Estes atuam como redutores de água, permitindo a obtenção de concretos trabalháveis a partir de relações água/cimento muito inferiores, sendo utilizados teores de até 5% sobre a massa de aglomerante (SHAH *et al.*, 2021).

Em relação aos poros capilares das matrizes cimentícias, Wang *et al.*(2015) observou que o CUAD apresenta uma porosidade contínua muito inferior ao CAD. Para exemplificar, o autor compara um CUAD de relação a/c 0,20 com um CAD de relação a/c 0,33: enquanto que o primeiro necessita hidratar apenas 26% dos grãos de cimento para que todos seus poros capilares tornem-se descontínuos, seria necessário que 54% dos grãos de cimento hidratassem para que o CAD alcançasse esta mesma configuração de microestrutura porosa. Esta diferença ocorre em função de uma baixíssima porosidade total e de um intenso refinamento da estrutura dos poros, tornando a microestrutura da matriz cimentícia muito densa, homogênea e no caso do CUAD, semi-impermeável à ação de dióxido de carbono, íons cloretos, sulfatos, entre outros agentes agressivos (LI, ZHUO e KWAN, 2020; WANG *et al.*, 2015).

Li, Wu e Shi (2020) observaram este aumento drástico da resistência à permeabilidade de agentes nocivos do CUAD quando compararam seus resultados a um CAD. Ao avaliar o coeficiente de permeabilidade de água (K_{cp}) de concretos de relação a/c de 0,40 e 0,20 com 28 dias de idade, os autores verificaram um decréscimo 97% no índice estudado. Além disto, ensaios acelerados de carbonatação e de reações alcali-agregado não foram capazes de gerar danos significativos ao CUAD em função da sua baixíssima permeabilidade.

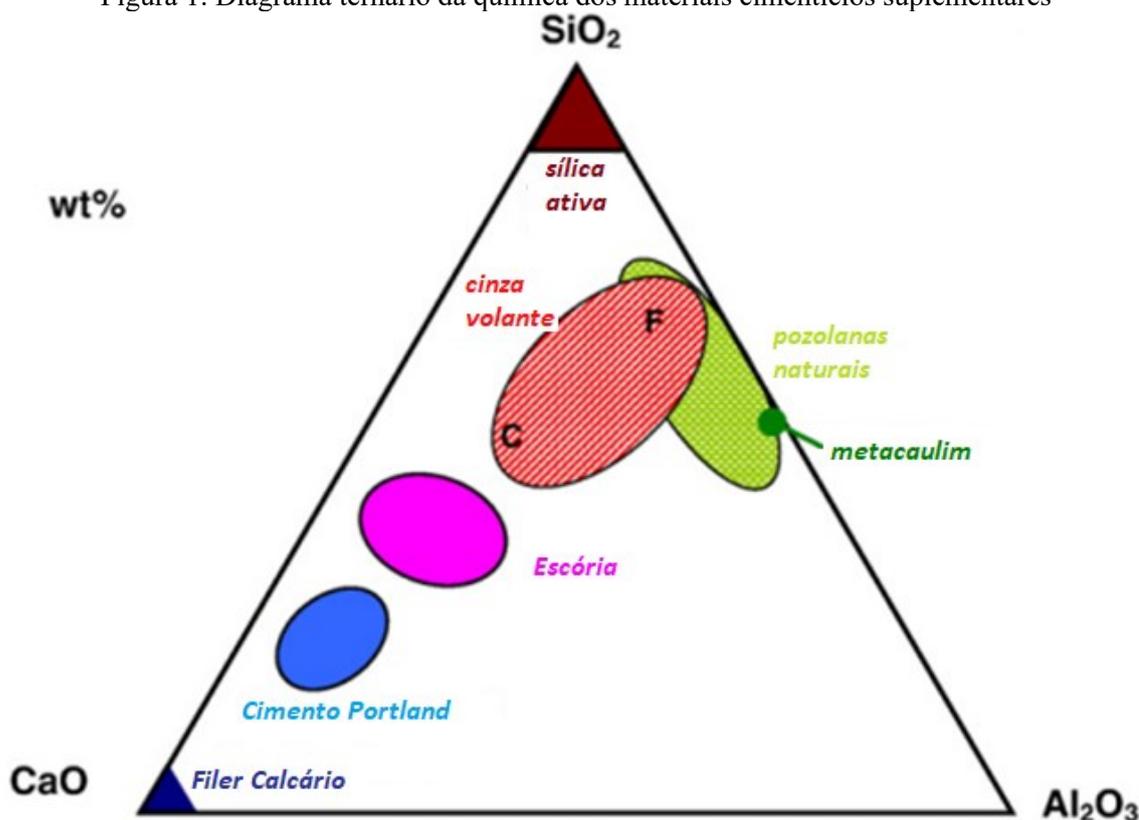
Em contrapartida, o CAD e, principalmente, o CUAD sofrem com a autodessecação da matriz cimentícia, ocasionando a retração autógena e com o deslocamento frágil diante de altas temperaturas (LI, WU e SHI, 2020). Diante destes desafios apresentados pela a técnica, uma das técnicas mais utilizadas para mitigar tal problema é a introdução de microfibras para a melhoria da ductilidade do compósito, obtendo assim um comportamento elástico-plástico diante da aplicação de tensões de tração (YANG *et al.*, 2019).

Por fim, as adições minerais têm destacada importância na composição de CADs e CUADs por proporcionarem diferentes características aos compósitos cimentícios. Existem MCS que diante da reação da hidratação do clínquer se mantêm inertes – contribuindo com o efeito de preenchimento físico da microestrutura assim auxiliando na nucleação de novos pontos de hidratação do cimento, por meio do efeito filer. Outras adições minerais são chamadas de hidráulicas, uma vez que na presença de água, reagem e apresentam efeitos cimentantes, como a escória de alto forno. Por fim, também existem os MCS que apresentam reatividade pozolânica – reagindo com o hidróxido de cálcio (CH) produzido durante a hidratação do grão de cimento, e transformando-o em C-S-H adicional (TERZIC *et al.*, 2018).

Todos os MCSs têm as suas reatividades – sendo por efeito filer, cimentante ou pozolânico – beneficiadas pela redução do tamanho médio das partículas e por maior área superficial específica – acelerando assim os processos de hidratação e aumentando a área de contato dos minerais com o cimento, respectivamente (MARVILLA *et al.*, 2021). Estes efeitos dos MCS sobre o aglomerante podem ser visualizados por meio da obtenção das curvas de calorimetria das pastas de cimento durante as primeiras horas de hidratação do aglomerante.

Dentre as adições minerais mais adotadas existem aquelas ricas em cálcio, como a escória de alto forno, a cinza volante do tipo C e o filer calcário, como também as adições ricas em sílica ou aluminossilicatos, como a cinza volante do tipo F, a sílica ativa, o metacaulim e as pozolanas naturais, como ilustrado na Figura 1 (LOTHENBACH, SCRIVENER e HOOTON, 2010) abaixo:

Figura 1: Diagrama ternário da química dos materiais cimentícios suplementares



Fonte: adaptado de Lothenbach, Scrivener e Hooton (2010)

Pesquisas vêm sendo realizadas com a finalidade de tornar os CAD e CUAD mais ecoeficientes e economicamente viáveis a partir da substituição do cimento por MCS, sem maiores prejuízos nas propriedades mecânicas e de trabalhabilidade. Tahwia, Elgendy e Amin (2021) realizaram testes com cimento CEM III 42.5 – composto por 50% de adição de escória de alto forno – com 15% de sílica ativa sobre a massa do material aglomerante e substituições de 50% de cimento por cinza volante. Aos 28 dias, ao compararem um CUAD referência (1000 kg de cimento/m³) e um CUAD com 50% do cimento substituído por cinza volante, os autores verificaram um leve aumento na resistência mecânica à compressão (135 MPa para 136 MPa) e a manutenção do módulo de elasticidade (46 GPa).

Outros materiais também vem sendo adotados como MCS em CADs e CUADs, como a cinza da casca de arroz (VAN TUAN, et. al, 2011; YE, 2013; VIGNESHWARI *et al.*, 2018), escória de alto forno (GUPTA, 2014; RANDL, et. al, 2014), cinza volante (ŠEPS e BROUKALOVÁ, 2019), pó de calcário (LI, BROUWERS e CHEN, 2020; HUANG, et. al, 2017), metacaulim (TRAFLOUI, et. al, 2016), pozolanas naturais (AHMAD, et. al, 2019), pó de granito moído (ZHANG, JI e HE, 2019), pó de pedra de basalto (YANG, et. al, 2020) e pó de vidro moído (SOLIMAN e TAGNIT-HAMOU, 2017).

2.2 RETRAÇÃO AUTÓGENA EM CAD E CUAD

Diversos são os fenômenos de retração que atuam nos concretos antes, durante e após o processo de hidratação do cimento. Estes processos geram contrações volumétricas que em estruturas restringidas resultam em fissurações, uma vez que o concreto apresenta baixa resistência à tração.

São fenômenos de retração que decorrem de condições externas a retração por secagem, retração térmica, retração plástica e a retração por carbonatação (NEVILLE, 2013). A retração por secagem pode ocorrer por longos períodos após a pega do concreto quando este é exposto a qualquer umidade abaixo do seu nível de saturação (HU, SHI, SHI, *et al.*, 2017). A retração térmica ocorre principalmente em concretos massa (estruturas de concreto de grande volume) quando as altas temperaturas geradas pelo calor de hidratação do cimento é resfriada pela temperatura ambiente (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Já a retração plástica ocorre no período plástico do concreto, quando a taxa de perda de água da superfície excede a taxa disponível de água exsudada. É normalmente observada em lajes em função da grande área superficial exposta e potencializada por altas temperaturas, baixas umidades e alta velocidade do vento. Exsudação excessiva do concreto e absorção de água pela sub-base ou fôrmas também podem agravar ainda mais a retração plástica, acarretando o enrijecimento da superfície do concreto fresco, acarretando fissuras (ALMUSALLAM, MASLEHUDDIN, ABDUL-WARIS, *et al.*, 1998). Por fim, a retração por carbonatação é outra forma de redução volumétrica do concreto que ocorre em função de reações de carbonatação que ocorrem entre o CO₂ (dióxido de carbono) e a portlandita formada na hidratação do cimento; o produto desta reação é água que ao evaporar da microestrutura resulta em uma retração por secagem (HOUST, 1997).

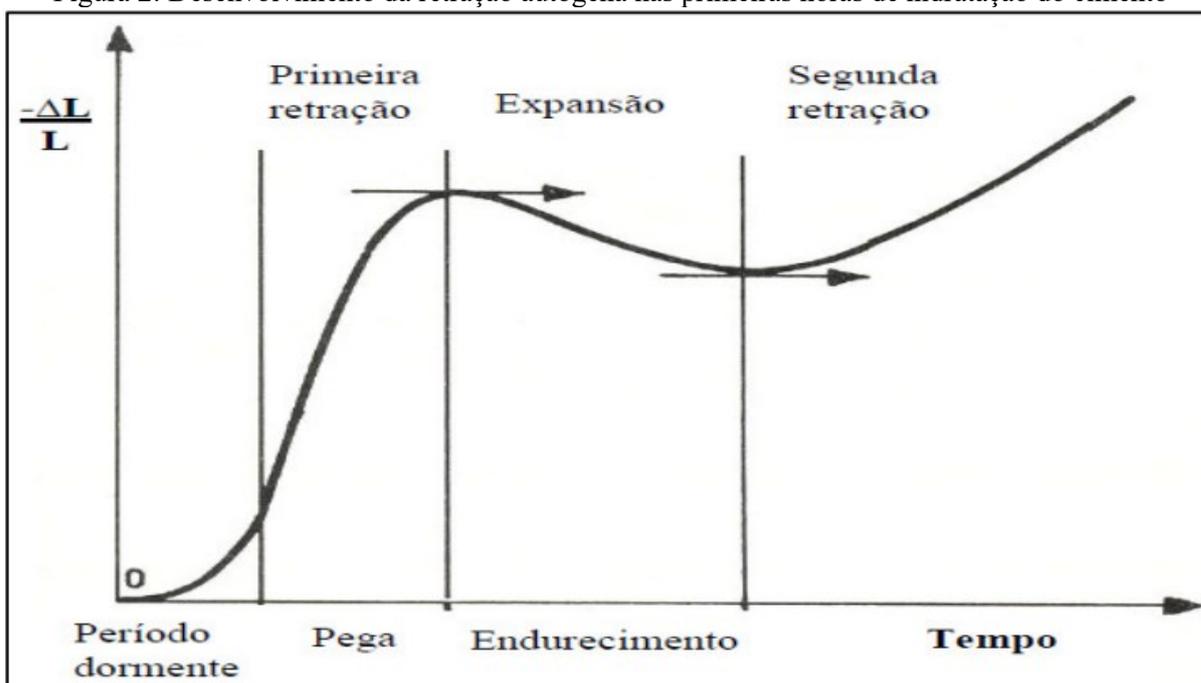
Em contrapartida, a retração autógena não é originada em função da perda ou ingresso de substâncias, variações de temperaturas, umidades ou reações químicas externas à ao compósito cimentício. Trata-se de retração isotérmica e sem troca de umidade com o ambiente. As suas causas são endógenas ao próprio compósito, ocorrendo em decorrência da contração química ocorrida durante o processo de hidratação do cimento anidro e da redução da umidade relativa interna da subsuperfície do concreto (TAZAWA, 1995).

Este segundo processo é denominado de autodessecação, onde a água disponível se desloca internamente na microestrutura do concreto para participar das reações de hidratação ou adsorver-se na superfície dos recém-formados C-S-H e CH, formando meniscos nos poros. Assim, o conjunto destes meniscos induzem uma contração volumétrica (retração autógena) tão maior quanto a pressão capilar gerada pelo tamanho médio dos poros (GHAFARI, *et al.* 2016).

A ocorrência da retração autógena é relatada, principalmente, em concretos com alto consumos de cimento e com relações água/cimento (a/c) abaixo de 0,42, incluindo, portanto, os CADs e, principalmente, CUADs (ALTOUBAT, *et al.* 2001) muito em função do elevado processo de autodessecação a que estes concretos são submetidos. Características como a adição de sílica ativa, baixa porosidade total, maior refinamento da microestrutura porosa e menor quantidade de água para hidratação do cimento são fatores que potencializam as tensões capilares que causam a retração autógena (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A Figura 2 apresentada a seguir demonstra as etapas da retração autógena segundo Balthar (2004) e Tavares (2008). Segundo os autores após o período de indução (dormência) de hidratação do cimento ocorre a retração inicial que é associada ao início das reações de hidratação. Após este pico inicial de retração ocorre um período de expansão que ocorre devido a precipitação de grandes cristais de etringita durante o endurecimento da matriz. Por fim, inicia-se a segunda retração autógena que apenas vai se estabilizar completamente ao final do processo de hidratação do cimento.

Figura 2: Desenvolvimento da retração autógena nas primeiras horas de hidratação do cimento



Fonte: Balthar (2004)

Conforme definição apresentada, a retração autógena é, portanto, fortemente influenciada pelo desenvolvimento da hidratação do cimento nas primeiras idades. Logo, curvas de fluxo de calor obtidas por meio de ensaios de calorimetria isométrica são indispensáveis no estudo deste fenômeno.

A fim de ilustrar como a retração autógena é mais prevalente em concretos de alto e ultra-alto desempenho, a Tabela 1 apresenta resultados obtidos em diferentes pesquisas que avaliaram, entre diferentes fatores, a retração autógena de CCs, CADs e CUADs.

Tabela 1: Valores de retração autógena de concretos em diferentes estudos:

| Autores | Cimento / Sílica ativa (kg/m ³) | Relação a/c | Aditivo Químico | | Resistência à compressão (MPa) | Retração autógena (µm/m) |
|---------------------------------|---|----------------|-----------------|-----|--------------------------------------|--------------------------------|
| | | | Base Química | (%) | | |
| Zhang <i>et al.</i> (2003) | 496/0 | 0,26 | Naftaleno | 1,5 | 86,6 | 197 |
| | 497/0 | 0,30 | | 1,2 | 70,1 | 180 |
| | 498/0 | 0,35 | | 0,7 | 63,7 | 40 |
| Deboodt <i>et al.</i> (2016) | 360/14,8 | 0,37 | Policarboxilato | 1,8 | 36,8 | 210 |
| Fang <i>et al.</i> (2020) | 790/210 | 0,18 | Policarboxilato | 6 | 128,3 | 730 |
| Roberti <i>et al.</i> (2021) | 970/0 | 0,20 | Policarboxilato | 2,8 | 106,8 | 572 |
| | 902/0 | 0,30 | | 0,3 | 68,3 | 384 |
| Zhang, Liu e Wang (2019) | 620/114 | 0,18 | Policarboxilato | 4,9 | 130 | 928 |
| Quasim (2018) | 450/45 | 0,45 | Policarboxilato | 2 | 58 | 105 |
| | 450/45 | 0,40 | | 2 | 66 | 125 |
| | 450/45 | 0,35 | | 2 | 70 | 165 |
| | 450/45 | 0,3 | | 2 | 76 | 200 |
| | 900/225 | 0,20 | | 2 | 82 | 508 |
| Liu, Yu e Shui (2019) | 950/144 | 0,18 | Policarboxilato | 2,8 | 109 | 733 |

A seguir, serão detalhados os principais fatores que influenciam na retração autógena de CADs e CUADs.

2.2.1 Fatores influenciadores da retração autógena

2.2.1.1 Teores de aglomerante e água

A retração autógena presente em CADs e CUADs é em grande parte influenciada pelo consumo e tipo de aglomerante utilizado definindo assim a estrutura de poros formada. A adoção de cimentos de alta resistência inicial de elevada finura e baixos teores de água aumentam a densificação da matriz cimentícia gerando um maior refinamento do sistema de poros (YANG, SHI e WU, 2019).

Além disto, os teores de aglomerante e de água característicos de CADs e CUADs tem papel importante sobre a quantidade de água livre presente no sistema de poros – em sendo

pouca, haverá um aumento da tensão capilar com intenso desenvolvimento de meniscos, resultando assim em maior retração autógena (MENG, et. al, 2018). Estes fatores também serão determinantes no alto fluxo de calor registrado no momento da hidratação de cimento, principalmente nas primeiras idades, resultando em um aumento precoce da tensão capilar e, conseqüentemente, em maiores valores de retração autógena (HOLT, 2005).

2.2.1.2 Agregados

Agregados miúdos ou graúdos podem atuar como restrições internas à deformação do compósito cimentício. Logo, em função de sua rigidez e altos módulos de elasticidade, o aumento do teor de agregados acarreta uma redução do volume de pasta cimentícia, influenciando positivamente a mitigação do fenômeno da retração autógena (MENG, et. al, 2018; LI, YU e BROUWERS, 2018). Isto foi verificado por Tian, Wei e Zheng (2022) ao avaliarem argamassas com frações volumétricas de agregados miúdos de 25, 50 e 60% frente ao volume total, obtendo assim reduções de 45 e 64% dos respectivos valores de retração autógena.

O tamanho máximo dos agregados também pode influenciar significativamente a retração autógena de CADs e CUADs. Enquanto que Shen *et al.* (2018) aumentou a dimensão máxima do agregado miúdo de quartzo de 0,212 para 2 mm, obtendo reduções de 30,8%, Yoo *et al.* (2016) introduziu um agregado graúdo em um CUAD obtendo reduções na retração autógena de 40%. No entanto, o aumento da dimensão máxima dos agregados tende a criar novos planos preferenciais de ruptura ao gerar zonas de transição interfaciais (ZTI) mais espessas, reduzindo os resultados de resistência à compressão (SCRIVENER *et al.*, 2004).

Por fim, agregados provenientes de processos de britagem oferecem superfícies mais rugosas e angulares frente a agregados naturais, resultando em nível superior de restrição interna à deformação da matriz cimentícia (RILEM, 1998).

2.2.1.3 Materiais Cimentícios Suplementares (MCS)

Existem diversos fatores através dos quais os MCS influenciam a retração autógena em concretos de alto e ultra-alto desempenho, dentre os quais destacam-se a reatividade pozolânica, o grau de finura da adição - que influencia o efeito filer - e o percentual de substituição de cimento. Em função destes fatores, os MCS podem afetar em maior ou menor medida, positiva ou negativamente, a retração autógena. O efeito resultante depende, principalmente, da sua influência sobre o fluxo de calor das reações de hidratação e a sua

participação no refinamento da microestrutura porosa – por meio da ocorrência de forte reatividade pozolânica nas primeiras idades e da nucleação heterogênea de novos pontos de hidratação em função da introdução de material de elevado grau de finura.

A sílica ativa vem sendo adotada na maioria das composições de CADs e CUADs exatamente por possuir finura e reatividade pozolânica elevadas. Estas características acabam por acelerar a hidratação do cimento tanto pelo efeito filer – criando novos pontos de nucleação heterogênea de C-S-H, refinando ainda mais a microestrutura – quanto pela sua alta reatividade pozolânica já em idades iniciais, sendo ambos fenômenos causadores do aumento da ocorrência da retração autógena em concretos com sílica ativa (WU, *et. al.*, 2017; ZHANG *et al.*, 2003).

A adição de escória de alto forno com alta área superficial específica – com finura pelo método Blaine de 599 m²/kg (YALÇINKAYA e YAZICI, 2017) – também gera refinamento dos poros dos CAD e CUAD e, conseqüentemente, atua como potencializador da retração autógena (TAZAWA *et al.*, 1997; YALÇINKAYA e YAZICI, 2017). A substituição de altos teores de cimento Portland por escória de alto forno também tende a aumentar a retração autógena, conforme observado por Lee *et al.* (2006); no entanto, quando comparado ao aumento gerado pela sílica ativa, a escória acarretou crescimentos menos significativos na retração autógena (GHAFARI *et al.*, 2016).

Estudos que avaliaram a substituição de cimento por metacaulim observaram reduções tanto na retração por secagem quanto na retração autógena (GLEIZE *et al.*, 2007), podendo ser justificada pelo menor teor de cimento presente na composição (BROOKS e JOHARI, 2001) e pela sua alta capacidade de absorção de água devido à sua microestrutura em camadas. Esta última característica justificaria a menor taxa de hidratação inicial do cimento, além de ter uma função de cura interna, reduzindo ainda mais a retração autógena (NORHASRI *et al.*, 2019). Em outra pesquisa, a substituição de dois terços de sílica ativa por metacaulim reduziu a retração autógena de um CUAD de 6 dias de idade em 50% (STAQUET e ESPION, 2004).

Características morfológicas das cinzas volantes, como a superfície lisa e baixa área superficial específica, auxiliam na liberação gradual de água aprisionada; desta forma reduzindo a rápida queda da umidade relativa interna da matriz cimentícia e os valores de retração autógena (YANG *et al.*, 2019). Liu, Ou e Mo (2017) ensaiaram CUADs de relação a/c 0,17 aos 7 dias de idade com substituições de cimento por cinza volante nos teores de 0, 15, 30 e 50%, e verificaram reduções da retração autógena de 1108, 788, 563 e 409 µm/m, respectivamente.

2.2.1.4 Aditivos Químicos modificadores de reologia

Os aditivos superplastificantes são agentes dispersantes de alta eficiência necessários para a obtenção de um nível de trabalhabilidade mínima, imprescindíveis para os CADs e CUADs em razão de suas baixas relações água/cimento. Ocorre que a adsorção de teores superiores de superplastificante tendem a retardar a hidratação do cimento, reduzindo também o desenvolvimento da retração autógena em baixas idades (YANG *et al.*, 2019). Li, Yu e Brouwers (2017) avaliaram os efeitos dos aditivos superplastificantes à base de policarboxilato na retração autógena de CUAD's e constataram que, após 72 horas, concretos com teores de aditivos de 0,4%, 0,8% e 1,2% apresentaram retrações de 1800, 1400 e 1100 $\mu\text{m}/\text{m}$, respectivamente. Tazawa e Miyazawa (1995) realizaram testes semelhantes sobre a influência da dosagem de superplastificantes na retração autógena de CADs. Medições com amostras contendo 0%, 0,2%; 0,4% e 0,6% de aditivo superplastificante foram realizadas até os 70 dias de idade, onde apresentaram resultados de 1680, 1577, 1464 e 1286 $\mu\text{m}/\text{m}$, respectivamente.

Os aditivos modificadores de viscosidade apresentam resultados semelhantes sobre a retração autógena de CADs e CUAD, uma vez que a adição de altos teores retarda o início da hidratação do cimento, reduzindo a retração em baixas idades (MENG *et al.*, 2018). No entanto, estes mesmos altos teores do aditivo modificador de viscosidade tendem a aumentar a incorporação de ar durante o processo de mistura, aumentando a porosidade e o raio médio dos poros no estado endurecido, prejudicando assim as propriedades mecânicas e a durabilidade superior dos CADs e CUADs. Portanto, tanto o aditivo superplastificante, quanto o aditivo modificador de viscosidade, apesar de potencialmente reduzirem a retração autógena em CADs e CUADs principalmente nas idades iniciais não devem ser utilizados com este intuito, uma vez que prejudicariam a tempo de pega do concreto ou ainda propriedades mecânicas e de durabilidade (CIOBANU *et al.*, 2013).

2.2.1.5 Fibras

Ao serem introduzidas em CADs e CUADs, as fibras restringem as deformações geradas pela retração que fissurariam a matriz cimentícia, principalmente em baixas idades. Este efeito advém da transferência parcial da tensão de retração da matriz para a fibra, por meio da criação de pontes de transferências de tensões, inibindo assim a criação/propagação de fissuras. Este novo comportamento de transferência de tensão e absorção de energia ocorre em função da aderência da matriz cimentícia nas fibras, o que confere ao concreto em estado endurecido um comportamento pseudo-dúctil, graças a propriedades mecânicas superiores

como o módulo de elasticidade e tenacidade das fibras (FIGUEIREDO, 2011). Dentre os diversos fatores que podem influenciar a eficiência das fibras na redução da retração autógena de matrizes cimentícias pode-se destacar os seguintes: tipo de fibra, tamanho e geometria, fator de forma (λ), teor adotado, método de dispersão, sentido de orientação e módulo de elasticidade (YANG *et al.*, 2019).

Dentre os diversos tipos de fibras, a mais adotada na composição de CADs e CUADs é a microfibras de aço por possuírem alta resistência à tração (MARVILLA *et al.*, 2021). O estudo realizado por Roberti *et al.* (2021) avaliou a influência do teor de microfibras de aço na retração autógena de CADs e CUADs de relação a/c 0,30 e 0,20, respectivamente. Entre os CADs foi observada a redução de 387 $\mu\text{m/m}$ para 345 $\mu\text{m/m}$ (diferença de 11%) na retração autógena após a adição de 1,5% de microfibras de aço; enquanto que nos CUADs a adição do mesmo teor de fibras resultou na redução de 576 $\mu\text{m/m}$ para 451 $\mu\text{m/m}$, representando uma redução de 22% na retração autógena. A influência da concentração das microfibras na mitigação da retração autógena de CADs e CUADs também foi observada por outros autores, conforme a compilação de resultados apresentada na Tabela 2. Esta redução está relacionada com a maior distribuição das microfibras de aço na matriz cimentícia, compensando em maior medida a tensão interna gerada pela retração autógena do concreto (QASIM, 2018).

Tabela 2: Influência do teor de microfibras de aço na mitigação da retração autógena

| Autores | Duração do ensaio (dias) | Relação a/agl | Cimento/Sílica ativa (kg/m ³) | Aditivo Químico | | Microfibras de aço (%) | Retração autógena ($\mu\text{m/m}$) | Redução percentual (%) |
|---------------------------|--------------------------|---------------|---|-----------------|-----|------------------------|---------------------------------------|------------------------|
| | | | | Base Química | (%) | | | |
| Fang <i>et al.</i> (2020) | 180 | 0,18 | 790/210 | Policarboxilato | 6 | 0 | 730 | - |
| | | | 790/210 | | 6 | 2 | 587 | 19,6 |
| Wu, Shi e Khayat (2019) | 3 | 0,18 | 863/216 | Policarboxilato | 4,3 | 0 | 1328 | - |
| | | | 863/216 | | 6,5 | 1 | 1066 | 19,8 |
| | | | 863/216 | | 8,6 | 2 | 726 | 45 |
| | | | 863/216 | | 9,7 | 3 | 625 | 53 |
| Zhang, Liu e Wang (2019) | 17 | 0,18 | 620/114 | Policarboxilato | 4,9 | 0 | 928 | - |
| | | | 620/114 | | 4,9 | 1 | 745 | 19,8 |
| | | | 620/114 | | 4,9 | 1,5 | 661 | 29 |
| | | | 620/114 | | 4,9 | 2,5 | 573 | 38 |
| Quasim (2018) | 28 | 0,35 | 450/45 | Policarboxilato | 2 | 0 | 165 | - |
| | | | 450/45 | | 2 | 1 | 130 | 21,2 |
| | | | 450/45 | | 2 | 2 | 116 | 30 |
| | | 0,20 | 900/225 | Policarboxilato | 6,3 | 0 | 508 | - |
| | | | 900/225 | | 6,3 | 1 | 381 | 25 |
| 900/225 | 6,3 | 2 | 279 | 45 | | | | |

A influência de diferentes formatos de fibras sobre a retração autógena de CUADs também foi avaliada por Wu, Shi e Khayat (2019) ao comparar concretos com relação a/agl 0,18 com 2% de teor de fibras dos tipos reta, corrugada e com ancoragem nas extremidades; as retrações verificadas foram, respectivamente, 730, 635 e 560 $\mu\text{m}/\text{m}$. Os autores concluíram que o uso de fibras corrugadas e com ancoragem nas extremidades apresentam melhorias na força de ligação matriz-fibra, contribuindo diretamente na obtenção de menores retrações autógenas.

Por fim, Fang *et al.* (2020) estudaram o efeito de fibras com diferentes fatores de forma (λ) – relação entre o comprimento longitudinal da fibra e o diâmetro da sua seção transversal. Os autores testaram fibras com ancoragem nas extremidades de três configurações distintas: 35/0,75 ($\lambda = 45$), 36/0,55 ($\lambda = 65$) e 60/0,75 ($\lambda = 80$) – i.e. comprimento/diâmetro (fator de forma). Em todos os teores volumétricos testados (1,5; 2,0 e 2,5% de fibra), as fibras com maior fator de forma obtiveram as maiores reduções da retração autógena dos CUADs. Diante dos resultados, os autores concluíram que a tensão de retração aplicada pela matriz cimentícia sobre a fibra ocorre predominantemente no seu sentido longitudinal, sendo, portanto, o comprimento mais relevante do que o diâmetro da seção da fibra. Ainda assim, o fator de forma demonstra possuir menor influência do que o volume e o formato das fibras sobre a redução da retração autógena (FANG *et al.*, 2020).

2.2.2 Métodos de mitigação da retração autógena

2.2.2.1 Controle da cinética da hidratação do cimento

O controle da hidratação do cimento pode se dar através de diferentes soluções, sendo uma delas a substituição parcial de cimento e/ou sílica ativa por MCSs que apresentem efeitos benéficos na redução da retração autógena (*i.e.* cinza volante, cinza da casca de arroz, metacaulim). Este método tende a restringir a taxa de hidratação inicial do cimento, reduzindo o processo de autodessecação decorrente da retração química ocorrente em CADs e CUADs (YANG *et al.*, 2019). No entanto, deve-se avaliar se propriedades físico-químicas dos MCS podem gerar melhorias na microestrutura do compósito cimentício – como, a formação de novos pontos de nucleação para hidratação do cimento, refinamento da estrutura porosa ou ainda maior reatividade pozolânica em baixas idades – a ponto de assim potencializar a ocorrência da retração autógena (TAZAWA *et al.*, 2007; YALÇINKAYA e YAZICI, 2017).

Como visto anteriormente, o aumento dos teores de aditivos superplastificantes e modificadores de viscosidade também retardam a taxa de hidratação do cimento e,

consequentemente, o fluxo de calor em baixas idades, reduzindo assim a tensão capilar induzida pela autodessecação (GUO, SUN e YANG, 2011; MENG *et al.*, 2017).

Por fim, outro método de controle da hidratação em baixas idades se dá por meio da redução do calor de hidratação através da substituição de parte da água por gelo. Xie *et al.* (2018) realizou estudo experimental no qual substituiu 50% da água no estado líquido por gelo em CUAD de relação *a/c* 0,15. Os autores obtiveram uma redução de 22% na ocorrência da retração autógena frente à amostra referência por meio desta técnica. No entanto, também foi verificado um aumento na porosidade total da microestrutura e um decréscimo de 50% no grau de hidratação, resultando em resistências à compressão 7% inferiores quando comparados à amostra referência aos 28 dias de idade.

2.2.2.2 *Adição de restrições na microestrutura interna*

Outro método adotado para mitigar os efeitos da retração autógena é a adição de restrições na microestrutura interna do compósito cimentício. Isto pode se dar pelo aumento do volume de agregados na composição (MENG, 2018) ou pelo aumento do diâmetro máximo dos agregados (SHEN *et al.*, 2018; YOO *et al.*, 2016). Ambos tendem a reduzir o volume de pasta de cimento, logo reduzindo a retração autógena (MA *et al.*, 2004); no entanto, esta técnica pode gerar prejuízos nas propriedades mecânicas do concreto, conforme verificado por Li, Yu e Brouwers (2018) que após aumentar o tamanho de partícula máxima do agregado de 3 para 16 mm registrou reduções de 10 e 15% nas resistências à compressão e à tração, respectivamente.

Maior eficiência na tarefa de mitigar a ocorrência da retração autógena é demonstrada por meio da adição de microfibras de aço à composição de CADs e CUADs. Além de melhorar a ductilidade e a resistência à tração dos concretos, também restringe o início e a propagação de fissurações, que no caso de CADs e CUADs, podem se originar do fenômeno da retração autógena. A efetividade das fibras nesta tarefa dependerá de fatores como o seu tipo, volume adicionado, geometria e fator de forma (DU *et al.*, 2021). No entanto, teores muito altos de fibras (adições acima de 3% sobre a fração volumétrica da mistura) e índices de trabalhabilidade inferiores podem gerar aglomerados que prejudicam a eficiência ou até mesmo exercerão efeitos adversos sobre a retração autógena (YANG *et al.*, 2019).

2.2.2.3 *Introdução de forças internas para compensar a tensão induzida pela retração*

Para compensar as tensões internas de autodessecação que resultam na retração autógena, pode-se fazer uso de aditivos/adições com usos específicos para este fim. No contexto

de materiais cimentícios, agentes expansivos são materiais que, em contato com água, sofrem uma expansão volumétrica macroscópica devido geração de grandes quantidades de cristais de etringita e/ou portlandita. Estes produtos induzem tensões expansivas que contrabalanceiam a tensão interna de retração, reduzindo assim a retração autógena de CADs e CUADs (YANG *et al.*, 2019).

O sulfoaluminato de cálcio é um tipo de agente expensor que consome grande quantidade de água em função da grande produção de etringita (YOO *et al.*, 2014), reduzindo a trabalhabilidade no estado fresco além de aumentar os valores de retração autógena em maiores idades (MO *et al.*, 2010). Além disso, a etringita é termicamente instável em temperaturas elevadas, decompondo-se ao atingir temperaturas de cura acima de 70° C (YAN e QIN, 2001), o que ocorre usualmente durante a cura de CADs e CUADs. Outros agentes expansores como o óxido de cálcio (CaO) e o óxido de magnésio (MgO) necessitam de menores quantidades de água para gerar cristais de portlandita, um produto termicamente mais estável que a etringita (HIGUCHI *et al.*, 2014). No entanto, os agentes expansivos à base de CaO tendem a reagir de forma rápida em baixa idades, enquanto que os à base de MgO geram seus resultados de expansão de forma mais lenta, em idades avançadas (YANG *et al.*, 2019).

Alguns desafios se apresentam para a melhor eficácia dos agentes expansivos, como a dificuldade na obtenção de uma distribuição uniforme na matriz cimentícia podendo dar origem a áreas com altas concentrações de cristais de etringita e portlandita. A sincronia do tempo da atuação dos agentes expansivos nos momentos de maiores tensões internas de autodessecação também pode ser problemática (YANG *et al.*, 2019). Para solucionar esta questão, Li, Cheng e Mo (2020) confeccionaram CUADs no qual adicionaram uma hibridização de óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO) permitindo a ativação dos agentes expansivos tanto em baixas e altas idades. Teores de 5% e 8% da hibridização dos referidos agentes expansivos sobre o peso do material cimentante obtiveram reduções de retração autógena de 34% e 38%, respectivamente, frente à amostra referência. Entretanto, apenas a amostra com teor de 8% de agentes expansivos apresentou significativas quedas no seu índice de trabalhabilidade e de resistência à compressão – 8 e 7%, respectivamente – frente à amostra referência.

O aditivo redutor de retração (ARR) é um tipo de aditivo químico que induz uma força interna repulsiva entre as partículas – uma vez que o possui uma cabeça hidrofílica (polar) e uma cauda hidrofóbica (apolar) – reduzindo assim a pressão capilar e, conseqüentemente, a tensão interfacial na solução dos poros de CADs e CUADs (ZHAN e HE, 2019). Além desta função, o ARR também realizara a manutenção de altos níveis de umidade relativa interna,

reduzindo a autodessecação (BENTZ *et al.*, 2001), e reduziria a alcalinidade da solução porosa, retardando assim a hidratação do cimento e a ocorrência da retração autógena (RAJABIPOUR *et al.*, 2008).

Xie *et al.* (2018) avaliaram a adição do ARR em CUAD de relação a/c 0,15 e 1000kg/m³ de material aglomerante (entre cimento e sílica ativa). Foram testados teores de 1%, 2% e 3% de aditivos para os quais foram observadas quedas na retração autógena de 36%, 55% e 70%, respectivamente, aos 90 dias de idade. No entanto, as resistências à compressão destes CUADs também apresentaram quedas acentuadas de 13%, 18,5%, 21,5% frente à composição de referência, respectivamente. O mesmo tipo de comportamento foi observado por Anshuang *et al.* (2017) em CUADs de relação a/c 0,2 e teores de ARR de 0,5%, 1% e 2% - obtendo reduções na retração autógena de 37%, 40%, 44% e de resistências a compressão de 10%, 14% e 17%, respectivamente. Este comportamento negativo pode ser atribuído à redução da alcalinidade da solução porosa, assim retardando a dissolução do C₃S (ZUO *et al.*, 2017).

2.2.2.4 Redução da autodessecação por meio do aumento da umidade relativa interna

Outra técnica de mitigação da retração autógena passa por aumentar a umidade relativa interna da matriz cimentícia através da introdução de componentes com alta capacidade de absorção de água para que realizem a cura interna gradual do CAD e CUAD. Dentre estes possíveis mitigadores da retração podem ser destacados os polímeros superabsorventes (SOLIMAN e NEHDI, 2011), agregados porosos pré-saturados (MA, LIU e XIU, 2019), cinza da casca de arroz (LIU, OU e MO, 2017), e fibras celulósicas (FERRARA *et al.*, 2015). A capacidade destes materiais de promover a redução da retração autógena é altamente dependente da sua estrutura físico-química, tamanho das partículas, teor máximo de saturação, teor de dosagem e a umidade relativa interna mínima abaixo do qual o componente iniciará a cura interna gradual da matriz cimentícia (YANG *et al.*, 2019).

2.3 RESÍDUO DE POLIMENTO DE PORCELANATO (RPP)

O porcelanato é um produto cerâmico de qualidade superior em função de controles de qualidade diferenciados e processos industriais mais rigorosos – com temperaturas de sinterização chegando aos 1200°C e propriedade de absorção de água menor ou igual a 0,5% (NBR ISO 13006:2020). Em função destes diferenciais, é um produto que possui maior resistência à impactos e menor porosidade quando comparado com as peças cerâmicas comuns (LOPES *et al.*, 2018). Segundo relatório da ANFACER (2021), foram produzidos em 2020

cerca de 840 milhões de metros quadrados de produtos cerâmicos, sendo que estudo anterior estimou que 68% do volume total corresponderia à produção do produto porcelanato (CABRAL JR. *et al.*, 2010). Trata-se, portanto, de um produto de forte apelo comercial frente à qualidade técnica apresentada.

Entretanto, a fase de acabamento do porcelanato prevê um processo de polimento no qual é aplicado um tratamento superficial abrasivo para a obtenção de características como alta impermeabilização, brilho superficial e uniformidade dimensional à todas peças. Este procedimento de polimento da peça de porcelanato faz uso de unidades polidoras que utilizam materiais abrasivos a base de magnésio, carbetto de silício e/ou diamante industrial (PUREZA, 2004). Desta forma, as unidades polidoras aplicam altas rotações com velocidades controladas na presença de água para reduzir o atrito entre polidor e peça de porcelanato. Ao final do procedimento, a dispersão de água e RPP são direcionadas para um tanque de decantação. A partir deste, a água é reaproveitada para outros processos e o resíduo sólido é retirado na forma de lodo. Este subproduto é colocado em um filtro-prensa de modo a formar um resíduo sólido e é posteriormente depositado em terrenos a céu aberto a fim de secarem ao ar. Ao final da secagem, o RPP é retirado por empresa de disposição de resíduos sólidos, gerando custos à empresa cerâmica (ARAÚJO, 2016; MATOS, 2019).

Deste procedimento, estima-se que retirada de 1 mm de espessura da peça de porcelanato, resulta na produção de cerca de 250 g de resíduo por m² de porcelanato produzido (KUMMER *et al.*, 2007; CABRAL JR. *et al.*, 2010). Matos (2019) reporta que duas grandes empresas do ramo cerâmico localizadas nos municípios de Tijucas e Criciúma, no estado de Santa Catarina, gerariam cerca de 4000 toneladas de RPP, mensalmente. Trata-se, portanto, de um problema ambiental, uma vez que sem destinação apropriada, o simples aterramento deste resíduo não inerte pode degradar águas subterrâneas e prejudicar a fertilidade do solo (SILVA *et al.* 2016).

Diante deste cenário, onde o RPP ainda não encontrou uma economia circular de grande escala viável dentro de sua própria indústria. Cresce o interesse da indústria cimenteira na reutilização deste resíduo como substituição parcial do clínquer. Pesquisas nacionais e internacionais vêm avaliando a eficiência deste resíduo como MCS, em função do seu já demonstrado potencial pozolânico e por ser o subproduto de uma cadeia produtiva confiável, de larga escala e com baixo custo de reaproveitamento.

2.3.1 Características Físico-Químicas do RPP

O RPP é constituído por uma mistura do material polido das peças de porcelanato em conjunto com o material abrasivo utilizado no processo e que é retirado na água na lavagem. Esta mistura que constitui o RPP é quimicamente formada por fases predominantes de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) em percentuais usuais entre 60% e 80% e 10% a 25%, respectivamente. Encontra-se também no RPP, em concentrações inferiores, óxido de magnésio (MgO) proveniente do material abrasivo utilizado durante o polimento (SANTOS, 2019). Na Tabela 3 a seguir, são apresentados os percentuais dos principais componentes químicos do RPP avaliados por diferentes pesquisadores por meio do ensaio de fluorescência de raios-X:

Tabela 3: Componentes químicos do RPP obtidos por meio de FRX de distintos autores

| Autores | SiO_2 (%) | Al_2O_3 (%) | MgO_2 (%) | Na_2O (%) | CaO (%) | K_2O (%) | Fe_2O_3 (%) | Perda ao Fogo (%) |
|-----------------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|------------------------------|----------------|--------------------------|--------------------------------|----------------------|
| STEINER (2015)* | 66,40 | 21,00 | 1,20 | 2,70 | 2,60 | 2,30 | 1,70 | 0,40 |
| KANAAN <i>et al.</i> (2017) | 69,40 | 18,20 | 3,53 | 3,19 | 1,24 | 1,89 | 0,83 | -*** |
| EL-DIEB <i>et al.</i> (2018) | 68,60 | 17,00 | 2,50 | -*** | 1,70 | -*** | 0,80 | 1,78 |
| SANTOS (2019) | 64,32 | 19,275 | 10,32 | 0,00 | 1,70 | 2,80 | 0,94 | -*** |
| MOHIT <i>et al.</i> (2019) | 64,04 | 21,00 | 0,88 | 2,07 | 1,29 | 2,35 | 6,51 | 1,10 |
| MATOS (2019)** | 67,23 e 68,56 | 19,93 e 19,14 | 2,22 e 2,91 | 1,76 e 1,23 | 2,33 e 2,02 | 1,97 e 1,38 | 1,27 e 2,96 | 2,25 e 2,83 |
| BETIOLI <i>et al.</i> (2020)** | 74,00 e 72,64 | 16,34 e 17,27 | -*** | -*** | 1,33 e 1,22 | 2,53 e 2,47 | 1,45 e 1,14 | 3,15 e 3,92 |
| LI, LIU e YOU (2020a) | 61,72 | 22,31 | 0,65 | 0,96 | 6,67 | 1,55 | 1,24 | 3,96 |
| LI, ZHUO e KWAN (2020) | 66,34 | 20,11 | 0,95 | 0,49 | 1,29 | 0,61 | 0,63 | -*** |
| Mínimo | 61,72 | 17,00 | 0,65 | 0,00 | 1,24 | 0,61 | 0,63 | 0,40 |
| Máximo | 74,00 | 22,31 | 10,32 | 3,19 | 6,67 | 2,80 | 6,51 | 3,96 |

* Valores médios obtidos a partir de 8 amostras coletadas em semanas distintas;

**Valores obtidos de duas amostras distintas;

*** Dado não apresentado;

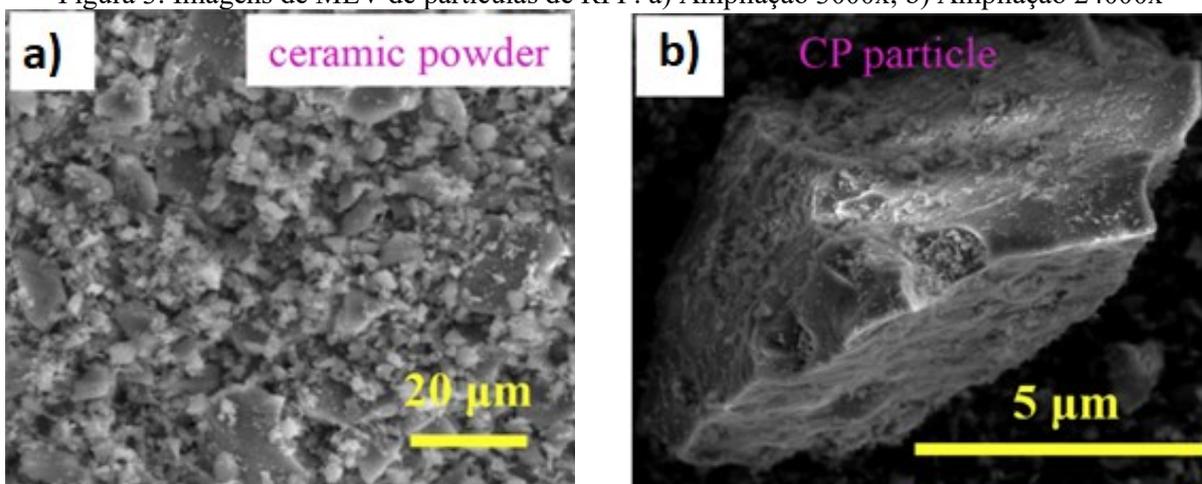
A normativa da ABNT NBR 12653:2014 estabelece os pré-requisitos químicos e físicos para que um material seja classificado como material pozolânico. A norma exige que o material possua teores de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ superiores à 70%; quantidades de SO_3 e Na_2O

menor ou igual a 4% e 1,5%, respectivamente; e percentual máximo de perda ao fogo de 10%. Todas as amostras de RPP analisadas pelos autores da Tabela 3 por meio do ensaio de FRX atenderam às exigências normativas da NBR com exceção de Steiner (2015), Kanaan *et al.* (2017), Mohit *et al.* (2019) e Matos (2020) que apresentaram teores de Na₂O superiores ao 1,5% estabelecido. No entanto, Matos (2019) aborda esta questão ao lembrar que o limite superior estabelecido pela norma diz respeito aos álcalis disponíveis, sendo que os teores obtidos pelo ensaio FRX indicam os teores de álcalis totais. Diante disto, o RPP atenderia as exigências químicas apresentadas pela norma brasileira para ser definido como material pozolânico.

Em relação ao índice de atividade pozolânica (IAP), a ABNT NBR 12653:2014 e a ABNT NBR 5752:2014 definem uma composição de argamassa referência e outro com 25% de substituição do cimento pelo material pozolânico. Após 28 dias de cura, a amostra contendo o material pozolânico deve apresentar resistência à compressão superior a 90% da resistência da amostra padrão. Seguindo esta metodologia, Matos (2019) realizou o teste de atividade pozolânica para RPPs de duas origens distintas e um filler calcário em dois regimes de cura distintos – imersão em tanque de cura a 24°C e a 38°C. O autor justificou a realização do teste sob este segundo regime de cura para simular a atividade pozolânica em idades mais avançadas. Matos (2019) verificou que as amostras curadas a 24°C apresentaram resultados de IAP de 88,2% e 91,4% para RPPs de origens distintas. Já os IAP das amostras submetidas a imersão em tanque de cura com temperatura de 38°C atingiram percentuais de 100,1% e 101,2%, ou seja, projetaram resultados superiores àqueles obtidos pela amostra referência, indicando alto potencial pozolânico para idades avançadas. Quanto às amostras contendo filler calcário, a mudança do regime de cura não gerou impacto no IAP – 74,8 e 73,9 %, respectivamente para temperaturas de cura de 24 e 38° C – demonstrando a inexpressiva pozolanicidade do material, além de reforçar a hipótese da atividade pozolânica tardia do RPP.

Por fim, a ABNT NBR 12653 (2014) determina que o material pozolânico deve apresentar no máximo 20% de material retido na peneira 45µm. O RPP também atende este requisito uma vez que do processo de polimento do porcelanato resultam partículas de dimensões semelhantes às do cimento. Os RPPs adotados por Li *et al.* (2020) e Kanaan *et al.* (2017) atenderam tais requisitos de caracterização física com D₅₀ de 11,75 µm e 11,5 µm, respectivamente. Outra característica marcante dos RPP's é a irregularidade e angularidade de suas partículas (BETIOLI *et al.*, 2020), conforme visualizado nas imagens de microscópios eletrônicos de varredura (MEV) obtidas por Li, Liu e You (2020a) na Figura 2.

Figura 3: Imagens de MEV de partículas de RPP: a) Ampliação 3000x; b) Ampliação 24000x



Fonte: Li, Liu e You (2020a)

Em análises de DRX, o RPP ficou caracterizado principalmente pela presença de fases cristalinas de quartzo e mulita (LI, LIU e YOU, 2020a; SANTOS, 2019). Por meio do mesmo ensaio de Matos (2019) avaliou o grau de cristalinidade de duas amostras distintas de RPP e verificou uma tendência, uma vez que ambas apresentaram altos graus de cristalinidade (86,5% e 88,4%). Esta configuração das fases cristalinas do RPP indica uma reatividade pozolânica inferior para baixas idades.

2.3.2 Influência do uso do RPP como MCS em compósitos cimentícios

O RPP introduz diversos benefícios ao ser adotado como MCS em compósitos cimentícios. Neste subitem serão apresentadas conclusões de pesquisas realizadas acerca da influência da substituição parcial do cimento por RPP nas propriedades em estado fresco e endurecido do concreto.

Em relação às características no estado fresco, a irregularidade e angularidade das partículas do RPP, em conjunto com os altos valores de área superficial (MATOS, 2019; LI, LIU e YOU, 2020; BETIOLI *et al.*, 2020), resultam em índices de consistência usualmente inferiores às amostras referências. Para relações *a/c* usuais de CADs e CUADs (normalmente abaixo de 0,40), a adoção de teores elevados de RPP acarreta um aumento na demanda de água, exigindo maiores teores de aditivo superplastificante para obtenção de consistências semelhantes. Isto foi observado por Li, Zhuo e Kwan (2020) que, ao testarem concretos de relação *a/c* 0,25 e teores de RPP de 0%, 5%, 10%, 15% e 20%, tiveram de acrescentar percentuais crescentes de aditivo superplastificante – 1,20%, 1,60%, 2,25%, 2,60% e 2,85%, respectivamente.

Ao mesmo tempo que pode afetar o índice de consistência da argamassa e o slump do concreto (BHARGAV e KANSAL, 2020), o RPP apresenta melhorias no que concerne à manutenção da trabalhabilidade por um período maior de tempo, como verificado por El-Dieb *et al.* (2018) e Kanaan *et al.* (2017). Isto ocorre em função da menor quantidade de cimento disponível, da reduzida reatividade pozolânica do RPP em baixas idades, e da absorção de água na superfície do referido resíduo, mantendo uma maior quantidade de água disponível na matriz por maior período de tempo (EL-DIEB *et al.*, 2018).

Em se tratando da influência do RPP sobre as propriedades mecânicas de compósitos cimentícios, os resultados são altamente dependentes do percentual de resíduo adicionado como MCS e do tempo de cura prévio ao ensaio. Isto porque, conforme observado por Kannan *et al.* (2017), nas primeiras idades de cura, o RPP apresenta como efeito primário o efeito filer – conferindo uma maior compacidade da matriz através do efeito filer e induzindo a ocorrência da nucleação heterogênea - e posteriormente, como material pozolânico de baixa reatividade, beneficiando resistências à compressão axial principalmente em idades acima de 28 dias. A fim de comprovarem o efeito pozolânico do RPP, os referidos autores realizaram o teste de Frattini com teores de substituição de 20% e 40% em concretos com idades de 8 e 28 dias. Obtiveram a confirmação da reatividade pozolânica em ambas idades, mas a maior reatividade foi obtida no teste aos 28 dias e com a composição com 40% de substituição de cimento por RPP.

Sendo assim, Mohit e Sharifi (2019) realizaram testes em argamassas de relações a/ag 0,48 em teores de 0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25%, testando-os em idades de 7, 14, 28 e 56 dias. Os autores observaram que teores de 5% e 10% de RPP apresentaram valores de resistência à compressão superiores à amostra referência já em baixas idades; já valores de substituição de cimento por RPP superiores a 10% tenderam a apresentar resistências à compressão gradualmente inferiores de resistência à compressão; o que foi sendo compensado em idades avançadas com a ocorrência da reação pozolânica.

O mesmo comportamento foi verificado por Li, Liu e You (2020a) que confeccionou argamassas com substituições de até 40% da massa do cimento por RPP e avaliou a resistência a compressão em idades avançadas de até 180 dias de cura. Ao analisar o comportamento mecânico aos 90 dias de cura, a argamassa contendo 30% de substituição de RPP já apresentou resistência à compressão 1% superior à amostra referência; já aos 180 dias, a amostra com 40% de substituição de RPP obteve resistência à compressão de apenas 2,4% abaixo da obtida pela amostra referência, representando um aumento de 67% sobre a resistência à compressão obtida pela mesma argamassa aos 28 dias de cura (de 47,1 MPa para 78,6 MPa).

Estudos realizados em concreto verificaram resultados semelhantes, no qual fatores como menores proporções de substituição de cimento por RPP e maiores tempos de cura resultaram em resistências à compressão superiores (AGIL e KUMAR, 2018; EL-DIEB *et al.*, 2018; KANAAN *et al.*, 2017; RANI, 2017; ALY *et al.*, 2019).

Diversos estudos quantificaram, por meio de tratamento de dados de ensaios de termogravimetria, a gradual redução dos teores de hidróxido de cálcio (CH) em pastas de cimento (JACOBY e PELISSER, 2015) e em argamassas (LI, LIU e YOU, 2020a; STEINER e PELISSER, 2015) contendo teores crescentes de substituição de cimento por RPP. Além disso, análises termogravimétricas realizadas em diferentes tempos de cura demonstram que o pico da reatividade pozolânica do RPP ocorre tardiamente entre os 56 e 90 dias de cura (LI, LIU e YOU, 2020a).

Steiner e Pelisser (2015) também avaliaram a cinética de hidratação de argamassas com substituições de 0%, 10, 20 e 25% de cimento por RPP por meio de ensaio de calorimetria de condução. Foram, então, observados aumentos gradativos do fluxo de calor máximo liberado nas hidratações quando normalizados por grama de cimento, sendo 4,25 mW/g, 4,37 mW/g, 4,47 mW/g e 4,48 mW/g, respectivamente. A partir destes resultados, os autores concluíram que existe uma tendência do RPP criar, desde as primeiras horas até o momento da pega, novos pontos de hidratação por meio da nucleação heterogênea em função das suas dimensões reduzidas frente ao cimento. Este comportamento, também observado por Matos *et al.* (2018), permite uma melhor dispersão da matriz de cimento hidratada aumentando a disponibilidade de pontos de nucleação para formação de C-S-H.

Li, Liu e You (2020b) avaliaram influência do RPP sobre propriedades de transporte da microestrutura porosa e observaram que argamassas com substituições de 20 e 40% de cimento por RPP apresentaram reduções de 40 e 60%, respectivamente, na absorção de água. Isto indicaria que a argamassa teria menor grau de permeabilidade através dos poros capilares, aumentando a capacidade de resistir a absorção de água (ALSAIF, 2021). Além disso, Kanaan (2017) observou uma redução considerável e gradual do volume de poros permeáveis ao testar em argamassas de duas classes de resistência distintas (C25 e C75, respectivamente com 25 e 75MPa) teores crescentes de RPP até 40%. A classe de resistência C25 passou de 10% para 6% de poros permeáveis (uma redução de 35%), enquanto que C75 reduziu de 6% para 4% - representando uma redução de 40% no volume de poros permeáveis. Esta redução poderia ser explicada pela capacidade do RPP de atuar como microfíler com alta superfície específica, que

acabou por reduzir o volume de poros permeáveis ao melhorar o empacotamento das partículas (EL-DIEB, 2018).

Estudos também abordaram a influência do RPP sobre diferentes aspectos da durabilidade do concreto, sendo verificadas melhorias nos resultados de resistência à penetrabilidade de íons cloreto (LI, ZHUO e KWAN *et al.*, 2020; EL-DIEB *et al.*, 2018; KANAAN, 2017), de resistividade elétrica (EL-DIEB *et al.*, 2018; KANAAN, 2017), de resistência à corrosão por sulfato (CHENG *et al.*, 2014), de resistência por ataque ácido (MOHIT *et al.*, 2021) e em relação à reação álcali-sílica (MOHIT e SHARIFI, 2019). Em contrapartida, a carbonatação em compósitos cimentícios tende a aumentar a partir da adição de maiores teores de RPP adicionados, em função da redução de CH pela reação pozolânica (CHENG *et al.*, 2014).

2.3.3 Influência do RPP sobre a retração autógena

Conforme observado anteriormente, poucas são as pesquisas que se debruçaram acerca da influência do RPP sobre a retração autógena de argamassas e concretos. Estas serão apresentadas de forma mais detida para traçarmos um perfil sobre a influência do resíduo nesta propriedade tão importante de CADs e CUADs.

Steiner *et al.* (2015) avaliaram a retração autógena de pastas de cimento de relação a/c 0,35 para teores de substituição de RPP de 0%, 25% e 40% em relação à massa de cimento. Foi necessária a adição de 1% de aditivo superplastificante para melhorar a consistência e facilitar a aplicação das pastas nos moldes do ensaio. Durante 23 dias, foram ensaiadas 3 composições de cada teor para obtenção de um valor médio, com novas medições sendo realizadas a cada 50 segundos. A partir da introdução do RPP nas amostras, os resultados dos ensaios apresentaram diferenças intensas na retração autógena das pastas de cimento: com a substituição de 25% de cimento por RPP, houve uma redução de 603 $\mu\text{m}/\text{m}$ para 381,5 $\mu\text{m}/\text{m}$ – queda de 37% da retração autógena; já a introdução de 40% de RPP apresentou retração autógena de 108 $\mu\text{m}/\text{m}$, uma redução de 82% frente à amostra referência. Os autores justificaram a redução da retração autógena da pasta de cimento em primeiro lugar, em função da lenta reatividade da reação pozolânica do RPP, que permite que suas partículas adsorvam quantidades significativas de água em suas superfícies para posterior liberação durante a hidratação do cimento e, conseqüentemente, reduzir a autodessecação e pressão capilar nos poros; o segundo ponto observado pelos autores foi que o efeito de diluição do cimento reduziu a quantidade de reações

exotérmicas de hidratação do cimento em baixas idades, e conseqüentemente, aumentou a quantidade de água livre presente nos poros capilares.

Ferrara *et al.* (2019) apresentaram estudo sobre o efeito da distribuição do tamanho das partículas de pó cerâmico aplicado como MCS na retração autógena de argamassas. Foram adotadas duas amostras de pó cerâmico com distribuições granulométricas bem distintas – RPP1 possuindo distribuição de partículas muito fina ($D_{90} < 10\mu\text{m}$) e RPP2 com granulometria mais semelhante aos diâmetros de uma areia fina ($D_{90} > 100\mu\text{m}$). Foram confeccionadas argamassas com relações a/c 0,30 com substituições volumétricas de 10% e 30% de cimento por pó cerâmico. As retrações autógenas/totais e de resistências à compressão obtidos aos 28 dias das referidas argamassas estão apresentados na Tabela 4 a seguir:

Tabela 4: Retrações Autógena e Total obtidas por Ferrara *et al.* (2019)

| | Retração autógena ($\mu\text{m/m}$) | Retração Total ($\mu\text{m/m}$) | Resistência à compressão 28d (MPa) | Porosidade Total (%) | Raio médio dos poros (μm) |
|-------------------|---------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|----------------------|--|
| 0,3Ref. | 1638 | 2769 | 95,9 | 21,59 | 0,0184 |
| 0,3RPP1-10 | 1204 | 2491 | 91,3 | 20,88 | 0,0143 |
| 0,3RPP1-30 | 1123 | 2217 | 92,8 | 23,26 | 0,0109 |
| 0,3RPP2-10 | 1196 | 2485 | 87,5 | - | - |
| 0,3RPP2-30 | 875 | 1911 | 66,2 | - | - |

Fonte: Adaptado de Ferrara (2019)

Dos resultados obtidos por Ferrara *et al.* (2019) pode-se extrair diversas conclusões a respeito do tema aqui investigado: a) independentemente do pó cerâmico adotado como MCS, as retrações autógenas e totais das argamassas apresentaram tendências de baixa; b) Dentre as composições testadas, as amostras contendo o pó cerâmico com maior tamanho de partículas - RPP2 - apresentaram menores valores de retração autógena/total e de resistência à compressão – com destaque para a composição 0,3RPP2-30; c) em contrapartida, destaca-se que o RPP1 – com dimensões de partículas menores que o próprio cimento – também não influenciou negativamente a retração autógena das argamassas, mesmo sendo observadas, por meio do ensaio MIP, reduções significativa do raio médio dos poros em pastas de cimento similares. Sabe-se que a redução do raio médio dos poros geralmente é acompanhada do aumento da pressão capilar na microestrutura porosa; no entanto, isto não se traduziu em aumento da retração autógena nas argamassas contendo RPP1. Portanto, cabe investigar se a relação entre redução do tamanho médio dos poros e o aumento da retração autógena seria infalível apenas para composições de CUAD como verificado por Ghafari *et al.* (2016) e não para CADs.

Em seguida são apresentadas outras duas pesquisas que não analisaram a influência do RPP diretamente na retração autógena, mas sim frente à retração por secagem – que é a

deformação por retração associada à perda de umidade para o ambiente. Entretanto, os resultados obtidos por El-Dieb e Kanaan (2018) e Li, Zhuo e Zhu (2019a) não devem ser desprezados, uma vez que também indicam uma tendência de redução da retração total com o aumento gradual do teor de RPP no compósito cimentício.

El-Dieb e Kanaan (2018) avaliaram a retração por secagem de concretos de três classes de resistências distintas (C25, C50 e C75, com respectivamente, 25, 50 e 75 MPa) com até 40% de substituição de cimento por RPP. Após 120 dias, todas as classes de resistência verificaram uma semelhante tendência de redução da retração por secagem a partir do gradual incremento da substituição de cimento por RPP; sendo que para 40% de substituição de cimento por RPP, C25, C50 e C75 obtiveram, respectivamente, reduções de 29%, 28,5% e 28% sobre a retração por secagem das composições referências. Os autores justificaram os bons resultados do RPP na mitigação da retração por secagem em função das alterações que a finura do RPP (atuando como microfíler) e a reação pozolânica em idades avançadas geraram na microestrutura dos concretos, refinando e reduzindo a conectividade dos poros e, portanto, restringindo o transporte de umidade no seu interior.

Li, Zhuo e Zhu (2019a) também realizam uma pesquisa para verificar a influência do RPP na retração por secagem em argamassas ao realizar a substituição volumétrica de cimento por RPP em diferentes relações a/c – 0,40; 0,45; 0,50 e 0,55 – e para teores distintos de RPP – 0; 5; 10; 15 e 20%. Os resultados obtidos para tensão de retração por secagem e as respectivas reduções são apresentadas na Tabela 5 apresentada a seguir.

Percebe-se nos resultados obtidos por Li, Zhuo e Zhu (2019) a influência que a introdução do RPP nas argamassas promoveu na redução da retração por secagem em todos os teores de relação a/c. A mitigação da retração por secagem foi superior na relação a/c 0,40 – onde a substituição volumétrica de 20% de cimento por RPP representou a redução de 41,34%. Além disto, é coerente que a ocorrência da retração por secagem atinja seus maiores valores em argamassas com altas relações a/c, uma vez estas apresentam microestruturas com alta conectividade de poros, resultando em maior perda de água ao ambiente. Isto também é condizente com o estabelecido por Liu, Shi e Wu (2019a) que verificaram que compósitos cimentícios com maiores relações a/c tendem a apresentar retrações por secagem superiores e retrações autógenas inferiores; sendo que o inverso também se aplicaria para concretos com relações a/c baixas. Por exemplo, CUADs com relação a/c inferiores a 0,25, a retração autógena corresponderia à 80% da retração total do concreto (LIU, FARZADNIA e SHI, 2019b).

Tabela 5: Resultados de ensaio de retração por secagem em argamassas contendo RPP

| Relação a/c | Volume de RPP (%) | Consumo de cimento (kg/m ³) | Retração por secagem (µm/m) | Redução (%) |
|-------------|-------------------|---|-----------------------------|-------------|
| 0,4 | 0 | 825 | 1590 | - |
| | 5 | 758 | 1414 | 11% |
| | 10 | 688 | 1345 | 15% |
| | 15 | 620 | 1192 | 25% |
| | 20 | 551 | 932 | 41% |
| 0,45 | 0 | 775 | 1750 | - |
| | 5 | 709 | 1620 | 7% |
| | 10 | 645 | 1445 | 17% |
| | 15 | 582 | 1276 | 27% |
| | 20 | 516 | 1170 | 33% |
| 0,5 | 0 | 731 | 1850 | - |
| | 5 | 667 | 1712 | 7% |
| | 10 | 607 | 1582 | 14% |
| | 15 | 546 | 1467 | 21% |
| | 20 | 485 | 1315 | 29% |
| 0,55 | 0 | 684 | 2071 | - |
| | 5 | 629 | 1827 | 12% |
| | 10 | 571 | 1720 | 17% |
| | 15 | 513 | 1521 | 27% |
| | 20 | 456 | 1422 | 31% |

Fonte: Adaptado de Li *et al.* (2019)

A partir dos resultados dos ensaios realizados por Steiner *et al.* (2015), El-Dieb *et al.* (2018) e Li, Zhuo e Zhu (2019), a adoção do RPP como MCS em compósitos cimentícios tende a reduzir tanto a retração por secagem quanto a retração autógena. Sendo assim, o presente estudo buscará avaliar a influência do resíduo de polimento de porcelanato aliado a microfibras de aço na retração autógena de CADs e CUADs. Trata-se de um tema pouco explorado, no qual se buscará confeccionar concretos de alto e ultra-alto desempenho com teores reduzidos de cimento para obtenção de compósitos ecoeficientes.

2.4 SÍNTESE DA REVISÃO DE LITERATURA

Os CADs e os CUADs são compósitos cimentícios complexos que extrapolam em muito o conceito clássico da simples mistura de cimento, água e agregados; a adição de componentes como fibras, compostos minerais e aditivos químicos auxiliam a conferir propriedades diferenciadas, realçando diversas características benéficas às propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos. Em contrapartida, as baixas relações a/c e a adição de adições minerais com características química e morfológicas desfavoráveis (alta finura e reatividade pozzolânica, como sílica ativa), resultam em maior refinamento e da pressão capilar na microestrutura porosa. Isto, somados à menor quantidade de água livre presente nos poros, acabam por gerar tensões internas de autodessecação que resultam na retração autógena.

Para compensar a alta retração autógena ocorrida nos CADs e CUADs, foram apresentados diferentes métodos de mitigação da retração autógena, dentre os quais pode-se destacar:

- Controle da cinética da hidratação: substituição parcial de cimento/sílica ativa por outros MCS que contribuam em menor medida com crescimento do fluxo de calor e calores acumulados gerados pelo efeito filer e pozzolânico em idades iniciais;
- Adição de restrições físicas na microestrutura interna: aumento do teor e da dimensão máxima dos agregados ou a introdução de microfibras na matriz;
- Introdução de forças internas para compensar a tensão induzida pela retração: introdução de agentes expansivos para que, em contato com a água, contrabalancem as tensões internas de retração, assim como o aditivo redutor de retração (ARR) que induz uma força interna repulsiva entre as partículas;
- Redução da autodessecação por meio do aumento da umidade relativa interna da matriz cimentícia: adoção de componentes com grandes capacidades de absorção de água, facilitando a ocorrência da cura gradual dos concretos como polímeros superabsorventes, agregados porosos pré-saturados, cinza da casca de arroz e fibras celulósicas.

Estes métodos podem ser aplicados tanto isoladamente quanto em conjunto para obtenção de melhores resultados na mitigação da retração autógena; no entanto, faz-se necessária a verificação da eficiência em conjunto destes métodos e sobre possíveis prejuízos sobre outras propriedades no estado fresco e endurecido dos CADs e CUADs.

As microfibras de aço são introduzidas em concretos para conferir um comportamento pseudo-dúctil ao concreto. Diversos estudos já avaliaram e confirmaram a influência que diferentes concentrações de microfibras geram sobre mitigação da retração autógena de CADs e CUADs. Além disto, fatores como dimensão, geometria e fatores de forma também apresentam influência sobre o referido fenômeno.

O RPP é um material particulado de alta finura (diâmetro médio na ordem de $10\mu\text{m}$) gerado em grande escala durante o processo de produção de peças de porcelanato. Apresenta alto teor de SiO_2 e Al_2O_3 (em grande parte, reativos), sendo que distintas pesquisas verificaram a contribuição do resíduo no efeito fíler, aumentando a ocorrência da nucleação heterogênea em baixas idades e também o cumprimento dos requisitos da ABNT NBR 12653 (2014) classificando o material como pozolânico. Esta reatividade, em específico, também foi verificada por meio de ensaios de DRX, TG, testes de Frattini e de caracterização mecânica em diversas idades. Estudos observaram a influência positiva do referido material na redução da retração autógena de pastas, argamassas e concretos de diferentes relações a/agl.

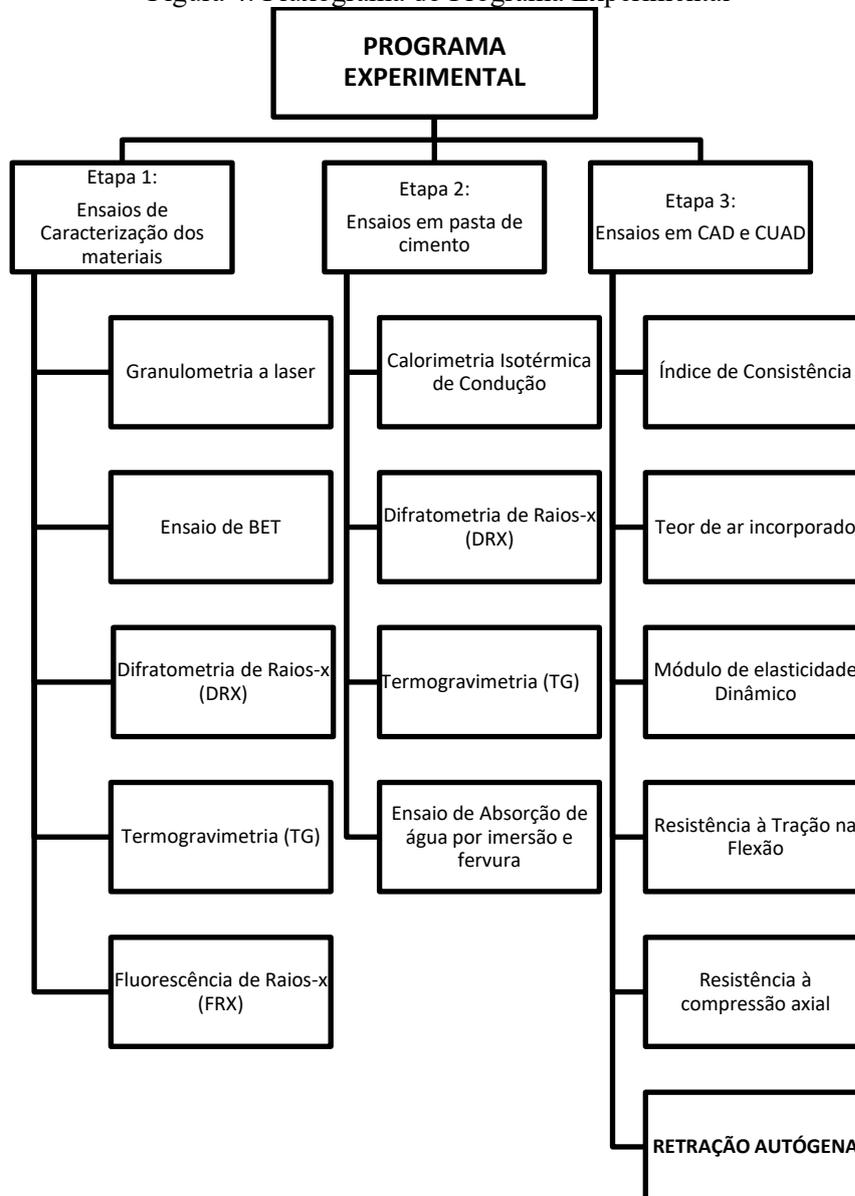
Sendo assim, o presente trabalho focará na introdução do RPP como MSC e das microfibras de aço como mecanismos de mitigação da retração autógena de CADs e CUADs. A análise conjunta destes dois mecanismos de mitigação da retração autógena é inédita e importante para verificar o potencial de cada técnica para concretos de alto desempenho com diferentes relações a/agl.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 MÉTODOS

O programa experimental do presente trabalho foi dividido em 3 etapas, que consistem em: 1) ensaios de caracterização físico-químico do RPP e do CP V-ARI; 2) ensaios em pastas de cimento avaliando a cinética de hidratação e a composição de pastas de cimento com diferentes teores de RPP; e, 3) ensaios em CAD e CUAD que permitam traçar a influência do RPP e das microfibras de aço sobre o estado fresco, endurecido e sobre a retração autógena dos concretos. A seguir, a Figura 3 apresenta um resumo dos ensaios executados em cada etapa do programa experimental:

Figura 4: Fluxograma do Programa Experimental



Fonte: Autor (2022)

3.2 ETAPA 1: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.2.1 Resíduo de Polimento de Porcelanato (RPP)

O RPP adotado neste trabalho foi coletado em pesquisa anterior (STEINER, BERNARDIN e PELISSER, 2015) em empresa localizada na região metropolitana de Criciúma, SC. A referida amostra de RPP é o resultado da mistura proporcional de 8 coletas de resíduo em semanas consecutivas; tal metodologia foi adotada para avaliar se a variação da linha de produção poderia representar diferença significativa na composição físico-química do resíduo. Cada lote amostral foi coletado úmido no pátio da empresa, passando então pelo processo de secagem em estufa sob temperatura de 60°C até a obtenção de constância de massa. Foi então destorroado manualmente e peneirado em peneira de abertura 0,15 mm (nº 100) para obtenção de uma melhor homogeneidade do material.

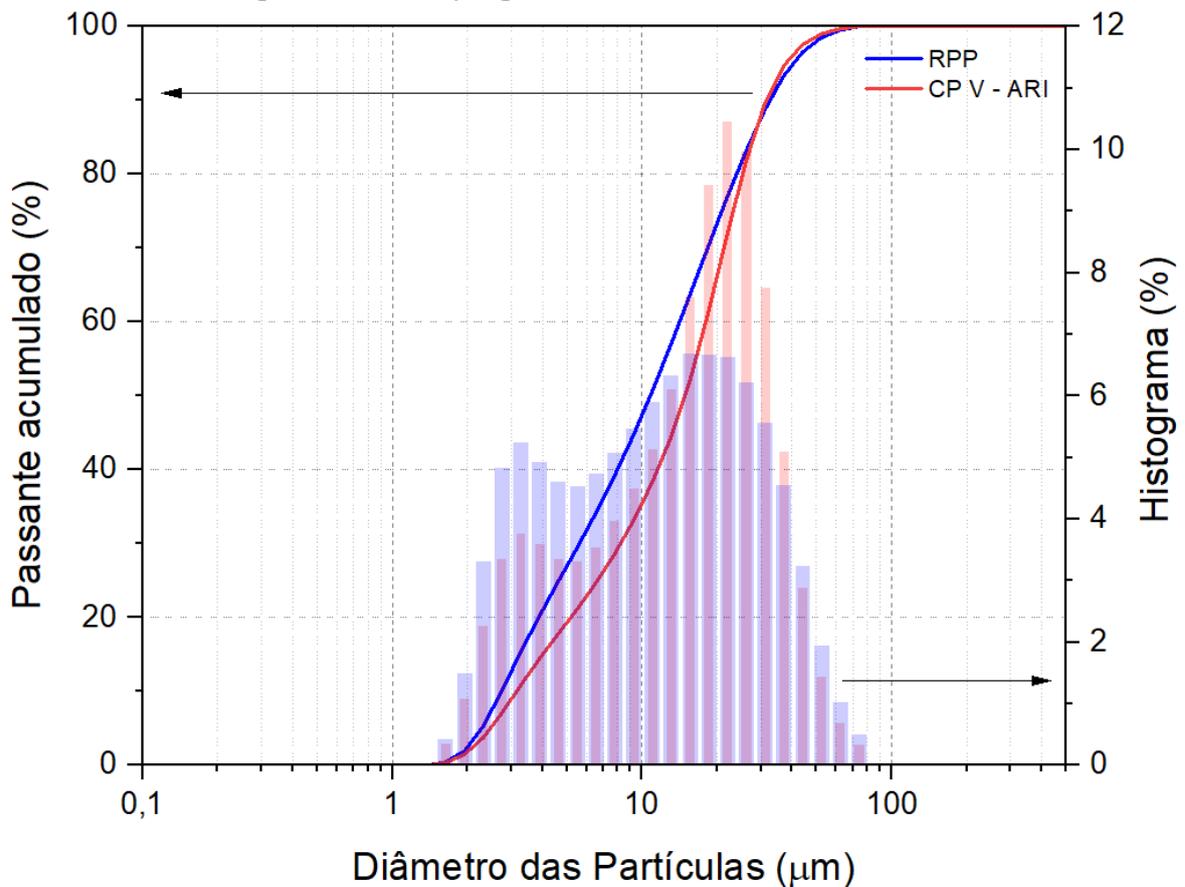
Figura 5: RPP após processos de secagem, destorroamento e peneiramento



Fonte: Autor (2022).

A caracterização física do RPP adotado neste estudo foi realizado por meio de ensaios de granulometria a laser por via seca, com o uso do Analisador de Tamanho de partículas Microtrac S3500 com faixa analítica de 0,2 – 1400 μm , além da determinação da área superficial específica e de porosimetria do resíduo pelo método BET por adsorção de nitrogênio, utilizando o equipamento NOVA 2200e (*Quantachrome Instruments*). Os resultados dos referidos ensaios estão expressos na Figura 5 e na Tabela 6. Importante ressaltar os diâmetros medianos (D50) e médio (Φ médio) obtidos pelo RPP – 10,82 μm e 13,67 μm , respectivamente – inferiores aos resultados do CP V – ARI. Além disto, o valor de D90 do resíduo - 32,53 μm – atende o requisito físico da ABNT NBR 12653:2014 e da ASTM C618 (2019) para classificação do RPP como material pozolânico.

Figura 6: Distribuição granulométrica do CP V – ARI e do RPP



Fonte: Autor (2022)

Tabela 6: Caracterização granulométrica, área superficial específica e porosidade do RPP e CPV-ARI

| | RPP | CPV – ARI |
|--|--------|-----------|
| D₁₀ (μm) | 2,74 | 3,15 |
| D₅₀ (μm) | 10,82 | 14,94 |
| D₉₀ (μm) | 32,53 | 31,51 |
| Φ médio (μm) | 13,67 | 15,49 |
| Massa Específica (g/cm³) | 2,48 | 3,10 |
| BET - Área Superficial Específica (m²/g) | 2,99 | 1,10 |
| Volume de Poros (cm³/g) | 0,0120 | 0,0039 |
| Porosidade total (%) | 2,98 | 1,21 |
| Diâmetro médio dos poros (nm) | 1,54 | 2,10 |

Fonte: Autor (2022)

A caracterização química do RPP adotado foi obtida por meio do ensaio de Fluorescência de Raios-X (FRX), realizados por um espectrômetro Rigaku modelo ZSX *Primus IV* equipado com tubo de Rh. Os resultados obtidos foram apresentados na Tabela 7, em porcentagem (%) de massa em base úmida:

Composições químicas do CPV – ARI e do RPP

| Óxidos analisados | RPP | CPV – ARI |
|-------------------------------------|-------|-----------|
| SiO ₂ | 66,64 | 19,78 |
| TiO ₂ | 0,69 | <LQ* |
| Al ₂ O ₃ | 20,36 | 4,27 |
| Fe ₂ O ₃ | 1,68 | 1,80 |
| MgO | 1,14 | 2,44 |
| CaO | 3,03 | 64,29 |
| Na ₂ O | 2,45 | 0,12 |
| K ₂ O | 2,17 | 0,91 |
| P ₂ O ₅ | <LQ* | <LQ* |
| SO ₃ | <LQ* | 2,19 |
| ZnO | 0,32 | <LQ* |
| ZrO ₂ + HfO ₂ | 0,67 | <LQ* |
| Perda ao fogo (1000°C) | 0,85 | 4,20 |

*LQ = Abaixo do Limite Detectável

Fonte: Autor (2023)

A partir dos resultados do ensaio de FRX, pôde-se verificar se o RPP adotado preencheria os requisitos químicos previstos nas normas NBR 12653 (2014) e ASTM C618 (2019) para classificar-se como um material pozolânico. Ao apresentar a soma de teores percentuais de SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ igual a 88,7%, superando o valor mínimo estabelecido de 70%. Os teores percentuais de SO₃ e de perda ao fogo também atenderam os requisitos normativos; entretanto, conforme já ocorrido nas pesquisas de Steiner (2015) e Matos (2020), o RPP apresentou concentração de Na₂O de 2,45%, o que superaria o limite normativo de 1,5%. Em contrapartida, considerando os teores usados em substituição ao cimento, em 10% e 20% de substituição, o teor de álcalis totais no ligante final fica dentro do exigido pela norma. Portanto, o RPP também preencheria os requisitos químicos normativos para ser denominado como material pozolânico.

As fases cristalinas do RPP foram identificadas por meio do ensaio de difratometria de raios-X (DRX), sendo utilizado um difratômetro Shimadzu XRD 6000, tubo de raios-X de cobre operando com radiação Cu K α ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$), tensão de 30 kV e corrente de 30 mA. O intervalo de 2theta avaliado foi de 5° a 70° em um passo de 0,02° 2theta – sendo a referida a configuração adotada para todos os ensaios de DRX realizados neste trabalho. Conforme observado na Figura 6, percebe-se a predominância da fase de Quartzo (SiO₂) no difratograma do RPP adotado neste trabalho.

Figura 7: Difratoograma do RPP

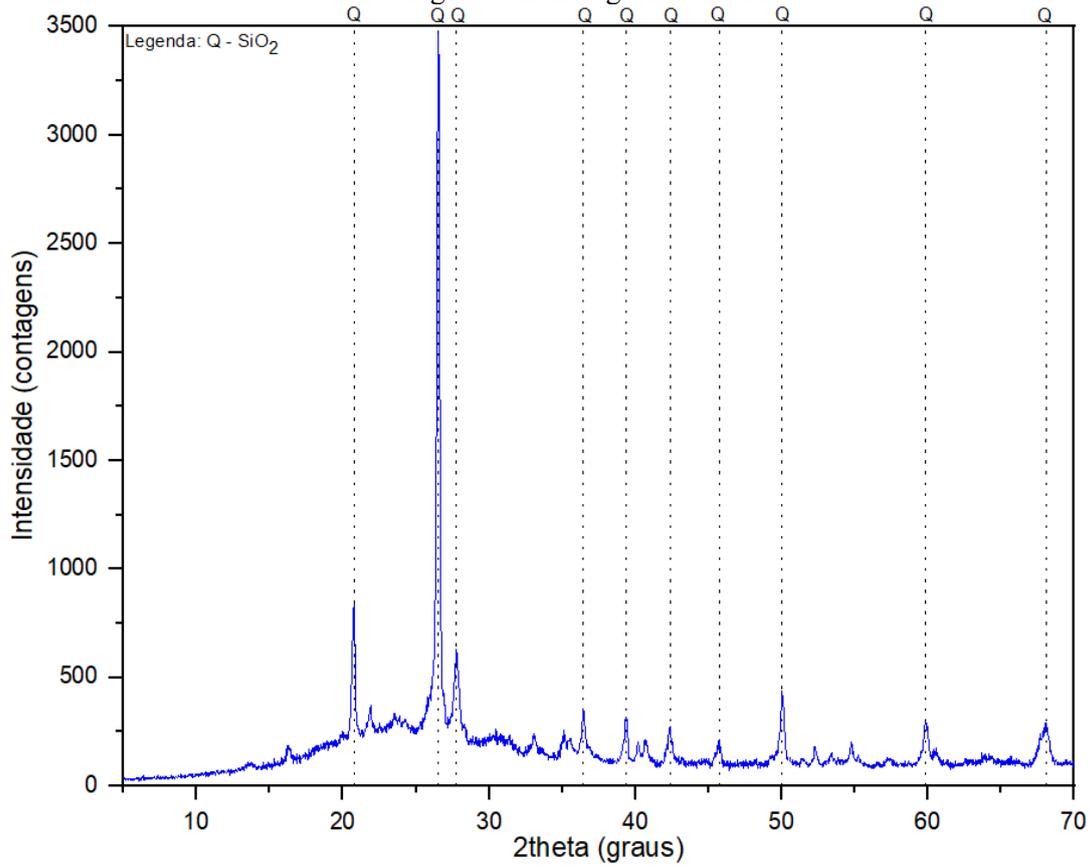
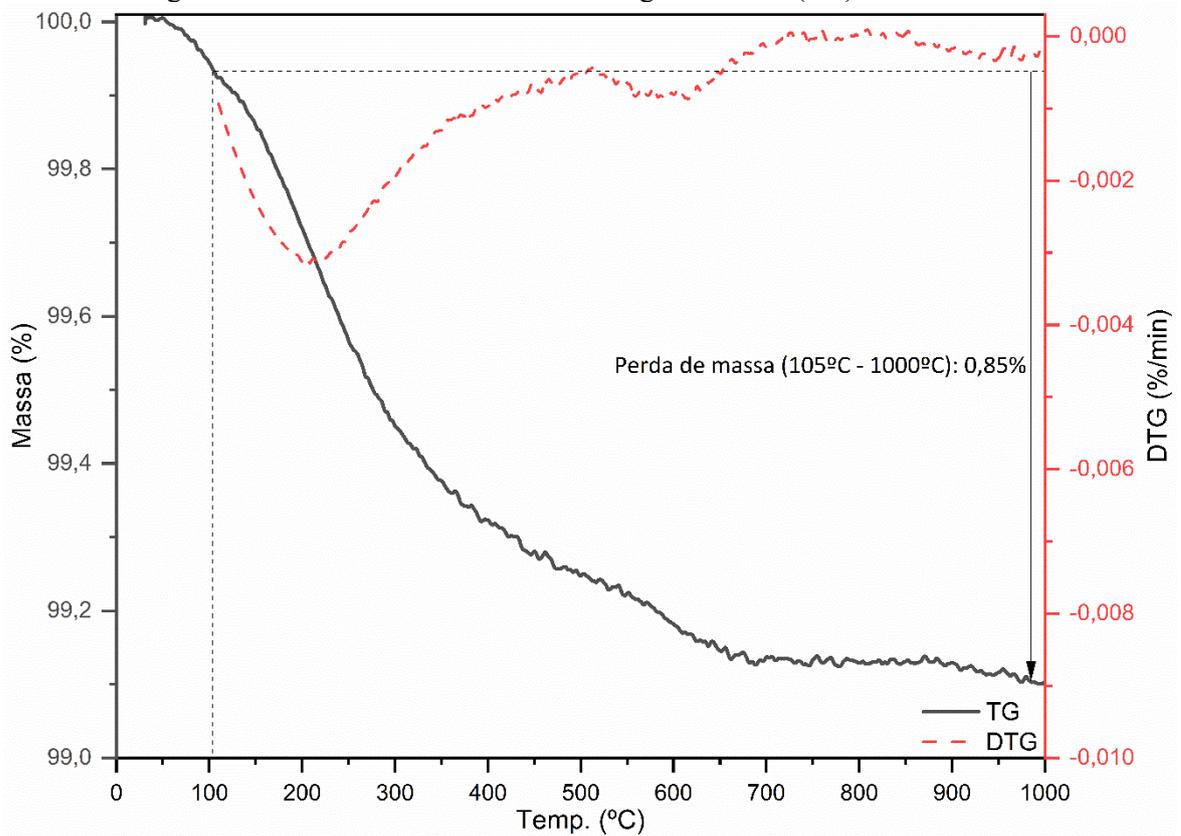


Figura 8: Perda de massa na análise termogravimétrica (TG) e DTG do RPP



Fonte: Autor (2023)

Por fim, o ensaio de termogravimetria (TG) e a análise da primeira derivada da TG (DTG) foram realizados em uma amostra de RPP por meio do analisador NETZSCH STA 449F3. Amostra de 22mg de RPP foi aquecida a uma taxa de 10° C/min até a temperatura de 1000°C com um fluxo de N₂ de 100 ml/min – sendo a mesma configuração adotada posteriormente na análise da amostra de CPV – ARI. O resultado deste ensaio para o RPP pode ser visualizado na Figura 7 anteriormente apresentada e demonstra um baixo teor percentual de perda de massa (0,85% sobre a massa total da amostra).

3.2.2 Cimento Portland

O Cimento Portland utilizado neste trabalho é o CP V – ARI, em função do seu reduzido teor de adições minerais – necessariamente inferior a 10% em massa, conforme prescrito pela ABNT NBR 16697:2018. A totalidade do cimento utilizado neste trabalho advém do mesmo lote de produção. As propriedades físicas e químicas do cimento, como massa específica aparente (ABNT NM 52), finura Blaine (ABNT NBR 5733) e início e fim de pega (ABNT NM 65) foram informados pelo fabricante e são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 7: Caracterização do CP V – ARI informada pelo fabricante

| Ensaio | ABNT NBR | Especificação | Unidade | Resultado |
|---|----------|---------------|-------------------|-----------|
| Massa Específica | 16605 | - | g/cm ³ | 3,10 |
| Blaine | 16697 | ≥300 | m ² /g | 0,43 |
| Retido #200 | 16697 | ≤6,0 | % | 0,09 |
| Início de Pega | NM 65 | ≥60 | Min | 180 |
| Fim de Pega | NM 65 | ≤600 | Min | 240 |
| Óxido de Magnésio (MgO) | 16697 | ≤6,5 | % | 3,16 |
| Trióxido de enxofre (SO₃) | 16697 | ≤4,5 | % | 2,81 |
| Perda ao Fogo | 16697 | ≤6,5 | % | 3,60 |
| Resíduo Insolúvel | 16697 | ≤3,5 | % | 0,65 |
| Resistência 1 dia | 7215 | ≥14 | MPa | 23,8 |
| Resistência 3 dias | 7215 | ≥24 | MPa | 37,9 |
| Resistência 7 dias | 7215 | ≥34 | MPa | 44,5 |
| Resistência 28 dias | - | - | MPa | 52,8 |

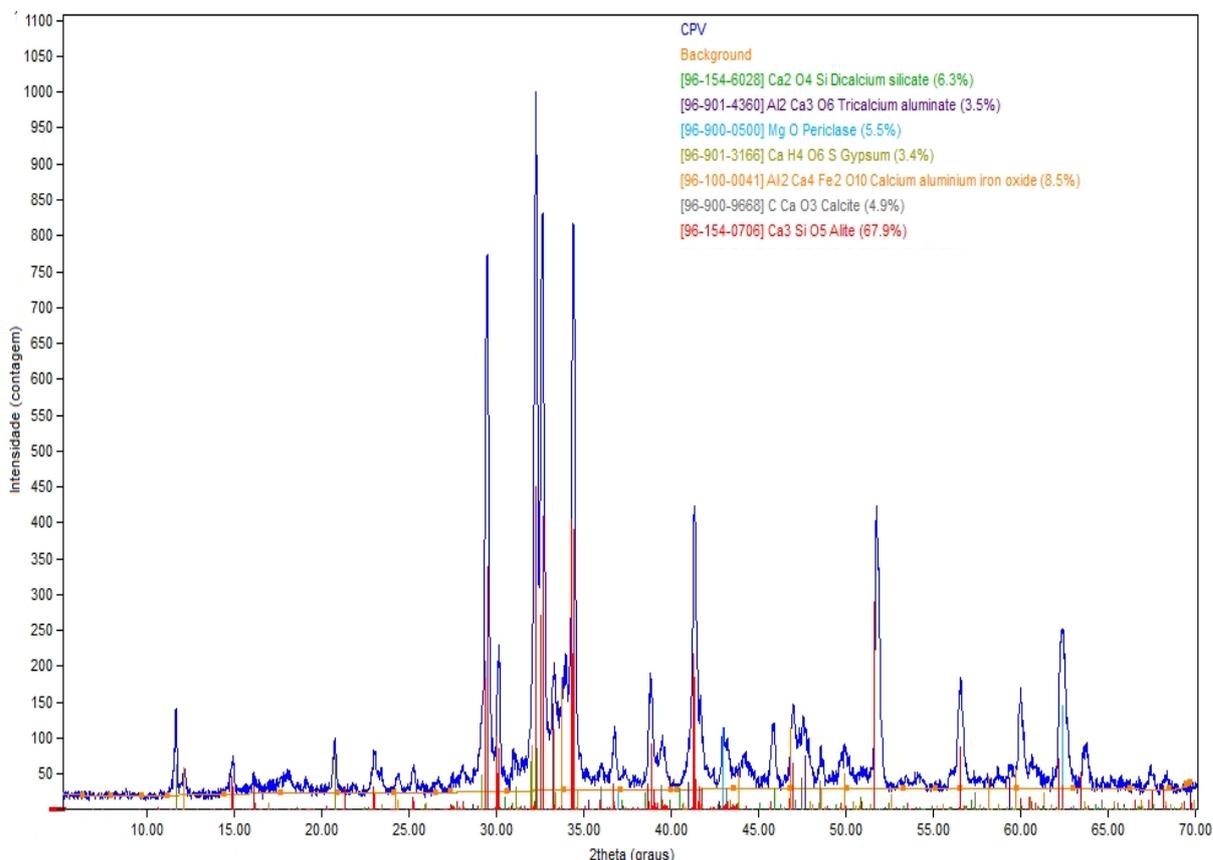
Fonte: Adaptado de Itambé (2021)

A distribuição física das partículas obtida no ensaio de granulometria a laser e características como a área superficial específica, porosidade total e tamanho médio dos poros obtidos no ensaio de BET pelo método de adsorção de nitrogênio, foram apresentadas na Figura

5 e Tabela 6. Já a análise das composições químicas do cimento obtidas por meio do ensaio de FRX estão descritas na Tabela 7.

A execução do ensaio de DRX com posterior tratamento dos resultados obtidos no software *Match!* 3.14, permitiu realização da quantificação das fases cristalinas do CPV – ARI pelo método de Rietveld, conforme apresentado a seguir na Figura 8.

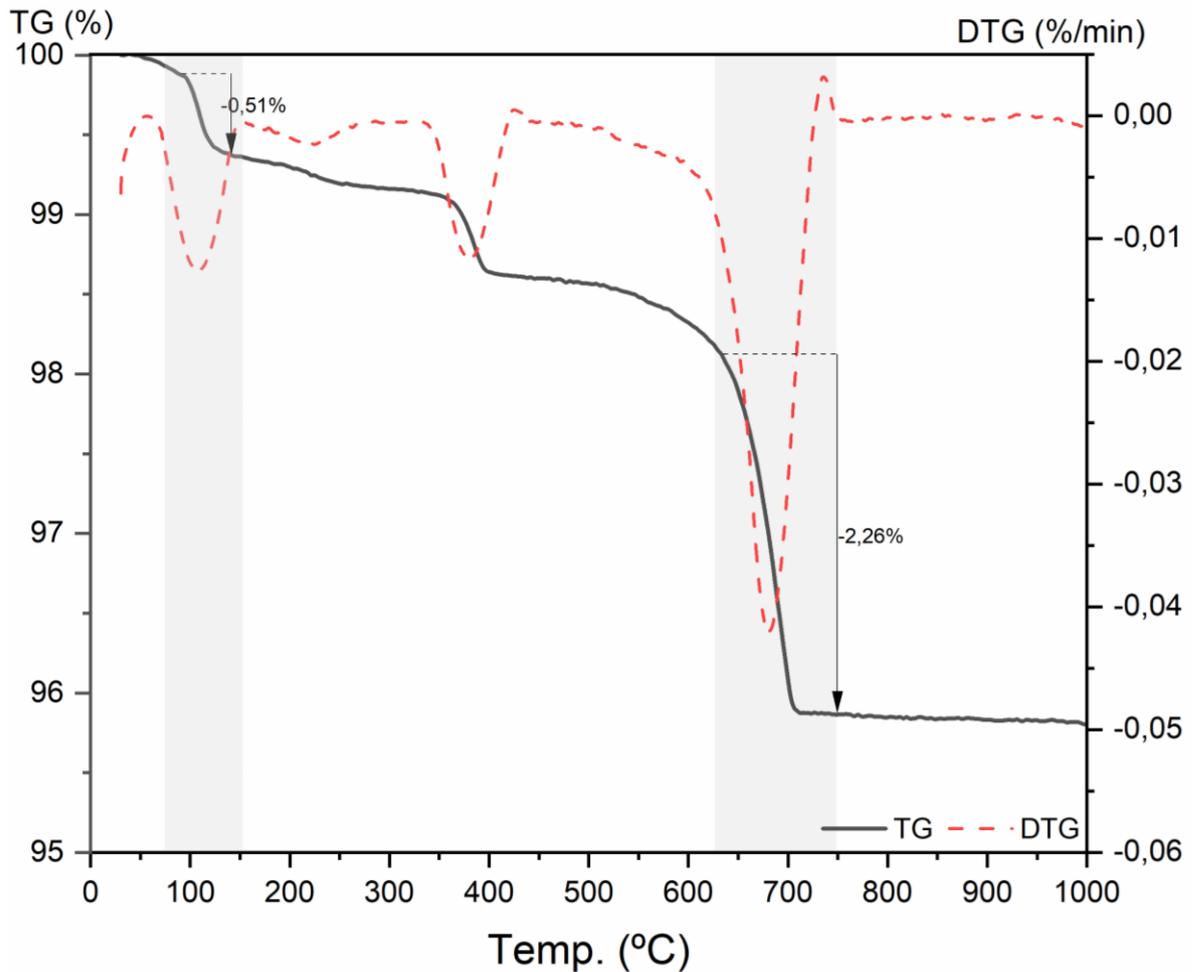
Figura 9: Difratograma do CP V – ARI



Fonte: Autor (2023)

Por fim, também foi realizado o ensaio de TG e DSC do CPV – ARI. Este tornou possível avaliar os teores de gipsita e de filer calcário (CaCO_3) da amostra de cimento ensaiada por meio das perdas de massa da amostra em diferentes faixas de temperatura. O resultado do ensaio está expresso na Figura 9:

Figura 10: Resultado da análise termogravimétrica do CPV-ARI



Fonte: Autor (2023)

Com a massa inicial de amostra e os percentuais de decomposição do sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e da calcita (CaCO_3), foi possível estimar – por meio de equações presentes na norma ASTM C1872 – os teores percentuais em massa de ambos compostos. Por meio das equações apresentadas na referida norma, o $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e o CaCO_3 obtiveram percentuais em massa de 3,18% e 5,14%, respectivamente, muito próximos, portanto, aos valores obtidos pela técnica de Rietveld. Além disto, a perda ao fogo observada durante o ensaio foi de 4,20%, abaixo do limite máximo de 6,5% exigido na ABNT NBR 16697:2018.

3.2.3 Microfibras de Aço

As microfibras de aço adotadas possuem geometria reta com dimensões de 13mm x 200 μm e fator de forma – relação entre comprimento e diâmetro da fibra – de 65. A microfibras é nominada como DRAMIX OL 13/.20 da fabricante BEKAERT, possuindo resistência à tração

nominal de 2.750 MPa e módulo de elasticidade de 200 GPa, conforme informado pelo fabricante.

Figura 11: Microfibra de aço DRAMIX OL 13/20



Fonte: Autor (2023)

3.2.4 Agregado miúdo

Como agregados miúdos foi adotada a areia normatizada fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) em três frações distintas, 30, 50 e 100, representando, respectivamente, as frações retidas nas peneiras 0,60 mm, 0,30 mm e 0,15 mm.

3.2.5 Aditivo Superplastificante

Foi utilizado um aditivo superplastificante à base de policarboxilato MC-PowerFlow 4001 da fabricante MC-Bauchemie para ajuste de consistência dos CADs e CUADs. Este aditivo possibilitará a introdução destes concretos nos moldes e no instrumento de medição do ensaio de retração sem ocorrência de falhas de moldagem. As características físico-químicas do aditivo superplastificante informadas pelo fabricante são apresentadas na Tabela 9 a seguir:

Tabela 8: Características físico-químicas do aditivo superplastificante

| Características | Resultado |
|---------------------------------------|-----------|
| Aspecto | Líquido |
| Cor | Marrom |
| Dosagem recomendada (%) | 0,2 a 5,0 |
| Massa específica (g/cm ³) | 1,12 |

3.3 ETAPA 2: ENSAIOS EM PASTA DE CIMENTO

A fim de enriquecer a investigação acerca do comportamento do RPP como material cimentício suplementar, foram confeccionadas composições de pastas de cimento semelhantes aos traços de CAD e CUADs da Etapa 3 deste estudo. As pastas de cimento foram misturadas em um misturador de eixo vertical de 750rpm durante um período de 2 minutos. As composições das pastas de cimento são apresentadas na Tabela 10 a seguir, onde o nome é dado pelo prefixo P (pasta), seguido da relação a/agl e do teor de RPP (sendo atribuído “Ref” à mistura sem o resíduo):

Tabela 9: Composições das pastas de cimento

| Composições | Cimento (g) | RPP (g) | Relação a/agl (em massa) | Aditivo (g) |
|------------------|-------------|---------|-----------------------------|-------------|
| P0,4 Ref. | 100 | 0 | 0,4 | 0 |
| P0,3 Ref. | 100 | 0 | 0,3 | 0,5 |
| P0,3R10 | 90 | 10 | 0,3 | 0,5 |
| P0,3R20 | 80 | 20 | 0,3 | 0,5 |
| P0,2 Ref. | 100 | 0 | 0,2 | 2,8 |
| P0,2R10 | 90 | 10 | 0,2 | 2,8 |
| P0,2R20 | 80 | 20 | 0,2 | 2,8 |

Fonte: Autor (2023)

As amostras de pastas de cimento foram curadas ao ar durante 28 dias quando cada uma delas foi manualmente moída em um almofariz e, em seguida, o material passante na peneira #200 foi imerso em álcool isopropílico por 72 horas para garantir a suspensão das reações de hidratação do cimento. Por fim, as amostras passaram por uma bomba de vácuo para retirada do excesso do líquido e foram secos em estufa sob temperatura de 40°C por 10 minutos. As amostras foram então acondicionadas em recipientes fechados e sem umidade até o momento da realização dos ensaios de DRX, TG e DSC.

Figura 12: Moagem e paralisação do processo de hidratação das pastas de cimento



Legenda: (a) amostra; (b) Moagem manual em almofariz; (c) Repouso por 72 horas em solução com álcool isopropílico; (d) Bomba de vácuo; (e) Estufa à 40°C até estabilização de massa; (f) Peneiramento da amostra em peneira de abertura #200; (g) Acondicionamento até ensaio.

Fonte: Autor (2023)

3.3.1 Calorimetria isotérmica

O ensaio de calorimetria isotérmica permitiu avaliar a cinética de hidratação do cimento em pastas de cimento com diferentes teores de substituição de RPP. Foram confeccionadas amostras com 6 g de pasta de cimento, sendo o ensaio iniciado após 10 minutos do início da mistura para homogeneidade do início da captura de dados entre as amostras. O equipamento adotado foi o calorífico *TAM Air* da marca *TA Instruments* (Figura 12) que possui um sistema de aquisição de dados que realiza medições a cada 40 segundos, com limite de detecção de $4\mu\text{W}$ e precisão de $\pm 20\mu\text{W}$. O ensaio foi realizado em sala climatizada sob temperatura constante de 23°C durante um período de 72 horas.

Figura 13: Calorífico TAM Air



Fonte: Autor (2022)

As leituras das curvas de fluxo de calor e de calor acumulado das amostras ao longo do ensaio auxiliaram a avaliação das diferenças nos processos de hidratação da pasta de cimento com diferentes relações a/agl e teores de RPP. Estes dados, em conjunto com as durações dos períodos de indução, período de aceleração do fluxo de calor e picos máximos de calor – metodologia de identificação adotada de Betioli *et al.* (2009); estes métodos auxiliaram a explicar os comportamentos da retração autógena de compósitos cimentícios em baixa idades a partir da introdução do RPP.

3.3.2 Difração de raios-X

Para a realização do ensaio DRX das pastas de cimento hidratadas foi utilizado o difratômetro Shimadzu XRD 6000, tubo de raios x de cobre operando com radiação Cu K α ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$), tensão de 30 kV e corrente de 30 mA. O intervalo de 2theta avaliado foi de 5° a 70° em um passo de 0,02° 2theta.

3.3.3 Termogravimetria e calorimetria exploratória diferencial

O ensaio de TG foi executado por meio de um analisador térmico SDT Q600 da TA *Instruments*. Amostras de aproximadamente 24 ± 2 mg de pasta de cimento hidratada foram aquecidas a uma taxa de $10^\circ \text{C}/\text{min}$ até a temperatura de 1100°C com um fluxo de N_2 de 100 ml/min. Com o auxílio da primeira diferencial da TG (DTG) foi possível calcular com precisão as faixas de temperatura nas quais ocorrem as reações químicas características de cada material aquecido.

No caso de pastas de cimento hidratadas, Collier (2016) realizou pesquisa bibliográfica sobre o tema e definiu três faixas de temperatura onde ocorrem as maiores perdas de massa deste composto, sendo elas entre: a) 40°C e 150°C ocorre a grande perda de água livre residual e da água quimicamente combinada (AQC) ao C-S-H e aluminatos; entretanto, perda de água combinada pode continuar a ocorrer em menor medida até a temperatura de 550°C ; b) 400 a 500°C , com o desprendimento da água do hidróxido de cálcio (CH); e c) 600 a 800°C em função da volatilização do anidrido carbônico da calcita (CaCO_3) e dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Vale salientar que estes intervalos podem variar ligeiramente em função de condições de ensaio, tais como a quantidade de amostra e a taxa de aquecimento (LOTHENBACH, *et al.*, 2016).

A fim de avaliar a intensidade da desidroxilação da portlandita (CH) no ensaio de TG, grande indicativo da ocorrência ou não de reações pozolânicas no sistema cimentício, e calcular os teores de calcita e água quimicamente combinada (AQC) das amostras de pasta de cimento são apresentadas as Equações (1) e (2) (LOTHENBACH, *et al.*, 2016), conforme apresentadas a seguir:

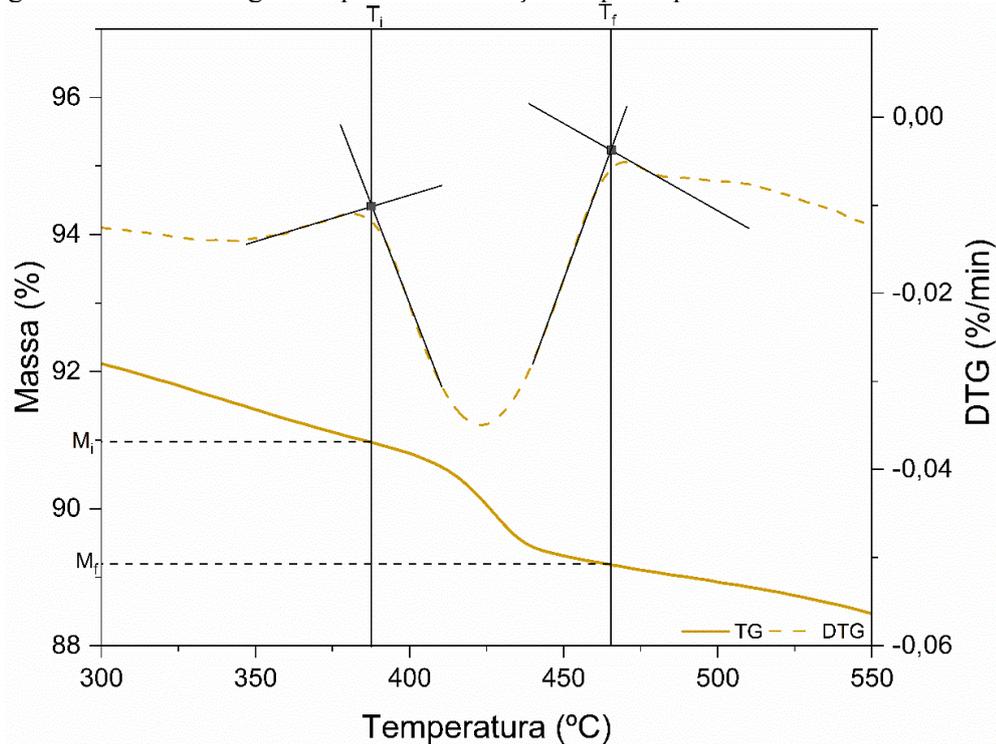
$$CH = \frac{pmCH}{m_{550}} \times \left(\frac{M_{CH}}{M_{H_2O}} \right) \times 100 = \frac{pmCH}{m_{550}} * \left(\frac{74}{18} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$AQC = \left(\frac{m_{105} - m_{550} - pmCH}{m_{550}} \right) * 100 \quad (2)$$

Onde:

- CH – é o percentual de hidróxido de cálcio da amostra;
- $pmCH$ – é a perda de massa de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, na faixa de temperatura definida pelo método tangencial (visualizado na Figura 13), em %;
- m_x – é a massa residual da amostra em temperatura $x^\circ \text{C}$, em %.
- $mm\text{Ca}(\text{OH})_2$ – é a massa molar do hidróxido de cálcio que equivale a 74g/mol;
- $mm\text{H}_2\text{O}$ – é a massa molar da água, que equivale a 18g/mol;
- AQC – é o percentual de água quimicamente combinada na amostra;

Figura 14: Método tangencial para determinação da perda percentual de massa de CH



3.3.4 Absorção de água por imersão

Foi realizado um ensaio de absorção de água por imersão das pastas de cimento - C0,3Ref., C0,3R10, C0,3R20, C0,2Ref., C0,2R10 e C0,2R20 – aos 28 dias de idade, conforme procedimento estabelecido na norma ASTM C642 (ASTM, 2021). A partir deste ensaio foram obtidas informações como o percentual de absorção de água e o volume de vazios permeáveis nas pastas de cimento. Para cada traço foram ensaiados 3 corpos de prova.

3.4 ETAPA 3: ENSAIOS EM CAD E CUAD

3.4.1 Dosagens dos materiais

Foram confeccionados concretos de duas classes de resistência para avaliar de forma integral os efeitos do RPP na retração autógena de compósitos cimentícios. Os traços unitários adotados para obtenção de concretos com resistências características de CAD (C80 – 80MPa) e de CUAD (C120 – 120MPa) foram selecionados a partir da pesquisa de Roberti (2019). Com os traços definidos procedeu-se à confecção de misturas com teores de substituição de 10% e 20% de cimento por RPP, em massa, e com adições de microfibras de aço de 1% e 2% sobre o

volume total, conforme composições apresentadas na Tabela 11 a seguir – com o prefixo C (concreto), seguido da relação a/agl, teor de RPP e microfibras de aço de cada composição.

Tabela 10: Traços unitários dos concretos (em massa) a serem ensaiados

| Composição | Cimento | RPP | Areia | Relação a/agl | Aditivo (%) | Fibra (% v_{total}) |
|-------------------|----------------|------------|--------------|----------------------|--------------------|------------------------------------|
| C0,2 Ref. | 1 | 0 | 1,25 | 0,2 | 2,8 | 0 |
| C0,2R10F0 | 0,9 | 0,1 | 1,25 | 0,2 | 2,8 | 0 |
| C0,2R20F0 | 0,8 | 0,2 | 1,25 | 0,2 | 2,8 | 0 |
| C0,2R0F1 | 1 | 0 | 1,25 | 0,2 | 2,8 | 1 |
| C0,2R20F1 | 0,8 | 0,2 | 1,25 | 0,2 | 2,8 | 1 |
| C0,2R0F2 | 1 | 0 | 1,25 | 0,2 | 2,8 | 2 |
| C0,2R20F2 | 0,8 | 0,2 | 1,25 | 0,2 | 2,8 | 2 |
| C0,3 Ref. | 1 | 0 | 1,25 | 0,3 | 0,5 | 0 |
| C0,3R10F0 | 0,9 | 0,1 | 1,25 | 0,3 | 0,5 | 0 |
| C0,3R20F0 | 0,8 | 0,2 | 1,25 | 0,3 | 0,5 | 0 |
| C0,3R0F2 | 1 | 0 | 1,25 | 0,3 | 0,5 | 2 |
| C0,3R20F2 | 0,8 | 0,2 | 1,25 | 0,3 | 0,5 | 2 |

Fonte: Autor (2022)

Estas composições foram adotadas para testar a influência do RPP nos CADs e CUADs de forma eficiente, uma vez que o ensaio de retração autógena tem duração média de 25 dias e, portanto, a limitação temporal se apresentou como um fator a ser considerado no planejamento deste programa experimental. Desta forma, objetivou-se com este plano de trabalho traçar um perfil de CADs e CUADs reforçados com fibras de aço e RPP como MCS com níveis de retração autógena reduzidos.

Os concretos foram confeccionados em um misturador de argamassas de eixo planetário, conforme Figura 14, iniciando o processo pela homogeneização dos materiais secos – cimento, areia e RPP – por 1 minuto. Em seguida, a água é gradualmente adicionada e o processo de mistura ocorre por 5 minutos; após o transcurso deste período, o aditivo superplastificante é adicionado e a mistura é continuada por mais 4 minutos; por fim, se a composição prever a adição de microfibras de aço, estas são incorporadas e homogeneizadas por mais 1 minuto, totalizando 10 minutos de processo de mistura.

Figura 15: Misturador de argamassas de eixo vertical



Fonte: Autor (2022)

3.4.2 Ensaios no estado fresco dos concretos e moldagem

Após a confecção dos concretos, foram realizados os ensaios de medição do índice de consistência do concreto na mesa de espalhamento (Figura 16) conforme a ABNT NBR 13276 (2016) e de determinação da densidade de massa do concreto no estado fresco, de acordo com a ABNT NBR 13278 (2005), utilizado para o posterior cálculo do teor de ar incorporado dos concretos. É importante ressaltar que se buscou a obtenção de misturas com índices de consistência semelhantes para não gerar condições de moldagem distintas.

Figura 16: Mesa para avaliação de índice de consistência



Fonte: Autor (2022)

Ao final do processo de mistura, procedeu-se imediatamente com a moldagem de dois prismas de dimensões 25 x 25 x 285 mm (altura x largura x comprimento) para a realização de ensaios de medição de variação dimensional linear, para obtenção dos valores de retração

autógena desde os primeiros momentos após a mistura do concreto. Em seguida, foi realizada a moldagem de seis corpos de prova (CP) no molde prismático de 40 x 40 x 160 mm (Figura 16), nos termos da NBR ABNT 13279 (2015), para a posterior realização dos ensaios de caracterização das propriedades mecânicas dos concretos no estado endurecido. Após um dia, os CPs foram desmoldados, identificados e, em seguida, colocados imersos em um tanque para a realização de sua cura saturada em água com cal em sala climatizada à 23 °C. E assim os CPs permaneceram nestas condições até o momento da realização dos ensaios em estado endurecido, aos 28 e 91 dias de idade.

Figura 17: Equipamento para moldagem dos corpos-de-prova prismáticos



Fonte: Autor (2022)

3.4.3 Ensaios no estado endurecido

3.4.3.1 Módulo de elasticidade dinâmico

Aos 28 dias e 91 dias, os corpos de prova prismáticos foram submetidos ao ensaio de módulo de elasticidade dinâmico, aplicado pelo equipamento Sonelastic®, fabricado pela empresa ATCP Engenharia Física. O equipamento ilustrado pela Figura 17, consiste em um suporte com cabos metálicos, onde o CP fica apoiado, um pulsador gerador de uma onda e um transdutor receptor da frequência. Após o usuário informar ao software informações como massa, comprimento, altura e largura de cada CP, e gerar uma onda na parte central do mesmo por meio do pulsador, o software capta esta mesma onda e, de posse das frequências obtidas no ensaio, calcula o módulo de elasticidade dinâmico. Foram realizadas 3 medidas para cada CP, para a obtenção de um valor médio.

Figura 18: Equipamento para medição do Módulo de Elasticidade Dinâmico

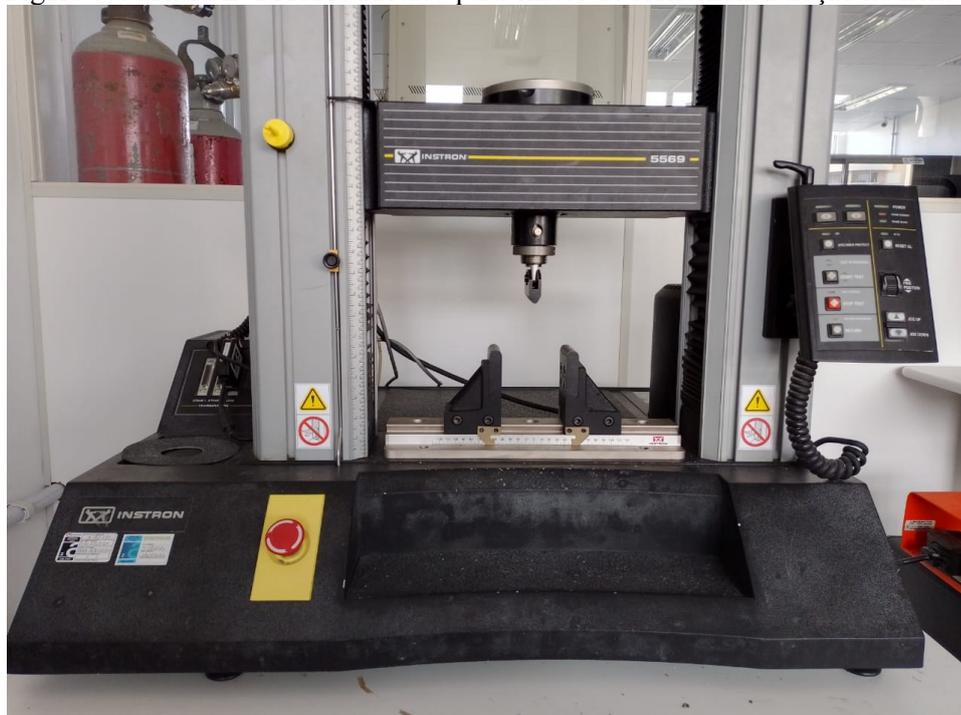


Fonte: Autor (2022).

3.4.3.2 Resistências à tração na flexão e à compressão axial

Aos 28 e 91 dias, foram realizados ensaios de resistência à tração na flexão por três pontos nos CPs prismáticos de cada mistura. O procedimento deste ensaio será realizado de acordo com o estabelecido na ABNT NBR 13279 (2005) sendo utilizada uma prensa Instron (Figura 18) com uma célula de carga de 50kN aplicando um carregamento de 50 N/s. O cálculo da resistência à tração realizado de acordo com a equação presente no item 5.5.2.3 da NBR ABNT NBR 13279 (2005).

Figura 19: Prensa INSTRON adotada para ensaio de resistência à tração na flexão



Fonte: Autor (2022)

Em seguida, foram determinadas as resistências à compressão axial das metades dos CPs prismáticos anteriormente rompidos à flexão. Foram adotados os procedimentos prescritos pela ABNT NBR 13279 (2005), sendo cada metade de CP rompida na Prensa Shimadzu universal de capacidade máxima de 2000 kN (Figura 19a) com a utilização de um adaptador para a realização de rompimentos de corpos de prova prismáticos – 40x40x160 mm - à compressão axial (Figura 19b). Para verificar os efeitos da reatividade pozolânica tardia do RPP na resistência à compressão axial dos concretos, 6 metades de cada mistura foram ensaiadas com 28 dias, enquanto as outras 6 foram ensaiadas aos 91 dias.

Figura 20: a) Prensa Shimadzu Universal; b) Adaptação para rompimento à compressão axial de CPs prismáticos



Fonte: Autor (2022)

Ao final dos ensaios de resistência à compressão axial foram realizados os cálculos para a verificação dos índices de intensidade do cimento (IIC). A partir dos dados de resistência à compressão e os seus respectivos consumos de cimento/ligante por metro cúbico, pôde-se calcular qual das composições dos concretos de alto desempenho apresentaram menores consumos de cimento por MPa obtido.

3.4.4 Ensaio de retração autógena

A medição da retração autógena inicia-se a partir da moldagem de dois prismas de concreto de dimensões de 25 x 25 x 285 mm. Estes prismas serão confeccionados em um molde de aço (Figura 20) no qual em cada extremidade apresenta sensores do tipo LVDT (*linear variable differential transformer*) que captam em tempo real o deslocamento linear gerado no concreto graças ao fenômeno da retração autógena.

As medições são realizadas a cada 50 segundos sendo transmitidas a um sistema de aquisição de dados conectado a um *software* que realiza o tratamento dos resultados. A vantagem deste sistema de captação das deformações do concreto está na utilização de um *software* que automatiza a coleta de dados, permitindo grande quantidade de medições com alta precisão, sem a necessidade da presença física do operador no decorrer do ensaio. Além disto, outra grande vantagem deste sistema é a possibilidade de iniciar a captação de dados logo após a finalização da moldagem do concreto, ou seja, fixar o tempo zero de ensaio desde as primeiras horas da hidratação do cimento.

Figura 21: Conjunto de moldes e sensores LVDT



Fonte: Autor (2022)

A duração dos ensaios variou entre 28, 24 e 21 dias, dependendo da amostra em teste, em ambiente com temperatura controlada ($23\pm 2^{\circ}\text{C}$). A fim de evitar que a troca de umidade dos prismas de concreto com o meio ambiente afete os resultados da retração autógena sendo medidos, o molde dos CPs foi vedado por uma placa de vidro selada com graxa azul.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o programa experimental definido, neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios da Etapa 2 (ensaios em pasta de cimento) e da Etapa 3 (ensaios em CADs e CUADs), na ordem definida no fluxograma da Figura 4: Fluxograma do Programa Experimental.

4.1 ETAPA 1: ENSAIOS EM PASTA DE CIMENTO

4.1.1 Calorimetria de condução isométrica

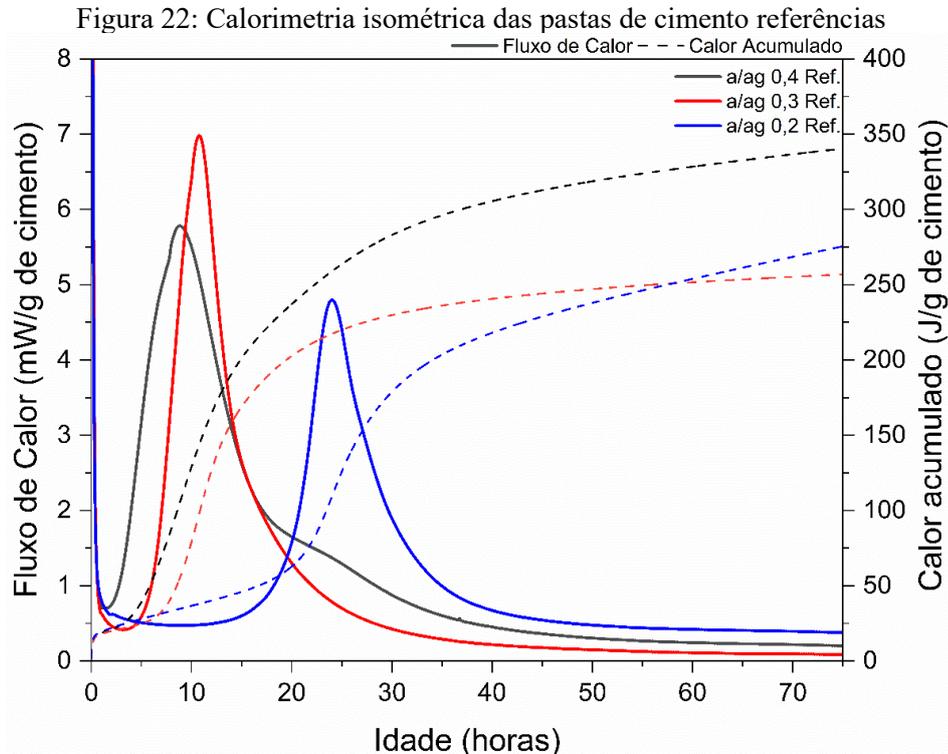
Conforme apresentado na Tabela 10, foram confeccionadas 6 pastas de cimento variando a relação a/agl, teor de superplastificante e de RPP substituindo o cimento em massa. A partir da confecção, as pastas permaneceram em média 75 horas no calorímetro realizando a medição das curvas de fluxo de calor de cada uma das amostras em temperatura constante de 23°C. A análise destes resultados será iniciada a partir da apresentação da sinopse dos resultados na Tabela 12 e da Figura 21 com a calorimetria das amostras referências.

Tabela 11: Resumo dos principais resultados obtidos no Ensaio de Calorimetria Isométrica

| Composição das pastas de cimento | Duração do período de indução (h:m) | Picos máximos de fluxo de calor | | | Calor acumulado após 75 horas | |
|----------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-----------------|-----------------|-------------------------------|----------------|
| | | Tempo (h:m) | mW/g de cimento | mW/g de ligante | J/g de cimento | J/g de ligante |
| P0,4 Ref. | 02:16 | 08:53 | 5,78 | 5,78 | 340,4 | 340,4 |
| P0,3 Ref. | 05:28 | 10:48 | 6,98 | 6,98 | 256,9 | 256,9 |
| P0,3R20 | 05:11 | 10:37 | 7,50 | 6,01 | 301,3 | 241,3 |
| P0,2 Ref. | 18:40 | 24:01 | 4,80 | 4,80 | 275,5 | 275,5 |
| P0,2R10 | 19:43 | 24:51 | 4,97 | 4,46 | 255,3 | 243,8 |
| P0,2R20 | 20:02 | 25:22 | 5,59 | 4,47 | 296,6 | 254,6 |

O comportamento da cinética de hidratação das pastas de cimento P0,4 Ref., P0,3 Ref. e P0,2 Ref. podem ser visualizados na Figura 21. Nesta, pode-se verificar que as amostras de relação a/agl 0,3 e 0,2 (com teores de aditivo superplastificante de 0,5% e 2,8%, respectivamente) apresentaram crescentes retardos no processo de hidratação quando comparadas à amostra de relação a/agl 0,4 (sem aditivo superplastificante); comportamento similar a este foi observado por Li, You e Brouwers (2017). Houve um aumento de 20,7% no pico máximo de fluxo de calor da relação a/agl 0,4 para a 0,3; crescimento semelhante foi observado por Matos *et al.* (2020) na adição do mesmo material cimentício suplementar em relação a/agl semelhante. No entanto, a relação a/agl 0,2 obteve redução de 17% no seu pico de fluxo de calor frente à relação a/agl 0,4; isto porque, apesar de necessário para a melhor

dispersão das partículas de cimento, o alto teor de aditivo à base de éter policarboxilato presente na amostra acabou por retardar a reação de hidratação do cimento (DU *et al.* 2021).



Já os índices de calor acumulados apresentaram tendência de redução com a diminuição da relação a/agl – conforme observado por Lura *et al.* (2017), Justs *et al.* (2013) e Scrivener (2015) – até as 55 horas de ensaio, quando P0,2Ref ultrapassou o calor acumulado de P0,3Ref, e finalizou as 75 horas de ensaio com aumento de 7,2% sobre a referida composição. Isto pode ser explicado pela melhor dispersão da mistura e longos períodos de indução de P0,2Ref, ambos fatos decorrentes do alto teor de aditivo superplastificante.

A Figura 22 ilustra os resultados de duas amostras com relações a/agl 0,3 tanto em relação à massa de cimento (Figura 22a) quanto em relação à massa de ligante (Figura 22b). Na análise realizada na Figura 22a e Tabela 12, o teor de 20% de RPP em P0,3R20 proporcionou uma redução de 17 minutos no período de indução e uma antecipação de 11 minutos na ocorrência do pico principal de liberação de calor, além de aumentos de 7% no fluxo de calor máximo e de 14,7% sobre o calor acumulado após 75 horas de ensaio quando normalizados para a massa de cimento, sendo estes comportamentos corroborados com resultados obtidos por Matos *et al.* (2020). Por sua vez, a Figura 22b indica que houve uma redução de 6% no calor acumulado (normalizado para a massa total de ligante) após 75 horas na mistura contendo RPP, mesmo com a remoção de 20% de cimento para a incorporação do resíduo. Há, portanto, uma indicação que para esta faixa de relação a/agl, a incorporação do RPP melhora o empacotamento das

partículas e contribui para a ocorrência da nucleação heterogênea através do efeito filler. Além disto, o aumento do calor acumulado pode ser decorrente do efeito de diluição que apresenta maior quantidade de água disponível para uma menor quantidade de cimento, e também um maior espaço físico disponível para a hidratação do cimento Portland (Huang *et al.*, 2017).

Figura 23: Calorimetria isométrica das pastas de cimento de relação a/agl 0,30

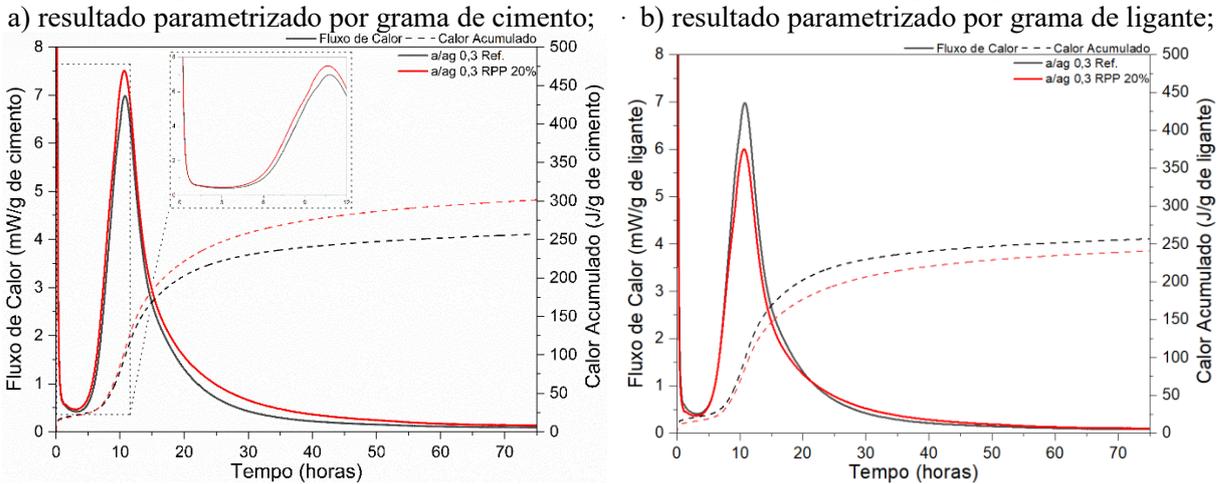
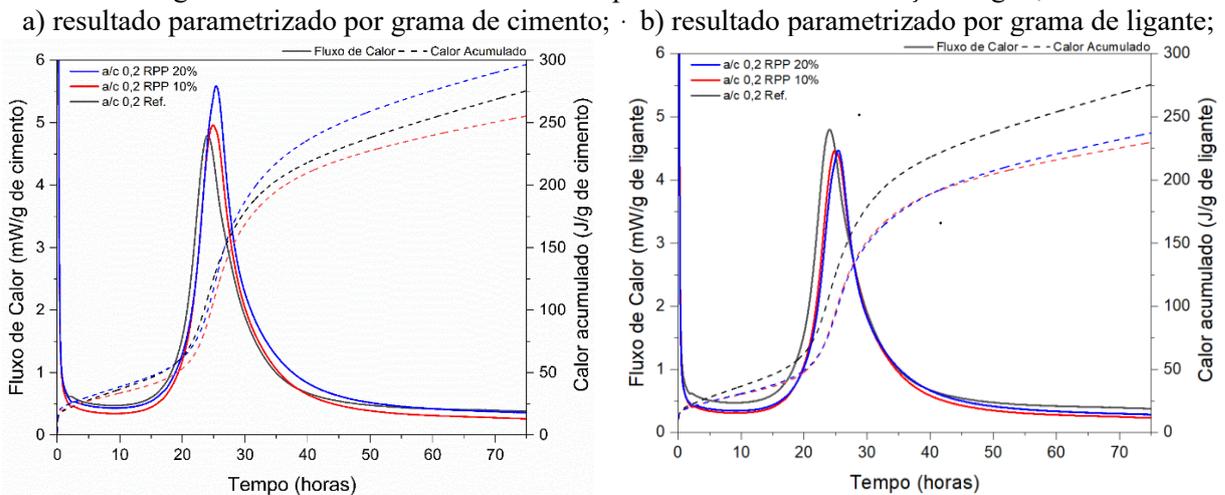


Figura 24: Calorimetria isométrica das pastas de cimento de relação a/agl 0,20



As Figura 23a) e b) apresentam os resultados do ensaio de calorimetria das amostras P0,2Ref, P0,2R10 e P0,2R20 parametrizadas por grama de cimento e por grama de ligante, respectivamente. Conforme anteriormente descrito na Tabela 12, a crescente presença de RPP nas pastas de cimento gerou aumentos sutis nas durações dos períodos de indução (de 6% e 7%, respectivamente) e no número de horas até o pico máximo do fluxo de calor (de 3% e 5%, respectivamente). Em contrapartida, as amostras com 10% e 20% de RPP apresentaram aumentos de 4% e 16% nos índices máximos de fluxo de calor frente à amostra referência, quando normalizado para a massa de cimento. Percebe-se, portanto, que em ambas faixas de relação a/agl, a introdução do RPP acarretou um aumento da taxa de reação das fases do cimento

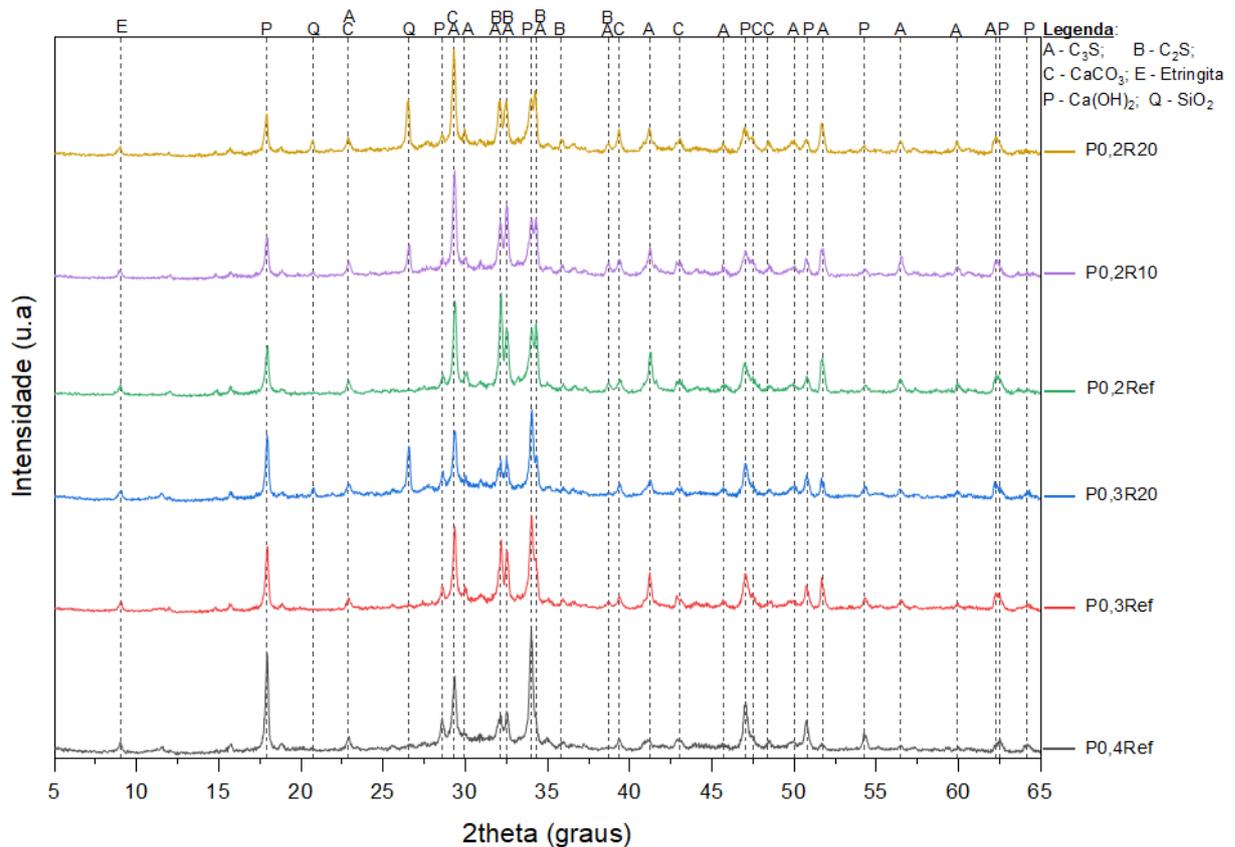
Portland, resultando em maiores picos de fluxo de calor – fato que é usualmente justificado por um melhor empacotamento das partículas assim como pela ocorrência da nucleação heterogênea, gerando novos locais para a precipitação de produtos hidratados (efeito filer).

Por fim, nas Figuras 22b e 23b, a parametrização dos resultados em função da massa de ligante, permite observar reduções dos picos de liberação de calor das amostras contendo RPP e dos seus respectivos valores de calor acumulado. Estes resultados são coerentes uma vez que a redução da presença de cimento nas amostras (sendo este substituído por um MCS menos reativo) tende a diminuir a liberação de calor nas primeiras horas. Nota-se que esta tendência foi mais evidente nas amostras com relação a/agl 0,20 do que nas amostras com a/agl 0,30. Isso pode ser justificado pela menor presença de água nas amostras com relação a/agl 0,20 que tende a aproximar as partículas, reduzindo o caminho percorrido pelas espécies iônicas (facilitando as reações), além de aumentar a concentração de íons na solução de poros, assim compensando parcialmente a menor presença de grãos de cimento (WADSÖ, *et al.*, 2016). De qualquer forma, destacam-se: o calor acumulado da amostra P0,3R20 muito próximo do índice da amostra referência P0,3Ref. (241,3 e 256,9 J/g de ligante, respectivamente) e o calor acumulado da amostra P0,2R20 superior à amostra P0,2R10 (254,6 e 243,8J/g de ligante, respectivamente), mesmo com uma maior redução de cimento na primeira amostra.

4.1.2 Difractometria de raios-X (DRX)

Conforme observado nos resultados expressos na Figura 24 e discutidos a seguir, foram verificadas grandes variações de intensidade entre os difratogramas, principalmente nos picos característicos de portlandita (Ca(OH)_2), alita (C_3S) e de quartzo (SiO_2), devido, principalmente, aos diferentes graus de hidratação do cimento e teores de RPP introduzidos nas amostras. Por fim, é importante salientar que a intensidade dos picos não corresponde necessariamente a uma medida quantitativa, mas sugere uma tendência de comportamento em relação à respectiva fase cristalina.

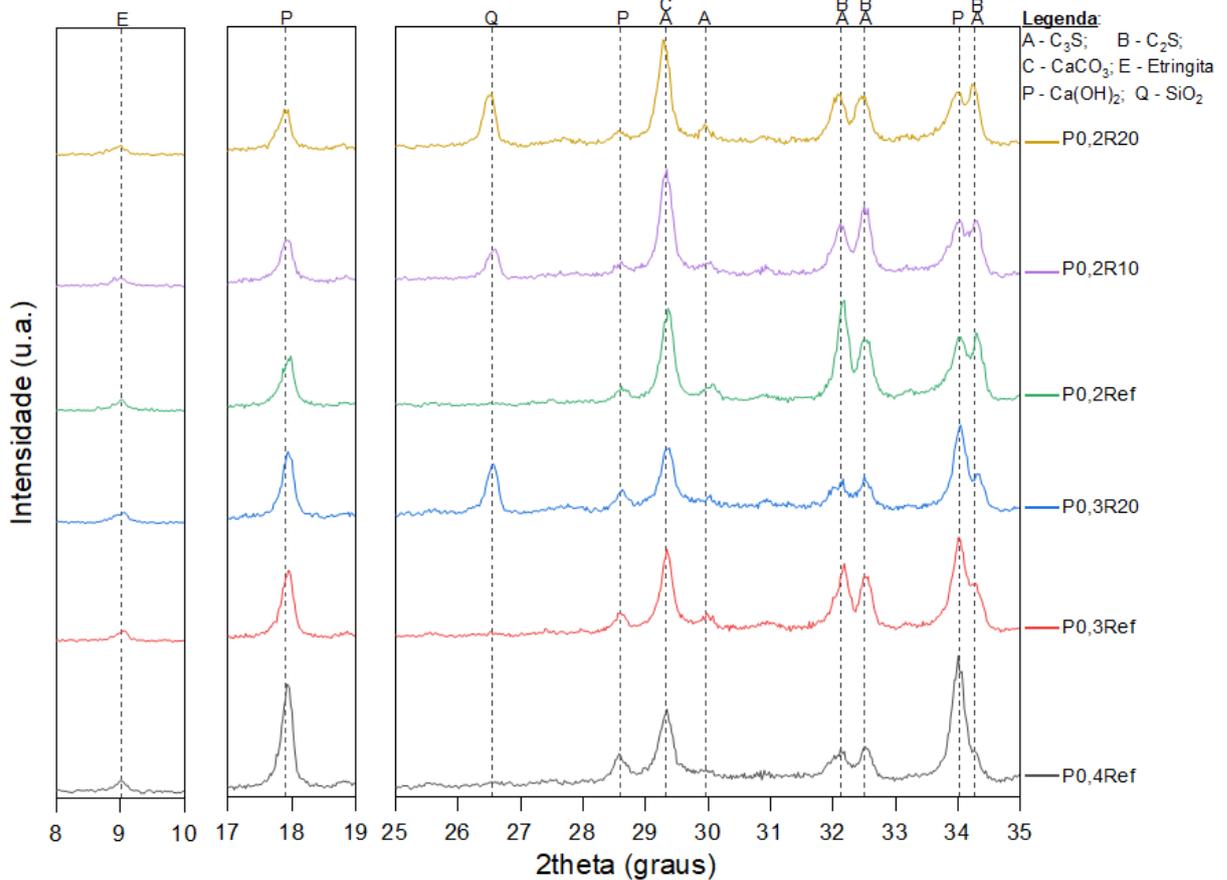
Figura 25: Difratograma das pastas de cimento aos 28 dias



Entre as pastas de cimento referências, com relações a/agl de 0,4, 0,3 e 0,2, observou-se a predominância de fases cristalinas características de portlandita ($Ca(OH)_2$), a alita (Ca_3Si), a calcita ($CaCO_3$) e, em menor quantidade, a etringita ($Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12} \cdot 26H_2O$). No entanto, a incorporação do RPP nas pastas de cimento acarretou o surgimento de picos de quartzo (SiO_2), presente no resíduo, sendo o principal deles localizado em $2\theta = 26,5^\circ$, conforme visualizado em detalhe na Figura 25.

Visualizou-se a redução dos picos característicos de portlandita ($2\theta = 18^\circ$ e 34°) em função de dois contextos distintos: quando reduz-se a relação água/aglomerante das amostras referências e quando introduz-se o RPP nas pastas. A primeira situação ocorre porque a redução da relação a/agl da pasta acarreta numa tendência de apresentar menor hidratação das fases de cimento anidro em um mesmo período e, conseqüentemente, menor produção de cristais de hidróxido de cálcio (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Já a redução dos picos de CH ocorrida com a introdução de RPP nas pastas pode ser justificada tanto pela reatividade pozolânica já confirmada do material como MCS (ALSAIF, 2021), e discutida posteriormente com base nos resultados de TG, como também pela substituição parcial do cimento pelo referido resíduo, reduzindo assim a formação de CH pelo processo de hidratação do cimento.

Figura 26: Intervalos selecionados dos difratogramas das pastas de cimento aos 28 dias

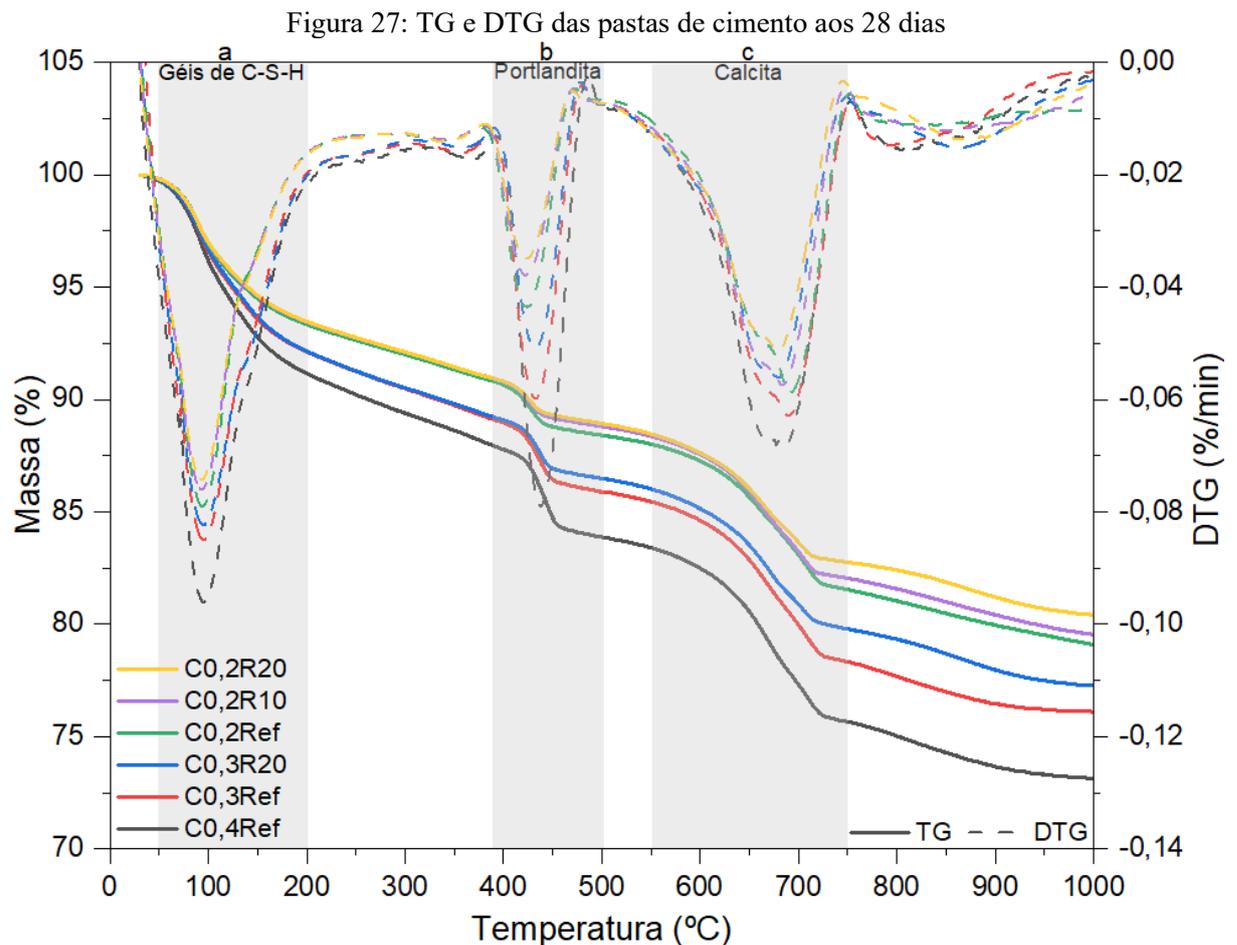


Sobre a evolução das fases cristalinas dos silicatos anidros, os picos de alita ($2\theta = 29,3^\circ; 32^\circ; 32,5^\circ; 34,3^\circ$ e belita (majoritariamente sobrepostos) apresentaram crescimento com a redução da relação a/agl; estes resultados corroboram o fato de que quanto menor a relação a/agl, menores os graus de hidratação da pasta cimentícia e, portanto, mais perceptíveis são os picos cristalinos dos silicatos anidros (como observado comparando as pastas referência de relações a/agl 0,4, 0,3 e 0,2). Em contrapartida, as pastas de cimento que continham RPP na sua composição, apresentaram picos com comportamentos distintos: por exemplo, o pico de alita em $2\theta = 29,3^\circ$ das pastas de relação a/agl 0,2, apresentou estabilidade frente à sua amostra referência; no entanto, nos picos de alita (e belita, sobrepostos) em $2\theta = 32^\circ, 32,5^\circ$ e $34,3^\circ$ foi observada redução quando as pastas continham RPP. Esta redução das fases de silicatos anidros pode ser um indicativo de uma maior hidratação destes em géis de C-S-H, uma vez que estas pastas apresentaram relações a/c efetiva superiores frente às amostras referências. Já a estabilidade do pico em $29,3^\circ$ 2θ pode ser relacionado ao fato deste coincidir com o pico principal da calcita (MATOS, *et al.*, 2022) a qual é pouco consumida durante o processo de hidratação.

4.1.3 Análise termogravimétrica (TG)

O ensaio de termogravimetria (TG) foi realizado nas amostras de pastas de cimento com idade de hidratação de 28 dias. Este ensaio permitiu estimar os teores de água combinada e de portlandita presentes na composição das pastas, auxiliando assim a observar os padrões de hidratação de cada uma das amostras. Os resultados da TG e DTG estão expressos em sua íntegra na Figura 26.

Como pode-se observar na Figura 26, as análises realizadas apresentaram resultados coerentes com o que esperado de pastas de cimento, com três faixas predominantes de temperatura representando as principais perdas de massa. Além disto, a redução da relação a/agl e a crescente introdução do RPP influenciaram significativamente os resultados do ensaio em intensidades distintas. Por exemplo, o fator relação a/agl influenciou significativamente a perda de massa entre as amostras referências e durante todas as faixas de temperatura. Já entre as amostras contendo RPP, visualiza-se na faixa de temperatura de 400°C a 500°C perda de massa significativamente superior em comparação às suas amostras referências.



A Tabela 13 a seguir apresenta os valores de perda de massa registradas nas faixas de temperatura “a” e “b”. Além disto, com a aplicação das Equações (1) e (2), apresentadas no item 3.3.3. deste trabalho, foram calculados os teores percentuais de água quimicamente combinada (AQC) e de CH presente nas amostras das pastas de cimento.

Tabela 12: Perdas de massa nas faixas de temperatura “a” e “b” e teores calculados

| Composições | Perda de massa | Percentuais em | Perda de massa na | Percentuais em |
|------------------|------------------|------------------|-------------------|--------------------------|
| | na Faixa “a” | massa calculados | faixa “b” | massa calculados |
| | 50°C a 200°C (%) | AQC (m%) | 400°C a 500°C (%) | Ca(OH) ₂ (m%) |
| P0,4 Ref. | 8,6 | 10,06 | 3,9 | 21,8 |
| P0,3 Ref. | 7,6 | 8,89 | 3,1 | 16,7 |
| P0,3R20 | 7,6 | 8,95 | 2,6 | 13,7 |
| P0,2 Ref. | 6,5 | 7,16 | 2,2 | 12,1 |
| P0,2R10 | 6,4 | 7,01 | 2,0 | 10,6 |
| P0,2R20 | 6,3 | 7,12 | 1,9 | 9,6 |

Fonte: Autor (2022)

Conforme apresentado na Tabela 13, foi confirmado que as reduções das relações a/agl afetaram significativamente os teores de AQC e CH nas pastas de cimento referências; a amostra de relação a/agl 0,40, por exemplo, obteve teores superiores de água quimicamente combinada e de CH, indicando um maior grau de hidratação do cimento frente às amostras de relação a/agl 0,30 e 0,20.

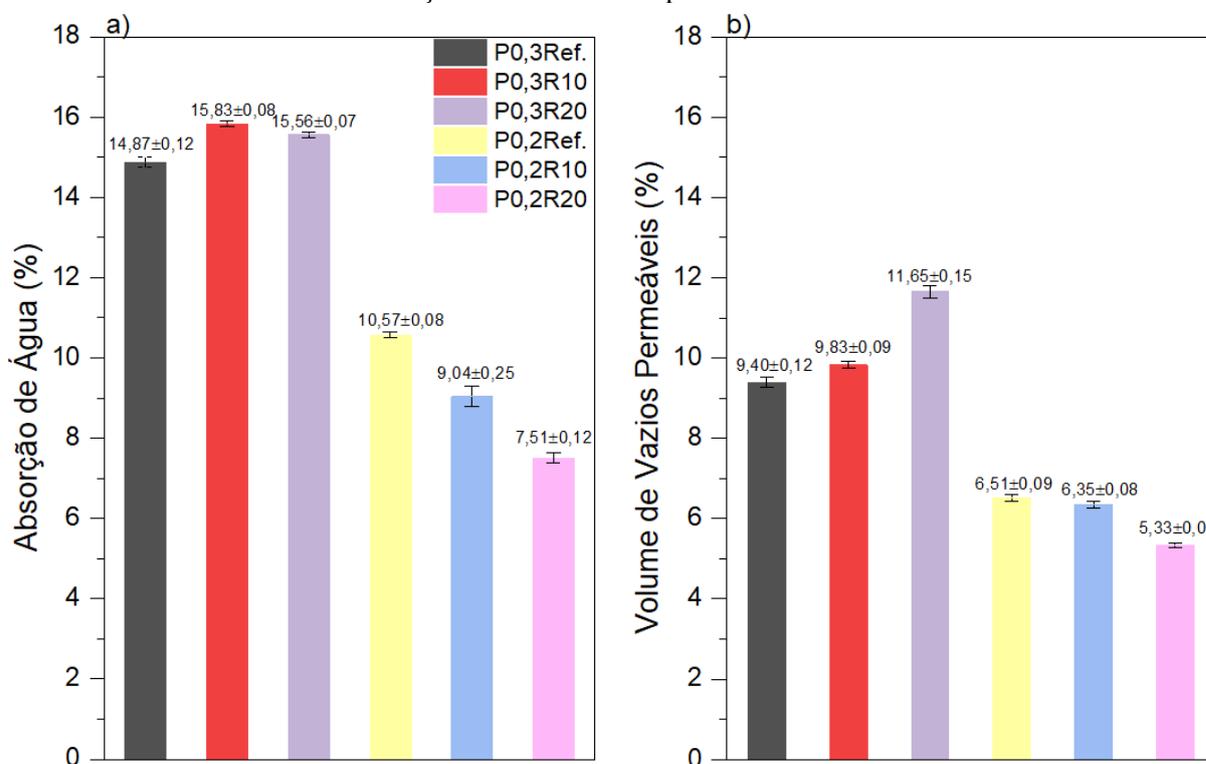
No que tange às amostras com substituição de cimento por RPP, independentemente da relação a/agl, foram registradas reduções de 4% nos percentuais de água quimicamente combinada permaneceram estáveis quando comparados às amostras referência. Já os teores de CH apresentaram reduções significativas tanto nas amostras com relação a/agl 0,30 – redução de 3,05 m% para 20% de substituição – quanto nas composições de relação a/agl 0,20 – reduções de 1,54% para 10% de substituição e 2,55 m% para 20% de substituição, quando comparadas com as respectivas amostras Referência

Portanto, mesmo com a redução do teor de cimento nas pastas contendo RPP, estas apresentaram uma manutenção do teor de AQC e reduções significativas de CH presente nas amostras com 28 dias de idade. Isto pode indicar que o RPP potencializou a hidratação do cimento por efeitos físicos, como o estabelecimento de novos pontos de nucleação para hidratação do cimento; assim como a reatividade pozolânica do resíduo teria atuado ativamente na transformação do CH em géis de C-S-H adicionais. Conclusões semelhantes foram observadas por Jacoby e Pelisser (2015), Matos (2019) e Li, Liu, You *et al.* (2020a).

4.1.4 Ensaios de absorção de água

A Figura 27 a seguir apresenta os resultados dos ensaios prescritos na ASTM 642-21 para o cálculo da absorção de água – após períodos de imersão e fervura – e do volume de vazios permeáveis de amostras de pastas de cimento de cada composição. Diferentemente do ensaio de BET, onde predomina a medição da porosidade entre cristais de C-S-H na escala de microporos (entre 1 nm e 3 nm) e mesoporos (entre 3 nm e 50 nm), o ensaio de absorção de água avalia a porosidade das amostras principalmente na escala de macroporos (acima de 50 nm). Em função disto, esta análise permitiu a obtenção de relevantes resultados para a discussão deste trabalho.

Figura 28: a) Absorção de água e b) volume de vazios permeáveis das pastas de cimento aos 28 dias de hidratação. Média e desvio padrões de 3 amostras



Fonte: Autor (2022)

A partir da realização do referido ensaio observou-se que o efeito da redução das relações a/agl entre as composições ensaiadas - de 0,30 para 0,20 – importou em significativa redução dos percentuais de absorção de água e volumes de poros permeáveis, indicando uma forte influência deste fator no refinamento do sistema de poros e na redução da porosidade total (CHEN, KWAN e JIANG, 2014).

Sobre as pastas de cimento de relação a/agl 0,30 – P0,3Ref., P0,3R10 e P0,3R20 – a substituição gradual de cimento por RPP elevou o percentual de absorção de água e gerou um

aumento do volume de poros permeáveis das referidas pastas de cimento aos 28 dias de hidratação. Tal aumento ocorreria em função das crescentes relações a/c absolutas (0,30; 0,33 e 0,38 para P0,3Ref, P0,3R10 e P0,3R20, respectivamente) que poderiam explicar o aumento gradativo da absorção de água e do percentual de vazios permeáveis. Logo, este aumento da porosidade nas amostras de relação a/agl 0,30 indicam uma predisposição a redução dos índices de pressão capilares que seriam os indutores da autodessecação das matrizes cimentícias, que será abordado posteriormente nos resultados de retração.

Em contrapartida, as pastas de cimento com relações a/agl 0,20 – P0,2Ref., P0,2R10 e P0,2R20 – apresentaram comportamento oposto: a substituição do cimento por RPP foi acompanhada por reduções dos percentuais de absorção de água e dos volumes de vazios permeáveis. Realizando análise semelhante à anterior, estas pastas de cimento apresentam crescimentos menos significativos das relações a/c a partir da substituição de cimento por RPP (0,20; 0,22; e 0,25 para P0,2Ref, P0,2R10 e P0,2R20, respectivamente). Estas relações a/c ainda caracterizam matrizes cimentícias com intensos processos de autodessecação e com baixas porosidades. Além disto, em função da maior compacidade destas matrizes cimentícias, o efeito filer apresentado pelo RPP foi mais pronunciado nas pastas de relação a/agl 0,20, gerando novos pontos de hidratação do cimento por nucleação heterogênea. Por esta razão, os pequenos aumentos das relações a/c podem ter contribuído no aumento do grau de hidratação destas composições, e conseqüentemente reduzido o percentual de absorção de água e de volume de vazios permeáveis aos 28 dias de idade. Assim, o resultado deste ensaio permite supor que a substituição do cimento por RPP nas pastas de cimento com relações a/agl 0,20 tenderiam a aumentar a pressão capilar e, conseqüentemente, os seus níveis de retração autógena.

4.1.5 Conclusões parciais dos ensaios em pasta

Diante dos resultados dos ensaios realizados nas pastas de cimento restou verificado:

- a) O alto teor de aditivo superplastificante nas amostras com relação a/agl 0,20 - 2,8% - retardou a hidratação do cimento aumentando o período de indução, além de estender, ao longo das 75 horas de ensaio de calorimetria isométrica, o pico máximo de fluxo de calor;
- b) A introdução do RPP nas amostras de relação a/agl 0,30 e 0,20:
 - Na calorimetria isométrica normalizada por grama de cimento, o RPP proporcionou resultado no aumento dos picos máximos de fluxo de calor e de calor acumulado, sugerindo uma potencialização da hidratação do cimento por efeitos

físicos, como o surgimento de pontos de nucleação na matriz cimentícia. Ao avaliar os resultados por grama de ligante: na a/agl 0,20, a substituição de 20% de cimento por RPP apresentou calor acumulado superior e picos máximos semelhantes à amostra contendo 10% de teor de RPP; enquanto que na a/agl 0,30, a substituição de 20% de RPP obteve calor acumulado apenas 6% inferior à amostra referência;

- Nos ensaios de DRX, foi observada redução dos picos de alita e belita nas pastas de cimento contendo teores de RPP, sugerindo uma maior dissolução dos silicatos anidros e formação de géis de C-S-H em razão de uma potencialização da hidratação do cimento;
- O percentual de água quimicamente combinada calculado a partir dos resultados da TG indicou uma manutenção mesmo com a substituição parcial do cimento por RPP, com reduções de apenas 4% frente ao valor das amostras referências, corroborando com a teoria da potencialização da hidratação do cimento;
- Ocorrência de reduções gradativas observadas na intensidade dos picos característicos de portlandita no difratograma de raio-X nas pastas de cimento contendo teores de substituição de cimento por RPP; este comportamento foi confirmado nos ensaios de TG nos quais restou verificado reduções gradativas nos teores de CH nas pastas de cimento contendo RPP. Enquanto que estas reduções poderiam ser provenientes da menor presença de cimento nestas amostras e, portanto, da menor quantidade de produtos de hidratação, a manutenção do percentual de água quimicamente combinada em conjunto com a redução do CH é um indicativo da ocorrência do efeito filer, resultando em novos pontos de hidratação por nucleação heterogênea e de início das reações pozolânicas decorrentes da introdução do RPP nestas amostras.
- O ensaio absorção de água por imersão e fervura indicaram que a substituição do cimento por RPP apresentou em: a) pastas de cimento com relações a/agl 0,30 tendências de aumento da porosidade; e b) pastas de cimento com relações a/agl 0,20 tendências de redução da porosidade.

4.2 ETAPA 2: ENSAIOS EM CAD E CUAD

A partir deste subitem serão apresentados os resultados dos ensaios realizados em concretos com três principais variáveis: a relação água/aglomerante (0,3 e 0,2); o teor substituição, em massa, do cimento em RPP (0%, 10%, 20%) e o teor percentual de microfibras de aço (0%, 1% e 2%). Os resultados serão expressos de forma sequencial na ordem de execução e ao final será realizada conclusão parcial adiantando algumas dos entendimentos.

4.2.1 Avaliação dos concretos no estado fresco

Os concretos confeccionados foram ensaiados no seu estado fresco em relação aos seus índices de consistência (mm), densidade real (g/cm^3) e teor de ar incorporado (%). Estes ensaios foram realizados logo após os 10 minutos de misturas na argamassadeira, lembrando que não houve ajuste do teor de aditivo superplastificante além do teor inicialmente adotado, uma vez que este pode afetar significativamente a retração autógena. Também importa ressaltar que em nenhum ensaio de *flow-table* foi registrado exsudação das bordas e acúmulo de material no centro da mesa. Os resultados obtidos nos referidos ensaios são apresentados na Tabela 14 a seguir:

Tabela 13: Resultados dos ensaios dos CADs e CUADs no estado fresco

| Composições | Índice de Consistência (mm) | Densidade Real (g/cm^3) | Teor de ar incorporado (%) |
|------------------|--------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|
| C0,2 Ref. | 308 | 2,35 | 2,58 |
| C0,2R10 | 302 | 2,34 | 1,40 |
| C0,2R20 | 292 | 2,32 | 0,55 |
| C0,2R0F1 | 289 | 2,40 | 2,69 |
| C0,2R20F1 | 306 | 2,37 | 0,80 |
| C0,2R0F2 | 311 | 2,45 | 2,75 |
| C0,2R20F2 | 312 | 2,43 | 0,57 |
| C0,3 Ref. | 289 | 2,23 | 3,38 |
| C0,3R10 | 262 | 2,21 | 2,96 |
| C0,3R20 | 250 | 2,19 | 2,11 |
| C0,3R0F2 | 272 | 2,26 | 6,49 |
| C0,3R20F2 | 264 | 2,22 | 5,21 |

Fonte: Autor (2022)

Avaliando inicialmente os resultados dos índices de consistência dos CUADs ($a/agl = 0,20$) percebe-se que nem a substituição do cimento por RPP nem a introdução das fibras nas misturas afetaram significativamente os resultados obtidos na mesa de *flow table*, permanecendo sempre na faixa entre 300 ± 20 mm. O alto teor de aditivo superplastificante presente nestas amostras pode auxiliar a explicar a constância destes resultados, facilitando em sobremaneira a homogeneidade da mistura e o escorregamento dos componentes da matriz cimentícia em uma relação $a/agl 0,20$. Adicionalmente, a substituição do cimento pelo resíduo resulta em uma maior relação aditivo/cimento, havendo uma maior quantidade (relativa) de aditivo para dispersar as partículas de cimento.

Sobre os resultados nos CADs ($a/agl = 0,30$), as amostras C0,3Ref., C0,3R10 e C0,3R20 apresentaram reduções gradativas do índice de consistência com a substituição de cimento por RPP (de 289 mm da amostra referência C0,3Ref. para 262 mm e 250 mm para 10% e 20% de substituição, respectivamente) com teores de ar incorporado semelhantes (2,11-3,38%). Este comportamento era esperado (BHARGAV e KANSAL, 2020) em razão da área superficial específica do resíduo superior ao do cimento, adsorvendo mais água durante o estado fresco da mistura e, assim, reduzindo o índice do ensaio de *flow-table*.

Já as amostras de CAD contendo fibras (C0,3R0F2 e C0,3R20F2), apresentaram maiores índices de consistência quando comparadas com as respectivas amostras com mesmos teores de RPP sem fibras. Isso pode ser explicado pelo maior teor de ar incorporado nas amostras de CAD contendo fibras (com fibras = 5,21-6,49% vs. Sem fibras = 2,11-3,38%). A incorporação de ar pode auxiliar na lubrificação interna das misturas, aumentando a fluidez das mesmas (KOSTRZANOWSKA-SIEDLARZ e GOŁASZEWSKI, 2015). Mesmo assim, todos os CADs apresentaram índice de espalhamento semelhantes dentro da faixa de 270 ± 20 mm.

Sobre a massa específica (g/cm^3) e o teor de ar incorporado (%) dos concretos confeccionados, os resultados apresentados na Tabela 14 indicaram que: a) a substituição de cimento por RPP tendeu a reduzir as massas específicas e os teores de ar incorporado dos concretos; e b) a introdução das microfibras metálicas aumentou as massas específicas e o teor de ar incorporado dos concretos confeccionados conforme observado por Roberti *et al.* (2021) e Carrillo *et al.* (2019). A tendência de redução na densidade real já é esperada, uma vez que a massa específica do RPP é menor que a do cimento ($2,48$ vs. $3,10 g/cm^3$). Contudo, a redução do ar incorporado indica que apenas a diferença de massa específica dos materiais não é suficiente para explicar a redução da densidade real dos concretos.

Já a tendência de crescimento do teor de ar incorporado em razão da introdução de microfibras de aço ocorreu em menor medida entre as amostras de CUAD e de forma bem mais significativa para as amostras de CAD. Esta diferença entre o aumento dos teores de ar incorporado nas amostras frescas de CUADs e CADs com microfibras deve-se, principalmente, às diferenças nas propriedades reológicas da matriz cimentícia: matrizes mais viscosas, como as obtidas em CUADs - favorecem uma dispersão das fibras mais estável e homogênea, evitando a formação de aglomerados de fibras que incorrem na formação de bolhas de ar (ROBERTI, *et al.*, 2021; WANG, *et al.*, 2017).

Em contrapartida, substituições de teores de cimento por RPP resultaram em reduções nos teores de ar incorporado conforme verificados nos C0,2R10 e C0,2R20 frente à amostra referência C0,2Ref., e nas amostras C0,3R10 e C0,3R20 em relação ao C0,3Ref. A mesma tendência de redução foi verificada nos C0,2R20F1, C0,2R20F2 e C0,3R20F2 quando comparados às suas respectivas amostras referência com fibras (C0,2R0F1, C0,2R0F2 e C0,3R0F2, respectivamente). Resultados semelhantes foram observados por El-Hawary e Mubarak (2019), concluindo que a reduzida dimensão das partículas de RPP acabam auxiliando na redução da quantidade de ar incorporado durante a mistura dos concretos.

Por fim, percebe-se que os maiores índices de ar incorporado ocorreram nos C0,3R0F2 e C0,3R20F2 em função de um maior volume de microfibras de aço em composições com maior relação a/agl e menor teor de aditivo superplastificante. Avaliando especificadamente o caso do C0,3R20F2, percebe-se que as microfibras de aço apresentaram um impacto negativo superior aos benefícios apresentados pela introdução do RPP no teor de ar incorporado de outras composições; ainda assim houve uma redução no referido índice entre as amostras C0,3R0F2 e C0,3R20F2 provocada pela incorporação do RPP.

4.2.2 Propriedades mecânicas dos concretos

Após o período de cura estabelecido para os ensaios – 28 e 91 dias – foram realizados os ensaios de módulo de elasticidade dinâmico, resistência à tração por flexão e resistência à compressão axial dos corpos de prova produzidos nas composições definidas anteriormente. A apresentação dos dados será dividida por classes de resistências, para que a vasta gama de resultados obtidos seja apresentada de forma sucinta e clara ao leitor.

4.2.2.1 CUADs

Na Tabela 15 apresentada a seguir foram compilados todos os resultados médios e os seus respectivos desvios padrões nos ensaios de caracterização mecânica dos CUADs confeccionados. Com estes resultados em mãos, foram confeccionadas as Figuras 28, 29 e 30 que apresentam graficamente os resultados obtidos nos ensaios de módulo de elasticidade, resistência à tração por flexão e resistência à compressão, respectivamente. Importante ressaltar que os resultados individualizados de todas as composições – CADs e CUADs – em cada um dos ensaios realizados foram integralmente apresentados no APÊNDICE C deste trabalho.

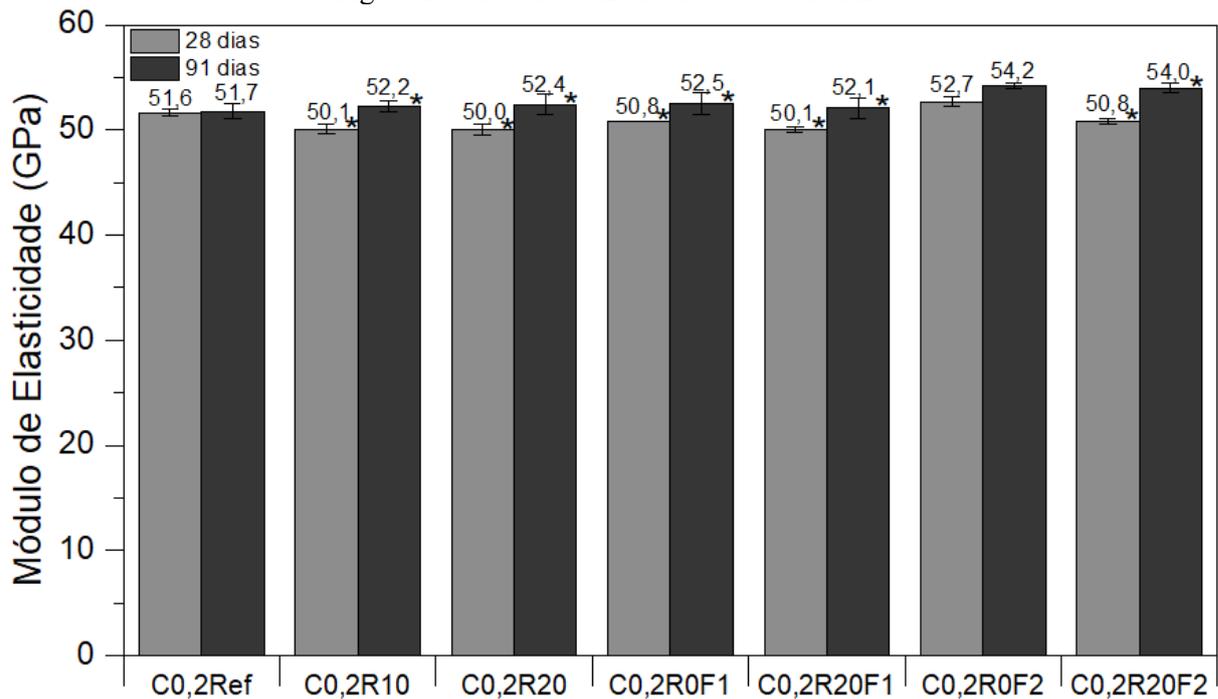
Tabela 14: Caracterização mecânica dos CUADs confeccionados

| | Módulo de Elasticidade (GPa) | | | | Resistência à Flexão (MPa) | | | | Resistência à Compressão (MPa) | | | |
|------------------|------------------------------|-------------|--------------|-------------|----------------------------|-------------|--------------|-------------|--------------------------------|-------------|--------------|-------------|
| | Média 28d | D.P. 28d | Média 91d | D.P. 91d | Média 28d | D.P. 28d | Média 91d | D.P. 91d | Média 28d | D.P. 28d | Média 91d | D.P. 91d |
| C0,2 Ref. | 51,6 | 0,3 | 51,7 | 0,7 | 18,0 | 0,5 | 21,6 | 0,6 | 99,7 | 3,9 | 108,2 | 6,9 |
| C0,2R10 | 51,7 | 0,5 | 52,3 | 0,5 | 16,6 | 0,7 | 17,3 | 1,0 | 95,6 | 5,4 | 108,2 | 3,9 |
| C0,2R20 | 50,1 | 0,5 | 52,4 | 1,0 | 15,7 | 0,9 | 17,9 | 0,7 | 97,7 | 4,3 | 119,2 | 4,7 |
| C0,2R0F1 | 50,8 | 0,0 | 52,5 | 1,1 | 18,6 | 0,5 | 20,7 | 2,8 | 107,6 | 4,1 | 120,3 | 5,0 |
| C0,2R20F1 | 50,1 | 0,3 | 52,1 | 0,9 | 16,7 | 0,9 | 18,8 | 0,8 | 109,8 | 5,8 | 120,1 | 6,6 |
| C0,2R0F2 | 52,7 | 0,4 | 54,2 | 0,2 | 25,7 | 1,8 | 30,7 | 3,2 | 121,5 | 3,9 | 126,2 | 5,6 |
| C0,2R20F2 | 50,8 | 0,2 | 54,0 | 0,5 | 23,1 | 2,2 | 26,8 | 3,0 | 116,4 | 4,8 | 138,8 | 2,6 |

Fonte: Autor (2022)

Para verificação da ocorrência de diferenças significativas entre as composições de CUADs, foram realizadas análises estatísticas de variância (ANOVA) a partir de critérios escolhidos – teor de RPP aos 28 e 91 dias, teor de microfibras e crescimento entre resultados de 28 e 91 dias. Estas análises foram realizadas por meio do software *Origin Pro 2019b* para cada um dos ensaios realizados e estão dispostas na sua íntegra no APÊNDICE D deste trabalho.

Figura 29: Módulo de Elasticidade dos CUADs



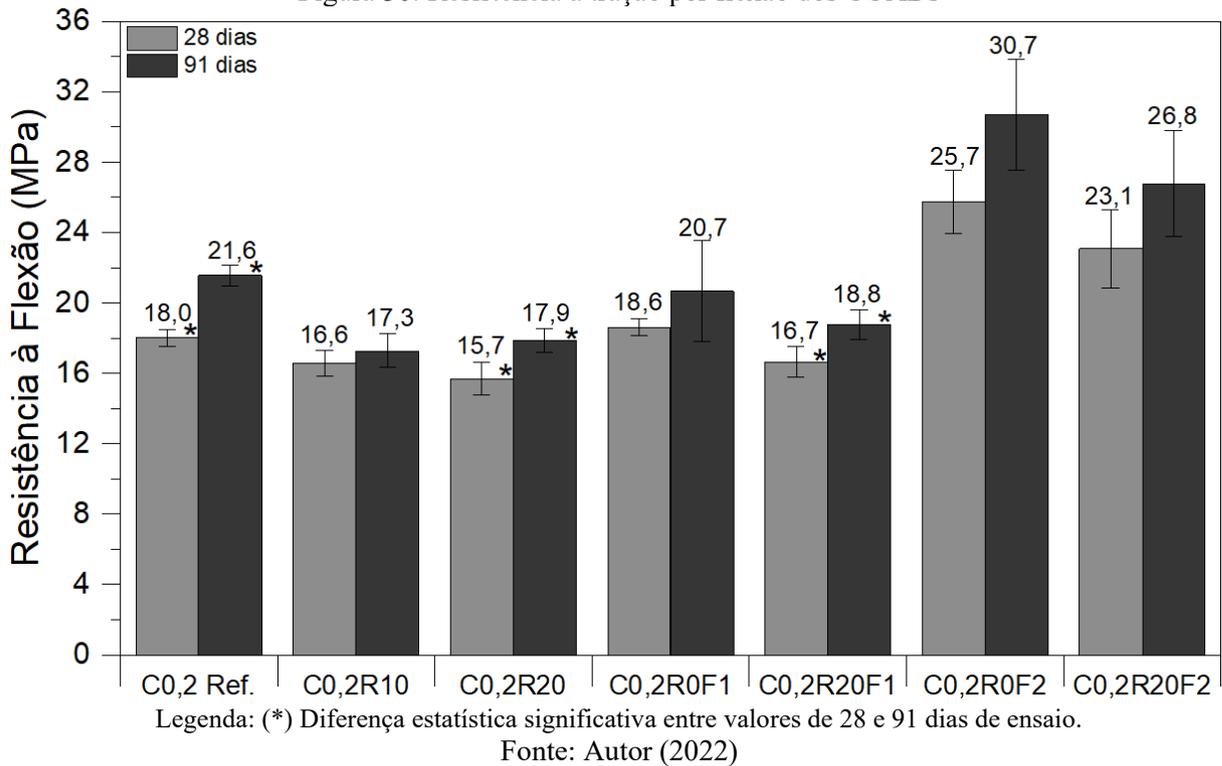
* Diferença estatística significativa entre valores de 28 e 91 dias de ensaio.

Fonte: Autor (2022)

Todos os CUADs apresentaram módulo de elasticidade superiores ao patamar de 50 GPa aos 28 dias, independentemente de sua composição, atendendo um dos requisitos definidos por Richard e Cheyrezy (1995) para caracterização mecânica de um CUAD. Além disto, restou verificado estatisticamente o efeito negativo da substituição do cimento por RPP sobre o módulo de elasticidade aos 28 dias; enquanto que, aos 91 dias, não foi verificada diferença significativa entre as composições C0,2Ref, C0,2R10 e C0,2R20, indicando o efeito positivo da substituição após o prolongado tempo de cura.

Em relação ao efeito das microfibras de aço no módulo de elasticidade foi observada, aos 28 dias, diferença significativa entre C0,2Ref, C0,2R0F1 e C0,2R0F2 com tendência de redução; contudo, aos 91 dias, ocorreu uma tendência de estabilização de C0,2R0F1 frente à C0,2Ref. (ROBERTI, *et al.* 2020; YOO *et al.*, 2014) e de crescimento de 5% de C0,2R0F2 frente à referida composição referência. Por fim, C0,2R20F1 e C0,2R20F2 apresentaram comportamentos coerentes, uma vez que em função da substituição de 20% de cimento por RPP, obtiveram, aos 28 dias, valores de módulo de elasticidade reduzidos frente à C0,2R0F1 e C0,2R0F2, respectivamente, e aumentos estatisticamente significativos aos 91 dias.

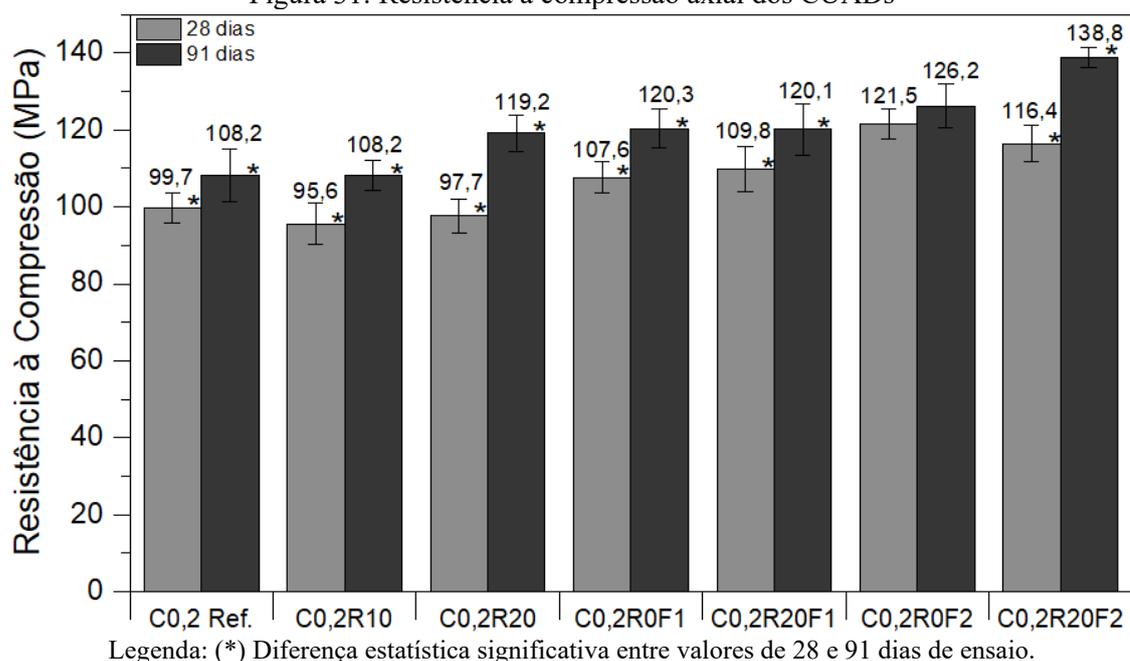
Figura 30: Resistência à tração por flexão dos CUADs



No que tange à resistência à tração por flexão, o aumento no teor de RPP acarretou reduções estatisticamente significativas frente às amostras referências em todos os casos, independentemente do tempo de ensaio. No entanto, a cada 10% de substituição do cimento por RPP nos concretos, menor foi a queda observada nos valores de resistência à flexão (FATIMA, JHAMB e KUMAR, 2013; PATEL, ARORA e VANIYA, 2015).

Entre as composições com microfibras de aço, C0,2Ref e C0,2R0F1 apresentaram resistências à flexão por tração equivalentes, independentemente da idade de ensaio; contudo, a introdução de 2% de microfibras metálicas em C0,2R0F2 resultou em aumentos estatisticamente significativos frente à C0,2Ref. – 43% aos 28 dias e 42% aos 91 dias. Karim e Shafei (2021) observaram tendência semelhante de alto crescimento da resistência à flexão no aumento do teor de 1 para 2% de microfibras de aço similares à adotada neste trabalho. As composições C0,2R20F1 e C0,2R20F2 apresentaram reduções frente às amostras C0,2R0F1 e C0,2R0F2, respectivamente, conforme era esperado em função da presença de RPP; entretanto, a ANOVA indicou que as diferenças entre as médias não foram estatisticamente significantes.

Figura 31: Resistência à compressão axial dos CUADs



Fonte: Autor (2022)

Nos ensaios de resistência à compressão dos CUADS, a introdução do RPP em C0,2R10 e C0,2R20 não prejudicou significativamente as resistências obtidas aos 28 dias frente à C0,2 Ref. Em contrapartida, aos 91 dias, a reatividade pozolânica do RPP pôde ser observada quando C,02R10 apresentou valores de resistência à compressão equivalentes e C0,2R20 obteve crescimento estatisticamente significativo de 10,2% sobre C0,2Ref.

Em relação à influência do teor de microfibras metálicas sobre a resistência à compressão, C0,2R0F1 e C0,2R0F2 apresentaram, aos 28 e 91 dias, crescimentos estatisticamente significativos frente à C0,2Ref. Ao analisarmos os resultados das amostras de C0,2R20F1 e C0,2R20F2 foi observada, aos 28 dias, uma tendência de estabilização das resistências à compressão frente às suas respectivas amostras referências; já aos 91 dias, enquanto C0,2R20F1 não apresentou diferença significativa frente à C0,2R0F1, a amostra de C0,2R20F2 obteve resultado significativamente superior à C0,2R0F2 – com crescimento de 10,3%.

É importante ressaltar a influência do tempo de ensaio – entre resultados de 28 e 91 dias - de cada uma das composições: esta foi uma tendência comumente verificada entre os CUADs com teores de RPP, principalmente nos ensaios de módulos de elasticidade e resistência à compressão; As ANOVA calculadas sobre este critério confirmaram que composições com teores de RPP apresentaram crescimentos significativas entre as médias de 28 e 91 dias. Esta influência positiva do RPP foi inferior no ensaio de resistência à tração por flexão, onde apenas C0,2R20 e C0,2R20F1 obtiveram aumentos significativos.

Por fim, vale a pena ressaltar o expressivo aumento de resistência à compressão axial entre C0,2Ref e C0,2R20F2, que ao combinar os efeitos do RPP, das microfibras e da passagem do tempo dos 28 aos 91 dias, apresentou crescimento de aproximadamente 40% de aumento.

4.2.2.2 CADs

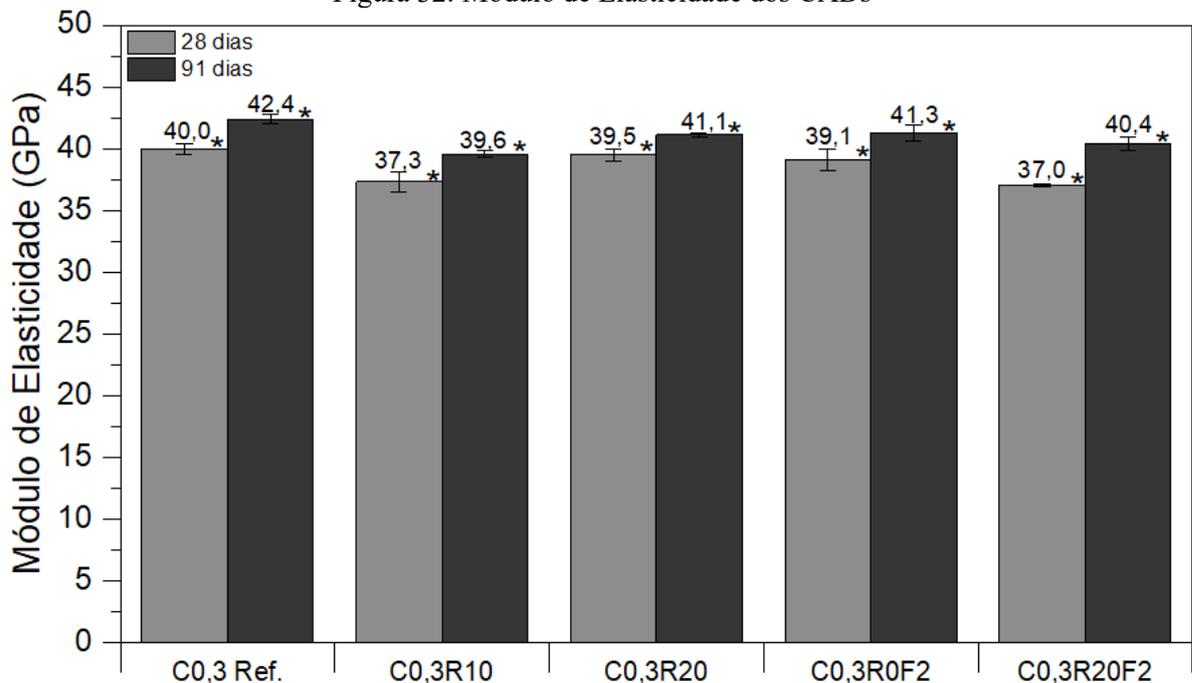
A Tabela 16 apresenta a seguir o compilado dos resultados médios e os seus respectivos desvios padrões obtidos nos ensaios de caracterização mecânica dos CADs, enquanto que as Figuras 31, 32, 33 apresentam graficamente os resultados obtidos nos ensaios de módulo de elasticidade, resistência à tração por flexão e resistência à compressão, respectivamente.

Tabela 15: Caracterização Mecânica dos CADs

| | Módulo de Elasticidade (GPa) | | | | Resistência à Flexão (MPa) | | | | Resistência à Compressão (MPa) | | | |
|------------------|------------------------------|-------------|--------------|-------------|----------------------------|-------------|--------------|-------------|--------------------------------|-------------|--------------|-------------|
| | Média 28d | D.P. 28d | Média 91d | D.P. 91d | Média 28d | D.P. 28d | Média 91d | D.P. 91d | Média 28d | D.P. 28d | Média 91d | D.P. 91d |
| C0,3 Ref. | 40,0 | 0,5 | 42,3 | 0,4 | 12,3 | 0,5 | 12,5 | 0,7 | 76,0 | 2,5 | 85,6 | 3,3 |
| C0,3R10 | 37,3 | 0,8 | 39,6 | 0,2 | 10,6 | 0,4 | 11,4 | 0,3 | 71,9 | 2,0 | 80,0 | 2,2 |
| C0,3R20 | 39,5 | 0,5 | 41,1 | 0,1 | 11,3 | 0,7 | 12,2 | 0,5 | 76,4 | 4,1 | 88,9 | 3,1 |
| C0,3R0F2 | 39,1 | 0,9 | 41,3 | 0,7 | 20,7 | 1,0 | 24,5 | 1,2 | 81,7 | 3,6 | 89,0 | 2,7 |
| C0,3R20F2 | 37,0 | 0,1 | 40,4 | 0,6 | 20,1 | 0,8 | 25,1 | 0,6 | 76,9 | 3,5 | 85,3 | 3,0 |

Fonte: Autor (2022)

Figura 32: Módulo de Elasticidade dos CADs

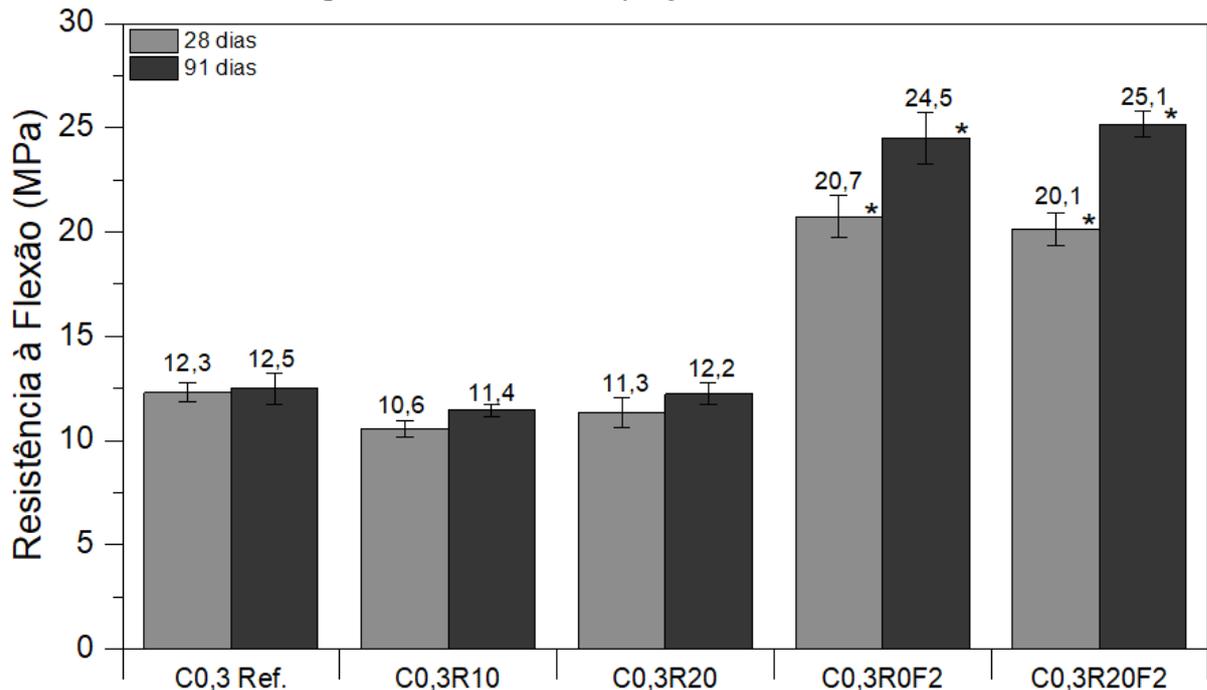


Legenda: (*) Diferença estatística significativa entre valores de 28 e 91 dias de ensaio.

Fonte: Autor (2023)

Entre os CADs, ocorreram reduções significativas do módulo de elasticidade tanto de C0,3R10 quanto C0,3R20 frente à amostra referência C0,3Ref em ambas idades de ensaio – entretanto, cabe ressaltar a superioridade estatística dos resultados de C0,3R20 frente à C0,3R10. Sobre a influência das microfibras de aço sobre a referida propriedade, a amostra C0,3R0F2 apresentou equivalência estatística de resultados frente à C0,3 Ref. – com reduções de 2,3% aos 28 e 91 dias de ensaio.

Figura 33: Resistência à tração por flexão dos CADs



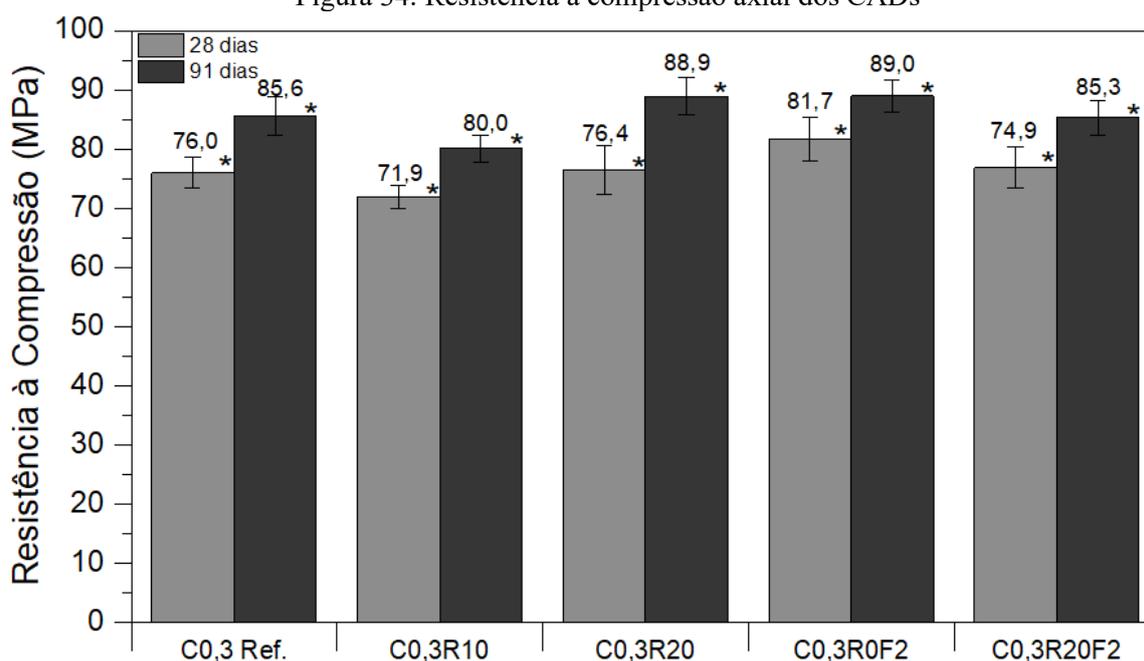
Legenda: (*) Diferença estatística significativa entre valores de 28 e 91 dias de ensaio.

Fonte: Autor (2022)

A substituição de cimento por RPP acarretou a redução significativa dos índices de resistência à tração por flexão aos 28 dias; no entanto, tanto C0,3R10 quanto C0,3R20 apresentaram valores estatisticamente semelhantes ao C0,3Ref aos 91 dias de idade (FATIMA, JHAMB e KUMAR, 2013; PATEL, ARORA e VANIYA, 2015).

Já a adição de 2% de microfibras metálicas em C0,3R0F2 resultou em crescimento significativo de 68,3% aos 28 dias e de 96% aos 91 dias frente aos respectivos resultados de resistência à flexão por tração de C0,3 Ref. Além disto, a composição C0,3R20F2 apresentou resistências estatisticamente similares quando comparadas com C0,3R0F2, independentemente da idade avaliada.

Figura 34: Resistência à compressão axial dos CADs



Legenda: (*) Diferença estatística significativa entre valores de 28 e 91 dias de ensaio.

Fonte: Autor (2022)

Sobre a resistência à compressão axial, a composição C0,3R10 apresentou reduções significativas de 5,4% aos 28 dias e de 6,5% aos 91 dias frente à C0,3 Ref. Em compensação, a amostra C0,3R20 obteve comportamento estatisticamente estável aos 28 dias e de crescimento aos 91 dias frente à C0,3Ref (FERRARA, 2019). Este comportamento está em concordância o observado nos ensaios de calorimetria isométrica em pasta de cimento nas quais P0,2R20 apresentou calor acumulado superior à P0,2R10 e P0,3R20 obteve calor acumulado inferior em apenas 6,5% à pasta referência P0,3Ref. (resultados normalizados em função da massa de ligante).

Sobre a introdução de 2% de microfibras de aço nos CADs, a ANOVA indicou um aumento significativo de 7,5% da resistência à compressão de C0,3R0F2 frente à C0,3Ref. aos 28 dias de ensaio; esta diferença, entretanto, deixou de existir nos ensaios realizados aos 91 dias. Sobre a composição C0,3R20F2, foi observado decréscimo significativo no índice de resistência à compressão em relação ao C0,3R0F2 aos 28 dias; entretanto, cabe ressaltar que aos 91 dias, ambas referidas composições não apresentaram diferenças significativas de acordo com a ANOVA.

O tempo de cura – crescimento dos valores entre os períodos de 28 e 91 dias – apresentou-se como fator influenciador no crescimento significativo dos valores de módulo de elasticidade e resistência à compressão dos CADs. Esta análise pode indicar melhorias na hidratação das matrizes cimentícias em idades avançadas, além da atuação do RPP como MCS

com reatividade pozolânica tardia. Sobre o ensaio de resistência à tração por flexão, as composições C0,3Ref., C0,3R10 e C0,3R20 apresentaram crescimentos inexpressivos entre os dois tempos de cura definidos; em contrapartida, C0,3R0F2 e C0,3R20F2 obtiveram resultados de crescimento semelhantes e significativos de acordo em função do tempo de cura. Estes resultados sugerem melhorias nos produtos de hidratação próximos às zonas de transição matriz-fibras, aumentando assim a energia necessária para romper a matriz e, em seguida, realizar o arrancamento das fibras, durante o processo de rompimento por flexão.

Por fim, destaca-se que o C0,3R20 apresentou aos 28 dias resultados de compressão axial e módulo de elasticidade estatisticamente equivalentes ao C0,3Ref. Além disto, a composição C0,3R20 apresentou, aos 91 dias, módulos de elasticidade e resistências à compressão equivalentes ao C0,3R0F2, permanecendo como único diferencial entre as referidas composições o excepcional resultado obtido pela composição C0,3R0F2 na resistência à tração por flexão. Em contrapartida, em havendo a necessidade de obtenção de níveis superiores de resistência à tração por flexão por questões de projeto, ainda assim, poder-se-ia adotar o RPP como MCS como apresentado na composição C0,3R20F2, uma vez que esta não apresentou prejuízo algum frente à sua composição referência, C0,3R0F2.

4.2.2.3 Índice de intensidade de cimento e ligante em função da resistência à compressão

Os índices de intensidade do cimento e do ligante apresentados na Tabela 17 a seguir avaliam o consumo de cimento/ligante por m³ necessário para obtenção de 1 MPa de resistência à compressão:

Tabela 16: IIC e IIL em função da resistência à compressão axial

| Composições | Consumo de cimento (kg/m ³) | Índice de Intensidade de Cimento | | Consumo de Ligante (kg/m ³) | Índice de intensidade do Ligante | |
|-------------|---|--|--|---|--|--|
| | | 28 dias (kg.m ⁻³ .MPa ⁻¹) | 91 dias (kg.m ⁻³ .MPa ⁻¹) | | 28 dias (kg.m ⁻³ .MPa ⁻¹) | 91 dias (kg.m ⁻³ .MPa ⁻¹) |
| C0,2Ref. | 974,4 | 9,8 | 9,0 | 974,4 | 9,8 | 9,0 |
| C0,2R10 | 869,9 | 9,1 | 8,0 | 966,6 | 10,1 | 8,9 |
| C0,2R20 | 767,1 | 7,9 | 6,4 | 958,9 | 9,8 | 8,0 |
| C0,2R0F1 | 964,7 | 9,0 | 8,0 | 964,7 | 9,0 | 8,0 |
| C0,2R20F1 | 759,5 | 6,9 | 6,3 | 949,4 | 8,6 | 7,9 |
| C0,2R0F2 | 955,2 | 7,9 | 7,6 | 955,2 | 7,9 | 7,6 |
| C0,2R20F2 | 752,1 | 6,5 | 5,4 | 940,1 | 8,1 | 6,8 |
| C0,3Ref. | 904,4 | 11,9 | 10,6 | 904,4 | 11,9 | 10,6 |
| C0,3R10 | 807,9 | 11,2 | 10,1 | 897,7 | 12,5 | 11,2 |
| C0,3R20 | 712,5 | 9,3 | 8,0 | 890,7 | 11,7 | 10,0 |
| C0,3R0F2 | 886,6 | 10,9 | 10,0 | 886,6 | 10,9 | 10,0 |
| C0,3R20F2 | 698,9 | 9,3 | 8,2 | 873,6 | 11,7 | 10,2 |

Fonte: Autor (2022)

Pode-se destacar que a redução percentual do IIC proveniente da substituição de cimento por RPP entre CUADS e CADs foi muito semelhante em ambas as idades avaliadas, sofrendo reduções entre 6-7% e 15-18% nas amostras C0,2R10 e C0,3R10 e entre 20-22% e 33-34% nas amostras C0,2R20 e C0,3R20. Entretanto, apesar das reduções nos IIC serem semelhantes, os índices das amostras referências – 9,8 e 11,9 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$ aos 28 dias, para C0,2Ref. e C0,3Ref., respectivamente – são distantes entre si, sendo os CUADs aqueles que apresentam maior eficiência no que tange à resistência à compressão axial em função da sua alta compactidade e percentuais de porosidade inferiores, quando comparados aos CADs (DAMINELI, *et al.* 2010).

Entre os concretos contendo microfibras, os CUADs apresentaram maiores reduções percentuais de IIC quando comparados aos CADs; este comportamento também foi observado por Roberti *et al.* (2021) uma vez que a maior retração da matriz de CUAD poderia aumentar a “coesão” entre fibra e matriz cimentícia e, assim, elevar os ganhos de desempenho mecânico dos CUADs frente aos CADs.

Os resultados obtidos em cada um dos ensaios de resistência à compressão axial aos 28 e 91 foram plotados nas Figuras 34 e 35 a seguir:

Figura 35: Relação IIC x Resistência à compressão das amostras sem microfibras

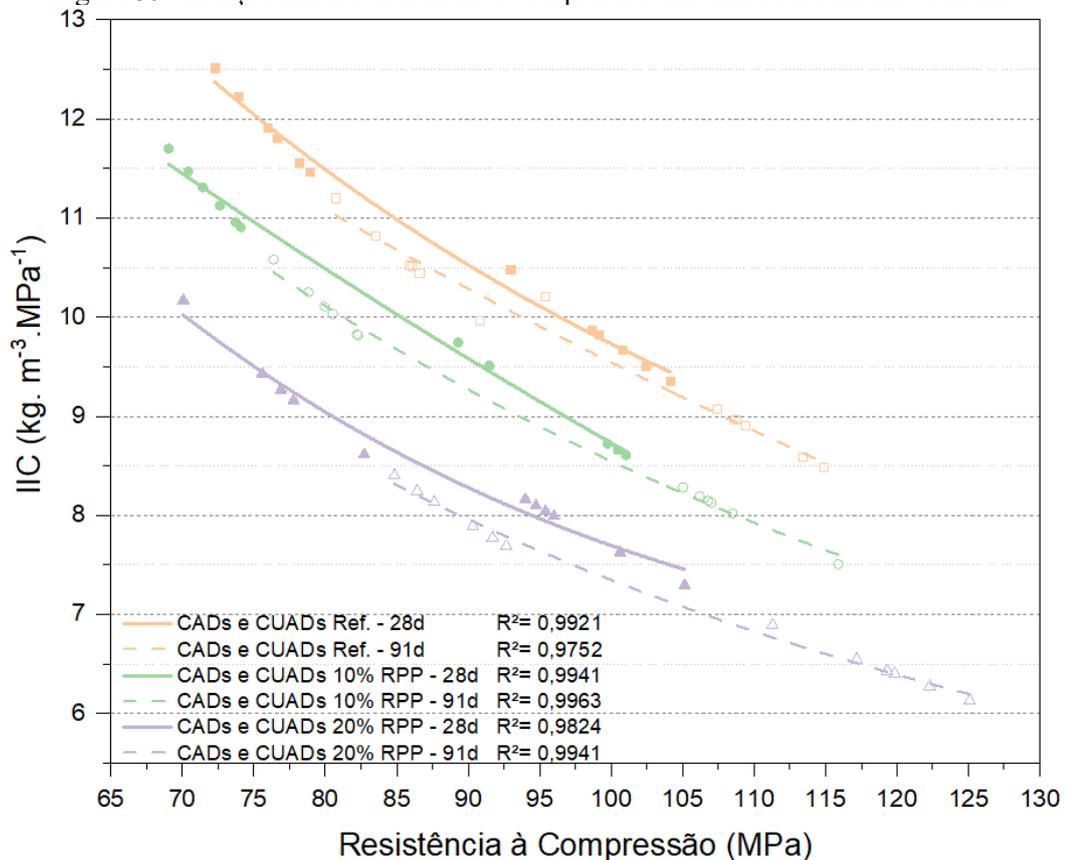
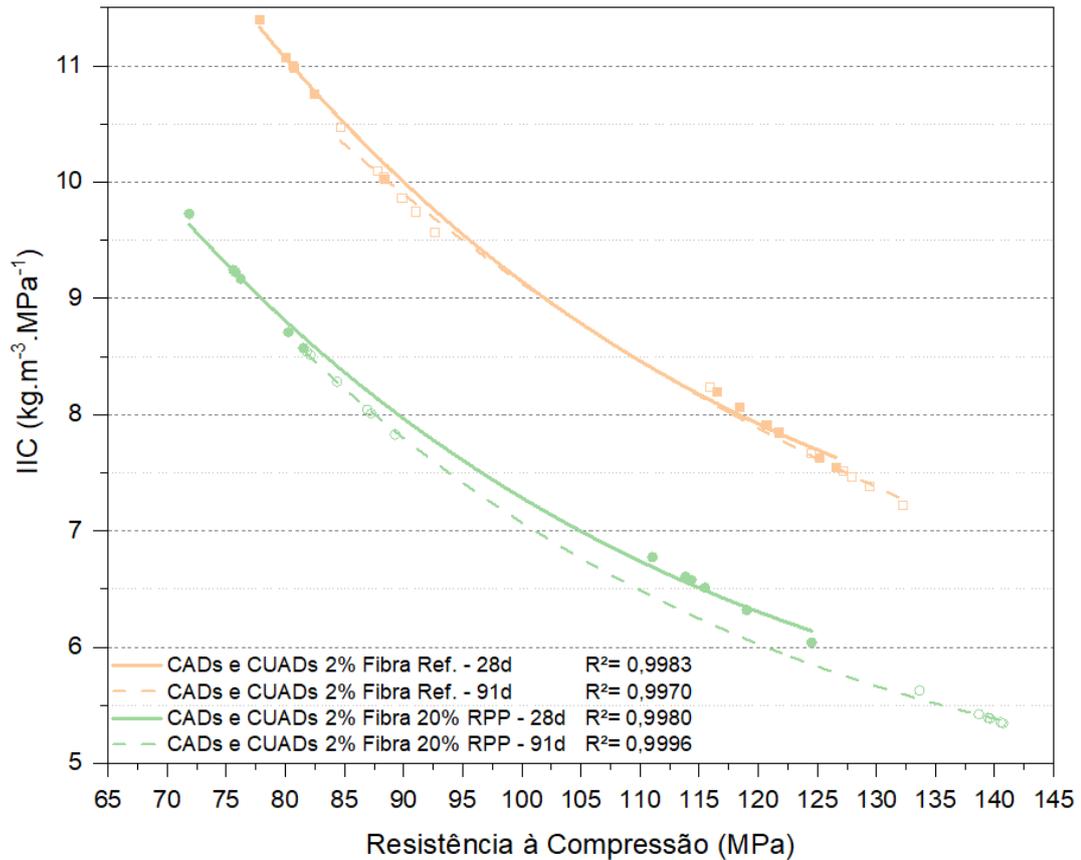


Figura 36: Relação IIC x Resistência à compressão das amostras com microfibras



Sobre os IIL, a introdução do RPP apresentou aos 28 dias crescimento nos CADs e estabilidade nos CUADs; isto indicaria uma maior eficiência do MCS no aumento da resistência axial em baixíssimas relações a/agl. Quanto aos IIL aos 91 dias, a introdução do RPP apresentou estabilidade nos CADs e redução no CUADs quando comparados às suas respectivas amostras referências, com as melhores eficiências obtidas pelas composições com 20% de RPP.

Diante dos resultados apresentados na Tabela 17 e nas Figuras 34 e 35, conclui-se que o RPP auxiliou a confecção de concretos mais ecoeficientes ao auxiliarem a obtenção de níveis inferiores de IIC e de IIL, principalmente em idades avançadas. As microfibras de aço, por sua vez, apresentaram forte influência sobre os IIC/IIL, com reduções potencializadas principalmente nos CUADs, uma vez que a baixíssima porosidade destes concretos aumenta a fricção matriz/fibra e disto decorrem aumentos de resistência à compressão axial.

4.2.3 Conclusões parciais dos ensaios em CADs e CUADs

Diante dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos concretos no estado fresco e das suas propriedades mecânicas, pode-se tecer algumas conclusões parciais:

- A substituição do cimento por RPP gerou tendência de redução gradativa nos teores de ar incorporado no estado fresco dos concretos, sendo os menores teores observados nos CUADs; em contrapartida, a adição de microfibras de aço acarretou aumentos nos teores de ar incorporado nos concretos frescos, ocorrendo em maior medida nos CADs.
- As ANOVA dos resultados de módulos de elasticidade verificaram que:
 - Aos 28 dias, a introdução do RPP reduz significativamente os resultados, enquanto aos 91 dias a diferença deixa de ser significativa;
 - Aos 28 dias e 91 dias, as microfibras metálicas não interferem significativamente nos resultados de módulo de elasticidade frente à amostra referência;
 - Houve crescimento significativo dos módulos de elasticidade entre os ensaios de 28 e 91 dias, tanto de amostras contendo teores de RPP quanto de microfibras metálicas.
- As ANOVA dos resultados de resistência à flexão por tração verificaram que:
 - Aos 28 e 91 dias, a introdução do RPP reduziu significativamente os resultados de resistência à flexão por tração frente às amostras referências de CADs e CUADs;
 - A introdução de 1% de microfibras metálicas nos CUADs não interferiu significativamente nos resultados de resistência à flexão por tração, independentemente da idade ensaiada. Já as composições de CADs e CUADs contendo 2% de microfibras de aço apresentaram crescimentos significativos tanto aos 28 e 91 dias frente às suas composições referências.
 - O tempo de cura (de 28 a 91 dias) influenciou significativamente apenas C0,2Ref, C0,2R20 e C0,2R20F1 entre os CUADs e C0,3R0F2 e C0,3R20F2, entre os CADs.

- As ANOVA dos resultados de resistência à compressão axial verificaram que:
 - Aos 28 dias, a introdução do RPP nos CUADs não resultou em diferença significativa da amostra referência. Já aos 91 dias, C0,2R20 apresentou crescimento estatisticamente significativo frente à C0,2Ref. Em relação aos CADs, C0,3R10 apresentou aos 28 e 91 dias, redução significativa frente à sua amostra referência. Já C0,3R20 apresentou estabilidade de valores frente à C0,3Ref, independentemente do tempo de ensaio.
 - A introdução de microfibras metálicas nos CUADs resultou em crescimentos significativos nos resultados de resistência à compressão axial, independentemente do tempo de ensaio ou do teor adicionado. Já as composições de CADs contendo 2% de microfibras de aço apresentaram crescimentos significativos apenas aos 28 dias, uma vez que C0,3Ref obteve, aos 91 dias de ensaio, resistências à compressão estatisticamente equivalentes à C0,3R0F2.
 - O tempo de cura (de 28 a 91 dias) influenciou significativamente praticamente todas as amostras de CADs e CUADs testadas - apenas C0,2R0F2 não apresentou crescimento estatisticamente significativo entre os tempos de ensaio. Dentre todos os resultados, os maiores crescimentos registrados foram das composições C0,2R20 (22%), C0,2R20F2 (19%) e de C0,3R20 (16,4%), com todos contendo teores de 20% de RPP, indicando uma forte reatividade pozolânica em idades avançadas.

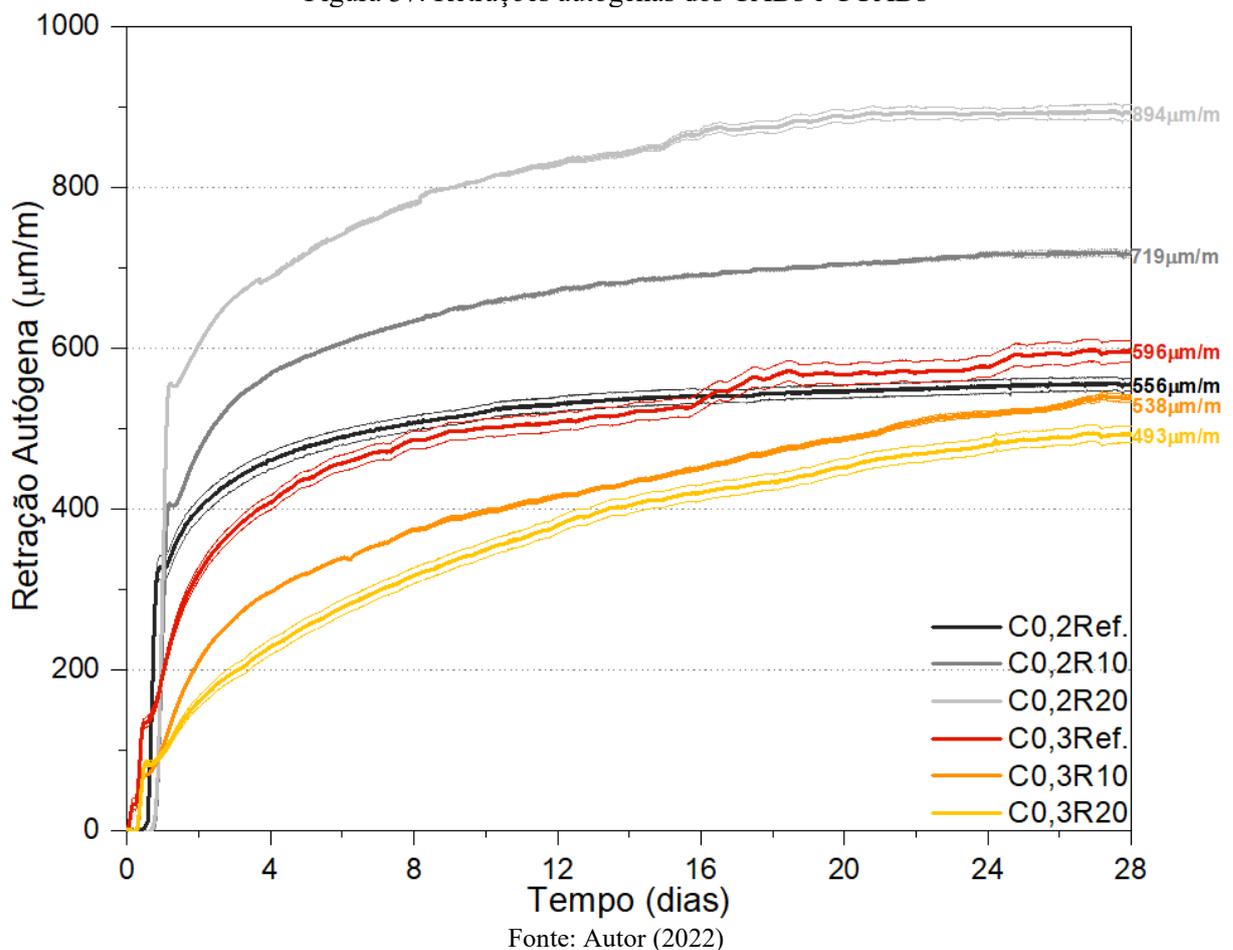
4.3 RETRAÇÃO AUTÓGENA

Conforme metodologia apresentada no item 3.4.4 deste trabalho, foram realizadas medições dos valores de retração autógena provenientes das composições de CADs e CUADs definidas anteriormente a fim de avaliar a influência do RPP e das microfibras de aço na mitigação deste tipo de retração. Com os resultados em mãos foi possível observar uma tendência global de redução na retração autógena a partir do aumento do teor de microfibras de aço nas amostras. No entanto, a substituição de cimento por RPP em CADs e em CUADs apresentaram tendências de influências díspares entre si, necessitando análise e justificativas aprofundadas.

4.3.1 Influência do RPP na Retração Autógena de CADs e CUADs

A Figura 36 a seguir apresenta o comportamento de retração autógena de CADs e CUADs referências e com teores de substituição, em massa, de cimento por RPP de 10% e 20%.

Figura 37: Retrações autógenas dos CADs e CUADs



O primeiro ponto a ser destacado dentre os resultados foram os valores de retração autógena obtidos por C0,2Ref e C0,3Ref. Esperava-se que o CUAD referência (C0,2Ref) apresentasse resultados superiores ao CAD referência (C0,3Ref) em função de sua menor relação a/c e do volume inferior de água por metro cúbico – 194 vs. 270 L/m³, respectivamente. Entretanto o que se observou foi a superioridade de 7,2% do valor da retração total aos 28 dias de C0,3Ref. frente à C0,2Ref – 596 µm/m e 556 µm/m, respectivamente. A fim de justificar este comportamento entre concretos de classes de resistência distintos, deve-se levar em consideração três fatores: **a)** o consumo de cimento por m³ entre as referidas composições referências apresentam redução de apenas 7% - de 970 kg/m³ para 902 kg/m³ - em concretos com alta relação cimento:areia (1:1,25 em massa); **b)** as diferentes relações a/agl resultaram em volumes de pasta de cimento do C0,2Ref inferior ao C0,3Ref – 528,9 L/m³ e 565,7 L/m³, respectivamente. Além disto, ao calcular a retração autógena aos 28 dias por volume de pasta de cimento por metro cúbico (µm/m/(L/m³)) ambas amostras referências apresentaram o mesmo resultado (1,05 µm/m/(L/m³)), demonstrando uma igualdade de comportamentos de retração autógena em função do volume de pasta de cimento; e **c)** o elevado teor de aditivo superplastificante presente nas composições de CUADs frente ao teor adicionado nos CADs (2,8% e 0,5%, respectivamente). Conforme discutido no item 2.2.1.4 deste trabalho, estudos de caso como de Li, Yu e Brouwers (2017) e de Tazawa e Miyazawa (1995) observaram que o aumento expressivo de teores de aditivos superplastificantes de policarboxilato em CUADs e CADs, respectivamente, tendem a reduzir expressivamente a retração autógena. Portanto, fica prejudicada uma possível comparação entre retrações autógenas obtidas por classes de resistência distintas; entretanto, isto não invalida a análise independente da influência do RPP nos CADs e CUADs.

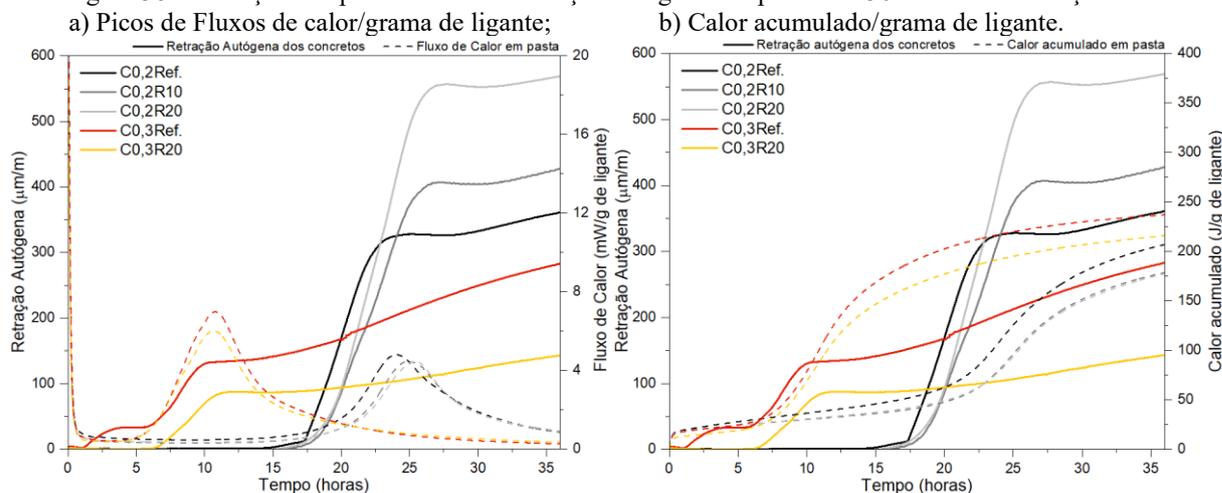
Ultrapassada esta primeira questão, cabe avaliar de fato qual foi o comportamento observado nos CADs e CUADs contendo RPP. Ao observarmos a Figura 36, percebe-se nos CADs o comportamento já anteriormente verificado em estudos similares (STEINER *et al.*, 2015 e FERRARA *et al.*, 2019) onde a substituição de cimento por RPP resultou em redução da retração autógena. As composições C0,3R10 e C0,3R20 apresentaram, respectivamente, reduções percentuais de 9,7% e 17,3% sobre a retração autógena do CAD referência (C0,3Ref.) aos 28 dias. Esta redução pode ser justificada pela redução do teor de cimento nestes compósitos – acarretando, assim, em uma menor autodessecação nas primeiras idades destes concretos. Além disto, o ensaio de absorção de água indicou um aumento da porosidade permeável nas

amostras contendo teores de RPP, o que resultaria em reduções nas pressões capilares dos concretos desta relação a/agl.

Em contrapartida, Ghafari *et al.* (2016) observou em CUADs com distintos MCS forte correlação entre o refinamento do sistema poroso e o aumento da retração autógena. Um maior volume de poros finos, decorrente da introdução de determinados MCS de elevada reatividade, acarretaria num aumento da pressão capilar induzida pela formação de meniscos gerados pela escassa água livre presente na matriz cimentícia dos CUADs. Assim, o conjunto destes meniscos, apresenta uma contração volumétrica (retração autógena) tão maior quanto a pressão capilar induzida pelo tamanho médio dos poros. Diante disto, é importante ressaltar os resultados obtidos no ensaio de absorção de água em pastas de cimento de relação a/agl 0,30 que indicaram resultados opostos e, ao mesmo tempo, coerentes com a correlação de Ghafari *et al.* (2016). A substituição de cimento por RPP nesta relação a/agl resultou em aumentos significativos das relações a/c, provocando, conseqüentemente, o aumento da absorção de água e do percentual de vazios permeáveis das pastas, o que se refletiu nas reduções dos valores de retração autógena observadas nos CADs.

As Figuras 37 apresentadas a seguir correlacionam as primeiras 36 horas de retração autógena dos concretos ($\mu\text{m}/\text{m}$) e as curvas de fluxo de calor (mW/g de ligante) e de calor acumulado (J/g de ligante) das pastas de cimento ensaiadas no item 4.1.1. Das referidas figuras pode-se observar semelhanças entre os tempos de aceleração e desaceleração dos picos de ambos ensaios. Isto indica, em conformidade com os estudos de Balthar (2004) e Tavares (2008) introduzido na Figura 2, que a primeira etapa da retração autógena ocorre durante o estado fresco, após o fim do período de indução, apresentando, posteriormente, uma desaceleração quando o fluxo de calor chega ao seu valor máximo.

Figura 38: Formação dos picos iniciais de retração autógena nas primeiras 36 horas de hidratação com:



Fonte: Autor (2023)

Ao comparar os resultados dos ensaios de retração autógena dos concretos e de calorimetria isométrica em pastas de cimento, restou verificada como mais coerente a análise dos resultados normalizados por grama de ligante total. Sendo assim, observou-se entre os CADs que a introdução do RPP gerou reduções tanto no pico máximo de fluxo de calor por grama de cimento (6,98 e 6,01 mW/g de cimento para P0,3Ref. e P0,3R20, respectivamente) quanto no calor acumulado por grama de cimento após 72 horas (256,9 e 241,3 J/g de cimento para P0,3Ref. e P0,3R20, respectivamente). Isto corrobora com a redução dos valores de retração autógena de C0,3R20 frente à C0,3Ref., tanto em relação aos picos iniciais das primeiras horas de hidratação quanto em relação os valores finais de retração medidos aos 28 dias. Além disto, a redução percentual entre os fluxos de calor máximo por massa de ligante é semelhante à redução das intensidades entre os picos iniciais de retração autógena de C0,3R20 frente à C0,3Ref. – em torno de 14% – conforme descrito na Tabela 18. Estes comportamentos semelhantes corroboram a tese de que a redução do calor de hidratação ocorrida nos CADs foi determinante para a redução dos valores de retração autógena.

Em contrapartida, a substituição de cimento por teores de RPP nos CUADs gerou expressivos aumentos dos valores de retração autógena. As amostras C0,2R10 (719 $\mu\text{m}/\text{m}$) e C0,2R20 (894 $\mu\text{m}/\text{m}$) apresentaram, ao fim do período de medição, aumentos percentuais de 29,3% e 60,8% frente à amostra C0,2Ref. (556 $\mu\text{m}/\text{m}$). A partir disto, serão apresentadas a seguir algumas hipóteses para a ocorrência desta completa reversão de comportamentos da retração autógena entre CADs e CUADs contendo RPP.

Assim como os CADs, os CUADs não apresentam em sua composição água suficiente para hidratar 100% de suas partículas de cimento; no entanto, além de sofrerem inatamente de intenso processo de autodessecação, apresentam porosidade totais e tamanho médio dos poros muito reduzidos, elevando em muito a pressão capilar. A partir deste cenário, a substituição, em massa, do cimento por um resíduo com massa específica inferior (3,10 g/cm^3 e 2,48 g/cm^3 , respectivamente), resultou em composições com um maior volume de partículas. Com isso, características físicas do resíduo, como o tamanho de partículas inferior (D_{50} 28% inferior) e a área superficial específica 172% superior à do cimento adotado, podem ter melhorado o empacotamento das partículas e contribuído para a ocorrência da nucleação heterogênea gerando novos locais para a precipitação de produtos hidratados.

Além disto, o aumento da relação a/c dos CUADs, em função da substituição de cimento por RPP (de 0,20 para 0,22 e 0,25, de C0,2Ref, C0,2R10 e C0,2R20, respectivamente),

reduziu a absorção de água e o volume de vazios permeáveis presentes nas respectivas pastas de cimento. Sugere-se a hipótese que a maior quantidade de água disponível por grama de cimento gerou matrizes cimentícias com maior grau de hidratação; isto foi demonstrado pela superioridade dos valores de fluxo de calor e de calor acumulado de P0,2R20 frente à P0,2Ref pela manutenção dos percentuais de AQC nos ensaios de TG e também através da manutenção das resistências à compressão das amostras de CUAD contendo o resíduo. Estes fatos em conjunto com a redução da porosidade permeável das amostras de P0,2R10 e P,0,2R20 justificariam o aumento da pressão capilar dos CUAD contendo RPP.

Conforme apresentado na Tabela 18, os primeiros picos de crescimento linear da retração autógena dos CUADs ocorrem após, em média, 17 horas do início das medições. O término deste pico de “retração primária” é facilmente identificável graças a uma desaceleração do crescimento seguida de um patamar, conforme destacado nas Figuras 37a e 37b. Este curto período de intenso crescimento linear da retração autógena e sua desaceleração coincidem com os tempos de aceleração e de ponto máximo das curvas de fluxo de calor obtidas no ensaio de calorimetria isométrica, indicando uma convergência entre ambos comportamentos.

Ao término deste período inicial de intensa retração autógena, todos os CUADs iniciaram uma lenta tendência de crescimento até atingirem a estabilização; além disto, estes picos iniciais estabeleceram três patamares facilmente distinguíveis de retração autógena que se mantiveram estáveis até o fim do período de ensaio. A Tabela 18 a seguir apresenta informações relevantes observadas durante o tratamento dos dados de retração autógena entre as composições de CADs e CUADs:

Tabela 17: Caracterização dos picos iniciais de retração autógena de CUADs e CADs

| Composição | Início do pico inicial | | Fim do pico inicial | | Variação do pico inicial* | Retração 28d (µm/m) | Variação 28d (%) | Retração pico inicial/ 28d (%) | Tempo p/ 95% (dias) |
|------------------|------------------------|-----------------|---------------------|-----------------|---------------------------|---------------------|------------------|--------------------------------|---------------------|
| | Tempo (h:m) | Retração (µm/m) | Tempo (h:m) | Retração (µm/m) | | | | | |
| C0,2 Ref. | 16:16 | 8 | 24:27 | 327 | 100% | 556 | 100% | 57% | 10,4 |
| C0,2R10 | 17:00 | 4 | 27:00 | 407 | 126% | 719 | 129% | 56% | 13,1 |
| C0,2R20 | 16:57 | 8 | 27:33 | 556 | 172% | 894 | 161% | 61% | 14,2 |
| C0,3 Ref. | 5:43 | 33 | 10:28 | 132 | 100% | 596 | 100% | 16% | 17,4 |
| C0,3R10 | 5:38 | -8 | 10:48 | 69 | 79% | 538 | 90% | 14% | 21,1 |
| C0,3R20 | 6:14 | 2 | 11:34 | 87 | 87% | 493 | 83% | 17% | 21,5 |

*em relação à retração autógena da respectiva composição referência.

Fonte: Autor (2022)

Com base na análise dos dados apresentados na Tabela 18, pode-se destacar que os picos iniciais de retração de C0,2R10 e C0,2R20 apresentaram aumentos percentuais de 26% e 72% frente ao pico inicial de C0,2Ref; sendo estes crescimentos percentuais semelhantes

àqueles observados ao final dos 28 dias de ensaio – onde C0,2R10 e C0,2R20 superaram em 29% e 61%, respectivamente, a retração autógena de C0,2Ref.

Além disto, as retrações registradas após os picos iniciais de retração autógena de C0,2Ref., C0,2R10 e C0,2R20 representaram, respectivamente, 57%, 56% e 61% da retração autógena medida aos 28 dias. Isto demonstra que, entre os CUADs a formação dos patamares de retração autógena tende a ser definida pela intensidade do crescimento deste pico de retração ocorrido as primeiras horas de hidratação do cimento. Em contrapartida, esta mesma tendência não foi visualizada entre os CADs, onde os picos iniciais apresentaram crescimentos muito inferiores e com valores menos representativos frente aos seus respectivos valores de retração autógena após 28 dias.

Ao analisarmos outros estudos que utilizaram cimentos com teores semelhantes de Al_2O_3 , Fe_2O_3 e SO_3 , como Matos *et al.* (2021) e Jansen *et al.* (2018), também pode-se levantar a hipótese de que uma possível razão para a referida intensidade dos picos iniciais de retração autógena de CADs e CUADs poderia ser em função da grande formação de etringita ocorrida nas primeiras horas de hidratação do cimento. Apesar desta reação química ter características expansivas, ela também consome grande quantidade de água (26 moléculas de água) resultando em intenso aumento da autodessecação (MEHTA e MONTEIRO, 2014). E por esta razão os picos iniciais dos CUADs seriam muito mais intensos que os de CAD, uma vez que apresentam quantidade reduzida de água disponível, sendo mais intensamente afetados pela autodessecação adicional provocada pela produção de etringita. Ocorre que em função da falta de ensaios de DRX nas pastas de cimento em diferentes idades (realizado apenas aos 28 dias), não pôde-se verificar o desenvolvimento da fase de etringita com o passar da idade das pastas.

Também merece destaque o fato de que a amostra C0,2R20 apresentou após o seu pico de retração inicial – decorridas, aproximadamente, 27 horas de ensaio – o mesmo valor de retração autógena da composição C0,2Ref. após 28 dias (556 $\mu\text{m}/\text{m}$). Este resultado coloca em perspectiva o nível do aumento da retração autógena percebida nos CUADs em função da substituição de cimento por RPP. Uma hipótese para o crescimento dos picos iniciais de retração seria relacionada ao aumento da relação a/c ocorrida em C0,2R10 e C0,2R20; esta provocaria uma maior produção de etringita por grama de cimento frente à composição C0,2Ref. E em função da já citada grande quantidade de água exigida por esta reação química expansiva, decorreria um intenso aumento da autodessecação destas matrizes já nas primeiras horas de hidratação com um conseqüente aumento dos picos iniciais de retração autógena das amostras contendo RPP.

A Tabela 18 também apresenta em sua última coluna o tempo necessário para cada amostra obter 95% da sua retração autógena final, referente a 28 dias, caracterizando assim uma estabilidade dimensional. O que se verificou foi que, a partir da substituição de cimento por RPP (seja de CADs ou CUADs), foi necessário um maior tempo para a estabilização dos valores de retração autógena. Entre os CUADs, os períodos para estabilização aumentaram de 10,4 dias para 13,1 e 14,2 dias (C0,2Ref, C0,2R10 e C0,2R20, respectivamente) e entre os CADs de 17,4 para 21,1 e 21,5 dias (C0,3Ref, C,3R10 e C0,3R20, respectivamente). O prolongamento do período de retração autógena seria consequência do aumento das relações a/c relativa, que resultam em partículas de cimento sendo hidratadas durante um maior período de tempo.

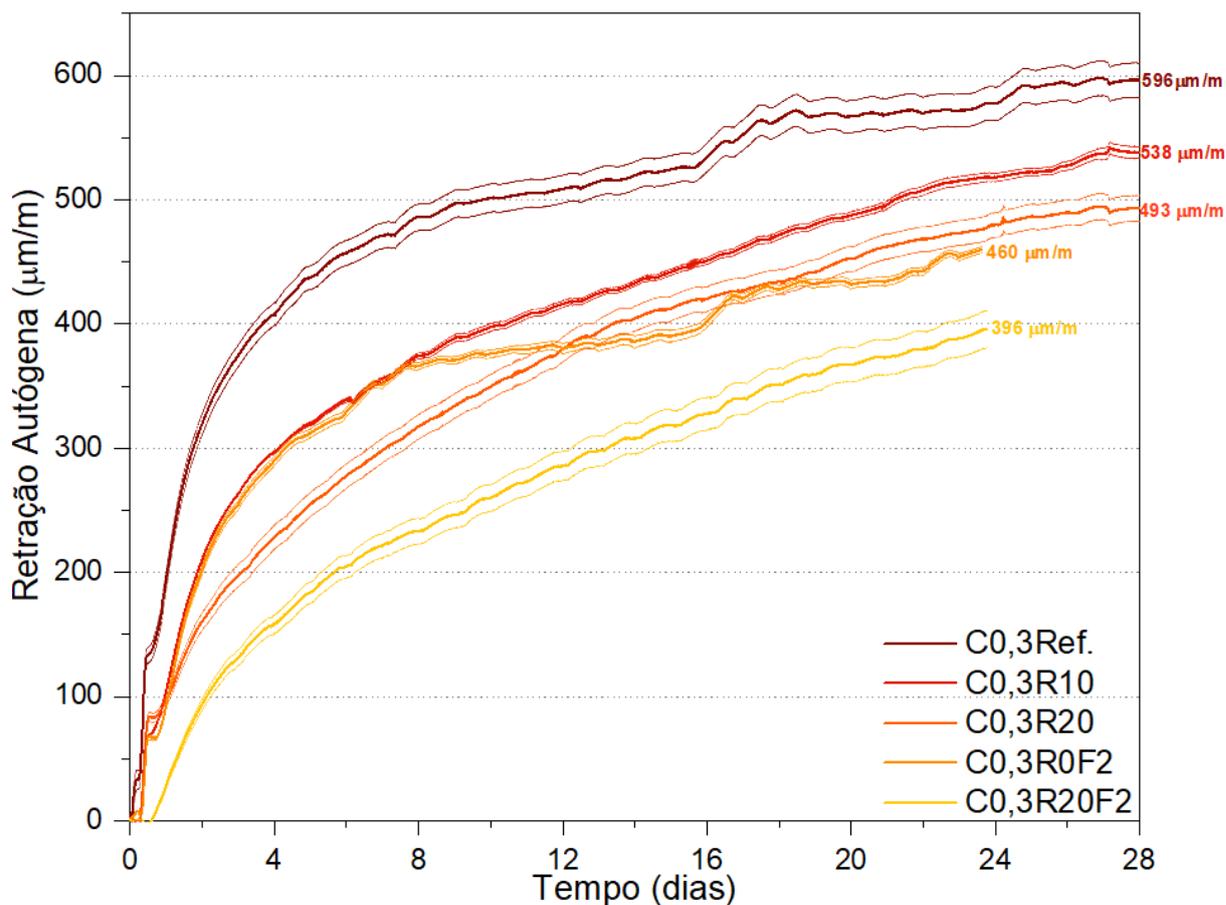
Outro fator que concorreria para o aumento da pressão capilar nos CUADs com teores de RPP foi o refinamento dos poros percebido no ensaio de absorção de água realizado em pastas de cimento. As amostras P0,2Ref., P0,2R10 e P0,2R20 apresentaram reduções no volume de vazios permeáveis – 6,5%, 6,4% e 5,3%, respectivamente – indicando um refinamento da estrutura porosa e fechamento de poros abertos. Desta forma, a substituição do cimento por RPP nos CUADs apresentou comportamento semelhante aos MCS testados por Ghafari *et al.* (2016), validando novamente a correlação entre o aumento do volume de poros finos e o aumento da retração autógena.

As diferenças entre os comportamentos observados entre os percentuais de absorção de água e de volume de vazios permeáveis nas pastas de cimento de relação a/agl 0,20 e 0,30 demonstram uma dinâmica distinta de hidratação e de construção do sistema poroso microestrutural. O desenvolvimento dos níveis de porosidade observado nos ensaios em pasta de cimento foram importantes indicativos sobre os distintos comportamentos observados entre as retrações autógenas de ambas as classes de resistência contendo RPP.

4.3.2 Influência das microfibras de aço na Retração Autógena

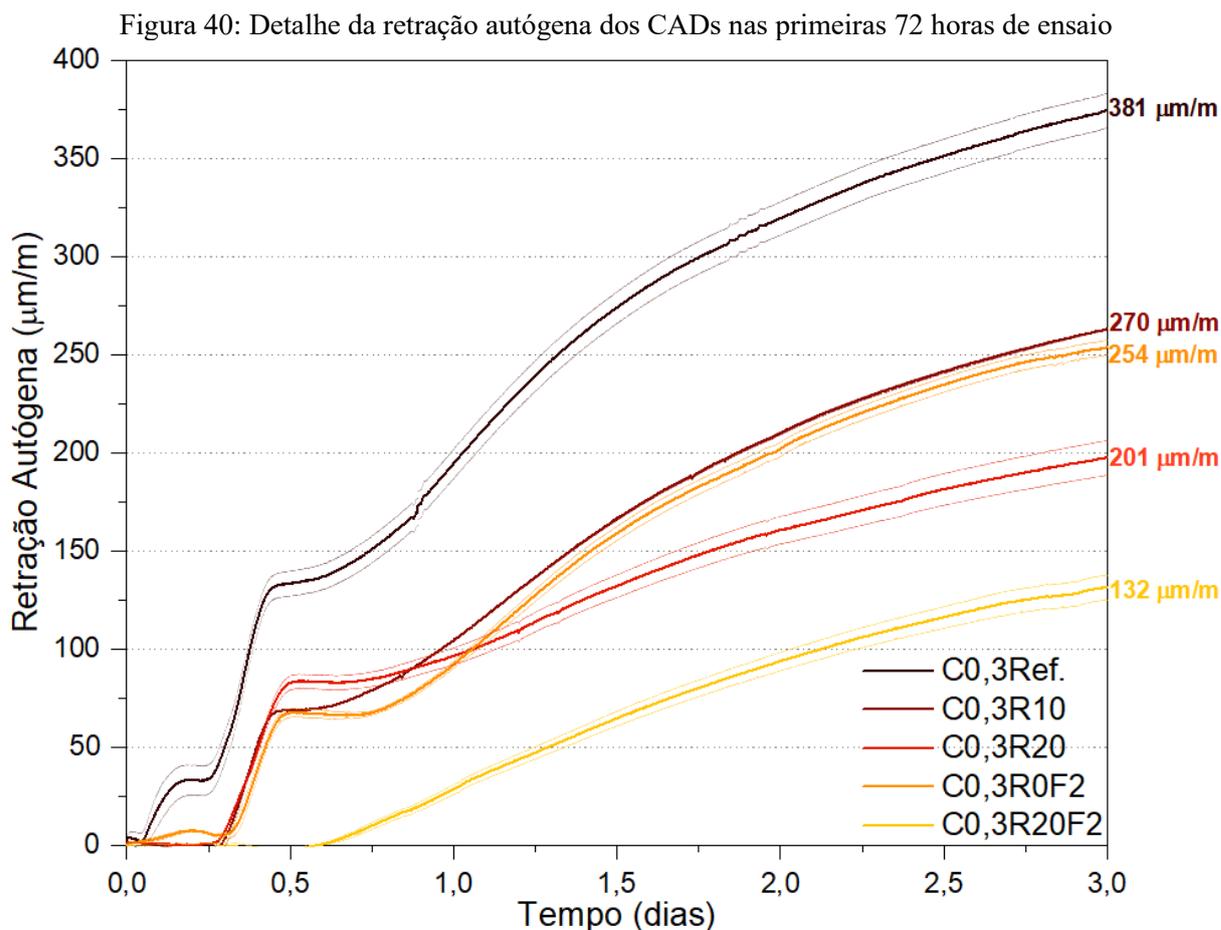
Os próximos resultados a serem apresentados e discutidos dizem respeito da influência das microfibras metálicas na mitigação retração autógena dos CADs e CUADs. Os resultados de CADs e CUADs serão apresentados separadamente a fim de distinguir os comportamentos entre ambos. Em função de limitações operacionais, os ensaios das amostras de CAD e CUAD contendo microfibras de aço foram interrompidos aos 24 e 21 dias, respectivamente. A Figura 38 a seguir apresenta os resultados das retrações autógenas obtidas nas composições de CAD:

Figura 39: Retração autógena dos CADs com microfibras metálicas



Fonte: Autor (2022)

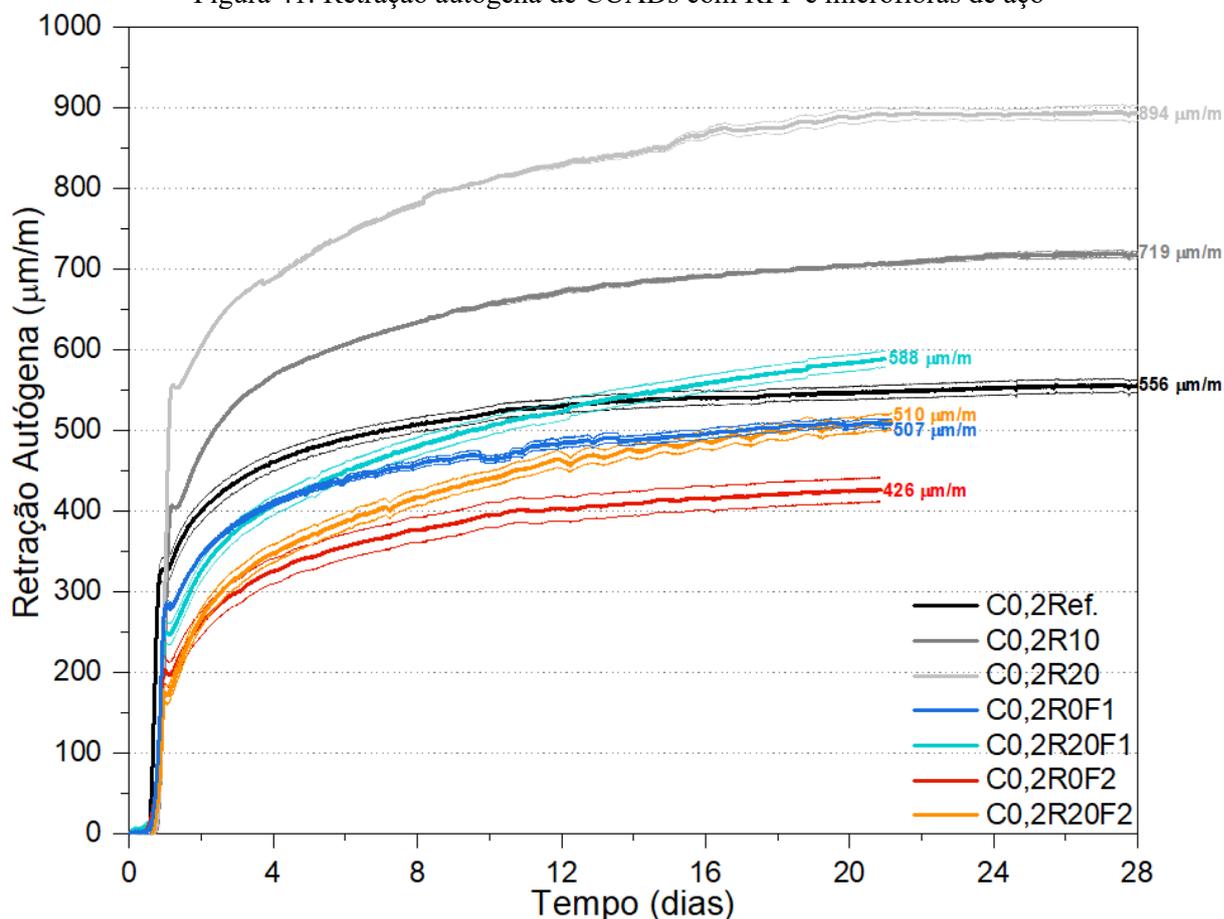
Nas medições das deformações de C0,3R0F2 e C0,3R20F2 observou-se clara tendência de redução da retração autógena em relação às suas respectivas composições referências. Por exemplo, a introdução do teor de 2% de microfibras em C0,3R0F2 reduziu a intensidade do pico inicial de retração durante as primeiras 12 horas de ensaio em 36% (99 $\mu\text{m/m}$ e 63 $\mu\text{m/m}$ para C0,3Ref. e C0,3R0F2, respectivamente) e a retração autógena aos 24 dias de ensaio em 21% (577 $\mu\text{m/m}$ e 459 $\mu\text{m/m}$ para C0,3Ref. e C0,3R0F2, respectivamente). Percebe-se também que durante os primeiros 8 dias de ensaio, C0,3R0F2 apresentou curva de retração muito similar à da composição C0,3R10; após este período inicial, entretanto, uma maior ativação das microfibras levou a uma tendência de estabilização, reduzindo os valores da retração autógena para um patamar 5,6% inferior aos apresentados por C0,3R20 (486 $\mu\text{m/m}$ e 459 $\mu\text{m/m}$ para C0,3R20 e C0,3R0F2, após 24 dias de ensaio).



Em relação à C0,3R20F2 – 20% de teor de RPP e 2% de microfibras metálicas – observa-se, em destaque na Figura 39, a inexistência do pico inicial de retração autóloga. Por conseguinte, o crescimento da retração autóloga iniciou após 12 horas de ensaio, coincidindo com o término do período de crescimento linear observados em todas as outras amostras. Aos 24 dias de medições, foi verificada redução de 19% entre a retração autóloga de C0,3R20 e C0,3R20F2 – 486 $\mu\text{m}/\text{m}$ e 396 $\mu\text{m}/\text{m}$, respectivamente – demonstrando o efeito positivo da microfibra de aço no combate à retração entre amostras com os mesmos teores de RPP. Ao comparar as duas composições com 2% de microfibras, C0,3R0F2 e C0,3R20F2, a substituição do cimento por RPP gerou redução de 14% na retração autóloga – 459 $\mu\text{m}/\text{m}$ e 396 $\mu\text{m}/\text{m}$, respectivamente. Por conseguinte, ocorreu nesta amostra – C0,3R20F2 – um efeito sinérgico entre o RPP e as microfibras de aço, uma vez que, por meio de diferentes métodos – redução do calor de hidratação, aumento de poros permeáveis e restrições físicas à deformação, respectivamente – auxiliaram na redução da retração autóloga nos CADs.

Em relação à influência das microfibras de aço sobre a retração autógena de diferentes composições de CUAD, os resultados verificados durante os 21 dias de ensaio estão expressos integralmente na Figura 40 a seguir:

Figura 41: Retração autógena de CUADs com RPP e microfibras de aço



Entre os CUADs, o aumento do teor de adição de microfibras de aço gerou efeitos positivos na mitigação da retração autógena: C0,2R0F1 (507 $\mu\text{m/m}$) e C0,2R0F2 (426 $\mu\text{m/m}$) registraram aos 21 dias reduções de 8% e 23,4%, respectivamente, frente à amostra C0,2Ref (556 $\mu\text{m/m}$). Este comportamento de redução progressiva da retração autógena em função do aumento do teor de microfibras foi documentado por Fang *et al.* (2020) e Roberti *et al.* (2021), uma vez que a distribuição da tensão de retração para uma maior quantidade de fibras auxilia na capacidade da matriz resistir à redução volumétrica causada pelo processo de autodessecação. Além disto, tanto C0,2R0F1 e C0,2R0F2 apresentaram, ao final dos 21 dias de ensaio, tendência de estabilização da retração autógena, em conformidade com o observado nas amostras de CUAD sem microfibras de aço.

Em relação às amostras C0,2R20F1 (588 $\mu\text{m/m}$) e C0,2R20F2 (510 $\mu\text{m/m}$), verificou-se que a substituição de teores de cimento por RPP manteve comportamento negativo no que

tange ao aumento da retração autógena, uma vez que as referidas amostras apresentaram, aos 21 dias de ensaio, valores 16% e 20% superiores às amostras C0,2R0F1 (507 $\mu\text{m/m}$) e C0,2R0F2 (426 $\mu\text{m/m}$), respectivamente. Além disto, C0,2R20F2 apresentou aos 21 dias de ensaio a mesma retração autógena de C0,2R0F1, demonstrando o efeito prejudicial do RPP em relação à referida propriedade – anulando, portanto, o efeito benéfico gerado pela inclusão de 1% de microfibras metálicas.

Entretanto, deve-se ressaltar o efeito positivo que as microfibras metálicas geraram na redução da retração autógena dos CUADs contendo teores de RPP; as amostras C0,2R20F1 e C0,2R20F2 reduziram em 54,5% e 68,3% os seus respectivos picos iniciais de retração autógena observados nas primeiras horas de hidratação frente à C0,2R20 (249,4 $\mu\text{m/m}$, 173,5 $\mu\text{m/m}$ e 548 $\mu\text{m/m}$, respectivamente). Ao final dos 21 dias de medição as respectivas composições apresentaram reduções de 34% e 43%, respectivamente, frente ao valor de retração autógena de C0,2R20. As microfibras de aço apresentaram, portanto, grande eficiência na redução da retração autógena amplificada nos CUADs pela presença do RPP.

Diferentemente das outras amostras de CUAD, tanto C0,2R20F1 quanto C0,2R20F2 não atingiram, ao fim dos seus 21 dias de ensaio, um distinto patamar de estabilidade de retração autógena. Isto se deve em função de dois fatores já discutidos: a) a presença de microfibras não reduz a pressão capilar provocada pela autodessecação da matriz, oferecendo apenas uma nova forma de restrição física ao ímpeto de deformação volumétrica; e b) como observado na Tabela 18, a substituição do cimento por RPP aumentou o tempo necessário até a estabilização da retração autógena em função da redução do calor de hidratação durante um período mais longo. Portanto, existe nas composições de CUAD, um embate entre a influência positiva das microfibras de aço - restringindo fisicamente a potencial retração volumétrica - e o efeito adverso da presença do RPP, aumentando a relação a/c e, conseqüentemente, o grau de hidratação destas amostras, e assim prolongando o período de relevância da retração autógena nestes concretos.

4.3.2.1 Índices de Intensidade do Cimento e de Ligante em função da retração autógena

Utilizando os dados coletados no ensaio de retração autógena em conjunto com os dados de consumo de cimento/ligante por metro cúbico de cada uma das composições foi possível calcular diferentes relações definidoras de eficiência tanto do cimento quanto do ligante como um todo.

A Tabela 19 apresenta os índices de intensidade do cimento (IIC) e os índices de intensidade de ligante (IIL) calculados em função dos resultados de retração autógena de cada composição. Estes coeficientes indicam o consumo de cimento/ligante necessários para obtenção de um microstrain ($\mu\text{m}/\text{m}$) de retração autógena. A fim de comparar igualmente todas as composições, entre CADs e CUADs, foram adotados os valores de retração registrados aos 21 dias de ensaio de todas as composições, inexistindo, portanto, prejuízo à análise comparativa das respectivas retrações autógenas.

Tabela 18: IIC e IIL em função da retração autógena

| Concreto | Consumo de cimento (kg/m^3) | Consumo de aglomerante (kg/m^3) | Ret. autógena aos 21d | | IIC por ret. autógena | | IIL por ret. autógena | |
|------------------|---|---|----------------------------|------|---|------|---|------|
| | | | ($\mu\text{m}/\text{m}$) | (%)* | $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot(\mu\text{m}/\text{m})^{-1}$ | (%)* | $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot(\mu\text{m}/\text{m})^{-1}$ | (%)* |
| C0,2Ref. | 974,4 | 974,4 | 548 | 100% | 1,78 | 100% | 1,78 | 100% |
| C0,2R10 | 869,9 | 966,6 | 706 | 129% | 1,23 | 69% | 1,37 | 77% |
| C0,2R20 | 767,1 | 958,9 | 892 | 163% | 0,86 | 48% | 1,08 | 60% |
| C0,2R0F1 | 964,7 | 964,7 | 507 | 92% | 1,90 | 107% | 1,90 | 107% |
| C0,2R20F1 | 759,5 | 949,4 | 588 | 107% | 1,29 | 72% | 1,61 | 91% |
| C0,2R0F2 | 955,2 | 955,2 | 426 | 78% | 2,24 | 126% | 2,24 | 126% |
| C0,2R20F2 | 752,1 | 940,1 | 510 | 93% | 1,47 | 83% | 1,84 | 103% |
| C0,3Ref. | 904,4 | 904,4 | 569 | 100% | 1,59 | 100% | 1,59 | 100% |
| C0,3R10 | 807,9 | 897,7 | 508 | 89% | 1,59 | 100% | 1,77 | 111% |
| C0,3R20 | 712,5 | 890,7 | 462 | 81% | 1,54 | 97% | 1,90 | 119% |
| C0,3R0F2 | 886,6 | 886,6 | 435 | 76% | 2,04 | 128% | 2,04 | 128% |
| C0,3R20F2 | 698,9 | 873,6 | 373 | 65% | 1,87 | 118% | 2,34 | 147% |

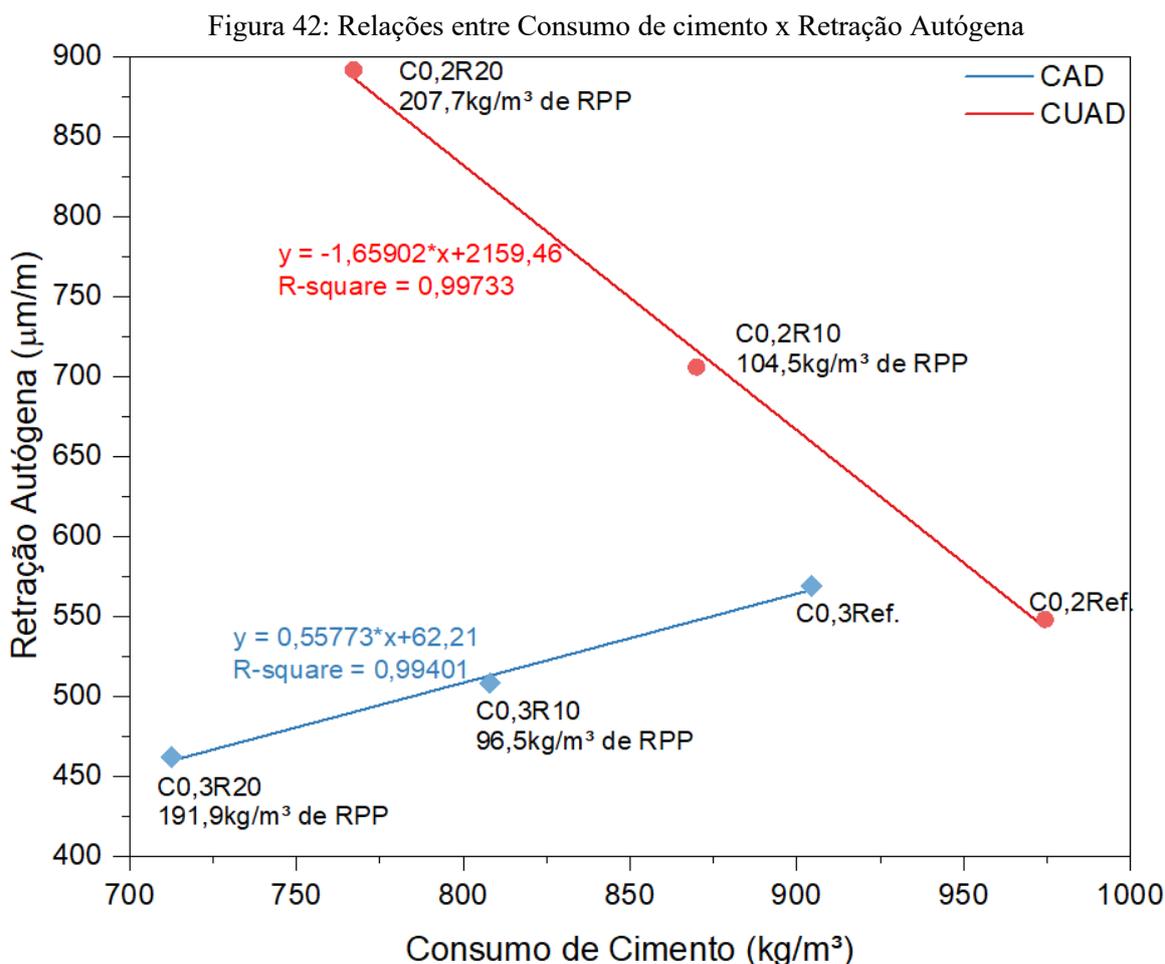
* percentual em relação à respectiva amostra referência.

Fonte: Autor (2022)

Conforme observado na Tabela 19, a introdução do RPP nos CUADs gerou intensas atenuações tanto nos IICs quanto IILs – com reduções de 31% e 23% para C0,2R10 e de 52% e 40% para C0,2R20, respectivamente – frente à C0,2Ref. Os resultados dos IIC indicam que apesar do decrescente consumo de cimento, ocorreu uma potencialização da retração autógena; além disto, as reduções dos IIL demonstraram que a adoção do RPP como MCS em CUADs prejudicou a eficiência do material ligante no controle da retração autógena. As razões para estes comportamentos foram discutidas no Item 4.3.1 deste trabalho, sendo que as referidas reduções nos IIC e de IIL corroboram as conclusões obtidas sobre os efeitos negativos do RPP na retração autógena de CUADs.

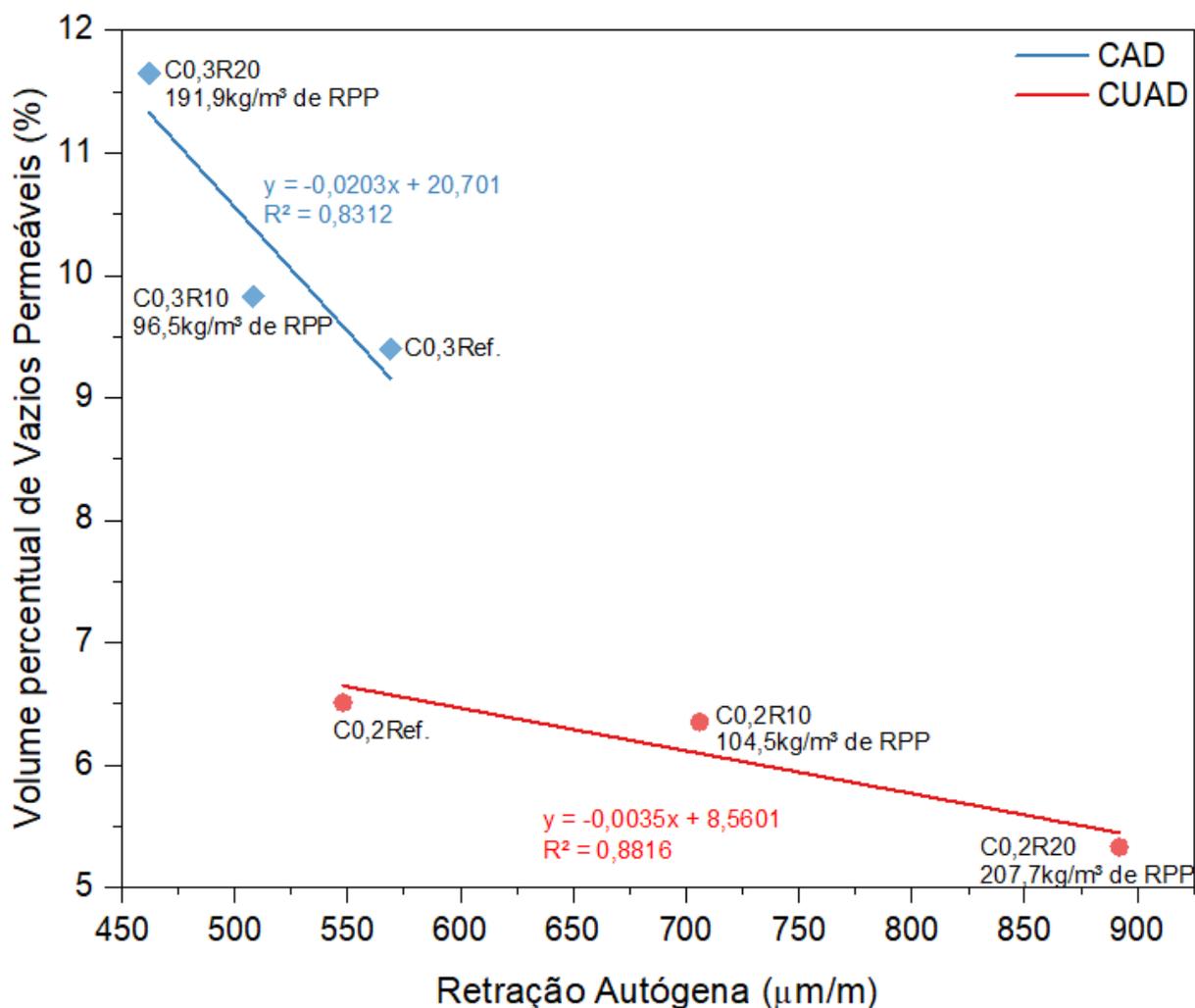
Em contrapartida, os CADs – C0,3Ref., C0,3R10 e C0,3R20 – obtiveram estabilização dos seus IIC em função da retração autógena, independentemente do teor de RPP introduzido. Este é forte indício de que a mitigação da retração autógena nos CADs ocorre primariamente em função do efeito de dissolução do calor de hidratação do cimento; ou seja, por si só o RPP

não apresentaria efeitos majoritariamente positivos ou negativos sobre a eficiência do cimento na retração autógena dos CADs uma vez que a redução deste índice tem maior correlação com a redução do consumo de cimento na composição do concreto. Em relação aos IILs dos CADs percebe-se um crescimento gradativo dos índices de eficiência do ligante com o aumento dos teores de substituição de cimento por RPP. A Figura 41 a seguir apresenta as correlações entre as retrações autógenas e os consumos de cimento obtidos para as composições de CAD e CUAD sem microfibras:



A Figura 42 e 43 demonstram, a partir de fortes correlações lineares, os comportamentos distintos da retração autógena de CADs e CUADs em relação ao consumo de cimento e, também, a correlação inversamente proporcional entre volume percentual de vazios permeáveis obtidos nos ensaios e pasta e a retração autógena nos concretos. Estas correlações são indicativos complementares aos resultados apresentados e discutidos no subitem 4.3.1 deste trabalho, além de confirmarem, no que tange à análise dos IIC/IIL, quem são os principais agentes influenciadores da redução e aumento da retração autógena entre CADs e CUADs, respectivamente.

Figura 43: Relação entre volume de vazios permeáveis x retração autógena//



Fonte: Autor (2023)

As microfibras de aço, por sua vez, geraram aumentos expressivos nos IIC e IIL tanto entre CAD quanto CUADs. Demonstram, portanto, um papel ativo no aumento da eficiência do cimento e do ligante na redução da retração autógena, independentemente da classe de resistência dos concretos. Ademais, ressalta-se que apesar do C0,2R0F2 apresentar IIC/IIL superiores à C0,3R0F2 – 2,24 e 2,04 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot(\mu\text{m/m})^{-1}$, respectivamente – o aumento percentual de ambas composições frente às suas amostras referências é muito similar – 26% e 28%, respectivamente. Isto indicaria um nível de influência das microfibras de aço semelhante sobre a mitigação da retração autógena das distintas classes de resistência.

Em relação às amostras de CUAD C0,2R20F1 e C0,2R20F2, observou-se reduções significativas dos IICs em relação à C0,2Ref. (28% e 17%, respectivamente), principalmente em função da influência negativa do RPP. Entretanto, quando as mesmas amostras são comparadas com os resultados de C0,2R20, foram verificados aumentos significativos dos IIC

e IIL graças à presença das microfibras de aço – gerando crescimentos de 50% e 71% sobre os IIC e 49% e 70% sobre os IIL, respectivamente. Além disto, o teor de 2% de microfibras de aço presente na amostra C0,2R20F2 neutralizou a influência negativa do RPP sobre o seu IIL, superando o índice obtido por C0,2Ref (1,84 e 1,78 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot(\mu\text{m}/\text{m})^{-1}$, respectivamente).

Em contrapartida, a composição de C0,3R20F2 registrou uma queda de 8% no IIC em relação à C0,3R0F2 – 1,87 e 2,04 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot(\mu\text{m}/\text{m})^{-1}$, respectivamente. No entanto, os resultados dos IIL das referidas amostras indicam novamente os efeitos positivos do RPP na eficiência do ligante dos CADs: C0,3R20F2 apresentou índice 15% superior ao IIL de C0,3R0F2 (2,34 e 2,04 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot(\mu\text{m}/\text{m})^{-1}$, respectivamente). Por fim, pode-se realizar uma análise adicional: a soma dos aumentos percentuais individuais dos IIL de C0,3R20 e C0,3R0F2 sobre C0,3Ref. – 19% e 28%, respectivamente – representa exatamente o mesmo aumento percentual do IIL de C0,3R20F2 sobre C0,3Ref. – 47% de crescimento. Isto indica que a introdução de componentes como o RPP e as microfibras de aço apresentaram nos CADs previsibilidade de comportamentos, possibilitando a criação de sistemas preditivos de retração autógena por meio da análise dos IIL.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa buscou verificar o efeito conjunto do uso do RPP em substituição ao cimento (10 e 20m%) e de microfibras de aço (1 e 2 vol%) como mitigadores da retração autógena de CAD e CUADs. Para tanto, foram realizados ensaios complementares em pasta de cimento, de caracterização de propriedades mecânicas e ensaio de retração autógena em concretos. O que se verificou após a confecção da revisão bibliográfica e da execução do programa experimental são as conclusões apresentadas a seguir:

- Apesar do RPP apresentar distribuição granulométrica das partículas mais fina e área superficial específica superior ao cimento, a substituição deste aglomerante pelo referido resíduo não resultou em prejuízo significativo às propriedades no estado fresco dos concretos, tanto em CADs ou CUADs, proporcionando, inclusive, reduções nos teores de ar incorporado das misturas no estado fresco.
- Resultados de ensaios de DRX e termogravimetria indicaram reduções nos teores de portlandita nas pastas de cimento com presença de RPP enquanto os percentuais de água quimicamente combinada (AQC) apresentaram manutenção dos seus percentuais para ambas relações a/agl. Estes resultados indicaram que, aos 28 dias, o efeito filer e o início das reações pozolânicas decorrentes da presença do RPP compensaram o menor volume de cimento presente nestas composições em termos de produtos hidratados. Este fato refletiu na resistência à compressão axial em CADs e CUADs contendo teores de RPP onde apresentaram, aos 28 dias, reduções pouco significativas frente às amostras referências. Posteriormente, aos 91 dias de ensaio, crescimentos expressivos - principalmente nas composições com teores de substituição de 20% de cimento por RPP – indicam a reatividade pozolânica do RPP em idades avançadas.
- O ensaio de calorimetria isométrica nas pastas de cimento indicou: a) um relevante aumento da duração do período de indução em função do crescente teor de aditivo superplastificante adotado; b) a substituição de cimento por RPP gerou crescimento dos picos máximos de fluxo de calor e dos calores acumulados quando os resultados foram normalizados por grama de cimento. No entanto, quando o resultado foi normalizado por grama de ligante tanto os picos máximos de fluxo de calor quanto o calor acumulado sofreram reduções nas amostras contendo

substituições de cimento pelo MCS. Indicando assim uma redução do calor de hidratação do cimento na matriz cimentícia como um todo.

- A realização do ensaio de absorção permitiu verificar os distintos efeitos que a substituição do cimento por RPP gerou na construção das microestruturas das pastas de cimento de relações a/agl 0,20 e 0,30. Enquanto a referida substituição aumentou a absorção de água e o volume de vazios permeáveis nas pastas com relação a/agl 0,30, comportamento diametralmente inverso foi registrado nas pastas de cimento com relação a/agl 0,20. Dos resultados dos ensaios de calorimetria isométrica e de absorção de água em pasta de cimento foram extraídas as principais justificativas para os resultados obtidos nos ensaios de retração autógena, foco principal desta pesquisa.
- A adoção do RPP como MCS apresentou comportamentos distintos em CADs e CUADs no que tange à influência na retração autógena sofrida pelas matrizes cimentícias. Entre os CADs, a substituição de cimento por RPP auxiliou a reduzir o calor de hidratação na matriz cimentícia como um todo e aumentou o percentual de vazios permeáveis na matriz cimentícia (em função do aumento da relação a/c relativa), reduzindo assim a pressão capilar. Assim, teores de substituição de 10% e 20% de cimento por RPP geraram, nos CADs, reduções de 10% e 17,3% nos valores de retração autógena aos 28 dias de idade.
- Em relação aos CUADs, a substituição do cimento pelo RPP também resultou no aumento das relações a/c. Levantou-se a hipótese de que esta maior quantidade de água disponível para a hidratação de uma menor quantidade de cimento resultou no: aumento dos picos de fluxos de calor e calor acumulado (normalizados por grama de cimento), um possível aumento da produção de etringita por grama de cimento, gerando grande autodessecação nas primeiras horas de hidratação, e redução do percentual dos poros permeáveis – indicando um aumento no refinamento da microestrutura e fechamento dos poros abertos. Destes fatos decorreram o aumento da autodessecação da microestrutura porosa e da pressão capilar com aumentos de 29,3% e 60,8% da retração autógena de C0,2R10 e C0,2R20 frente à C0,2Ref, respectivamente.
- Portanto, apesar da substituição de cimento por RPP acarretar um efeito benéfico às propriedades mecânicas dos CUADs em idades avançadas, com C0,2R20

apresentando, inclusive, o menor IIC em função da resistência à compressão axial da pesquisa – $6,4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$ – o referido MCS prejudicou em grande medida a eficiência das amostras de CUAD no que tange à retração autógena, foco principal deste trabalho.

- A substituição de cimento por RPP aumentou o tempo necessário até a estabilização da retração autógena, tanto em CADs quanto em CUADs.
- Segue uma tabela resumo dos resultados obtidos a partir da adição do RPP:

| CUADs | CADs |
|----------------------------|----------------------------|
| ↑ RPP | ↑ RPP |
| ≈ AQC | ≈ AQC |
| ↓ Índice de Vazios | ↑ Índice de Vazios |
| ↑ Resistência à Compressão | ≈ Resistência à Compressão |
| ↑ Retração Autógena | ↓ Retração Autógena |

- Os efeitos da introdução das microfibras de aço nos CADs e CUADs foram positivos tanto no que tange às resistências à tração por flexão e compressão axial, quanto na redução da retração autógena, independentemente da relação a/agl testada. Além disto, o aumento da concentração volumétrica de fibras influenciou positivamente nas referidas propriedades até o teor máximo avaliado (2%);
- Os efeitos benéficos das microfibras na mitigação da retração autógena foram visualizados desde o fim do período de indução – onde a intensidade da deformação volumétrica tende a ser crítica – até a formação dos patamares de estabilização. As microfibras de aço foram especialmente efetivas na redução do efeito negativo apresentado pelo RPP nas composições de CUADs – com C0,2R20F2 apresentando valores inferiores à amostra referência aos 21 dias ($510 \mu\text{m}/\text{m}$ e $548 \mu\text{m}/\text{m}$, respectivamente). Além disto, C0,2R20F2 também apresentou o menor IIC em função da resistência à compressão axial ($5,4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$ aos 91 dias de ensaio);
- Diferentemente do embate verificado nos CUADs, nos CADs a presença de microfibras de aço e a substituição de teores de cimento por RPP geraram um efeito sinérgico de redução da retração autógena. Destaca-se, em especial, a composição C0,3R20F2 que registrou os menores valores de retração autógena e o maior IIL por $\mu\text{m}/\text{m}$ de deformação registrados nesta pesquisa.

- Por fim, entre os CADs, a substituição de cimento por RPP além de tornar os concretos mais ecoeficientes também auxiliou na redução da retração autógena, atingindo um dos objetivos específicos desta pesquisa. Entre os CUADs a referida substituição não foi bem sucedida em ambos quesitos, conforme o esperado inicialmente.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A fim de aprofundar os temas tratados nesta pesquisa são apresentados a seguir algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Realização de estudo aprofundado a respeito da evolução do sistema poroso microestrutural de CADs e CUADs contendo RPP como MCS;
- Confeção de um modelo para previsão da retração autógena em CADs e CUADs com substituição parcial de cimento por RPP;
- Confeção de novas composições de concretos com reduzidos consumos de cimento e maiores teores de RPP para obtenção de concretos com grande eficiência na mitigação da retração autógena e ecoeficientes.
- Encontrar a relação a/agl para a qual ocorre a inversão da tendência de incorporação do RPP vs. retração autógena dos concretos.

7 REFERÊNCIAS

- AHMAD, S.; MOHAISEN, K.O.; ADEKUNLE, S.K.; AL-DULAIJAN, S.U.; MASLEHUDDIN, M. **Influence of admixing natural pozzolan as partial replacement of cement and microsilica in UHPC mixtures**. *Constr. Build. Mater.* 2019, 198, 437–444.
- AÏTCIN, P.-C. **High-performance concrete**. ed. New York: Routledge, 2004. 591 p.
- AÏTCIN, P.-C.; LAPLANTE, P.; BÉDARD, C. **Development and experimental use of 90 MPa field concrete**. *ACI SP-87*, 1985, P. 51-70.
- AGIL, R.; KUMAR, A., **Experimental study on replacement of cement with ceramic tile powder in concrete**, *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.* V. 9(3), 2018, P.1814– 1818.
- ALMUSALLAM, A., MASLEHUDDIN, M., ABDUL-WARIS M. e KHAN, M. M. **Effect of mix proportions on plastic shrinkage cracking of concrete in hot environments**. 1998, P. 353-358. doi:10.1016/s0950-0618(98)00019-1.
- ALSAIF, A. **Utilization of ceramic waste as partially cement substitute – A review**. *Construction and Building Materials*, v.300, 2021, P.1-28.
- ALTOUBAT S.A., LANGE D.A. **Tensile basic creep: measurements and behavior at early age**. *ACI Materials Journal* 2001; V. 98(5):386–93.
- ALY, S.T.; EL-DIEB, A.S.; TAHA, M.R., **Effect of high-volume ceramic waste powder as partial cement replacement on fresh and compressive strength of self-compacting concrete**. *J. Mater. Civ. Eng.*, v. 31(2), 2019, P. 1-11.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI PRC-239-18: Ultra-High Performance Concrete: An Emergin Technology Report**. Michigan, 2018.
- ANFACER - ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE CERÂMICA PARA REVESTIMENTOS, **Números do setor cerâmico do ano de 2021**. Disponível em: <<https://www.anfacer.org.br/setor-ceramico/numeros-do-setor>>. Acessado em: 20/11/2021.
- ANSHUANG, S.; LING, Q.; SHOUJIE, Z.; JIAYANG, Z.; ZHAOYO, L., **Effects of shrinkage reducing agent and expansive admixture on the volume deformation of ultrahigh performance concrete**. *Adv. Mater. Sci. Eng.*, v. 2017; 2017.
- ARAUJO, S. C. J. F. N. **Análise de microestrutura e de características geotécnicas de misturas de resíduo de polimento de porcelanato e solo**. 2016. 114p. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC). UFRN, Natal.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos Sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projetos de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 13006**: Placas cerâmicas – definições, classificação, características e marcação. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: Materiais Pozolânicos – Determinação do Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa e do teor de ar. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 65**: Cimento Portland – Determinação do tempo de Pega. Rio de Janeiro, 2017.

BACHE, H.H. **Densified Cement/Ultra Fine Particle-Based Materials.**, Second International Conference on Superplasticizer in Concrete, Ottawa, 1981, pp. 1–35.

BALTHAR, V. K. C. B. L. M., **Retração autógena e evolução de propriedades mecânicas de pastas pozolânicas.** 2004. 143f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

BENTZ, D.P.; GEIKER, M.R.; HANSEN, K.K., **Shrinkage-reducing admixtures and early-age desiccation in cement pastes and mortars.** Cement Concr Res v. 31(7), 2001, P. 1075–1085.

BETIOLI, A.M.; FORTUNATO, M.; MARTINS, B-H.R.; CASALI, J.M.; ROCHA, J.C.; COLLODETTI, G., **Efeito da composição granulométrica e da área superficial específica de resíduos de polimento de porcelanato em argamassas autoadensáveis.** Ambiente Construído, v. 20 (3), 2020, P. 385-402.

BETIOLI, A.M.; GLEIZE, P.J.P.; SILVA, D.A.; SILVA, D.A.; JOHN, V.M.; PILEGGI, R.G., **Effect of HMEC on the consolidation of cement pastes: Isothermal calorimetry oscillatory rheometry.** Cement and Concrete Research, vol. 39, 2009, P.440-445.

BHARGAV, M.; KANSAL, R., **Experimental investigation to substitute of cement with ceramic tiles powder in concrete**, Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol. V. 8 (IX), 2020, P. 1-9.

BROOKS, J.J.; JOHARI, M.A.M. **Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete**, Cem. Concr. Compos., 23(6), 2001, pp. 495-502.

CABRAL JR., M; BOSCHI, A.L.O; MOTTA, J.M.M; TANNO, L.C; SINTONI, A; COELHO, J.N; CARIDADE, M. **Panorama e perspectiva da indústria de revestimento cerâmico no Brasil**. Cerâmica Industrial, V. 15 (3), 2010, P. 7-18

CARRILLO, J.; RAMIREZ, J.; LIZARAZO, J.M. **Modulus of elasticity and Poisson's ratio of fiber-reinforced concrete in Colombia from ultrasonic pulse velocities**. Journal of Building Engineering, Vol. 23, 2019, P. 18–26.

CESARI, V.F. **Estudo das propriedades micro-nanomecânicas na interface matriz/microfibras de aço em concretos de ultra-alto desempenho com adição de nanocarbonato de cálcio**. Orientador: Prof. Dr. Fernando Pelisser. 2021. 147f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2021.

CHEN, J.J.; KWAN, A.K.H.; JIANG, Y. **Adding limestone fines as cement paste replacement to reduce water permeability and sorptivity of concrete**. Construction and Building Materials, v. 56, 2014, P. 87-93.

CHENG, Y; HUANG, F.; LI, G.L., LI, G.; XU, L.; HOU, J., **Test research on effects of ceramic polishing powder on carbonation and sulphate-corrosion resistance of concrete**, Constr. Build. Mater. V. 55, 2014, P. 440–446.

CHOI, Y.C.; PARK B.; **Enhanced autogenous healing of ground granulated blast furnace slag blended cements and mortars**, Journal of Materials Research and Technology, v.8(4), 2019, P. 3443-3452.

CIOBANU, C.; LAZĂU, I.; PĂCURARIU, C., **Investigation regarding the effect of viscosity modifying admixtures upon the Portland cement hydration using thermal analysis**. J Therm Anal Calorim, 112(1), 2013, P. 331–338.

COLLIER, N. C. **Transition and decomposition temperatures of cement phases – a collection fo termal analysis data**. Ceramics Silikáty, V. 60 (4), 2016, P. 338-343.

DAMINELI, B.L.; KEMEID, F.M.; AGUIAR, P.S.; JOHN, V.M., **Measuring the eco-efficiency of cement use**. Cement and Concrete Composites. V. 32, 2010, P. 555–562, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.009>

DEBOODT, T.; FU, T.; IDEKER, J.H. **Evaluation of FLWA and SRAs on autogenous deformation and long-term drying shrinkage of high performance concrete**. Constr Build Mater., 119, 2016, P. 53–60.

DU, J.; MENG, W.; KHAYAT, H.K.; BAO, Y.; GUO, P.; LYU, Z.; ABU-OBEIDAH, A.; NASSIF, H.; WANG, H., **New development of ultra-high-performance concrete (UHPC)**. Composites Part B: Engineering, v. 224, 2021, P. 1-31.

EPPERS, S.; MÜLLER, C.; **Autogenous shrinkage strain of Ultra-High-Performance Concrete (UHPC)**. Paper apresentado no 2º Simpósio Internacional de UHPC, Kassel, Alemanha, 2007, P. 433-441.

EL-DIEB. A.S.; KANAAN, D.M., **Ceramic waste powder an alternative cement replacement – Characterization and evaluation**. Sustainable Materials and Technologies, v. 63, 2018, P.1-49.

EL-HAWARY, M.; MUBARAK, M. **Sustainability and properties of Ceramic Waste Concrete**. Challenges in Developing Sustainable Infrastructure. 2019, P. 147-158.

FANG, C.; ALI, M.; XIE, T.; VISITIN, P.; SHEIKH, A.H., **The influence of steel fibre properties on the shrinkage of ultra-high performance fibre reinforced concrete**. Construction and Building Materials, v. 242, 2020, P. 1-10.

FATIMA, E.; JHAMB, A.; KUMAR, R. **Ceramic dust as Construction Material in rigid pavement**. American Journal of Civil Engineering and Architecture, v.1, 2013, P. 112-116.

FERRARA, L.; DEEGAN, P.; PATTARINI, A.; SONEBI, M.; TAYLOR, S., **Recycling ceramic waste powder: effects its grain-size distribution on fresh and hardened properties of cement pastes/mortars formulated from SCC mixes**. Journal of Sustainable Cement-based Materials, 8:3, 145-160, DOI: [10.1080/21650373.2018.1564396](https://doi.org/10.1080/21650373.2018.1564396).

FERRARA, L.; FERREIRA, S.R.; DELLA TORRE, M.; KRELANI, V., SILVA, F.A., FILHO, R.D.T., **Effect of cellulose nanopulp on autogenous and drying shrinkage of cement based composites**. In: Nanotechnology in construction. Springer; 2015. p. 325–330.

FIGUEIREDO, A. D. de. **Concreto reforçado com fibras**. Universidade de São Paulo, [s. l.], 2011. 256 f.

GHAFAARI, E.; GHAHARI, S.A.; COSTA, H.; JÚLIO, E., PORTUGAL, A., DURÃES, L., **Effect of supplementary cementitious materials on autogenous shrinkage of ultra-high performance concrete**, Constr. Build. Mater. 127, 2016, P. 43–48.

GLEIZE, P.J.P.; CYR, M.; ESCADEILLAS, G.; **Effects of metakaolin on autogenous shrinkage of cement pastes**, Cem. Concr. Compos., 29(2), 2007, P. 80-87.

GUO, W.; SUN, N.; YANG, T.; PEI, M., WANG, Y., **Synthesis and properties of amphoteric superplasticizer**. ACI Materials Journal, 108, 2011, P. 108-116.

GUPTA, S. **Development of ultra-high performance concrete incorporating blend of slag and silica fume as cement replacement**. Int. J. Civ. Struct. Eng. Res., 2, 2014, P. 35–51.

HIGUCHI, T.; EGUCHI, M.; MORIOKA, M.; SAKAI, E., **Hydration and properties of expansive additive treated high temperature carbonation**. Cement Concr Res v.64, 2014; P.11–16.

HOLT, E. **Contribution of mixture design to Chemical and autogenous shrinkage of concrete at early ages**. Cement and Concrete Research, 35. P. 464-472, 2005.

HOSSAIN, U., DONG, Y., NG, S.T., **Influence of supplementary cementitious material in sustainability performance of concrete industry: A case study in Hong Kong**. Case Studies in Construction Materials, v. 15, p. 1-13, 2021

HOUST, Y. F. **Carbonation shrinkage of hydrated cement paste**. Presented at 4th CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Ottawa, Canada, 1997. 481-91.

HU, X.; SHI, Z.; SHI, C.; WU, Z.; TONG, B.; OU, Z.; e de SCHUTTER, G. **Drying shrinkage and cracking resistance of concrete made with ternary cementitious components**. Construction and Building Materials v. 149, 2017, P. 406-415. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.05.113.

HUANG, W.; KAZEMI-KAMYAB, H.; SUN, W.; SCRIVENER, K. **Effect of cement substitution by limestone on the hydration and microstructural development of ultra-high performance concrete (UHPC)**. Cem. Concr. Compos. 2017, 77, 86–101.

JACOBY, P.C., PELISSER, F., **Pozzolanic effect of porcelain polishing residue in Portland Cement**. Journal of Cleaner Production, v. 100, 2015, p. 84-88.

JANSEN, D.; NABER, C.; ECTORS, D.; LU, Z.; KONG, X.M.; GOETZ-NEUNHOEFFER, F.; NEUBAUER, J., **The early hydration of OPC investigated by in-situ XRD, heat flow calorimetry, pore water analysis and ¹HNMR: Learning about adsorbed ions from a complete mass balance approach**. Cement and Concrete Research, v.109, July 2018, P. 230-242.

JUSTS, J.; WYRZYKOWSKI, M.; WINNEFELD, F.; BAJARE, D.; LURA, P., **Influence of superabsorbent polymers on hydration of cement pastes with low water-to-binder ratio: a calorimetry study**. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, v. 115, 2014, P. 425-432.

KANAAN, D.M.; ABOUBAKR, S.H.; EL-DIEB, A.S., TAHA, M.M.R., **High performance concrete incorporating ceramic waste poder as large partial replacement of Portland cement**. Construction and Building Materials, v. 144, 2017, P.35-41.

KUMMER, L; BASSETTI, F.J; RIELLA; H.G; AZEVEDO, J.C.R. **Reutilização dos resíduos de polimento de porcelanato e feldspato na fabricação de novos produtos cerâmicos**. Cerâmica Industrial, Volume 12 (3), Maio/Junho 2007, p. 34–38

LAWRENCE, P.; CYR, M.; RINGOT, E., **Mineral admixtures in mortars: Effect of inert materials on short-term hydration**. Cement and Concrete Research, Vol. 33, 2003, P. 1939-1947.

- LEE, K.M.; LEE, H.K.; LEE, S.H.; KIM, G.Y.; **Autogenous shrinkage of concrete containing granulated blast-furnace slag**, *Cem. Concr. Res.* V. 36 (7), 2006, P.1279–1285.
- LI, C.; SUN, Z.; YANG, L., ZHANG, G., **Study on autogenous shrinkage characteristic and mechanism of ultra-high performance cementitious composite**. *Journal Chinese Ceramic Society*, 234(1), 2018.
- LI, L.G.; ZHUO, Z.Y.; ZHU, J., KWAN, A.K.H., **Adding ceramic polishing waste as paste substitute to improve sulfate and shrinkage resistance of mortar**. *Powder Technology*, v. 362, 2019a, P. 1-46.
- LI, L.G.; ZHUO, Z.Y.; ZHU, J., KWAN, A.K.H., **Reutilizing ceramic polishing waste as powder filler in mortar to reduce cement content by 33% and increase strength by 85%**. *Powder Technology*, v. 355, 2019b, P. 119-126.
- LI, L.G.; ZHUO, Z.Y.; KWAN, A.K.H., ZHANG, T.S.; LU, D.G., **Cementing efficiency factors of ceramic polishing residue in compressive strength and chloride resistance of mortar**. *Powder Technology*, V. 367, 2020, P 163-171.
- LI, L.G.; OUYANG, Y.; ZHUO, Z.Y., KWAN, A.K.H., **Adding ceramic polishing waste as filler to reduce paste volume and improve carbonation and water resistances of mortar**. *Advances in Bridge Engineering*, v. 2, 2021, P. 1-19.
- LI, J.; WU, Z.; SHI, C.; YUAN, Q., ZHANG, Z., **Durability of ultra high-performance concrete – A review**. *Construction and Building Materials*. V. 255, 2020, P.1-13.
- LI, L.; LIU, W.; YOU, Q., CHEN, M., ZENG, Q., **Waste ceramic powder as a pozzolanic supplementary filler of cement for developing sustainable building materials**. *Journal of Cleaner Production*, v. 259, 2020a, P.1-12.
- LI, L.; LIU, W.; YOU, Q., CHEN, M., ZENG, Q., ZHOU, C., ZHANG, M., **Relationships between microstructure and transport properties in mortar containing recycled ceramic powder**. *Journal of Cleaner Production*, v. 263, 2020b, P.1-15.
- LI, P.; YU, Q.; BROUWERS, H., **Effect of PCE-type superplasticizer on early-age behaviour of ultra-high performance concrete (UHPC)**. *Construct Build Mater*, v.153, 2017, P. 740-750.
- LI, P.; YU, Q.; BROUWERS, H., **Effect of coarse basalt aggregates on the properties of Ultra-high Performance Concrete (UHPC)**. *Construct Build Mater*, v.170, 2018, P. 649–659.
- LI, P.; BROUWERS, H.J.H.; CHEN, W.; YU, Q. **Optimization and characterization of high-volume limestone powder in sustainable ultra-high performance concrete**. *Constr. Build. Mater.* 2020, 242, 118112
- LI, S.; CHENG, S.; MO, L.; DENG, M., **Effects of steel slag powder and expansive agent on the properties of ultra-high performance concrete (UHPC): based on a case study**. *Materials* 13(3), 2020, P.1-11.

LIU, J.; SHI, C.; MA, X.; KHAYAT, K.H., ZHANG, J., WANG, D., **An overview on the effect of internal curing on shrinkage of high performance cement-based materials.** *Constr Build Mater*, v. 146, 2017, P. 702–712.

LIU, J.; OU, Z.; MO, J., WANG, Y., WU, H., **The effect of SCM and SAP on the autogenous shrinkage and hydration process of RPC.** *Constr Build Mater*, 155, 2017, P. 239–249.

LIU, J.; SHI, C., WU, Z., **Hardening, microstructure, and shrinkage development of UHPC: a review,** *J. Asian Concr. Feder.* V. 5 (2), 2019a, P. 1–19.

LIU, J.; FARZADNIA, N.; SHI, C.; MA, X., **Effects of superabsorbent polymer on shrinkage properties of ultra-high strength concrete under drying condition.** *Constr. Build. Mater.* V. 215, 2019(b), P. 799-811.

LIU, K; YU, R; SHUI, Z., **Optimization of autogenous shrinkage and microstructure for Ultra-High Performance Concrete (UHPC) based on appropriate application of porous pumice.** *Constr Build Mater* v. 214, 2019, P. 369–381.

LOPES, M. V. **Rota de fabricação do porcelanato polido retificado.** III SAEMPRO. Viçosa: UFV, 2018.

LOTENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R.D., **Supplementary cementitious materials.** *Cement and Concrete Research*, n. 41, p. 1244-1256, 2010.

LOTENBACH, B.; DURDZINSKI, P.T.; WEERDT, K.D. **Thermogravimetric analysis.** In: *A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials.* 1ª Edição, 2016. P.1-36.

LURA, P.; WINNEFELD, F.; FANG, X. **A simple method for determining the total amount of physically and chemically bound water of different cements.** *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry.* V. 130, 2017, P. 653-660.

KARIM, R. SHAFEI, B. **Flexural response characteristics of ultra-high performance concrete made with steel microfibers and macrofibers.** *Structural Concrete*, v.22, 2021, P. 3476-3490.

KOSTRZANOWSKA-SIEDLARZ, A., GOŁASZEWSKI, J., **Rheological properties and the air content in fresh concrete for self compacting high performance concrete,** *Constr. Build. Mater.* 94 (2015) 555–564, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.051>

MA, J.; ORGASS, M.; DEHN, F.; SCHMIDT, D., TUE, N.V., **Comparative investigations on ultra-high performance concrete with and without coarse aggregates.** In: *International symposium on ultra high performance concrete.* Germany: Kassel; 2004.

MA, X.; LIU, J.; SHI, C., **A review on the use of LWA as an internal curing agent of high performance cement-based materials.** *Constr Build Materials*, v. 218, 2019, P. 385–393.

MARVILLA, M.T.; de AZEVEDO, A.R.G.; de MATOS, P.R.; MONTEIRO, S.N.; VIEIRA, C.M.F., **Materials for production of high and Ultra-high performance concrete: Review and Perspective of possible novel materials.** *Materials*. V. 14, 2021, P.1-36.

MATOS, P.R., PRUDÊNCIO JR., L.R., OLIVEIRA, A.L.; PELISSER, F., GLEIZE, P.J.P., **Use of porcelain polishing residue as supplementary cementitious material in self-compacting concrete.** *Construction and Building Materials*, v.193, 2018, P. 623-630.

MATOS, P. R., **Estudo do uso de resíduo de polimento de porcelanato em concreto autoadensável.** Orientador: Prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio Júnior. 2019. 207f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2019.

MATOS, P.R.; SAKATA, R.D.; ONGHERO, L.; ULIANO, V.G.; BRITO, J.; CAMPOS, C.E.M.; GLEIZE, P.J.P., **Utilization of ceramic tile demolition waste as supplementary cementitious material: An early-age investigation.** *Journal of Building Engineering*, V. 38, Jun. 2021.

MATOS, P.R.; ANDRADE NETO, J.S.; SAKATA, R.D.; KIRCHHEIM, A.P., **Strategies for XRD quantitative phase analysis of ordinary and blended Portland cements.** *Cement and Concrete Composites*, V. 131, Aug. 2022.

MEHTA, P. K. **Reducing the Environmental Impact of Concrete.** *Concrete International*, v.23, n. 10, p. 61-66, 2001.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **CONCRETO: Microestrutura, Propriedades e Materiais.** 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MENG, W.; SAMARANAYAKE, V.; KHAYAT, K.H.; **Factorial Design and Optimization of Ultra-High-Performance Concrete with Lightweight Sand.** *ACI Materials Journal*, 2018. 115(1).

MENG, W.; KHAYAT, K.H., **Improving flexural performance of ultra-high-performance concrete by rheology control of suspending mortar.** *Compos B Eng*, 117, 2017, P. 26–34.

MO, L.; DENG, M.; TANG, M., **Effects of calcination condition on expansion property of MgO-type expansive agent used in cement-based materials.** *Cement Concr Res.*V.40(3), 2010; P.437–446.

MOHIT, M.; SHARIFI, Y., **Ceramic waste powder as alternative mortar-based cementitious materials,** *ACI Mater. J.* v.116, 2019.

MOHIT, M.; RANJBAR, A.; SHARIFI, Y., **Mechanical and microstructural properties of mortars incorporating ceramic waste powder exposed to the hydrochloric acid solution,** *Constr. Build. Mater.* V. 271, 2021.

MORAES, R.C., **Efeito físico e pozolânico das adições minerais sobre a resistência mecânica do concreto.** 2001. 165f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2001.

MORENO, J. **High-strength concrete in Chicago high-rise buildings**. In: Concrete structures for the future. 1987, P.407-412.

NAZARI, A.; SANJAYAN, J. G. **Handbook of Low Carbon Concrete**. 1a. ed. Elsevier, 2017.

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

NORHASRI, M.S.M.; HAMIDAH, M.S.; FADZIL, A.M.; **Inclusion of nano metaclayed as additive in ultra-high performance concrete (UHPC)**. Constr Build Mater; 201: 2019, P. 590–608.

PARK, S.; WU, S.; LIU, Z.; PYO, S. **The Role of Supplementary Cementitious Materials (SCMs) in Ultra High Performance Concrete (UHPC): A Review**. Materials, v.14, 2021, 1472. <https://doi.org/10.3390/ma14061472>

PELISSER, F., STEINER, LR., BERNARDIN, A.M., **Recycling of Porcelain Tile Polishing Residue in Portland Cement: Hydration Efficiency**. Environmental Science & Technology, v. 46, 2012, P.2368-2374.

PATEL, H.; ARORA, N.K.; VANIYA, S.R.; **Use of ceramic waste powder in cement concrete**. International Journal for Innovative Research in Science & Technology, v.2, 2015.

PUREZA, J.C.C. **Utilização de resíduos industriais de baixa granulometria em massas cerâmicas de argila vermelha: aspectos tecnológicos e ambientais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

QASIM, O.A., **Experimental investigation on autogenous shrinkage of high and ultra high strength concrete**. Materials Science and Engineering, v.454, 2008, P. 1-11.

RAJABIPOUR, F.; SANT, G.; WEISS, J., **Interactions between shrinkage reducing admixtures (SRA) and cement paste pore solution**. Cement Concr Res, v. 38(5), 2008, P. 606–615.

RANDL, N.; STEINER, T.; OFNER, S.; BAUMGARTNER, E.; MESZOLY, T. **Development of UHPC mixtures from an ecological point of view**. Constr. Build. Mater. 2014, 67, 373–378.

RANI, M.S., **A study on ceramic waste powder**, Int. J. Civ. Eng. v. 3, 2016, P.1–6.

RICHARD, P.; CHEYREZY, M. **Composition of reactive powder concretes**. Cement and concrete research, v. 25, n. 7, p. 1501-1511, 1995.

RILEM Committee 119, **Prevention of Thermal Cracking in Concrete at Early Ages**, ed. R. Springenschmid. 1998, London and New York Rilemri.

ROBERTI, F., **Efeito das Microfibras de aço na retração autógena de concretos de ultra-alto desempenho**. Orientador: Prof. Dr. Fernando Pelisser. 2019. 65f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2019.

ROBERTI, F.; CESARI, V.F.; MATOS, P.R.; PELISSER, F., PILAR, R., **High- and Ultra-High-Performance concrete produced with sulfate-resisting cement and steel microfiber: Autogenous shrinkage, fresh-state, mechanical properties and microstructure characterization**. *Construction and Building Materials*, v.268, 2021, P. 1-10.

SANTOS, H.M.M.S., **Uso do Resíduo do polimento do porcelanato como adição e como material cimentício suplementar**. Orientadora: Prof. Dra. Ana Cecília Vieira da Nóbrega. 2019. 99f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, PE, 2019.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. **Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry**. *Cement and Concrete Research*, n. 114, p. 2-26, 2018.

SCRIVENER, K. L.; JUILLAND, P.; MONTEIRO, P.J.M. **Advances in understanding hydration of Portland Cement**. *Cement and Concrete Research*, n. 78, 2015, P. 38-56.

SCRIVENER, K.L.; CRUMBIE A.K.; LAUGESSEN P., **The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete**. *Interface Science*, 12(4), P. 411–421, 2004.

ŠEPS, K.; BROUKALOVÁ, I.; CHYLÍK, R. **Cement Substitutions in UHPC and their Influence on Principal Mechanical-Physical Properties**. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2019, 522, 012009

SHAH, H.A.; YUAN, Q.; ZUO, S. **Air Entrainment in Fresh Concrete and Its Effects on Hardened Concrete - a Review**. *Constr. Build. Mater.* V. 274, 2021.

SHEN P., LU L., HE Y., RAO, M., FU, Z., WANG, F., HU, S., **Experimental investigation on the autogenous shrinkage of steam-cured ultra-high performance concrete**. *Constr Build Mater* 2018;162: 512–522.

SHI, C.; WU, Z.; XIAO, J.; WANG, D., HUANG, Z., FANG, Z., **A Review on Ultra High Performance Concrete: Part I. Raw Materials and Mixture Design**. *Constr. Build. Mater.* V.101, 2015, P.741–751.

SILVA, G.J.B. **Estudo do comportamento do concreto de cimento Portland produzido com a adição do resíduo de polimento do porcelanato**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

SILVA, R. V., BRITO, J., DHIR, R. K., **Performance of cementitious renderings and masonry mortars containing recycled aggregates from construction and demolition wastes**. *Constr. Build. Mater.* V.105, 2016: 400–415.

SINDICERAM – SINDICATO DAS INDÚSTRIAS DE CERÂMICA DA REGIÃO DE CRICIÚMA, **Dados do setor**. 2021. Disponível em: <<http://www.sindiceram.com.br/dados-do-setor>>. Acessado em 20/11/2021.

SINDICATO NACIONAL DA INDUSTRIA DO CIMENTO. **Perfil da distribuição do cimento Portland consumido, segundo as regiões geográficas 2018**. 2019. Disponível em: <<http://snic.org.br/assets/pdf/numeros/1576692905.pdf>> Acesso em: 10 jan. 2020.

SNELLINGS, R.; MERTENS, G.; ELSSEN, J., **Supplementary Cementitious Materials**. Reviews in Mineralogy & Geochemistry, V. 74, 2012, P. 211-278.

SOLIMAN, A.M.; NEHDI, M.L., **Effect of partially hydrated cementitious materials and superabsorbent polymer on early-age shrinkage of UHPC**. Mater. Struct. v. 44(5), 2011; P. 879–899.

SOLIMAN, N.A.; TAGNIT-HAMOU, A. **Partial substitution of silica fume with fine glass powder in UHPC: Filling the micro gap**. Constr. Build. Mater. 2017, 139, 374–383.

SOUSA JÚNIOR, A. M. S. **Efeito da adição de filler a base de resíduo do polimento do porcelanato e dispersão aquosa de poliuretana na permeabilidade de pastas de cimento**. 2016. 94p. Tese (doutorado). Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo (PPGCEP), UFRN, Natal, 2016.

SOUZA, P. A. B. F. **Estudo do comportamento plásticos, mecânico, microestrutural e térmico do concreto produzido com resíduo de porcelanato**. 2007. 230p. Tese (doutorado). Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM), UFRN, Natal.

STAQUET, S.; ESPION, B.; **Early age autogenous shrinkage of UHPC incorporating very fine fly ash or metakaolin in replacement of silica fume**. In: International symposium on ultra-high-performance concrete, Germany; 2004. p. 587–99.

STEINER, L R. **Efeito do resíduo do polimento de porcelanato como material cimentício suplementar**. 2014. 126p. Dissertação (mestrado). Programa de Pósgraduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM), UNESC, Criciúma.

STEINER, L.R.; BERNARDIN, A. M.; PELISSER, F. **Effectiveness of ceramic tile polishing residues as supplementary cementitious materials for cement mortars**. Sustainable Materials and Technologies. v. 4, p. 30-35, 2015.

SUKSAWANG, N.; WTAIFE, S.; ALSABBAGH, A.; **Evaluation of elastic modulus of fiber-reinforced concrete**, ACI Mater. J. v. 115, 2018, P. 239–249.

TAFRAOUI, A.; ESCADEILLAS, G.; VIDAL, T. **Durability of the Ultra High Performances Concrete containing metakaolin**. Constr. Build. Mater. 2016, 112, 980–987.

TAHWIA, A.M.; ELGENDY, G.M.; AMIN, M., **Durability and microstructure of eco-efficient ultra-high-performance concrete**. Construction and Building Materials, v. 303, 2021.

TAVARES, L. R. C., **Avaliação da retração autógena em concretos de alto desempenho com diferentes adições**. 2008. 107f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil). - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

TAZAWA, E.; MIYAZAWA, S.; **Influence of cement and admixture on autogenous shrinkage of cement paste**, Cement and Concrete Research. Vol. 25 (2), 1995, P.281–287.

TAZAWA, E.; MIYAZAWA, S.; **Influence of constituents and composition on autogenous shrinkage of cementitious materials**, Mag. Concr. Res. 49 (178) (1997) 15–22.

TERZIC, A.; PEZO, L.; MIJATOVIC, N.; STOJANOVIC, J., KRAGOVIC, M., MILICIC, L., ANDRIC, L., **The Effect of Alternations in Mineral Additives (Zeolite, Bentonite, Fly Ash) on Physico-Chemical Behavior of Portland Cement Based Binders**. Constr. Build. Mater. V. 180, 2018, P. 199–210.

TIAN, C.; WEI, X.; ZHENG, Z. **A practical model for predicting the autogenous shrinkage of cementitious materials**. Constr. Build. Mater. V. 323, 2022, P. 1-11.

TUTIKIAN, B. F.; ISAI, G. C.; HELENE, P. **Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho**. In: ISAI, G. C. (Org.) Concreto: Ciência e Tecnologia ed. São Paulo: IBRACON, v. 2, p. 1283– 1326. 2011.

VAN TUAN, N.; YE, G.; VAN BREUGEL, FRAAIJ, A.L.A., DAI, B.D., **The study of using rice husk ash to produce ultra high performance concrete**. Constr. Build. Mater. 2011, 25, 2030–2035.

VIGNESHWARI, M., ARUNACHALAM, K., ANGAYARKANNI, A., **Replacement of silica fume with thermally treated rice husk ash in Reactive Powder Concrete**. Journal of Cleaner Production, 2018. 188: p. 264-277.

WADSÖ, L.; WINNEFELD, F.; RIDING, K.; SANDBERG, P. **Calorimetry**. In “A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials”. 1ª Edição, 2016. P.1-38.

WANG, D.; SHI, C.; WU, Z.; XIAO, J., HUANG, Z., FANG, Z., **A Review on Ultra High Performance Concrete: Part II. Hydration, Microstructure and Properties**. Constr. Build. Mater. V. 96, 2015, P.368–377.

WANG, R., GAO, X., HUANG, H., HAN, G., **Influence of rheological properties of cement mortar on steel fiber distribution in UHPC**, Constr. Build. Mater. V. 144, 2017, P. 65–73, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.173>.

WEISE, K.; UKRAINCZYK, N.; KOENDERS, E. **A Mass Balance Approach for Thermogravimetric Analysis in Pozzolanic Reactivity R3 Test and Effect of Drying Methods**. Materials, 14, 2021, P. 1-16. <https://doi.org/10.3390/ma14195859>

WHITTAKER, M., ZAJAC, M., HAHN, M.B., BULLERJAHN, F., BLACK, L., **The role of the alumina content of slag, plus the presence of additional sulfate on the hydration and microstructure of Portland cement-slag blends**. Cement and Concrete Research V. 66, 2014, P. 91-101.

WU, L.; FARZADNIA, N.; SHI, C.; ZHANG, Z.; WANG, H., **Autogenous shrinkage of high performance concrete: A review**, *Constr. Build. Mater.*, 149, 2017, pp. 62-75

WU, Z.; SHI, C.; KHAYAT, K.H., **Investigation of mechanical properties and shrinkage of ultra-high performance concrete: Influence of steel fiber content and shape**. *Composites Part B*, v. 174, 2019, P. 1-12.

XIE, T.; FANG, C.; ALI, M.S.M.; VISITIN, P., **Characterizations of autogenous and drying shrinkage of ultra-high performance concrete (UHPC): an experimental study**. *Cement Concr Compos*, v.91, 2018, P.156–173.

YALÇINKAYA, Ç; YAZICI, H.; **Effects of ambient temperature and relative humidity on early-age shrinkage of UHPC with high-volume mineral admixtures**. *Construction and Building Materials* v. 144, 2017, P. 252–259

YAN, P.; QIN, X., **The effect of expansive agent and possibility of delayed ettringite formation in shrinkage-compensating massive concrete**. *Cement Concr Res*, v.31(2), 2001; P.335–347.

YANG, L.; SHI, C.; WU, Z., **Mitigation techniques for autogenous shrinkage of ultra-high-performance concrete – A review**. *Composites Part B* 178, 2019, P. 1-12

YANG, R.; YU, R.; SHUI, Z.; GAO., X, HAN, J., LIN, G., QIAN, D., LIU, Z., HE, Y., **Environmental and economical friendly ultra-high performance-concrete incorporating appropriate quarry-stone powders**. *J. Clean. Prod.* 2020, 260, 121112.

YE, G., **Mitigation of autogenous shrinkage of ultra-high performance concrete by rice husk ash**. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2012. 40(2): p. 212-216.

YOO D.Y., BANTHIA N. **Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: a review**. *Cement Concr Compos*, 2016, 73, P. 267–280.

YOO, D.Y.; PARK J.J.; KIM S.W.; OON, Y.S., **Combined effect of expansive and shrinkage-reducing admixtures on the properties of ultra high performance fiberreinforced concrete**. *J Compos Mater*, v.48(16), 2014, P.1981–1991.

ZHAN, P.M.; HE, Z.H., **Application of shrinkage reducing admixture in concrete: a review**. *Construct Build Mater*, v. 201, 2019; P. 676–690.

ZHANG, H.; JI, T.; HE, B.; HE, L., **Performance of ultra-high performance concrete (UHPC) with cement partially replaced by ground granite powder (GGP) under different curing conditions**. *Constr. Build. Mater.* 2019, 213, 469–482.

ZHANG, M.H.; TAM, C.T.; LEOW, M.P. **Effect of water-to-cementitious materials ratio and silica fume on the autogenous shrinkage of concrete**. *Cement Concr Res* 2003;33 (10):1687–94.

ZHANG, X.; LIU, Z.; WANG, F., **Autogenous shrinkage behavior of ultra-high performance concrete.** Construction and Building Materials, v. 226, 2019, P. 459-468.

ZUO, W.; FENG, P.; ZHONG, P.; TIAN, Q., GAO, N., WANG, Y.; YU, C., MIAO, C. **Effects of novel Polymer-type shrinkage-reducing admixture on early age autogenous deformation of cement pastes.** Cement and concrete Research, v. 100, 2017, P. 413-422.

APÊNDICE A

Cálculo da Teores de CH, CaCO₃ e Água Quimicamente Combinada das Pastas de cimento

$$CH = \frac{pmCH}{m_{550}} \times \left(\frac{M_{CH}}{M_{H_2O}} \right) \times 100 = \frac{pmCH}{m_{550}} * \left(\frac{74}{18} \right) \times 100 \quad (1)$$

Tabela 19: Teor calculado de Hidróxido de Cálcio (CH)

| Pasta | Temp.1 (°C) | Temp.2 (°C) | Massa ₁ (%) | Massa ₂ (%) | Massa _{550°C} (%) | CH (%) |
|-----------------|-------------|-------------|------------------------|------------------------|----------------------------|--------|
| P0,4Ref. | 392,1 | 484,1 | 87,9 | 84,0 | 83,4 | 21,8 |
| P0,3Ref. | 387,8 | 481,5 | 89,1 | 86,0 | 85,5 | 16,7 |
| P0,3R20 | 390,2 | 478,3 | 89,2 | 86,6 | 86,0 | 13,7 |
| P0,2Ref. | 381,3 | 472,2 | 90,9 | 88,6 | 88,0 | 12,1 |
| P0,2R10 | 380,8 | 470,8 | 91,0 | 89,0 | 88,4 | 10,6 |
| P0,2R20 | 383,0 | 469,2 | 91,0 | 89,2 | 88,5 | 9,6 |

$$AQC = \left(\frac{m_{105} - m_{550} - pmCH}{m_{550}} \right) * 100 \quad (2)$$

Tabela 20: Teor calculado de Água Quimicamente Combinada

| Pasta | Massa _{105°C} (%) | Massa _{550°C} (%) | pmCH (%) | AQC (%) |
|-----------------|----------------------------|----------------------------|----------|--------------|
| P0,4Ref. | 95,7 | 83,41 | 3,9 | 10,06 |
| P0,3Ref. | 96,2 | 85,5 | 3,1 | 8,89 |
| P0,3R20 | 96,3 | 86,0 | 2,6 | 8,95 |
| P0,2Ref. | 96,6 | 88,0 | 2,3 | 7,16 |
| P0,2R10 | 96,6 | 88,4 | 2,0 | 7,01 |
| P0,2R20 | 96,7 | 88,5 | 1,9 | 7,12 |

APÊNDICE B

CÁLCULO DOS ÍNDICES DE TEOR DE AR INCORPORADO NO ESTADO FRESCO DOS CONCRETOS

Tabela 21: Teor de ar incorporado e densidades teóricas dos concretos

| Composição | Proporção dos Materiais (g) | | | | | | Volume aparente (cm ³) | Massa do concreto* (g) | Densidade teórica (g/cm ³) | Teor de ar incorporado (%) |
|------------------|-----------------------------|------|-------|------|---------|-------|------------------------------------|------------------------|--|----------------------------|
| | Cimento | RPP | Areia | Água | Aditivo | Fibra | | | | |
| C0,2Ref. | 1,00 | 0,00 | 1,25 | 0,20 | 0,03 | 0,00 | 1,03 | 1120 | 2,41 | 2,58 |
| C0,2R10 | 1,00 | 0,11 | 1,25 | 0,20 | 0,03 | 0,00 | 1,08 | 1114 | 2,37 | 1,40 |
| C0,2R20 | 1,00 | 0,25 | 1,25 | 0,20 | 0,03 | 0,00 | 1,15 | 1104,6 | 2,33 | 0,55 |
| C0,2R0F1 | 1,00 | 0,00 | 1,25 | 0,20 | 0,03 | 0,08 | 1,04 | 1144,1 | 2,47 | 2,69 |
| C0,2R20F1 | 1,00 | 0,25 | 1,25 | 0,20 | 0,03 | 0,09 | 1,16 | 1127,7 | 2,39 | 0,80 |
| C0,2R0F2 | 1,00 | 0,00 | 1,25 | 0,20 | 0,03 | 0,16 | 1,05 | 1168,2 | 2,52 | 2,75 |
| C0,2R20F2 | 1,00 | 0,25 | 1,25 | 0,20 | 0,03 | 0,18 | 1,17 | 1156,6 | 2,44 | 0,57 |
| C0,3Ref. | 1,00 | 0,00 | 1,25 | 0,30 | 0,01 | 0,00 | 1,11 | 1063 | 2,31 | 3,38 |
| C0,3R10 | 1,00 | 0,11 | 1,25 | 0,30 | 0,01 | 0,00 | 1,16 | 1050 | 2,27 | 2,96 |
| C0,3R20 | 1,00 | 0,25 | 1,25 | 0,30 | 0,01 | 0,00 | 1,23 | 1042 | 2,24 | 2,11 |
| C0,3R0F2 | 1,00 | 0,00 | 1,25 | 0,30 | 0,01 | 0,18 | 1,13 | 1078 | 2,42 | 6,49 |
| C0,3R20F2 | 1,00 | 0,25 | 1,25 | 0,30 | 0,00 | 0,19 | 1,25 | 1058,3 | 2,34 | 5,21 |

*Massa medida em recipiente com 2772g de massa e 476,12cm³ de volume.

APÊNDICE C

Resultados individualizados dos ensaios de caracterização mecânica

Tabela 22: Módulo de elasticidade dinâmicos dos concretos aos 28 e 91 dias

| Composições | Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa) | | | | | | | | | |
|------------------|---------------------------------------|-------|-------|--------------|-------------|---------|-------|-------|--------------|-------------|
| | 28 dias | | | | | 91 dias | | | | |
| | CP1 | CP2 | CP3 | Média | D.P. | CP4 | CP5 | CP6 | Média | D.P. |
| C0,2Ref. | 51,97 | 51,57 | 51,31 | 51,62 | 0,33 | 51,63 | 52,53 | 51,07 | 51,74 | 0,74 |
| C0,2R10 | 49,87 | 49,73 | 50,65 | 50,08 | 0,49 | 51,76 | 52,22 | 52,75 | 52,25 | 0,50 |
| C0,2R20 | 50,48 | 49,51 | 50,15 | 50,05 | 0,49 | 51,53 | 53,51 | 52,27 | 52,43 | 1,00 |
| C0,2R0F1 | 50,77 | 50,83 | 50,82 | 50,81 | 0,03 | 51,43 | 52,65 | 53,54 | 52,54 | 1,06 |
| C0,2R20F1 | 50,13 | 49,75 | 50,28 | 50,05 | 0,28 | 51,43 | 51,59 | 53,13 | 52,05 | 0,94 |
| C0,2R0F2 | 52,49 | 52,38 | 53,19 | 52,69 | 0,44 | 54,11 | 54,05 | 54,50 | 54,22 | 0,24 |
| C0,2R20F2 | 51,10 | 50,63 | 50,81 | 50,84 | 0,24 | 53,68 | 53,72 | 54,52 | 53,97 | 0,47 |
| C0,3Ref. | 40,41 | 39,48 | 40,02 | 39,97 | 0,47 | 42,75 | 42,28 | 42,01 | 42,35 | 0,37 |
| C0,3R10 | 37,04 | 36,65 | 38,21 | 37,30 | 0,82 | 39,33 | 39,57 | 39,82 | 39,57 | 0,24 |
| C0,3R20 | 39,35 | 39,13 | 40,06 | 39,51 | 0,49 | 41,07 | 41,01 | 41,27 | 41,12 | 0,14 |
| C0,3R0F2 | 38,50 | 40,08 | 38,74 | 39,11 | 0,85 | 41,70 | 40,52 | 41,62 | 41,28 | 0,66 |
| C0,3R20F2 | 36,98 | 36,92 | 37,19 | 37,03 | 0,14 | 40,85 | 40,63 | 39,74 | 40,40 | 0,58 |

Tabela 23: Resistências à tração na flexão dos concretos aos 28 e 91 dias

| Composições | Resistência à Tração na Flexão (MPa) | | | | | | | | | |
|------------------|--------------------------------------|------|------|-------------|------------|---------|------|------|-------------|------------|
| | 28 dias | | | | | 91 dias | | | | |
| | CP1 | CP2 | CP3 | Média | D.P. | CP4 | CP5 | CP6 | Média | D.P. |
| C0,2Ref. | 17,8 | 18,6 | 17,7 | 18,0 | 0,5 | 20,9 | 22,0 | 21,8 | 21,6 | 0,6 |
| C0,2R10 | 16,1 | 16,2 | 17,4 | 16,6 | 0,7 | 17,0 | 16,5 | 18,3 | 17,3 | 1,0 |
| C0,2R20 | 16,4 | 16,0 | 14,6 | 15,7 | 0,9 | 17,2 | 18,5 | 17,9 | 17,9 | 0,7 |
| C0,2R0F1 | 19,1 | 18,1 | 18,6 | 18,6 | 0,5 | 18,4 | 19,7 | 23,9 | 20,7 | 2,8 |
| C0,2R20F1 | 17,6 | 16,5 | 15,9 | 16,7 | 0,9 | 19,5 | 18,9 | 17,9 | 18,8 | 0,8 |
| C0,2R0F2 | 27,8 | 24,3 | 25,2 | 25,7 | 1,8 | 27,1 | 32,1 | 32,9 | 30,7 | 3,2 |
| C0,2R20F2 | 20,6 | 24,8 | 23,9 | 23,1 | 2,2 | 23,5 | 27,3 | 29,5 | 26,8 | 3,0 |
| C0,3Ref. | 12,1 | 12,9 | 12,0 | 12,3 | 0,5 | 11,7 | 12,7 | 13,2 | 12,5 | 0,7 |
| C0,3R10 | 11,0 | 10,6 | 10,1 | 10,6 | 0,4 | 11,2 | 11,7 | 11,4 | 11,4 | 0,3 |
| C0,3R20 | 11,4 | 12,0 | 10,6 | 11,3 | 0,7 | 11,9 | 12,0 | 12,8 | 12,2 | 0,5 |
| C0,3R0F2 | 19,6 | 21,0 | 21,6 | 20,7 | 1,0 | 25,9 | 23,6 | 24,0 | 24,5 | 1,2 |
| C0,3R20F2 | 19,3 | 20,9 | 20,2 | 20,1 | 0,8 | 24,5 | 25,7 | 25,3 | 25,1 | 0,6 |

Tabela 24: Resistência à compressão axial dos concretos aos 28 dias

| Composições | Resistência à Compressão Axial (MPa) | | | | | | | |
|------------------|--------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|-------------|
| | 28 dias | | | | | | | |
| | CP1-A | CP1-B | CP2-A | CP2-B | CP3-A | CP3-B | Média | D.P |
| C0,2Ref. | 104,13 | 92,95 | 102,43 | 98,65 | 100,78 | 99,13 | 99,68 | 3,88 |
| C0,2R10 | 85,30 | 103,05 | 89,50 | 102,48 | 103,75 | 89,48 | 95,59 | 8,37 |
| C0,2R20 | 96,00 | 105,15 | 94,00 | 95,41 | 100,63 | 94,75 | 97,66 | 4,35 |
| C0,2R0F1 | 104,95 | 106,78 | 107,26 | 102,33 | 109,98 | 114,15 | 107,57 | 4,10 |
| C0,2R20F1 | 101,38 | 104,13 | 115,83 | 112,33 | 114,15 | 111,10 | 109,82 | 5,77 |
| C0,2R0F2 | 125,18 | 126,55 | 116,50 | 120,68 | 118,40 | 121,70 | 121,50 | 3,86 |
| C0,2R20F2 | 113,85 | 115,50 | 114,35 | 124,53 | 119,05 | 111,05 | 116,39 | 4,76 |
| C0,3Ref. | 78,88 | 78,20 | 75,95 | 72,25 | 73,93 | 76,63 | 75,97 | 2,52 |
| C0,3R10 | 72,63 | 71,45 | 69,05 | 70,43 | 74,09 | 73,73 | 71,89 | 1,96 |
| C0,3R20 | 75,58 | 75,58 | 76,90 | 77,78 | 82,73 | 70,07 | 76,44 | 4,09 |
| C0,3R0F2 | 88,38 | 82,43 | 80,55 | 80,75 | 77,80 | 80,03 | 81,65 | 3,61 |
| C0,3R20F2 | 75,60 | 81,53 | 76,23 | 67,85 | 80,25 | 67,78 | 74,87 | 5,92 |

Tabela 25: Resistência à compressão axial dos concretos aos 91 dias

| Composições | Resistência à Compressão Axial (MPa) | | | | | | | |
|------------------|--------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|-------------|
| | 91 dias | | | | | | | |
| | CP4-A | CP4-B | CP5-A | CP5-B | CP6-A | CP6-B | Média | D.P |
| C0,2Ref. | 113,40 | 107,43 | 109,35 | 114,83 | 95,38 | 108,68 | 108,18 | 6,89 |
| C0,2R10 | 106,20 | 107,03 | 115,90 | 105,05 | 108,50 | 106,80 | 108,25 | 3,91 |
| C0,2R20 | 122,30 | 111,30 | 119,85 | 125,10 | 117,18 | 119,30 | 119,17 | 4,72 |
| C0,2R0F1 | 112,28 | 121,90 | 120,18 | 126,85 | 123,20 | 117,68 | 120,35 | 5,00 |
| C0,2R20F1 | 122,15 | 131,33 | 115,93 | 115,65 | 113,35 | 121,93 | 120,05 | 6,58 |
| C0,2R0F2 | 132,20 | 124,48 | 129,40 | 127,85 | 115,88 | 127,13 | 126,15 | 5,65 |
| C0,2R20F2 | 139,63 | 138,68 | 140,55 | 133,65 | 140,73 | 139,48 | 138,78 | 2,62 |
| C0,3Ref. | 86,56 | 83,53 | 90,75 | 85,90 | 86,00 | 80,73 | 85,58 | 3,34 |
| C0,3R10 | 76,38 | 79,95 | 82,23 | 80,53 | 82,30 | 78,83 | 80,03 | 2,24 |
| C0,3R20 | 91,70 | 84,83 | 86,43 | 92,68 | 87,63 | 90,33 | 88,93 | 3,11 |
| C0,3R0F2 | 88,21 | 89,83 | 87,80 | 90,85 | 92,53 | 84,63 | 88,97 | 2,75 |
| C0,3R20F2 | 84,38 | 86,90 | 89,18 | 81,83 | 82,10 | 87,15 | 85,25 | 2,97 |

APÊNDICE D-1

ANOVA dos ensaios de caracterização mecânica dos CUADs

Tabela 26: ANOVA para resultados de módulo de elasticidade de CUADs

| Critério | Amostras | p¹ | Diferença Estatística |
|---|----------------------------|----------------------|------------------------------|
| Teor de RPP – 28 dias | C0,2Ref-C0,2R10-C0,2R20 | 0,0077 | Significativa |
| | C0,2Ref-C0,2R10 | 0,0110 | Significativa |
| | C0,2Ref-C0,2R20 | 0,0101 | Significativa |
| | C0,2R10-C0,2R20 | 0,9362 | Não significativa |
| Teor de RPP – 91 dias | C0,2Ref-C0,2R10-C0,2R20 | 0,5601 | Não significativa |
| | C0,2Ref-C0,2R10 | 0,3814 | Não significativa |
| | C0,2Ref-C0,2R20 | 0,3911 | Não significativa |
| | C0,2R10-C0,2R20 | 0,7873 | Não significativa |
| Teor de Microfibras – 28 dias | C0,2Ref.-C0,2R0F1-C0,2R0F2 | 0,0011 | Significativa |
| | C0,2Ref.-C0,2R0F1 | 0,0134 | Significativa |
| | C0,2Ref.-C0,2R0F2 | 0,0281 | Significativa |
| | C0,2R0F1-C0,2R0F2 | 0,0018 | Significativa |
| Teor de Microfibras – 91 dias | C0,2Ref.-C0,2R0F1-C0,2R0F2 | 0,0187 | Significativa |
| | C0,2Ref.-C0,2R0F1 | 0,3458 | Não Significativa |
| | C0,2Ref.-C0,2R0F2 | 0,0052 | Significativa |
| | C0,2R0F1-C0,2R0F2 | 0,0560 | Não Significativa |
| Tempo de cura entre 28 e 91 dias | C0,2Ref. | 0,7995 | Não Significativa |
| | C0,2R10 | 0,0058 | Significativa |
| | C0,2R20 | 0,0021 | Significativa |
| | C0,2R0F1 | 0,0475 | Significativa |
| | C0,2R20F1 | 0,0061 | Significativa |
| | C0,2R0F2 | 0,15114 | Não Significativa |
| | C0,2R20F2 | 0,0005 | Significativa |

¹ Valores de $p < 0,05$ indicam uma diferença significativa entre as amostras analisadas;

Fonte: Autor (2022)

Tabela 27: ANOVA para resultados de resistência à tração na flexão dos CUADs

| Critério | Amostras | p¹ | Diferença Estatística |
|--|----------------------------|----------------------|------------------------------|
| Teor de RPP – 28 dias | C0,2Ref-C0,2R10-C0,2R20 | 0,0230 | Significativa |
| | C0,2Ref-C0,2R10 | 0,0457 | Significativa |
| | C0,2Ref-C0,2R20 | 0,0187 | Significativa |
| | C0,2R10-C0,2R20 | 0,2649 | Não significativa |
| Teor de RPP – 91 dias | C0,2Ref-C0,2R10-C0,2R20 | 0,0009 | Significativa |
| | C0,2Ref-C0,2R10 | 0,0028 | Significativa |
| | C0,2Ref-C0,2R20 | 0,0021 | Significativa |
| | C0,2R10-C0,2R20 | 0,4406 | Não significativa |
| Teor de Microfibras – 28 dias | C0,2Ref.-C0,2R0F1-C0,2R0F2 | 0,0002 | Significativa |
| | C0,2Ref.-C0,2R0F1 | 0,2053 | Não significativa |
| | C0,2Ref.-C0,2R0F2 | 0,0019 | Significativa |
| | C0,2R0F1-C0,2R0F2 | 0,0026 | Significativa |
| Teor de Microfibras – 91 dias | C0,2Ref.-C0,2R0F1-C0,2R0F2 | 0,0046 | Significativa |
| | C0,2Ref.-C0,2R0F1 | 0,6243 | Não Significativa |
| | C0,2Ref.-C0,2R0F2 | 0,0079 | Significativa |
| | C0,2R0F1-C0,2R0F2 | 0,0015 | Significativa |
| Teor de RPP em CUADs com Microfibra – 28 dias | C0,2R0F1-C0,2R20F1 | 0,0273 | Significativa |
| | C0,2R0F2-C0,2R20F2 | 0,1799 | Não Significativa |
| Teor de RPP em CUADs com Microfibra – 91 dias | C0,2R0F1-C0,2R20F1 | 0,3280 | Não Significativa |
| | C0,2R0F2-C0,2R20F2 | 0,1944 | Não Significativa |
| Tempo de cura entre 28 e 91 dias | C0,2Ref. | 0,0013 | Significativa |
| | C0,2R10 | 0,3710 | Não Significativa |
| | C0,2R20 | 0,0319 | Significativa |
| | C0,2R0F1 | 0,2843 | Não Significativa |
| | C0,2R20F1 | 0,0389 | Significativa |
| | C0,2R0F2 | 0,0769 | Não Significativa |
| | C0,2R20F2 | 0,1608 | Não Significativa |

¹ Valores de p < 0,05 indicam uma diferença significativa entre as amostras analisadas;

Tabela 28: ANOVA para resultados de resistência à compressão axial dos CUADs

| Critério | Amostras | p¹ | Diferença Estatística |
|--|----------------------------|-----------------------|------------------------------|
| Teor de RPP – 28 dias | C0,2Ref-C0,2R10-C0,2R20 | 0,3299 | Não Significativa |
| | C0,2Ref-C0,2R10 | 0,1620 | Não Significativa |
| | C0,2Ref-C0,2R20 | 0,4159 | Não Significativa |
| | C0,2R10-C0,2R20 | 0,4811 | Não Significativa |
| Teor de RPP – 91 dias | C0,2Ref-C0,2R10-C0,2R20 | 0,0035 | Significativo |
| | C0,2Ref-C0,2R10 | 0,9830 | Não Significativo |
| | C0,2Ref-C0,2R20 | 0,0091 | Significativo |
| | C0,2R10-C0,2R20 | 0,0014 | Significativo |
| Teor de Microfibras – 28 dias | C0,2Ref.-C0,2R0F1-C0,2R0F2 | 3,45*10 ⁻⁷ | Significativo |
| | C0,2Ref.-C0,2R0F1 | 0,0065 | Significativo |
| | C0,2Ref.-C0,2R0F2 | 1,95*10 ⁻⁶ | Significativo |
| | C0,2R0F1-C0,2R0F2 | 0,0001 | Significativo |
| Teor de Microfibras – 91 dias | C0,2Ref.-C0,2R0F1-C0,2R0F2 | 0,0003 | Significativo |
| | C0,2Ref.-C0,2R0F1 | 0,0057 | Significativo |
| | C0,2Ref.-C0,2R0F2 | 0,0006 | Significativo |
| | C0,2R0F1-C0,2R0F2 | 0,0887 | Não Significativo |
| Teor de RPP em CUADs com Microfibra – 28 dias | C0,2R0F1-C0,2R20F1 | 0,4556 | Não Significativo |
| | C0,2R0F2-C0,2R20F2 | 0,0681 | Não Significativo |
| Teor de RPP em CUADs com Microfibra – 91 dias | C0,2R0F1-C0,2R20F1 | 0,9328 | Não Significativo |
| | C0,2R0F2-C0,2R20F2 | 0,0006 | Significativo |
| Tempo de cura entre 28 e 91 dias | C0,2Ref. | 0,0250 | Significativa |
| | C0,2R10 | 0,0009 | Significativa |
| | C0,2R20 | 9,4*10 ⁻⁶ | Significativa |
| | C0,2R0F1 | 0,0007 | Significativa |
| | C0,2R20F1 | 0,0168 | Significativa |
| | C0,2R0F2 | 0,1264 | Não Significativa |
| | C0,2R20F2 | 1,46*10 ⁻⁶ | Significativa |

¹ Valores de p < 0,05 indicam uma diferença significativa entre as amostras analisadas;

APÊNDICE D-2

ANOVA dos ensaios de caracterização mecânica dos CADs

Tabela 29: ANOVA para resultados de módulo de elasticidade de CADs

| Critério | Amostras | p¹ | Diferença Estatística |
|---|-------------------------|----------------------|------------------------------|
| Teor de RPP – 28 dias | C0,3Ref-C0,3R10-C0,3R20 | 0,0037 | Significativa |
| | C0,3Ref-C0,3R10 | 0,0079 | Significativa |
| | C0,3Ref-C0,3R20 | 0,3069 | Não Significativa |
| | C0,3R10-C0,3R20 | 0,0156 | Significativa |
| Teor de RPP – 91 dias | C0,3Ref-C0,3R10-C0,3R20 | 0,0001 | Significativa |
| | C0,3Ref-C0,3R10 | 0,0004 | Significativa |
| | C0,3Ref-C0,3R20 | 0,0058 | Significativa |
| | C0,3R10-C0,3R20 | 0,0007 | Significativa |
| Teor de Microfibras – 28 dias | C0,3Ref- C0,3R0F2 | 0,1995 | Não Significativa |
| Teor de Microfibras – 91 dias | C0,3Ref- C0,3R0F2 | 0,0709 | Não Significativa |
| Tempo de cura entre 28 e 91 dias | C0,3Ref | 0,0023 | Significativa |
| | C0,3R10 | 0,0099 | Significativa |
| | C0,3R20 | 0,0054 | Significativa |
| | C0,3R0F2 | 0,0250 | Significativa |
| | C0,3R20F2 | 0,0006 | Significativa |

¹ Valores de $p < 0,05$ indicam uma diferença significativa entre as amostras analisadas;

Fonte: Autor (2022)

Tabela 30: ANOVA para resultados de resistência à tração na flexão dos CADs

| Critério | Amostras | p¹ | Diferença Estatística |
|---|-------------------------|----------------------|------------------------------|
| Teor de RPP – 28 dias | C0,3Ref-C0,3R10-C0,3R20 | 0,0240 | Significativa |
| | C0,3Ref-C0,3R10 | 0,0136 | Significativa |
| | C0,3Ref-C0,3R20 | 0,1689 | Não Significativa |
| | C0,3R10-C0,3R20 | 0,2457 | Não Significativa |
| Teor de RPP – 91 dias | C0,3Ref-C0,3R10-C0,3R20 | 0,1106 | Não Significativa |
| | C0,3Ref-C0,3R10 | 0,0602 | Não Significativa |
| | C0,3Ref-C0,3R20 | 0,2373 | Não Significativa |
| | C0,3R10-C0,3R20 | 0,2409 | Não Significativa |
| Teor de Microfibras – 28 dias | C0,3Ref- C0,3R0F2 | 0,0002 | Significativa |
| Teor de Microfibras – 91 dias | C0,3Ref- C0,3R0F2 | 0,0001 | Significativa |
| Teor de RPP em CUADs com Microfibras – 28 dias | C0,3R0F2-C0,3R20F2 | 0,4726 | Não Significativa |
| Teor de RPP em CUADs com Microfibras – 91 dias | C0,3R0F2-C0,3R20F2 | 0,4579 | Não Significativa |
| Tempo de cura entre 28 e 91 dias | C0,3Ref | 0,8861 | Não significativa |
| | C0,3R10 | 0,0977 | Não significativa |
| | C0,3R20 | 0,5484 | Não significativa |
| | C0,3R0F2 | 0,0111 | Significativa |
| | C0,3R20F2 | 0,0010 | Significativa |

¹ Valores de $p < 0,05$ indicam uma diferença significativa entre as amostras analisadas;

Tabela 31: ANOVA para resultados de resistência à compressão axial dos CADs

| Critério | Amostras | p¹ | Diferença Estatística |
|---|-------------------------|----------------------|------------------------------|
| Teor de RPP – 28 dias | C0,3Ref-C0,3R10-C0,3R20 | 0,0362 | Significativa |
| | C0,3Ref-C0,3R10 | 0,0108 | Significativa |
| | C0,3Ref-C0,3R20 | 0,8172 | Não Significativa |
| | C0,3R10-C0,3R20 | 0,0340 | Significativa |
| Teor de RPP – 91 dias | C0,3Ref-C0,3R10-C0,3R20 | 0,0003 | Significativa |
| | C0,3Ref-C0,3R10 | 0,0070 | Significativa |
| | C0,3Ref-C0,3R20 | 0,1023 | Não Significativa |
| | C0,3R10-C0,3R20 | 0,0002 | Significativa |
| Teor de Microfibras – 28 dias | C0,3Ref- C0,3R0F2 | 0,0102 | Significativa |
| Teor de Microfibras – 91 dias | C0,3Ref- C0,3R0F2 | 0,0823 | Não Significativa |
| Teor de RPP em CUADs com Microfibras – 28 dias | C0,3R0F2-C0,3R20F2 | 0,0423 | Significativa |
| Teor de RPP em CUADs com Microfibras – 91 dias | C0,3R0F2-C0,3R20F2 | 0,0507 | Não Significativa |
| Tempo de cura entre 28 e 91 dias | C0,3Ref | 0,0002 | Significativa |
| | C0,3R10 | $5,3 \cdot 10^{-5}$ | Significativa |
| | C0,3R20 | $1,4 \cdot 10^{-4}$ | Significativa |
| | C0,3R0F2 | 0,0028 | Significativa |
| | C0,3R20F2 | 0,0012 | Significativa |

¹ Valores de $p < 0,05$ indicam uma diferença significativa entre as amostras analisadas;