

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
Departamento de Engenharia Civil
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

Pedro Valle Salles

**COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS DE ALTO DESEMPENHO COM FINOS
DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

BELO HORIZONTE
2023

Pedro Valle Salles

**COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS DE ALTO DESEMPENHO COM
FINOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do CEFET-MG como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. Augusto Cesar da Silva Bezerra
Coorientador: Prof. Dr. Conrado de Souza Rodrigues

Belo Horizonte, março de 2023

Salles, Pedro Valle Salles
S168c Compósitos cimentícios de alto desempenho com finos de
resíduos de construção e demolição. / Pedro Valle Salles. -- Belo
Horizonte, 2023.
xiii , 97 f. : il.

Tese (Doutorado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
2023.
Orientador: Prof. Dr. Augusto Cesar da Silva Bezerra
Coorientador: Prof. Dr. Conrado de Souza Rodrigues.

Bibliografia

1. Resíduos como materiais de construção. 2. Cimento. 3.
Produtos reciclados. I. Bezerra, Augusto Cesar da Silva. II. Centro
Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título

CDD 691.3

Pedro Valle Salles

**COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS DE ALTO DESEMPENHO COM
FINOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil do CEFET-MG como requisito parcial
para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil

Prof. Augusto Cesar da Silva Bezerra
Orientador
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG

Prof. Conrado de Souza Rodrigues
Coorientador
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG

Profa. Flávia Spitale Jacques Poggiali
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG

Prof. Guilherme Jorge Brigolini Silva
Departamento de Engenharia Civil, UFOP

Prof. White José dos Santos
Departamento de Engenharia de Materiais e Construção Civil, UFMG

Belo Horizonte, março de 2023



Emitido em 02/03/2023

CÓPIA DE FOLHA DE ASSINATURAS Nº 1/2023 - DET (11.55.11)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 25/04/2023 09:55)

AUGUSTO CESAR DA SILVA BEZERRA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DET (11.55.11)
Matricula: ###064#6

(Assinado digitalmente em 26/04/2023 08:31)

CONRADO DE SOUZA RODRIGUES
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DPPG (11.52)
Matricula: ###243#0

(Assinado digitalmente em 25/04/2023 12:48)

FLAVIA SPITALE JACQUES POGGIALI
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DEC (11.56.07)
Matricula: ###903#6

(Assinado digitalmente em 25/04/2023 15:33)

WHITE JOSE DOS SANTOS
ASSINANTE EXTERNO
CPF: ###.###.746-##

(Assinado digitalmente em 25/04/2023 10:04)

GUILHERME JORGE BRIGOLINI SILVA
ASSINANTE EXTERNO
CPF: ###.###.386-##

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/documentos/> informando seu número: 1, ano: 2023, tipo: **CÓPIA DE FOLHA DE ASSINATURAS**, data de emissão: 25/04/2023 e o código de verificação: 8c33744425

Agradecimentos

Ao meu orientador Augusto Cesar da Silva Bezerra pela orientação, paciência, parceria e confiança.

Aos demais, professores Conrado de Souza Rodrigues, Flávia Spitale Jacques Poggiali, White José dos Santos e Guilherme Jorge Brigolini Silva, pela boa vontade e disponibilidade.

Aos meus pais, Renato e Iara, pelo constante amor, apoio, incentivo e dedicação ao longo da vida.

À Flávia, companheira de todas as horas, pela ajuda, pelo amor e, principalmente, pela paciência.

Aos meus avós pela paciência e apoio incondicional.

À minha irmã, Maria, que mesmo distante, se faz presente.

Às minhas amigas de longa data, Bárbara, Athená e Raquel, pela companhia e amizade todos esses anos.

Aos amigos da História, fundamentais na minha história, em especial, Alexandre, Aléssio, Bernardo, Marina, Heitor, Camila, Marina Helena, Felipe, Paulo, Thiago, Laís, Davi e Leandro.

Ao curso de doutorado em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais pela sabedoria e pelas oportunidades que me foram oferecidas e aos professores pelo convívio e conhecimentos compartilhados.

Aos funcionários, professores, colegas e amigos do CEFET-MG, em especial ao amigo de longa data Thiago.

À Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG) e a seus funcionários, pela acolhida durante esses anos

A Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades e por minha vida, família e amigos.

E a todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

*No fundo, no fundo,
bem lá no fundo,
a gente gostaria
de ver nossos problemas
resolvidos por decreto*

*a partir desta data,
aquela mágoa sem remédio
é considerada nula
e sobre ela — silêncio perpétuo*

*extinto por lei todo o remorso,
maldito seja quem olhar pra trás,
lá pra trás não há nada,
e nada mais*

*mas problemas não se resolvem,
problemas têm família grande,
e aos domingos
saem todos a passear
o problema, sua senhora
e outros pequenos probleminhas.*

Paulo Leminski

“Bem no fundo”

Resumo

A utilização de resíduos de construção e demolição (RCD) é de suma importância quando se trata de sustentabilidade na engenharia civil. A utilização desses resíduos como agregados reciclados é vastamente estudada, ainda que pouco utilizado na prática no contexto nacional. Contudo, devido às massivas quantidades de resíduos gerados mundialmente e a crescente dificuldade de sua disposição final, faz-se necessário o desenvolvimento de novas técnicas de reciclagem desses materiais. Neste contexto surge a possibilidade da utilização da parcela pulverulenta desses resíduos como adições minerais aos compósitos cimentícios. A presente tese apresenta duas possibilidades de utilização desses resíduos e avaliou a adequabilidade do uso de pós provenientes de RCD como materiais cimentícios suplementares e/ou aglomerantes. Inicialmente, estudou-se a adição de pó reciclado de tijolos de alvenaria (PRT). Posteriormente, avaliou-se a possibilidade de reciclagem do pó proveniente de pastas de cimento hidratado (PRC), por meio de tratamento térmico dessas. Esses pós serviram de substituinte/adição do cimento Portland em misturas de concretos de alto desempenho. De maneira geral, os resultados indicam que o PRT é uma adição extremamente viável, uma vez que o material se apresenta como pozolânico de acordo com os ensaios realizados, melhorando, nos ensaios avaliados, o desempenho dos traços compostos por ele. O PRC, apesar de cimentante, após tratamento térmico e ao substituir 20% do cimento Portland, mostrou-se, em certos aspectos, deletério às misturas realizadas. O PRC tratado a 800 °C é aquele que apresenta piores resultados e o tratado a 450 °C aquele que apresenta melhor desempenho, tendo em vista as moldagens com uso de RCD, exibindo perdas de resistência à compressão de aproximadamente 10%. De forma geral, é possível afirmar que o PRT e o PRC tratado a 450 °C apresentam resultados de resistência mecânica e indicativos de durabilidade que possibilitam a sua utilização como materiais cimentícios suplementares. O PRT provou-se pozolânico, o que possibilita seu uso como adição mineral em compósitos cimentícios. Além disso, foi possível obter alguma reatividade dos PRC tratados termicamente, controlando-se o problema da pega rápida esses resíduos também são potencialmente utilizáveis em traços com cimento Portland. A utilização de RCD gera ganhos ambientais, dependendo dos custos de processamento do resíduo, como a menor disposição de RCD em aterros e a não extração de matérias primas não renováveis, por exemplo, o que incentiva a continuidade do desenvolvimento de uso desses resíduos.

Palavras-chave: Resíduos de Construção e Demolição; Pós Reciclados; Compósitos Cimentícios de Alto Desempenho.

Abstract

The construction and demolition waste (CDW) use is important to sustainability in civil engineering. The use of these residues as recycled aggregates is widely studied, although it is poorly used in practice in the national context. However, due to the massive amounts of waste generated worldwide and the increasing difficulty of final disposal, it is necessary to develop new recycling techniques. In this context, the possibility of using these wastes as mineral additions to cementitious composites arise. This thesis presents two options for using these residues and evaluates the suitability of powders from CDW as supplementary cementitious materials and/or binders. First has been studied the partial replacement of Portland cement or silica fume by recycled powder from masonry bricks (PRT). Subsequently, the possibility of recycling the powder from hydrated cement pastes (PRC) has been evaluated by its heat treatment. These powders served as a substitute for Portland cement in high-performance concrete mixes. In general, the results indicate that PRT is a viable addition, since the material presents itself as pozzolanic, improving, in the tests evaluated, the performance of the traits containing PRT. PRC, although cementing, after heat treatment and when replacing 20% of Portland cement, proved to be deleterious to the mixtures made. The powder treated at 800 °C is the one that presents the worst results and the one treated at 450 °C presented the best performance among the mixtures with CDW, showing losses of resistance to compression of approximately 10%. In general, it is possible to state that PRT and PRC treated at 450 °C present results that allow their use as supplementary cementitious materials, consequently large environmental gains can be obtained with the continued development of these materials.

Key words: Construction and demolition waste; recycled powders; cementitious composites.

Lista de Figuras

Figura 1: Compilação de dados da <i>U.S. Geological Survey</i> sobre a produção de cimento entre os anos de 1994 e 2019.	2
Figura 2: Compilação de dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) sobre a coleta de RCD entre os anos de 2007 e 2021.....	14
Figura 3: Difração de raios X de uma amostra de pó reciclado de tijolo.....	27
Figura 4: Granulometria das matérias primas.	30
Figura 5: Variação da condutividade elétrica das soluções ao longo de 10 minutos.	33
Figura 6: Termogravimetria das pastas executadas.....	34
Figura 7: Fluxo de calor das pastas executadas (a) e detalhe do pico exotérmico (b).....	36
Figura 8: Calor de hidratação acumulado das pastas.	37
Figura 9: Índice de consistência médio dos traços produzidos.....	38
Figura 10: Resistência à compressão média aos 28 dias.	39
Figura 11: Resistência à compressão média aos 91 dias.	41
Figura 12: Módulo da elasticidade estático médio aos 28 dias.....	43
Figura 13: Resistência à tração média aos 28 dias.....	44
Figura 14: Absorção de água média aos 28 dias.	45
Figura 15: Massa específica média aos 28 dias.....	47
Figura 16: Distribuição Percentual de Poros aos 28 dias.	48
Figura 17: Perda de massa média dos CP após ataque ácido.....	49
Figura 18: Termogravimetria do PRC.	57
Figura 19: DRX das amostras. CPV (a), PRC0 (b), PRC450 (c) e PRC800 (d) .	59
Figura 20: Granulometria dos materiais utilizados.	61
Figura 21: Termogravimetria das pastas contendo PRC.....	64
Figura 22: Fluxo de calor nas pastas fabricadas.....	65
Figura 23: Calor de hidratação acumulado nas pastas fabricadas.	67
Figura 24: Índice de consistência médio dos traços.....	67
Figura 25: Resistência à compressão média aos 07 dias.	69
Figura 26: Resistência à compressão média aos 28 dias.	70
Figura 27: Módulo da elasticidade estático médio aos 28 dias.....	72
Figura 28: Resistência à tração média aos 28 dias.....	74
Figura 29: Absorção média aos 28 dias.....	75
Figura 30: Massa específica média aos 28 dias.	76

Figura 31: Perda de massa média devida ao ataque com ácido sulfúrico.....	77
Figura 32: Imagens de elétrons secundários da amostra PCR0. (a) imagem geral e (b) imagem de detalhe com indicação dos pontos das análises EDS presentes na Figura 33.	78
Figura 33: Padrões EDS obtidos na amostra PCR0, indicados na Figura 1b. (a) C-S-H. (b) Etringita.....	78
Figura 34: Imagens de elétrons secundários da amostra PCR450. (a) imagem geral e (b) imagem de detalhe com indicação dos pontos das análises EDS presentes na Figura 35.....	79
Figura 35: Padrões EDS obtidos em análises pontuais, indicadas na Figura 3b, em C-S-H da amostra PCR450.	79
Figura 36: Imagens de elétrons secundários da amostra PCR800. (a) imagem geral e (b) imagem de detalhe com indicação dos pontos de análises EDS presentes na Figura 37.....	80
Figura 37: Padrões EDS obtidos em análises pontuais, indicadas na Figura 3b, em C-S-H da amostra PCR800.	80

Lista de Tabelas

Tabela 1: Composição química do Cimento Portland e de alguns materiais cimentícios suplementares.	10
Tabela 2: Composição dos materiais pulverulentos utilizados.	26
Tabela 3: Fases dos principais picos presentes na amostra.	28
Tabela 4: Aferição da pozolanicidade a partir da variação da condutividade elétrica	28
Tabela 5: Siglas dos traços executados.....	31
Tabela 6: Variação de condutividade elétrica aos 120 segundos e classificação das amostras.	33
Tabela 7: Porcentagem de hidróxido de cálcio nas misturas.....	35
Tabela 8: Teste de Tukey para os resultados de resistência à compressão aos 28 dias.....	40
Tabela 9: Teste de Tukey para os resultados de resistência à compressão aos 91 dias.....	42
Tabela 10: Teste de Tukey para os resultados de módulo estático de elasticidade aos 28 dias.	44
Tabela 11: Teste de Tukey para os resultados de absorção de água aos 28 dias.	46
Tabela 12: Massa específica real das matérias primas utilizadas.	58
Tabela 13: Composição das matérias primas pulverulentas utilizadas.....	58
Tabela 14: Traços executados.....	62
Tabela 15: Porcentagem de hidróxido de cálcio nas misturas.....	64
Tabela 16: Teste de Tukey para os resultados de resistência à compressão axial aos 07 dias.	71
Tabela 17: Teste de Tukey para os resultados de resistência à compressão axial aos 28 dias.	72
Tabela 18: Teste de Tukey para os resultados de módulo de elasticidade aos 28 dias.....	73
Tabela 19: Teste de Tukey para os resultados de absorção de água aos 28 dias.	75

Lista de Siglas e Abreviaturas

A/C – Relação Água/Cimento

ANOVA – Análise de Variância

CAD – Concretos de Alto Desempenho

CCA – Cinza de Casca de Arroz

CUAD – Concretos de Ultra Alto Desempenho

CBIC – Câmara Brasileira de Indústria e Comércio

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CP – Corpos de prova

CPV ARI – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial

CPC – Cimento Portland Comum

CPR – Concreto de Pós Reativos

CSH – Silicato de Cálcio Hidratado

CV – Cinzas Volantes

EGAF – Escória Granulada de Alto Forno

MCS – Materiais Cimentícios Suplementares

ONU – Organização das Nações Unidas

PRC – Pó Reciclado Cimentício

PRT – Pó Reciclado de Tijolo

RCD – Resíduos de Construção e Demolição

SA – Sílica ativa

SP-II – Superplastificante Tipo II

TG – Termogravimetria

ZTI – Zona de Transição Interfacial

Sumário

1. Possibilidades de Uso de Resíduos de Construção e Demolição como Material Cimentício Suplementar	1
1.1. Introdução e Objetivos do Trabalho	1
1.2. Histórico do Uso de Adições Mineraias na Produção de Cimentos.....	6
1.3. Características e Mecanismos de Funcionamento das Principais Adições Mineraias Utilizadas na Composição de Cimentos Portland.....	8
1.3.1. Pozolanas.....	8
1.3.2. Escória de Alto Forno	12
1.3.3. Fíleres	12
1.4. Características do RCD e Seus Potenciais Para Uso Como Materiais Cimentícios Suplementares.....	14
1.4.1. Pozolanicidade	15
1.4.2. Efeitos dos pós reciclados de RCD na microestrutura de compósitos cimentícios	16
1.4.3. Influência dos pós reciclados de RCD na trabalhabilidade de compósitos cimentícios.....	17
1.4.4. Influência dos pós reciclados de RCD na resistência à compressão de compósitos cimentícios.....	18
1.5. Possibilidade do Uso de RCD Como Adição Para Concretos de Alto Desempenho.....	20
2. Utilização de Pós Provenientes de Resíduos de Tijolos na Fabricação de Compósitos Cimentícios de Alto Desempenho	22
2.1. Introdução	22
2.1.1. Resíduos cerâmicos utilizados como adições mineraias.....	23
2.2. Materiais e Métodos	26
2.3. Resultados	33
2.3.1. Pozolanicidade do PRT	33
2.3.2. Caracterização das Pastas	34
2.3.3. Trabalhabilidade	37
2.3.4. Resistência à Compressão Axial.....	39

2.3.5. Módulo de Elasticidade Estático	42
2.3.6. Resistência à Tração por Compressão Diametral	44
2.3.7. Absorção de Água	45
2.3.8. Massa Específica e Porosimetria por Intrusão de Mercúrio.....	47
2.3.9. Ataque Ácido	49
2.4. Conclusões	50
3. Possibilidades de Uso de Pó Reciclado Cimentício na Fabricação de Compósitos Cimentícios de Alto Desempenho	52
3.1. Introdução	52
3.1.1. Possibilidades de utilização de pós cimentícios reciclados	53
3.2. Materiais e Métodos	56
3.3. Resultados	64
3.3.1. Termogravimetria do PRC	64
3.3.2. Calorimetria das Pastas.....	65
3.3.3. Trabalhabilidade	67
3.3.4. Resistência à Compressão	68
3.3.5. Módulo de Elasticidade.....	72
3.3.6. Resistência à Tração	73
3.3.7. Absorção de Água	74
3.3.8. Massa Específica.....	76
3.3.9. Ataque Ácido	76
3.3.10. MEV/EDS.....	77
4. Considerações Finais	83
5. Referências	85

1. Possibilidades de Uso de Resíduos de Construção e Demolição como Material Cimentício Suplementar

1.1. Introdução e Objetivos do Trabalho

A produção do clínquer, principal constituinte do cimento, apresenta grande potencial poluidor. Estima-se que as emissões de gás carbônico (CO₂) possam chegar a uma tonelada, por tonelada de clínquer fabricado, estando nessa contabilização incluídas as emissões advindas da clinquerização, da queima de combustíveis para uso dos fornos e do transporte. A parcela de CO₂ atribuída à fabricação de cimento representa algo entre 3 e 8% das emissões totais mundiais (ANDREW, 2018; SHAN *et al.*, 2019; SUMMERBELL; BARLOW; CULLEN, 2016).

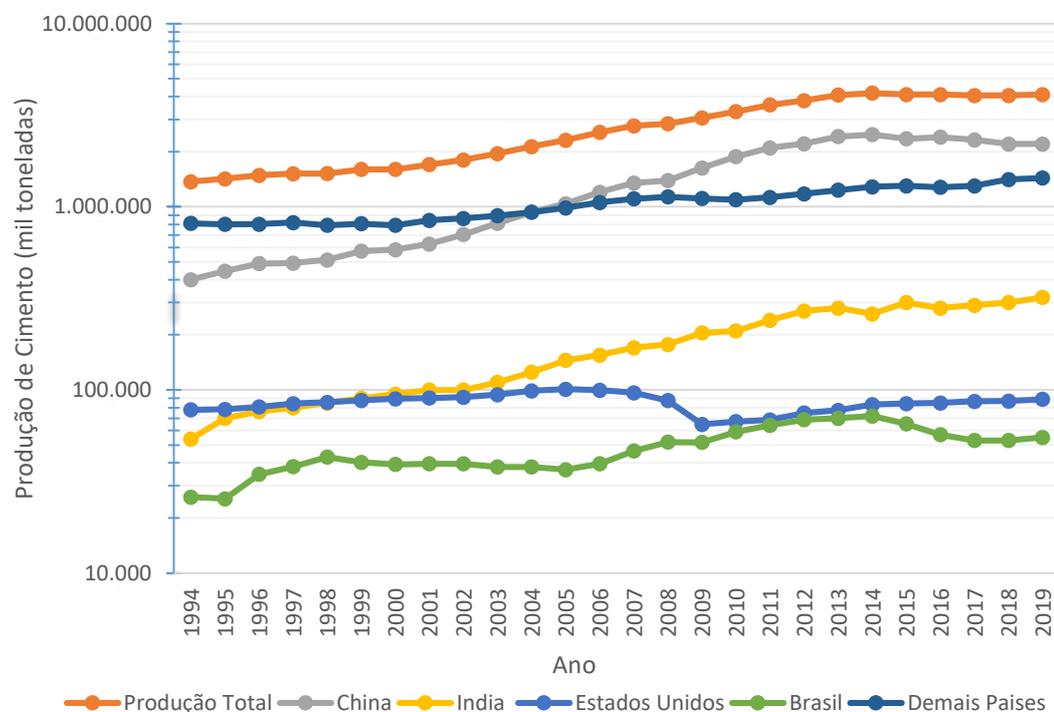
Além da emissão de gases de efeito estufa, a produção de clínquer para cimento consome algo em torno de 1,7 toneladas de matérias primas não renováveis para cada tonelada produzida e emite dois quilogramas de particulados finos. Rochas calcárias e argilas são as principais matérias primas utilizadas (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A produção de cimento Portland é algo que impressiona pelos números. Dos 193 países reconhecidos pela ONU, 159 fabricam esse material, sendo que 141 produzem clínquer para esse fim. No ano de 2019, mais de 4,1 bilhões de toneladas de cimento foram produzidas (U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2020), sendo que a quantidade de material produzido na China é maior que a produção de todos os outros países somados (EDWARDS, 2018; U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2020). No Brasil, de 1950 até 2013, nota-se que o consumo sempre foi maior que a produção, o que significa importações do produto. No ano de 2019 a produção nacional aproximou-se da marca de 60 mil toneladas anuais de cimento (CBIC, 2018; U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2020).

A Figura 1 demonstra a evolução na produção de cimento Portland nos cenários mundial e nacional de 1994 a 2019. Nota-se que nos últimos anos a China, maior produtora global, viu seu ritmo de crescimento na produção desacelerar. Os Estados Unidos mantêm um padrão constante de crescimento, tendo como exceção o período da crise econômica de 2008. A produção de cimento no Brasil também está fortemente atrelada à economia, nota-se que a partir do ano de 2014, com o início da recessão econômica, ocorre o queda na fabricação (U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001,

2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020).

Figura 1: Compilação de dados da *U.S. Geological Survey* sobre a produção de cimento entre os anos de 1994 e 2019.



Fonte: Dados compilados de U.S. Geological Survey (1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020).

Se por um lado há uma enorme demanda por cimento e seus derivados, por outro, há uma massiva geração de resíduos oriundos de construções e demolições, resíduos esses que provocam grandes problemas de disposição final em grandes centros urbanos (ZHANG *et al.*, 2015; ZHU, Y. G. *et al.*, 2013). Sendo assim, a tendência é que paulatinamente esses RCD sejam vistos como coprodutos de uma cadeia produtiva, o que exige um nível de conhecimento e estudos cada vez maior.

Apresentam-se, pois, dois problemas diretamente relacionados com a construção civil: i) o massivo uso de produtos cimentícios, que demanda enormes quantidades de matérias primas não renováveis e emite grandes quantidades de gases poluentes; ii) a gestão e disposição final de resíduos de demolição de construção (RCD).

Com a gradual mudança nos paradigmas ambientais, inclusive na construção civil, algumas estratégias já estão (mais ou menos) estabelecidas no

intuito de mitigar os problemas apresentados. Por exemplo, a utilização de RCD como agregados em concretos e argamassas é relativamente comum em diversos países, tendo sido, em 2021, normatizada no Brasil (ABNT, 2021). Outra estratégia, bem estabelecida é a de diminuir a produção de clínquer, para tanto utiliza-se resíduos (cinzas volantes, sílica ativa, escória de alto, cinzas de casca de arroz etc.), pozzolânicos ou cimentantes, como substituintes do cimento Portland.

Contudo, entende-se que somente essas estratégias são insuficientes para mitigar em grande escala os problemas indicados, pois quanto maior a quantidade de formas de se reduzir a extração de recursos não renováveis e a emissão de poluentes, e de se facilitar a disposição final de resíduos, mais o objetivo de uma indústria da construção sustentável se aproxima da realidade. De forma geral, é necessário o estudo e desenvolvimento de novas soluções que possam mitigar os impactos advindos da expansão da indústria da construção.

No viés dessa expansão os concretos de alto desempenho (CAD) são peças-chave, uma vez que sua utilização aumenta o consumo de insumos e neles há quase que obrigatoriamente demanda por materiais cimentícios suplementares (MCS) e fileres para que se atinja as características necessárias. Além disso, muitas vezes, a demanda do CAD por cimento Portland pode ser maior que o concreto convencional (MEHTA; AÏTCIN, 1990; TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2016).

De maneira incipiente, mas com alguma segurança, resíduos cerâmicos – pulverizados em granulometrias similares ou próximas às adições minerais convencionais – têm sido utilizados como adições minerais. Já a fração cimentícia dos resíduos tem ainda seu uso muito embrionário, sendo mal compreendida e mal estudada a utilização dos mesmos em substituição de adições minerais estabelecidas ou até mesmo do cimento Portland (WANG, J.; MU; LIU, 2018). Essa falta de conhecimento gera problemas, uma vez que, no contexto nacional, a separação das diversas frações constituintes dos RCD é inexistente. Quando se discute essas adições no contexto de concretos de alto desempenho, as informações e pesquisas se apresentam ainda mais restritas. O ineditismo desse trabalho está em utilizar RCD pulverizados, fração cimentícia e cerâmica, na fabricação de CAD, principalmente no que tange o aproveitamento da fração cimentícia do resíduo.

Entende-se que a fração cinza dos pós de RCD pode, mediante tratamentos térmicos, apresentar potencial de substituição de adições minerais/cimento Portland na constituição dos concretos. Além disso, inquire-se a possibilidade de fabricação de materiais de alto, ou ultra alto desempenho, com a utilização desses pós reciclados.

Diante do exposto surgem algumas perguntas norteadoras da pesquisa que se apresenta:

- Pós de RCD cinza e vermelho são potenciais substituintes dos cimentos e/ou adições minerais em compósitos cimentícios de alto desempenho?
- É possível, a partir de cominuição e tratamentos térmicos, transformar a fração cimentícia dos RCD em material cimentante, passível de aproveitamento em novos compósitos?
- É possível diminuir o consumo de cimento Portland/adições minerais nos traços onde há presença de pós de RCD?
- Qual o desempenho de compósitos cimentícios fabricados com PRT e PRC em relação a concretos tradicionais? Seria possível a produção de concretos de alto desempenho com a utilização desses materiais?

Diante disso, o objetivo geral deste trabalho é avaliar as possibilidades de inserção de pós de RCD em compósitos cimentícios de alto desempenho. Já entre os objetivos específicos estão:

- Apresentar as possibilidades do uso de resíduos de construção e demolição como material cimentício suplementar;
- Avaliar o uso de pó de resíduo cerâmico na fabricação de compósitos cimentícios de alto desempenho;
- Avaliar o uso de pó de resíduo cimentício tratado termicamente (ou não) na fabricação de compósitos cimentícios de alto desempenho.

Para tanto, a presente tese é estruturada em capítulos estanques, mas interligados pela mesma temática. O presente capítulo apresenta-se como introdutório, trazendo noções fundamentais e possibilidades de estudos, a justificativa e os objetivos do trabalho. O segundo capítulo apresenta resultados da utilização de pó de resíduos cerâmicos (não cimentícios) na fabricação de compósitos de alto desempenho. O terceiro capítulo apresenta resultados da

potencial reativação dos resíduos cimentícios e da utilização dos pós tratados termicamente como substituintes do cimento em CAD. Finalmente, o último capítulo apresenta as considerações finais do trabalho e possibilidades de estudos futuros.

1.2. Histórico do Uso de Adições Minerais na Produção de Cimentos

O uso de adições minerais na fabricação de produtos cimentantes remete à idade antiga. A utilização de cinzas vulcânicas, provenientes do monte Vesúvio, difundiu-se por todo império romano por volta de 1500 a.C. Possivelmente outros materiais foram utilizados como adições minerais, dentre eles é possível citar os tufos de origem vulcânica e, posteriormente, as argilas calcinadas (MALHOTRA; MEHTA, 1996).

Não apenas o antigo Império Romano beneficiou-se da utilização de materiais pozolânicos em cimentos, há relatos da utilização desses produtos nas sociedades egípcia e indiana. Entendia-se que a presença desses componentes, em cimentos à base de cal, aumentavam a resistência mecânica e durabilidade das peças fabricadas (COUTINHO, 1997).

Dentre as adições usualmente utilizadas, a Escória Granulada de Alto Forno (EGAF) é uma das mais difundidas e relevantes. O uso desse material cimentante tem suas origens em meados século XIX, onde a escória era comercializada como "Cimento de Escória". Nessa época, uma parcela significativa do cimento nos Estados Unidos vendido como Cimento Portland, era na verdade "Cimento de Escória" (PARIS *et al.*, 2016).

Apesar de ser reconhecida como material cimentante passível de utilização, a aceitação da escória na primeira metade do século XX foi bastante restrita, principalmente pelo desconhecimento de suas propriedades e pela concorrência por parte do cimento Portland. Após 1950, com o avanço científico proporcionado pela Segunda Guerra Mundial, a crescente escassez de matérias primas e crises relacionadas à produção de energia, foi possível a ascensão da EGAF como importante MCS (BAUER, 2015; COUTINHO, 1997).

Conceitos ligados à sustentabilidade e economia têm cada vez mais impulsionado a pesquisa, desenvolvimento, inovação, produção e utilização de materiais que possam substituir o clínquer na produção de cimentos e concretos, sendo raro, em diversas partes do mundo, a utilização de cimento sem a presença de MCS (JUENGER; SNELLINGS; BERNAL, 2019; MEYER, 2009; PARIS *et al.*, 2016).

É possível separar os materiais pozolânicos em dois grandes grupos: as pozolanas naturais e os subprodutos pozolânicos. O primeiro grupo engloba materiais que foram processados apenas com o intuito de se produzir pozolanas (vidros e tufas vulcânicas e argilas calcinadas, por exemplo). Já o segundo grupo

é formado por subprodutos de outros processos produtivos, não ligados à produção de adições minerais (podendo ser citados a cinza volante, a sílica ativa e a cinza de casca de arroz) (JUENGER; SNELLINGS; BERNAL, 2019; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A utilização de alguns tipos de adições minerais no cimento já é fato bem delimitado e entendido, cada vez mais MCS naturais são substituídos por resíduos ou subprodutos provenientes de outros processos produtivos (SKIBSTED; SNELLINGS, 2019). Com esse panorama em vista, faz-se necessário o entendimento dos mecanismos que possibilitam a utilização desses materiais em misturas cimentícias.

1.3. Características e Mecanismos de Funcionamento das Principais Adições Mineraias Utilizadas na Composição de Cimentos Portland

Nessa seção, apresentar-se-á os mais usuais materiais cimentícios suplementares e os mecanismos de ação que permitem que eles sejam utilizados na produção do Cimento Portland ou na substituição de parte dele.

1.3.1. Pozolanas

Pozolanas são materiais finamente pulverizados que, na presença de água e de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), reagem formando silicatos de cálcio hidratados (C-S-H). Diferentemente dos produtos cimentantes, elas incapazes de endurecerem apenas na presença de água e necessitam de produtos de hidratação do cimento para reagirem. Essas adições mineraias são, em geral, ricas em sílica reativa (amorfa) e materiais aluminosos, os principais responsáveis pelo efeito pozolânico (SKIBSTED; SNELLINGS, 2019).

A Equação 1 descreve a reação pozolânica em concretos:



Onde: S = Sílica amorfa reativa; CH = Hidróxido de Cálcio; H = Água e CSH = Silicato de Cálcio Hidratado

Em geral, as pozolanas podem apresentar composição química semelhantes aos do clínquer Portland (SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , por exemplo), diferindo na proporção dos constituintes e na combinação desses nas fases sólidas. Em consequência, cimentos com presença de pós pozolânicos resultam em produtos de hidratação semelhantes, desde que o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ esteja disponível. As proporções e a composição dos produtos de hidratação mudam significativamente após a reação progressiva do MCS. A reação de um material pozolânico silicioso, como a sílica ativa, leva à formação de C-S-H, como demonstrado na Equação 1 (SKIBSTED; SNELLINGS, 2019). Para materiais ricos em aluminossilicatos, por exemplo o metacaulim, também aparecem na equação da reação aluminatos de cálcio hidratados (SKIBSTED; SNELLINGS, 2019).

A reação demonstrada na Equação 1 é significativamente mais lenta que as de hidratação do silicato tricálcico (C_3S), o que explica a necessidade de maiores tempos para desenvolvimento da resistência ou de catalisação – térmica, por exemplo – para se evidenciar os efeitos da pozolanicidade (IMBABI; CARRIGAN; MCKENNA, 2013).

A utilização de pozolanas se dá, em geral, em adição ao cimento Portland, formando cimentos compostos. De acordo com Mehta e Monteiro (2014), a redução de custos foi provavelmente a razão original do desenvolvimento de cimentos compostos. No entanto, o incentivo para o grande crescimento da produção desses cimentos em muitos países da Europa e Ásia surgiu como resultado da economia de energia gerada pela diminuição do consumo de clínquer. Além disso, em certos aspectos, os cimentos com adições apresentam melhor desempenho do que o cimento comum. Além disso, com a diminuição na produção de clínquer, emite-se uma menor quantidade de gases de efeito estufa na atmosfera e evita-se a extração de matérias primas não renováveis.

Uma vez que as pozolanas apresentam reações mais lentas, as taxas de liberação de calor e desenvolvimento de resistência mecânica são conseqüentemente mais vagarosas. Outra questão é que nas reações pozolânicas consome-se calor em vez de produzi-lo, o que tem grande relevância com relação à durabilidade da pasta hidratada em ambientes ácidos. Aliado a isso, estudos de distribuição do tamanho dos poros de cimentos compostos hidratados mostram que os produtos da reação pozolânica são muito eficientes no preenchimento de espaços capilares, melhorando assim o comportamento mecânico e a impermeabilidade do sistema. De maneira geral, ao se adicionar pozolanas a cimentos comuns, ocorre a formação de novas partículas de C-S-H, o que melhora o desempenho físico, mecânico e durabilidade das misturas (MEHTA; MONTEIRO, 2014; SKIBSTED; SNELLINGS, 2019).

Dentre as pozolanas mais comumente utilizadas como MCS pode-se citar a sílica ativa (microsílica), as cinzas volantes, as cinzas de casca de arroz e o metacaulim (BEZERRA *et al.*, 2017; RAHHAL *et al.*, 2019). A Tabela 1 faz uma comparação entre a composição química desses materiais e o cimento Portland e da escória de alto forno. Nota-se a alta presença de SiO₂ nos materiais pozolânicos e semelhança de composição entre o Cimento Portland Comum (CPC) e a EGAF.

Tabela 1: Composição química do Cimento Portland e de alguns materiais cimentícios suplementares.

Material	Composição								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Outros
Cimento Portland	18,7–24,4	2,2–6,3	0,2–6,1	60,2–68,7	0,3–4,8	0,5–1,2	–	1,7–4,6	0,0–3,0
Sílica Ativa	85,0–97,0	0,2–0,9	0,4–2,0	0,3–0,5	0,0–1,0	0,1–0,4	0,5–1,3	0,0–0,4	0,0–1,4
Cinzas Volantes	59,9–70,6	17,5–26,6	3,9–11,1	0,9–3,7	0,4–0,6	0,1–0,4	1,3–3,1	0,0–0,5	–
Cinzas de Casca de Arroz	87,0–87,3	0,1–0,8	0,1–0,8	0,5–1,4	0,3–0,6	0,1–1,1	2,4–3,7	0,0–0,3	1,8–5,2
Metacaulim	45,7–63,2	20,1–46,9	0,4–21,5	0,1–1,5	0,0–2,0	0,1–2,2	0,0–1,2	0,0–0,5	–
Escória de Alto Forno	35,0–40,0	10,0–15,0	0,3–2,5	30,0–42,0	8,0–9,5	0,0–1,4	0,0–0,3	0,0–1,3	0,8–8,3

Fonte: Dados compilados de Abrão (2019) e Paris (2016).

1.3.1.1. Sílica ativa

Sílica ativa (SA), também conhecida como microssílica, é um subproduto da indústria de ferrosilício/silício formado quando o quartzo, reduzido a uma temperatura de 2000°C, forma gases ricos em dióxido de silício que se condensam, em filtros específicos, em partículas esféricas de sílica amorfa, essas são coletadas e utilizadas como adições minerais. Estima-se que a produção mundial de SA seja algo em torno de 15.000.000 de toneladas anuais (PARIS *et al.*, 2016).

A maior parte das partículas usuais de sílica ativa (95%) apresentam granulometria abaixo de 1×10^{-6} m. Esse fato, aliado à alta concentração de SiO₂, tornam o material um dos mais reativos e nobres para utilização como MCS (PARIS *et al.*, 2016). Contudo, a obtenção de microssílica não é tão simples quanto a de outras pozolanas, sendo necessário alto consumo energético no processo produtivo do ferrosilício/ silício (IMBABI; CARRIGAN; MCKENNA, 2013).

A finura excessiva pode causar problemas. Apesar de tornar o material altamente pozolânico, por outro lado cria dificuldades de manuseio e aumenta consideravelmente a necessidade de água no concreto, a menos que sejam utilizados aditivos redutores de água (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

1.3.1.2. Cinzas Volantes

As cinzas volantes são produzidas na combustão de carvão mineral e alguns outros combustíveis sólidos. Essas cinzas são expelidas juntamente com os gases de combustão e coletadas por meio de precipitação eletrostática, tendo como composição primária uma mistura heterogênea de óxidos de silício (SiO₂),

óxidos de alumínio (Al_2O_3) e óxidos de ferro (Fe_2O_3 , Fe_3O_4) (IMBABI; CARRIGAN; MCKENNA, 2013).

Tendo em vista diferenças significativas na composição e propriedades mineralógicas, as cinzas volantes podem ser classificadas em duas categorias que diferem entre si, principalmente, no conteúdo de cálcio. As cinzas da primeira categoria, que contém menos de 10% de CaO, geralmente são produtos da combustão de carvão antracito e betuminoso. As cinzas da segunda categoria, normalmente contendo 15 a 35% de CaO, são produtos da combustão de linhito e carvão sub-betuminoso. Em comparação, a cinza contendo maior quantidade de cálcio tende a ser mais reativa, uma vez que sua estrutura apresenta uma maior grau de amorfismo (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

1.3.1.3. Cinza de Casca de Arroz

A Cinza de Casca de Arroz (CCA) é um subproduto da queima da casca de arroz. A produção de uma tonelada de arroz gera 200 kg de cascas que, por sua queima controlada entre 500°C e 700°C, produzem 40 kg de cinzas reativas. Essas cinzas, por sua vez, são ricas em sílica amorfa, sendo consideradas altamente pozolânicas e quando utilizadas em conjunto com cimento Portland podem proporcionar melhorias no desempenho mecânico e de durabilidade de produtos finais (GOMES, 2019; REAL, 2018).

Além da pozolanicidade, devido à sua estrutura de poros, esse tipo de cinza absorve uma quantidade significativa de água livre no processo de mistura de produtos cimentícios. Com a diminuição do fator A/C efetivo das misturas é possível um aumento de resistência mecânica dos compósitos. Do mesmo modo, a CCA cumpre uma importante função no combate à retração nos materiais cimentícios, trabalhando de forma a proporcionar uma cura interna (GOMES, 2019; REAL, 2018).

1.3.1.4. Metacaulim

Trata-se de um tipo de argila, rica em sílica e alumina na forma de caulinita, que quando calcinada e moída fornece um material com alta superfície específica e alta reatividade pozolânica (VIEIRA, 2013). A calcinação, ocorrida entre 600 e 900°C, tem como objetivo a destruição da estrutura cristalina presente nos argilominerais e a formação de estrutura amorfa (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

As cerâmicas utilizadas na construção civil, e mais tarde constituintes dos resíduos de construção e demolição (RCD), podem ser relacionados ao

metacaulim, ambas passam por queimas controladas e podem apresentar reatividade como demonstrar-se-á na seção.

1.3.2. Escória de Alto Forno

Diferentemente das pozolanas, que dependem de produtos de hidratação do cimento para endurecerem e desenvolverem resistência mecânica, a escória de alto forno é auto cimentante, o que significa que com adição de água ela reage e endurece. Contudo, seu tempo de pega é muito longo e a quantidade de C-S-H formada insuficiente, o que inviabiliza a utilização do material de maneira estrutural (JUENGER; SNELLINGS; BERNAL, 2019).

A formação dessa escória se dá na produção do ferro gusa. Se a escória é resfriada lentamente ao ar, os componentes químicos do material apresentam geometria cristalina, que não reage com a água a temperatura ambiente e será fracamente cimentícia e pozolânica. No entanto, quando a escória líquida é rapidamente resfriada, a maior parte do cal, magnésia, sílica e alumina são mantidas em estado não cristalino ou vítreo, sendo assim reativa de maneira análoga às pozolanas (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

1.3.3. Fíleres

Os fíleres são materiais que têm como objetivo principal a melhoria das zonas de transição interfacial (ZTI), da microestrutura da matriz, da coesão e a diminuição da porosidade dos compósitos cimentícios. Primariamente, o fíler atua como preenchimento entre partículas maiores presentes no concreto (BAUER, 2015; OLIVEIRA *et al.*, 2017).

Em geral, esses materiais são entendidos como não reativos, ou seja, não apresentam efeitos pozolânicos ou cimentantes, sendo compostos, comumente, por rochas calcárias moídas finamente. Relacionando com o empacotamento de partículas, os fíleres podem ser utilizados com intuito de sanar uma distribuição granulométrica falhada, ou seja, preencher espaços entre partículas de diferentes tamanhos. Os fíleres calcários (FC) são resíduos advindos do processo de extração e manipulação de rochas calcárias, portanto ao serem utilizados no concreto apresentam ainda esse benefício ambiental de serem reaproveitados (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014).

Diante da necessidade de se absorver os RCD na própria atividade de construção civil e tendo em vista que grande parte dos resíduos gerados não apresentam reatividade de maneira *in natura* – resíduos cimentícios, em geral –

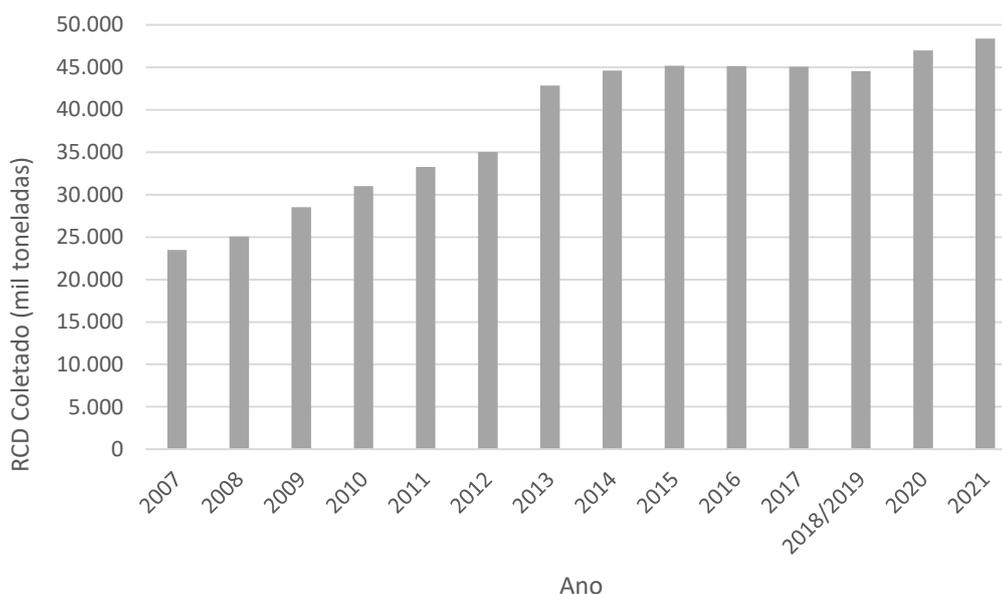
vislumbra-se a possibilidade da utilização desse material como fíleres cimentícios ou da reativação deles por meio de tratamento térmico.

1.4. Características do RCD e Seus Potenciais Para Uso Como Materiais Cimentícios Suplementares

Grande parte dos resíduos sólidos gerados em ambientes urbanos estão ligados às atividades de construção e demolição, sendo essa quantidade tida como, aproximadamente, metade de todos os resíduos urbanos gerados nos grandes centros (KWON *et al.*, 2015; LIU, Q. *et al.*, 2014).

Somente no Brasil, em 2021, coletou-se mais de 48 milhões de toneladas de resíduos, isso sem contabilizar as disposições irregulares. A Figura 2 demonstra a evolução na quantidade de RCD coletados de 2007 a 2021, onde ocorre estabilização na quantidade de resíduos produzidos nos últimos anos (ABRELPE, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2019, 2020, 2021, 2022).

Figura 2: Compilação de dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) sobre a coleta de RCD entre os anos de 2007 e 2021.



Fonte: Dados compilados da ABRELPE (2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022).

O problema da geração de RCD e do consumo exacerbado de concreto pode ser tratado por três vieses: o dispêndio de matérias primas não renováveis, a poluição gerada na extração e produção desses insumos e a disposição final dos resíduos gerados, uma vez que a edificação chega ao fim de sua vida útil (ABRELPE, 2019). O aproveitamento desses materiais como adições aos produtos cimentícios tem grandes possibilidades de mitigar essas questões.

A geração de pós é algo inerente à fabricação de agregados de RCD (utilização mais comum desses resíduos) e também à demolições e fabricações de estruturas e componentes construtivos, gerando dificuldades tanto no processo produtivo quanto na utilização dos agregados reciclados (DUAN *et al.*, 2020; RAVAL; PATEL; PITRODA, 2013). Com isso, torna-se interessante o estudo de destinações para essa fração fina do material.

1.4.1. Pozolanicidade

Por meio de uma visão macro dos RCD, é possível dividir os mesmos em dois grandes grupos: resíduos de origem cimentícias e de origem cerâmica. Os resíduos cerâmicos são compostos predominantemente de cacos e pulverulentos de cerâmicas vermelhas, como tijolos e telhas de barro. Os resíduos cimentícios são compostos basicamente de sobras ou demolições de concretos e argamassas. Enquanto é bem definido o fato dos resíduos cerâmicos serem considerados pozolânicos (ALIABDO; ABD-ELMOATY; HASSAN, 2014; DUAN *et al.*, 2020; GE *et al.*, 2015; HEIKAL; ZOHDY; ABDELKREEM, 2013; LIU, Q. *et al.*, 2014; XIAO *et al.*, 2018a; ZHU, P. *et al.*, 2016), o papel do pó de resíduos cimentícios é menos conhecido.

A reatividade de diversos pós pode ser estipulada pelo *strength activity index* e por análises químicas (ASTM, 2002, 2019). Analisando pós cerâmicos, Ge *et al.* (2015), indicam que, quanto menor a granulometria do resíduo, mais reativo esse se apresenta. Liu *et al.* (2014) classificam tanto o pó cerâmico quanto o pó cimentício, bem como a mistura de ambos, como reativos, sendo que essa reatividade novamente estaria ligada ao tamanho das partículas utilizadas, quanto mais finas elas se apresentam, mais reativas. Os autores ainda indicam que quanto maior a quantidade de RCD cerâmico na mistura, melhor o desempenho do pó reciclado.

Kwon *et al.* (2015), ao trabalhar com RCD cimentício, indicam que a constituição é formada por 75% de SiO₂. Kim e Choi (2015), trabalhando com resíduos de concreto, apontam que a constituição química do material é formada por 58,55% de dióxido de silício. Já com relação aos resíduos cerâmicos, Heikal, Zohdy e Abdelkreem (2012) indicam presença de SiO₂ compondo 75,06% do material. Aliabdo; Abd-Elmoaty; Hassan (2014) apontam 54,20% de dióxido de silício em RCD cerâmico. Trabalhando com um RCD misto, Xiao *et al.* (2018) indicam aumento SiO₂ na mistura do material com o cimento Portland, contudo há diminuição de Al₂O₃ e CaO. A presença de SiO₂ em possíveis adições minerais é

fundamental, uma vez que a reação pozolânica é estritamente dependente dessa substância.

Um ponto comum a diversos estudos é o fato de a reatividade do pó estar ligada à granulometria dele. Quanto mais fino o material, mais reativo esse se apresenta. Granulometrias próximas ao cimento, ou mais finas, são ideais para utilização. Recomenda-se que esses pós passem pela peneira de abertura de malha 0,45 mm, o que os caracterizariam com finura próximas a do aglomerante (LIU, Q. *et al.*, 2014; XIAO *et al.*, 2018a).

Como exposto na seção 1.2.1. a possibilidade de utilização de RCD como pozolanas apresenta diversas possibilidades de estudo e desenvolvimento de pesquisas.

1.4.2. Efeitos dos pós reciclados de RCD na microestrutura de compósitos cimentícios

Liu *et al.* (2014) apresentam resultados da microestrutura de argamassas fabricadas com 30% de pó híbrido (50% pó reciclado cerâmico e 50% pó reciclado cimentício). A microscopia eletrônica por varredura revela que o pó reciclado híbrido afeta a microestrutura da pasta de cimento, uma vez que o tamanho e a morfologia dos géis de C-S-H nas proximidades do pó híbrido são similares àqueles próximos à areia. Com isso o aumento da rugosidade superficial e do limite visível dos géis de C-S-H indicam uma ligação mais fraca em torno do pó híbrido.

Realizando a microscopia de uma pasta de cimento Portland com pó de RCD em comparação com outra sem substituição, Kim e Choi (2012) relatam que, apesar das duas partículas (com e sem RCD) terem formatos angulares, quando hidratado o aglomerante com RCD apresenta maior porosidade devido à formação de microporos provenientes da formação de Ca(OH)_2 .

Heikal, Zohdy e Abdelkreem (2012) indicam que a porosidade do concreto diminui com a adição de pó reciclado, isso se deve ao efeito pozolânico e à consequente formação de C-S-H. Algo parecido é indicado por Xiao *et al.* (2018), os autores relatam uma densificação da mistura devida às reações pozolânicas de pós de cerâmicas queimadas e ao efeito fíler das partículas não reativas, como, por exemplo, de cimentos hidratados.

Aliabdo, Abd-Elmoaty, Hassan (2014) confirmam a melhoria da microestrutura dos compósitos com a adição de pó cerâmico à mistura. Os autores

relatam uma diminuição na quantidade de poros e na frequência desses nos materiais fabricados.

Há, ainda, carência no entendimento de como esses pós reciclados podem afetar a microestrutura de um concreto. Por um lado, esses materiais reciclados se apresentam com uma maior porosidade, por outro lado, podem ser considerados reativos o que levaria a uma melhoria da microestrutura. É necessário ainda avaliar as possibilidades dos RCD não reativos de agirem como fíleres dentro da estrutura do material.

1.4.3. Influência dos pós reciclados de RCD na trabalhabilidade de compósitos cimentícios

A presença dos pós de RCD nas misturas de concreto trazem diversas mudanças na trabalhabilidade. O RCD apresenta formato irregular, granulometria variada e maior absorção de água, quando comparado ao cimento Portland e às demais adições minerais (GE *et al.*, 2015; KIM; CHOI, 2012; SALLES, 2018).

Ge *et al.* (2015), ao utilizarem pós cerâmicos como adições minerais em concretos, concluíram que quanto menores as partículas do RCD, menores os resultados de abatimento do tronco de cone, pois há um aumento da superfície específica do material e conseqüentemente da demanda de água. Outra constatação é que, quanto maior o grau de substituição do cimento pelo RCD menor a trabalhabilidade. Contudo, até 10% de substituição não causa danos ao desempenho do traço.

Substituindo microssilica por RCD misto, na fabricação de CPR, Zhu *et al.* (2016) expõem resultados onde ficam evidentes as perdas de trabalhabilidade dos traços com o aumento das substituições. Os autores atribuem esse fato à forma e a granulometria do RCD, contudo a trabalhabilidade das misturas é aceitável. Substituindo o cimento pelo pó de RCD não causa alterações significantes na trabalhabilidade de nenhum dos traços.

Utilizado pó híbrido (mistura entre materiais cimentícios e cerâmicos), Liu *et al.* (2014) relatam necessidade de acréscimo de 5% a mais de água para obter pastas de cimento com pós de RCD com mesma trabalhabilidade da referência. Os autores indicam que essa necessidade se deve aos cantos angulosos e bordas irregulares presentes no RCD, fato esse que leva a uma maior demanda de água.

Trabalhando com pó reciclado de concreto, Yong e Choi (2012) indicam perdas de trabalhabilidade proporcionais à substituição de cimento. O pó reciclado

utilizado tem uma granulometria mais fina que o aglomerante tradicional e, sendo assim, demanda mais água.

1.4.4. Influência dos pós reciclados de RCD na resistência à compressão de compósitos cimentícios

Quando da utilização de novas adições minerais, um dos pontos mais importantes é a resistência à compressão dos compósitos fabricados. O uso de materiais pozolânicos em substituição ao cimento, normalmente, provoca um retardo no ganho de resistência mecânica, fato que se deve à velocidade das reações pozolânicas (MEHTA; MONTEIRO, 2014). No caso de pós de RCD, é bem aceito o fato de adições advindas de cerâmicas serem reativas, já os pós cimentícios ficam na dependência de tratamentos térmicos ou presença de parcelas anidras (MENG *et al.*, 2021).

Kwon *et al.* (2015) utilizam pós de RCD cimentício para fabricação de concreto. A presença de RCD no aglomerante deu-se nos teores de 0, 10, 30, 50 e 65%. Os resultados aos 28 dias indicam perdas na resistência à compressão, perdas essas proporcionais a presença do RCD. Os resultados aos 90 dias indicam um maior ganho percentual de resistência mecânica dos concretos com pós reciclados em relação aos 28 dias, contudo, eles atingem, na melhor das hipóteses, 76% da resistência do concreto controle. Ainda no viés da utilização de pós advindos de concreto, Kim e Choi (2012) relatam grandes perdas de resistência à compressão, o que, segundo os autores, indica não reatividade da adição.

Substituindo 0, 10, 20 e 30% de cimento por pó cerâmico de RCD, Ge *et al.* (2015) expõem resultados que o cimento pode ser parcialmente substituído por pó cerâmico sem grandes perdas de desempenho. Com o aumento da substituição, a resistência à compressão nas primeiras idades diminui. Contudo, com o aumento da idade (90 dias) e do tempo de cura, o concreto com pó cerâmico tem desempenho similar ao concreto referência. Esse fenômeno pode ser explicado pela menor velocidade das reações pozolânicas.

Na fabricação de concretos autoadensáveis, Heikal, Zohdy e Abdelkreem (2012) substituem 0; 12,5; 25 e 37,5% de cimento por pó cerâmico de RCD. Os resultados aos 7 e 28 dias demonstram um pior desempenho dos concretos com resíduos. Essa tendência se inverte aos 366 e 1095 dias, com os concretos com pó cerâmicos tendo desempenhos melhores. No caso de fabricação de pastas de

cimento, os autores já relatam melhores desempenhos dos aglomerantes com presença de RCD já com 28 dias.

Uma outra possibilidade é a utilização de pós cerâmicos e cimentícios misturados, chamados de pós híbridos ou mistos. Utilizando pós mistos na fabricação de CPR, Zhu *et al.* (2016) apontam que o uso de RCD em substituição à sílica ativa (20, 40, 60, 80 e 100%) não causa perda de desempenho em relação à resistência à compressão. A substituição do cimento (9, 18, 27%) por pó de RCD demonstra que a resistência mecânica diminui em relação à referência. Sugere-se a substituição de 18% do cimento, uma vez que essa apresenta os melhores resultados.

Ainda tratando-se de pó híbrido, Liu *et al.* (2014) explicitam resultados que apontam para uma maior qualidade do pó cerâmico em relação ao cimentício. Diferentes proporções de cada pó são usadas em compósitos cimentícios, e conclui-se que quanto mais pó cerâmico na mistura, melhor o desempenho das argamassas.

Como pode-se entender, pelos estudos apresentados, os pós cerâmicos e cimentícios apresentam diferentes efeitos na resistência à compressão dos materiais fabricados. Como demonstrado, os pós cerâmicos apresentam maior reatividade pozolânica, sendo passíveis de serem utilizados como adição mineral ou substituinte do cimento Portland. Já os pós cimentícios têm sua reatividade colocada em dúvida, o que gera uma necessidade de avaliação desse tipo de resíduo, sendo outra utilização possível como fíler. O comportamento dos pós misturados (em diferentes proporções) também é algo passível de avaliação. A utilização de ambos em concretos de alto desempenho também é algo incipiente que deve ser estudado.

1.5. Possibilidade do Uso de RCD Como Adição Para Concretos de Alto Desempenho

Com o desenvolvimento da ciência dos materiais e da construção civil, novas demandas foram geradas, conseqüentemente novos materiais foram criados. Nesse contexto surgiram os concretos de alto desempenho (CAD) e de ultra alto desempenho (CAUD).

O CAD foi inicialmente discutido no início da década de 1990 e pode ser definido como um concreto que apresenta desempenho superior ao concreto convencional, devendo ser entendido desempenho não apenas pela resistência mecânica, mas também pelas características reológicas, físicas, químicas e, principalmente, pela durabilidade (MEHTA; AİTCIN, 1990). É comum a confusão entre alta resistência e alto desempenho, nota-se que o alto desempenho é algo mais geral se comparado a alta resistência, que em geral ocorre a partir dos 50/55 MPa (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2016).

A produção de concretos de alto desempenho está ligada a alguns métodos que visam a melhora dos agregados utilizados, a melhoria da microestrutura dos produtos, técnicas de dosagem baseadas no conceito de empacotamento de partículas e a utilização de adições minerais. Em resumo o CAD é uma evolução de técnicas que, segundo Tutikian, Isaia e Helene (2016), se resumem a:

- Redução do fator A/C e volume de água por m³, por meio de uso de aditivos plastificantes ou superplastificantes;
- Melhoria da granulometria dos agregados no intuito de obter maior compacidade e empacotamento da mistura. Para tanto a diminui-se o diâmetro dos agregados e adequa-se a composição granulométrica dos finos;
- Uso de adições minerais no objetivo de refinar a estrutura de poros com a formação de novos silicatos de cálcio hidratados (CSH).

Diante dessas técnicas vislumbra-se a possibilidade de utilização de pós de RCD em compósitos de alto desempenho, seja para melhorar a estrutura de poros, fornecendo partículas de preenchimento, quanto para melhora da zona de transição interfacial por meio de reações pozolânicas ou como cimentantes a partir de tratamentos. Uma interessante oportunidade de pesquisa se vislumbra, sendo ela a utilização de pós de RCD em concretos de alto desempenho. Muito pouco se discutiu sobre esse assunto de forma conjunta, com isso, entende-se que o

presente trabalho pode contribuir de forma relevante para a fabricação de CAD com viés sustentável.

2. Utilização de Pós Provenientes de Resíduos de Tijolos na Fabricação de Compósitos Cimentícios de Alto Desempenho

2.1. Introdução

A engenharia civil é uma das grandes responsáveis pela expansão da economia mundial e geração de riquezas, cumprindo um importante papel social e econômico no cenário mundial. Contudo, essa forte presença traz diversos ônus, principalmente no que tange questões ambientais. Como uma das maiores geradoras de resíduos e consumidora de matérias primas do planeta, a construção civil tem forte influência sobre a sociedade e o meio ambiente (RANI; JENIFER, 2016; YANG; LIU; MA, 2020; ZIMING *et al.*, 2021).

Os denominados Resíduos de Construção e Demolição (RCD), muitas vezes, causam problemas de forma acentuada, principalmente no que diz respeito à disposição final desses (SALES; FILHO, 2014; XIAO *et al.*, 2018b). Quantidades exorbitantes de RCD são gerados anualmente, principalmente nas nações em desenvolvimento. No Brasil, no ano de 2017 a coleta de RCD chegou a um valor de 123.421 toneladas por dia, o que corresponde a 57,45% de um total de 214.826 toneladas de resíduos sólidos coletados diariamente. Em 2018 houve uma pequena queda nesses valores, diariamente coletou-se 122.012 toneladas diárias de resíduos de construção e demolição, o que equivale a 56,32% do total coletado (ABRELPE, 2019). É importante frisar que os dados referentes aos RCD dizem respeito apenas aos materiais coletados, não englobando destinações e disposições irregulares.

Os problemas não se restringem apenas ao Brasil. A China, maior consumidora mundial de cimento, em 2014, produziu 2,5 bilhões de toneladas de resíduos de construção e demolição (GE *et al.*, 2012, 2015), sendo esse número reduzido para 1,8 bilhões de toneladas em 2017 (DUAN *et al.*, 2020). Mundialmente, a indústria da construção civil gera quantidades de RCD na casa dos 40 bilhões de toneladas anuais (XIAO *et al.*, 2018b).

No intuito de mitigar os problemas advindos da geração desses materiais, desde 2003, há no Brasil uma obrigatoriedade de segregação de resíduos de construção e demolição ditos Classe A, que podem ser reciclados como agregados na construção (BRASIL, 2002). De forma geral, o aproveitamento de RCD como agregado em concreto e pavimentação viária é algo bem aceito e

difundido mundialmente (ALIABDO; ABD-ELMOATY; HASSAN, 2014; GE *et al.*, 2015), sendo a utilização para fins estruturais desses agregados normatizada em alguns países europeus (LNEC, 2009; RILEM, 1994), fato contrário do que ocorre no contexto brasileiro.

Os RCD são majoritariamente formados por resíduos cimentícios e cerâmicas vermelhas, sendo que para a utilização como agregados, a parte cimentícia apresenta uma maior qualidade e um melhor desempenho, contudo a presença de cerâmicas podem representar até 50% do total de RCD (LIU, Q. *et al.*, 2014; ROBAYO-SALAZAR; RIVERA; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, 2017).

Inato ao processo de britagem dos agregados reciclados está a produção de materiais pulverulentos, além disso na própria cadeia produtiva de tijolos e telhas é alta a geração de pós residuais (DUAN *et al.*, 2020; RAVAL; PATEL; PITRODA, 2013). Esses materiais ainda são pouco estudados, tornando-se um entrave à reciclagem desses resíduos. De forma incipiente e recente, tem-se estudado a possibilidade de utilização desses pós reciclados como fíleres e/ou adições minerais em compósitos cimentícios (ZHAO *et al.*, 2021).

Afora a questão de geração de resíduos, apresenta-se, ainda, outros problemas relativos à produção de concreto. As matérias primas constituintes da mistura são, geralmente, provenientes de fontes não renováveis, o que tem gerado uma grande preocupação ambiental e, pontualmente, escassez de recursos (DUAN *et al.*, 2020; XIAO *et al.*, 2018b). Além disso a produção de cimento emite grande quantidade de CO₂ (aproximadamente 5% do total mundial), um dos grandes responsáveis pelo efeito estufa (GE *et al.*, 2015; LETELIER *et al.*, 2018).

Diante desse panorama ambiental na construção civil, é imperativo que novas possibilidades de reaproveitamento de resíduos sejam estudadas e avaliadas, principalmente quando se trata de compósitos cimentícios de alto desempenho, que notoriamente consomem elevada quantidade insumos.

2.1.1. Resíduos cerâmicos utilizados como adições minerais

A utilização de pós de resíduos de tijolos (PRT) em materiais cimentícios pode dar-se de duas formas, como fíleres e/ou como pozolanas. Três pré-requisitos básicos se apresentam com relação à pozolanicidade dos PRT, sendo eles a presença de sílica e alumina, o amorfismo das estruturas e a granulometria adequada (que também se mostra fundamental na utilização do material como fíler).

Entende-se como necessário que a soma dos percentuais de SiO_2 e de Al_2O_3 sejam maiores que 70% da constituição do material para que se possa considerar possível a pozolanicidade (ABNT, 2014a; ASTM, 2019; LUM *et al.*, 2018). No caso de tijolos cerâmicos é comum que esse requisito seja atendido (NAVRÁTILOVÁ; ROVNANÍKOVÁ, 2016). Sales e Filho (2014) indicam 71,5 % de sílica e alumina na composição do pó, Letelier *et al.* relatam 80,52% desses materiais e Garcia, Cabral e Júnior (2014) expõem resultados de 82,2; 84,3; 81,7 e 85,1% para resíduos cerâmicos provenientes de diferentes fabricantes de tijolos.

Com relação ao amorfismo, as cerâmicas vermelhas, em geral, são queimadas em temperaturas entre 700°C a 900°C. Nessas temperaturas, há alterações na estrutura cristalina do material, com algum grau de vitrificação da mistura. Quimicamente, ocorre a desidroxilação e amorfismo dos argilominerais, o que aumenta as possibilidades do material se apresentar como pozolânico (GARCIA *et al.*, 2014).

A respeito da granulometria, grande parte dos estudiosos aplicam a metodologia de britagem primária por meio de trituradores de mandíbula e secundária com utilização de moinho de bolas, sendo possível atingir granulometrias na mesma ordem de grandeza do cimento ou mais finas (DUAN *et al.*, 2020; GE *et al.*, 2015; XIAO *et al.*, 2018b). Apresenta-se ainda como possibilidade a utilização de moinhos planetários para moagem (MA *et al.*, 2020). Quanto maior a finura dos materiais obtidos, maior a reatividade e desempenho do mesmo (MA *et al.*, 2020).

A utilização de PRT se dá, usualmente, abaixo dos 30% de substituição do cimento, uma vez que valores que ultrapassam essa quantidade têm consideráveis efeitos deletérios sobre a mistura, uma vez que retira-se quantidade significativa de cimento Portland (LUM *et al.*, 2018), abaixo de 30% os resultados são conflitantes. Apresenta-se ainda a possibilidade de adição do pó reciclado de tijolo aos compósitos cimentícios, opção essa menos abordada.

Ge *et al.* (2015) expõem que o cimento pode ser parcialmente substituído pelo pó cerâmico sem grandes perdas de desempenho. Além dos 10% de substituição, o pó cerâmico diminui a trabalhabilidade dos concretos devido à sua alta absorção. Com o aumento da substituição do cimento pelo PRT, a resistência à compressão em idades menores diminui, contudo, com o avançar da idade (90 dias) e da cura, o concreto com pó cerâmico tem desempenho similar à referência, o que indica pozolanicidade do material.

Heikal, Zohdy e Abdelkreem (2012) indicam que a substituição de cimento por pós cerâmicos diminui a porosidade do material, aumentando assim a resistência à compressão, principalmente em idades mais avançadas, 1095 dias por exemplo. Navratilova e Rovnanikova (2016) relatam melhorias na resistência mecânica de todas as argamassas contendo pó proveniente de tijolos, em todos os níveis de utilização.

Por outro lado, Raval, Patel e Pitroda (2013) relatam que quanto maior a substituição de cimento por PRT, pior o desempenho mecânico do concreto, contudo para substituições de 10 e 20% as perdas de desempenho são menores que 10 e 20%, respectivamente. Sales e Filho (2014), indicam que o pó de tijolo apresenta reatividade, no entanto há perdas na resistência à compressão, principalmente nas primeiras idades.

Estudos sobre durabilidade de materiais cimentícios fabricados com pós cerâmicos reciclados são mais raros, é necessário entender mais profundamente o efeito dessas adições/substituições nos compósitos cimentícios.

O objetivo do presente estudo é avaliar a possibilidade da incorporação de pós de resíduos de tijolos em compósitos cimentícios de alto desempenho, uma vez que esses materiais demandam, quase que obrigatoriamente, adições minerais em sua composição.

2.2. Materiais e Métodos

O aglomerante utilizado na fabricação dos corpos de prova (CP) foi o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV ARI) da marca Brennand (Cimentos Nacional), com índice de finura de 0,08%. A massa específica real do cimento, bem como de todos os materiais utilizados, foi determinada por picnometria a gás Hélio, utilizando o Picnômetro Multipycnometer MVP-6DC Quantachrome, obtendo uma média de 3,04 g/cm³ para o cimento Portland. O ensaio de fluorescência de raios X (FRX) foi realizado em equipamento da marca Bruker, modelo S2 Ranger pelo método de pastilhas fundidas de tetraborato de lítio, os resultados são apresentados na Tabela 2, juntamente com os da sílica ativa e do PRT.

Tabela 2: Composição dos materiais pulverulentos utilizados.

Material	Composição (%)												
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	MnO	SrO	K ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂	Mn ₂ O ₃
Cimento Portland	23,29	6,45	4,99	55,92	2,51	-	0,61	0,39	1,65	1,66	-	2,50	-
Sílica Ativa	94,95	0,69	0,12	0,99	-	-	-	-	2,84	0,16	-	-	-
Pó reciclado de Tijolo	65,90	21,86	7,19	0,28	0,64	0,66	-	-	2,54	0,13	0,11	0,57	0,05

Fonte: O Autor (2023).

Como agregado miúdo, utilizou-se quartzo moído resíduo de britagem, com massa específica real média de 2,64 g/cm³, módulo de finura de 1,04 – o que classifica a areia como fina – e massa unitária solta de 1513,82 kg/m³ (ABNT, 2003, 2006).

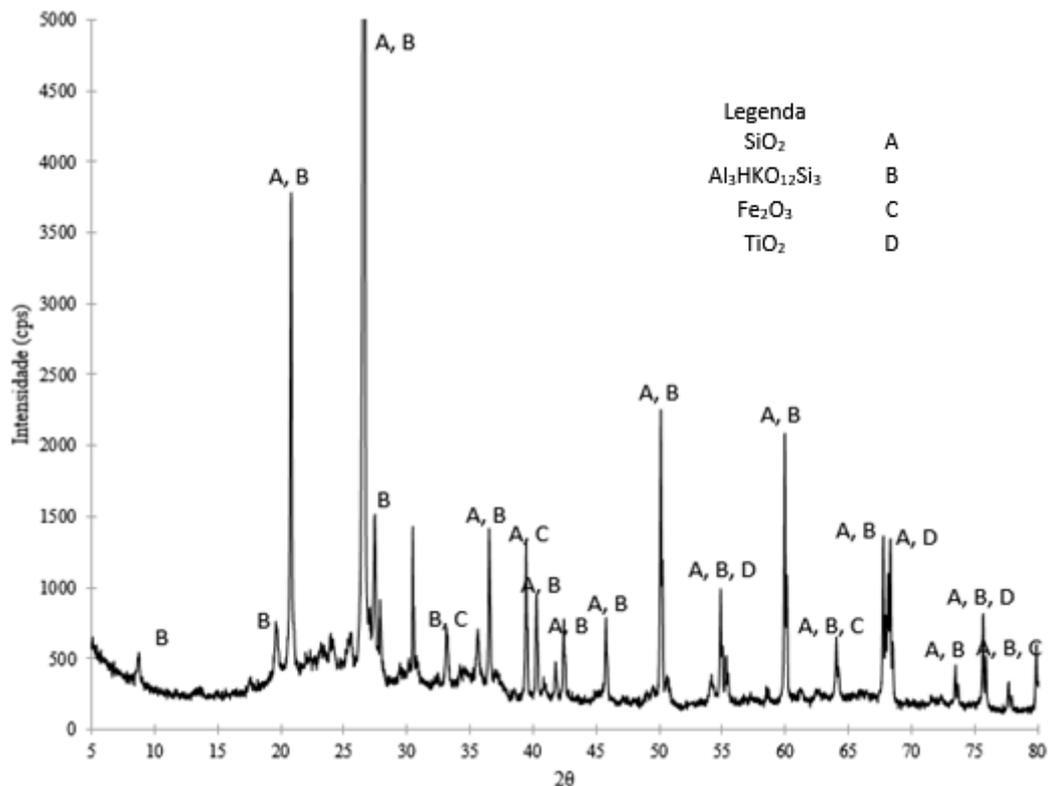
Para obtenção do pó reciclado, tijolos cerâmicos (de vedação, 9 furos e de marca comercial) passaram por britagem em um britador de mandíbulas. Após esse procedimento inicial, 10 kg de particulados obtidos foram colocados em moinho de bolas metálicas por dois períodos de uma hora cada, em rotação de 90 rpm, em um vasilhame com diâmetro de aproximadamente 30 cm. Para garantir que a granulometria do material estivesse na mesma ordem de grandeza do aglomerante fez-se necessário ainda a utilização de moinho planetário com 25 esferas cerâmicas de 20 mm, modelo PULVERISETTE, marca Fritsch, por quatro ciclos de 5 minutos cada com rotação de 300 rpm. Obteve-se então um pó com massa específica real média de 2,67 g/cm³. A opção pela fabricação do pó cerâmico deveu-se à dificuldade de obtenção de RCD sem mistura ou

contaminantes, com isso, para assegurar a composição e a menor variabilidade possível do material, optou-se pela fabricação do resíduo.

De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014a), o pó reciclado em questão classifica-se como material de classe N. Nessa classe é necessário que a soma entre óxidos de silício, alumínio e de ferro totalize, ao menos, 70 %. Atendendo a normativa, o FRX do PRT (Tabela 2) apresenta somatório de 94,95%, tendo concentração de óxido de silício em 65,90% e de alumínio em 21,86%. A perda ao fogo do material foi de 2,5%, a quantidade de SO_3 é de 0,13% e a de Na_2O é de 0,66%, todos esses resultados confirmam a classificação do material, conforme NBR 12653 (ABNT, 2014a) .

O pó reciclado de tijolo foi submetido a difração de raios X no difratômetro Shimadzu XRD-7000, sendo utilizado um tubo de raios X de cobre (Cu) com tensão de 40,0 kV e corrente elétrica de 30,0 mA, com varredura por passo de $0,02\theta$, variando de 5 a 80° , na velocidade de 5 s/passos. A Figura 3 indica os resultados dessa análise, que mostra uma prevalência de quartzo dentre os picos.

Figura 3: Difração de raios X de uma amostra de pó reciclado de tijolo.



Fonte: O Autor (2023).

A identificação dos picos foi realizada por meio do *Software Match!*, as fases e suas respectivas informações estão indicadas na Tabela 3. Já o

refinamento dos dados foi realizado pelo software FullProf (RODRIGUEZ-CARVAJAL, 1990). Importante observar que a pozolanicidade está ligada à presença de óxidos de silício e alumínio amorfos, que não podem ser detectadas na amostra por meio da análise de picos desse ensaio (SALES; FILHO, 2014). Entretanto, a alta radiação de fundo pode ser correlacionado ao halo amorfo, indicando a presença de alto percentual de fases não cristalinas.

Tabela 3: Fases dos principais picos presentes na amostra.

Fase	Match! COD Data-base	Fórmula	Índice	Área de Pico (%)
Quartzo	96-901-3322	SiO ₂	A	17,79
Moscovita	96-110-0014	Al ₃ HKO ₁₂ Si ₃	B	1,26
Hematita	96-210-8028	Fe ₂ O ₃	C	1,6
Anatásio	96-901-5930	TiO ₂	D	0,28
Picos não identificados	-	-	-	8,8
Difração de picos	-	-	-	29,73
Radiação de fundo (Background)	-	-	-	70,27

Fonte: O Autor (2023).

Para avaliação de pozolanicidade realizou-se ensaio nos moldes da NBR 5752 (ABNT, 2014b), para tanto corpos de prova foram moldados e rompidos aos 28 dias. A avaliação da pozolanicidade deu-se por meio da NBR 16697 que indica que a argamassa com os resíduos deve apresentar no mínimo 75% da resistência à compressão da argamassa referência aos 28 dias (ABNT, 2018a).

Ainda no intuito de aferir potencial pozolanicidade executou-se o Método da Condutividade Elétrica proposto por Luxán, Madruga e Saavedra em 1989. Tal método baseia-se na avaliação da condutividade elétrica de uma solução saturada de hidróxido de cálcio a 40 °C antes e depois da adição do material a ser avaliado, no caso o PRT. Tendo em vista a leitura obtida sem o material supostamente pozolânico e 120 segundos após a adição desse, classifica-se o material de acordo com a Tabela 4 (LUXÁN; MADRUGA; SAAVEDRA, 1989).

Tabela 4: Aferição da pozolanicidade a partir da variação da condutividade elétrica

Variação da Condutividade Elétrica (mS/cm)	Grau de Pozolanicidade
Abaixo de 0,4	Não Pozolânico
Entre 0,4 e 1,2	Moderadamente Pozolânico
Acima de 1,2	Altamente Pozolânico

Fonte: Lúxan, Madruga e Saavedra (1989).

Pastas com fator A/C de 0,33, desmoldadas após 24 horas e após cura de 28 dias foram submetidas à análise termogravimétrica. Para isso, utilizou-se

equipamento marca Hitashi modelo STA 7000 Series com variação de temperatura de 30 °C até 1000 °C com aquecimento de 10 °C/minuto, fluxo de nitrogênio de 180mL/min. A partir dos resultados foi possível aferir a quantidade de hidróxido de cálcio (CH %) nas pastas, tendo como base a Equação 2 (VOGLER *et al.*, 2022).

$$CH(\%) = M1 \left(\frac{74}{18} \right) + M2 \left(\frac{100}{44} \right) \quad (2)$$

M1 representa a perda de massa causada pela desidroxilação do CH (mg%), M2 representa a perda causada pela descarbonatação, já o CH (%) indica o percentual de hidróxido de cálcio presente nas pastas.

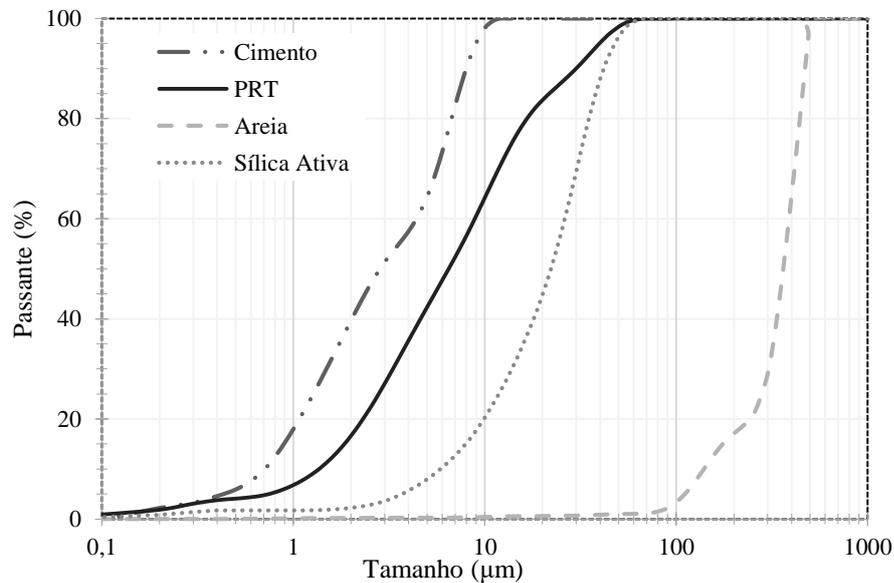
A calorimetria isotérmica foi realizada com intuito de determinar, principalmente, a liberação de energia em cada reação de hidratação e verificar se a temperatura atingida corresponde ao esperado para o SCM (*Standard Test Methods for Measuring the Reactivity of Supplementary Cementitious Materials by Isothermal Calorimetry and Bound Water Measurements*) (ASTM, 2021).

O calor de hidratação das pastas de cimento nas primeiras 72 h foi mantido constante em 23 °C, já a pressão atmosférica foi analisada usando um calorímetro isotérmico de alta precisão I-Cal 2000 HPC, da marca Calmetrix, com intuito de medir o fluxo de calor das pastas de cimento.

A mistura foi realizada com um misturador interno Intramix em duas sequências, sendo iniciada 30 min após o fechamento do compartimento de amostra. A primeira sequência consistiu em 40 ciclos de giros de 720°. A segunda sequência consistiu em 40 ciclos de giros de 360°. A velocidade de mistura foi de 200 rpm para ambas as sequências. A água foi adicionada no décimo ciclo da primeira sequência. Quando as amostras sólidas (30 g) e água (9,9g) foram misturadas, a aferição do calor de hidratação foi iniciada. O setup programado coletava dados a cada 5 segundos.

A granulometria dos materiais foi aferida por meio de um granulômetro a laser CILAS 1090 LASER, utilizado com água ou álcool anidro, e os resultados estão expostos na Figura 4. Com relação ao material reciclado, o diâmetro médio encontrado foi de 11,02 µm, sendo o d50 igual a 6,47 µm e o d90 igual a 29,96 µm, sendo que a NBR 12653 (ABNT, 2014a) exige que menos de 20% do material seja retido na peneira de 45 µm, requisito atendido pelo PRT. Já o ensaio de área superficial pelo método BET indicou um resultado de 14,39 m²/g.

Figura 4: Granulometria das matérias primas.



Fonte: O Autor (2023).

A sílica ativa utilizada no trabalho é da marca Tecnosil (Silicon), com diâmetro médio de 19,31 µm, d_{50} igual a 18,49 µm e o d_{90} igual a 34,22 µm. A massa específica do material pozzolânico é de 2,25 g/cm³ e sua área superficial de 17,71 m²/g.

Finalmente, utilizou-se o aditivo superplastificante do tipo II (SP-II) Silicon ns high 400, da marca Tecnosil, onde o fabricante recomenda a utilização entre 0,55 e 2,2% do peso do cimento. O aditivo possui massa específica de 1,07 a 1,11 g/cm³, pH entre 2 e 4 e teor de cloretos solúveis em água menor que 0,15% (TECNOSIL, 2015).

As adições foram feitas por peso e o compósito referência foi dosado por empacotamento de partículas, com o auxílio do Software EMMA. Adotou-se metodologia de Andreassen modificada e q -valor de 0,28. O módulo de distribuição q , assumindo valor de 0,37, fornece a densidade máxima de empacotamento em função dos materiais a serem utilizados (FUNK; DINGER, 1994). Contudo, esse valor não origina um concreto com boa trabalhabilidade, uma vez que o grau de compactação é muito alto. Com isso, opta-se por valores de q menores que 0,30, sendo que dessa forma favorecem a trabalhabilidade (VANDERLEI, 2004).

Para avaliação das propriedades mecânicas das misturas moldou-se corpos de prova (CP) cilíndricos de 5 x 10 cm. O compósito controle, referência do trabalho, apresenta o traço de 1: 1,95 e fator A/C de 0,33, com consumo de 639,94 kg/m³ de cimento, 1.242,04 kg/m³ de areia e 211,18 kg/m³ de água. Após 24 horas os CP foram submersos em água saturada com hidróxido de cálcio, sendo mantidos em temperatura ambiente até a data dos ensaios.

Os teores de adição de PRT fixaram-se em 5, 10 e 15% em relação ao peso do cimento Portland. Já com relação à sílica ativa, a porcentagem de adição ficou em 10%. Um traço com a mistura de sílica ativa e PRT foi fabricado na proporção de 5% de cada um dos materiais, em relação ao peso do cimento. Em todos os traços manteve-se a relação A/C em 0,33. A Tabela 5 indica a sigla os traços elaborados.

Tabela 5: Siglas dos traços executados.

Sigla	CC	PRT5	PRT10	PRT15	SA10	SA5PRT5
Traço	Compósito Controle	Adição de 5% de PRT	Adição de 10% de PRT	Adição de 15% de PRT	Adição de 10% de SA	Adição de 5% de SA e 5% de PRT

Fonte: O Autor (2023).

A trabalhabilidade das misturas foi avaliada por meio de ensaio em *flow table*, sendo seguidas as recomendações exposta na NBR 13276 (ABNT, 2016). As quantidades de aditivo adicionadas em cada traço – respeitando a recomendação do fabricante – foram suficientes para garantirem a trabalhabilidade e a moldagem dos CP: CC, PRT5 e SA10 1,2% do peso do cimento, PRT 10 1,6% do peso do cimento, PRT15 1,8% do peso do cimento e SA5PRT5 1,4% do peso do cimento.

O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado aos 28 e 91 dias, segundo o exposto na NBR 5739 (ABNT, 2018b). O módulo estático de elasticidade foi aferido por meio da norma NBR 8522 (ABNT, 2008) aos 28 dias, ambos ensaios realizados com uma velocidade de carregamento de 0,5 MPa/s. Já o ensaio de tração por compressão diametral seguiu o proposto na NBR 7222 (ABNT, 2011), sendo também realizado aos 28 dias. Todos os ensaios mecânicos foram realizados em equipamento universal de ensaios da marca EMIC com capacidade de 300 kN.

Com relação a ensaios físicos, a densidade do compósito endurecido foi avaliada por meio de picnometria a gás Hélio, já a porosidade foi medida por meio de porosímetro por intrusão de mercúrio (PIM) por meio do equipamento

Quantachrome PoreMaster 60, ambos ensaios ocorreram aos 28 dias. Já a absorção de água por imersão pautou-se na norma NBR 9778 (ABNT, 2009), ocorrendo também aos 28 dias.

Realizou-se, ainda, ataque ácido dos corpos de prova por meio de imersão deles em ácido sulfúrico. Para tanto, elaborou-se solução aquosa com concentração de 0,5% de ácido. Em período anterior ao ataque, os corpos foram seco em estufa e pesados, após sete dias submersos realizou-se novamente o procedimento e registrou-se a perda de massa.

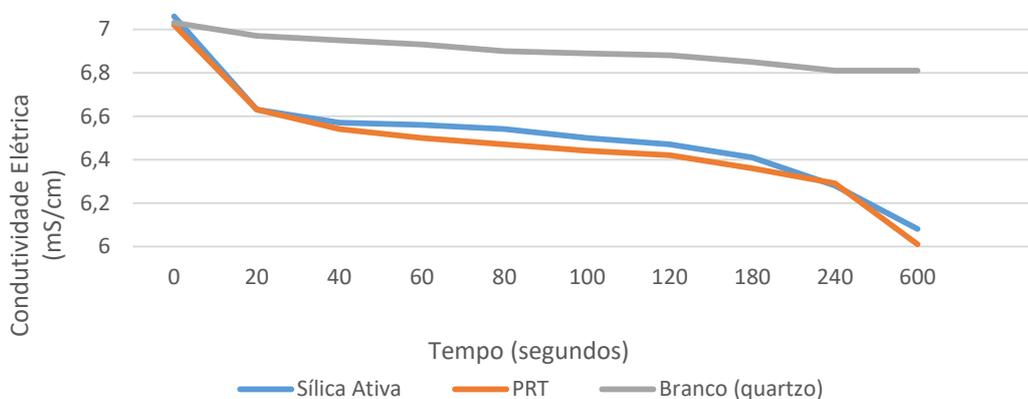
Para aferição de possíveis diferenças significativas entre as médias dos resultados encontrados foi realizada análise de variância (ANOVA), onde pressupõem-se na hipótese nula (H_0) que as médias sejam iguais e na hipótese alternativa (H_1) que há alguma diferença significativa entre elas, para tal análise o nível de significância foi de 5%. Nos casos em que rejeitou-se H_0 , foi realizado o Teste de Tukey, ao nível de significância de 5%, para identificar entre quais médias há diferença significativa. Tal procedimento foi realizado para os resultados de resistências à compressão, à tração, módulo de elasticidade, absorção de água e ataque ácido, no intuito de vislumbrar reais diferenças estatísticas entre as médias de resultados obtidos.

2.3. Resultados

2.3.1. Pozolanicidade do PRT

Os resultados de resistência à compressão aos 28 dias das argamassas contendo 25 % de PRT indicam índices de desempenho com cimento Portland de 77%. Segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018 a, p.7) “A atividade do material pozolânico utilizado como adição, determinada conforme a ABNT NBR 5752, deve ser no mínimo de 75 % aos 28 dias.”. Com isso, o resultado obtido caracteriza o PRT como um material pozolânico passível de ser utilizado como adição ao cimento. A Figura 5 indica a variação da condutividade elétrica das soluções preparadas.

Figura 5: Variação da condutividade elétrica das soluções ao longo de 10 minutos.



Fonte: O Autor (2023).

A Tabela 6 expõe o valor da variação de condutividade elétrica aos 120 segundos e classifica os materiais avaliados segundo a Tabela 4.

Tabela 6: Variação de condutividade elétrica aos 120 segundos e classificação das amostras.

	Sílica Ativa	PRT	Branco (quartzo)
Condutividade Inicial (mS/cm)	7,06	7,02	7,03
Condutividade aos 120 s (mS/cm)	6,47	6,42	6,88
Varição de Condutividade (mS/cm)	0,59	0,60	0,15
Classificação	Moderadamente Pozolânico	Moderadamente Pozolânico	Não Pozolânico

Fonte: O Autor (2023).

Os dados expostos na Figura 5 e na Tabela 6 corroboram a pozolanicidade indicada pela NBR 16697 (ABNT, 2018a), indicando mesmo grau de pozolanicidade para ambas adições minerais utilizadas. Tanto o PRT quanto a SA classificam-se como moderadamente pozolânicos, sendo essa pozolanicidade do RCD confirmada por diversos autores (HEIKAL; ZOHDY; ABDELKREEM, 2013; LETELIER *et al.*, 2018).

Essa pozolanicidade reforça a possibilidade de pós reciclados oriundos de materiais cerâmicos poderem ser usados como MCS, uma vez que são potencialmente reativos, formando novos silicatos de cálcio hidratados quando utilizados em conjunto com o cimento Portland.

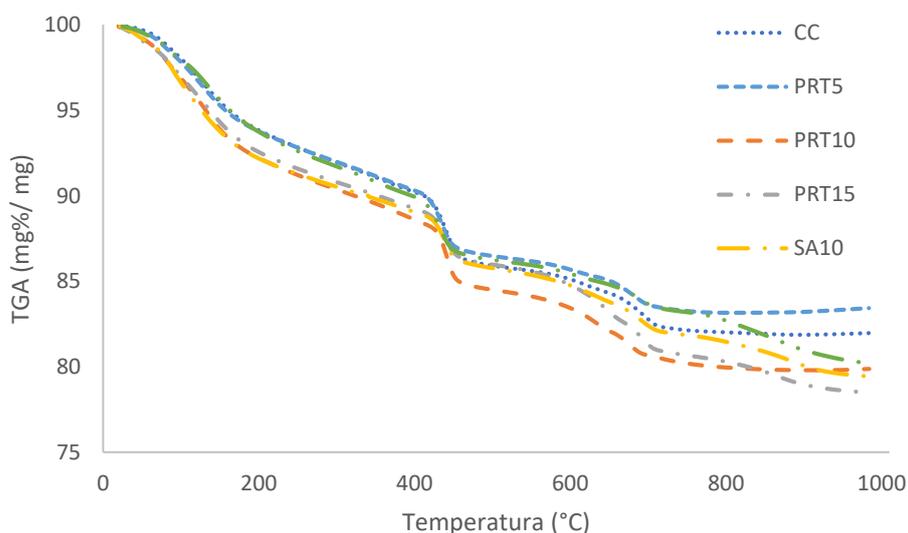
2.3.2. Caracterização das Pastas

2.3.2.1. Termogravimetria das Pastas

A percentagem de hidróxido de cálcio (CH) em misturas cimentícias está diretamente ligado à hidratação do cimento Portland e a potenciais reações pozolânicas advindas de MCS utilizados nas misturas executadas (RUPASINGHE *et al.*, 2017).

A Figura 6 apresenta as curvas obtidas no ensaio de Termogravimetria das pastas.

Figura 6: Termogravimetria das pastas executadas.



Fonte: O Autor (2023).

As quedas acentuadas apresentadas nos gráficos representam três momentos distintos do processo. Entre 80 e 200 °C ocorre a perda da água livre e da água ligada ao CSH e à etringita; entre 400 e 500 °C vislumbra-se a

desidroxilação do CH; já a perda de peso na faixa de temperatura de 600 a 800 °C representa a descarbonatação do CaCO₃ (RUPASINGHE *et al.*, 2017; WANG, X. *et al.*, 2021).

A Tabela 7 indica a porcentagem de CH nas pastas analisadas, os valores foram obtidos tendo em vista a Equação 2.

Tabela 7: Porcentagem de hidróxido de cálcio nas misturas.

Traço	CH (%)
CC	24,79
PRT5	21,49
PRT10	21,35
PRT15	21,13
SA10	20,99
PRT5SA5	21,39

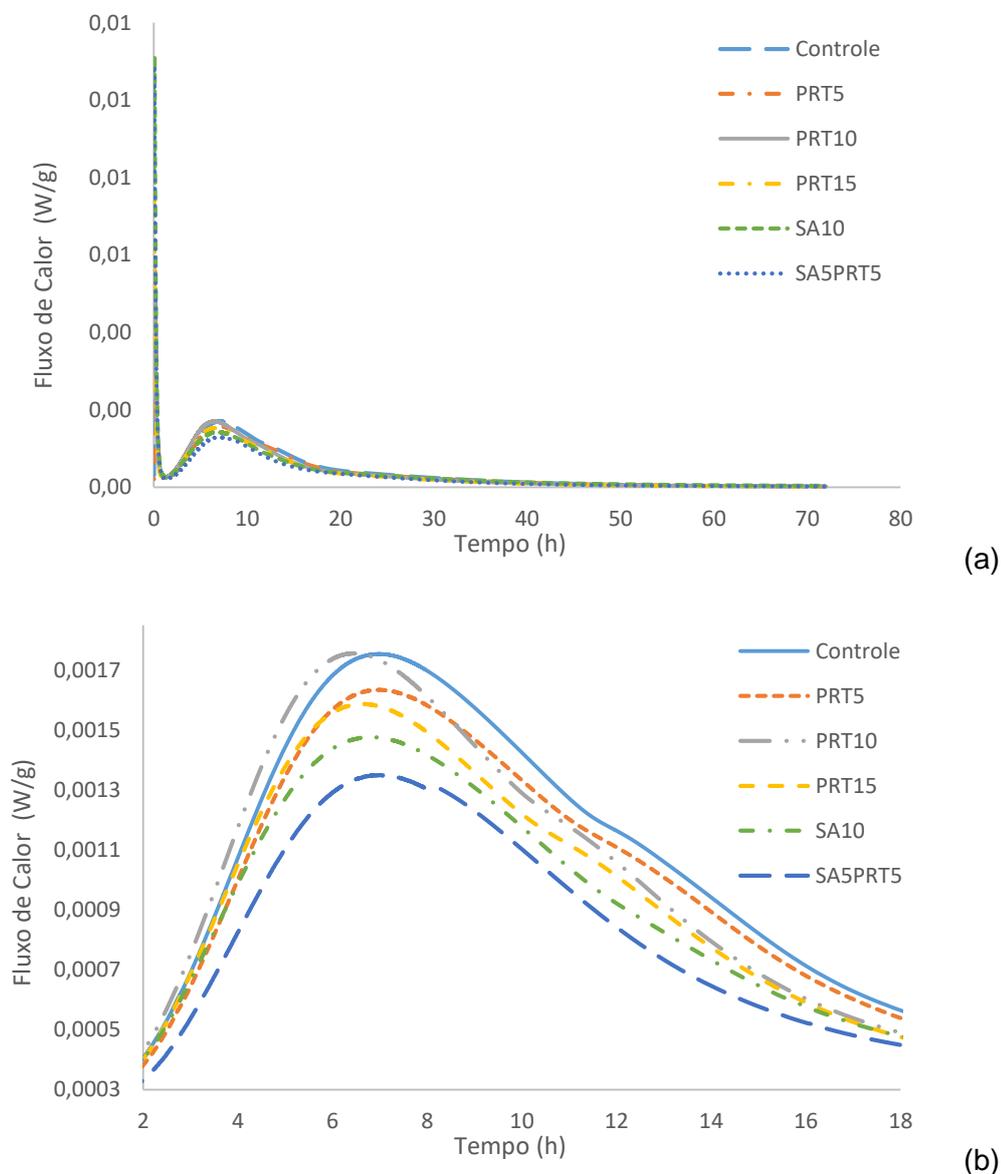
Fonte: O Autor (2023).

Nota-se que a adição do PRT e da SA ao cimento Portland diminuem as porcentagens de CH nas pastas. Isso reforça a hipótese que os pós advindos de cerâmicas queimadas são reativos, uma vez que as reações pozolânicas consomem CH da mistura transformando-os em C-S-H. Esse indicativo de pozolanicidade é corroborado por outros estudos que apontam o PRT como um material reativo (GARCIA *et al.*, 2014; SALES; FILHO, 2014; WANG, X. *et al.*, 2021). Infere-se que em ensaios realizados em períodos mais longos de cura essa diferença entre a porcentagem de CH do compósito controle e dos demais acentue-se, uma vez que as reações pozolânicas, usualmente, ocorrem em idades mais tardias.

2.3.2.2. Calorimetria das Pastas

A Figura 7, (a) e (b), indica a o fluxo de calor nas pastas avaliadas. É possível dividir a hidratação do cimento Portland em cinco fases principais: de indução; de dormência; de aceleração; de desaceleração e final. Na fase de indução (0 – 2 horas, aproximadamente), o pico corresponde à dissolução exotérmica do material e reações precoces de hidratação. No período de dormência (cerca de 2 – 5 horas) ocorre a difusão de Ca²⁺. Já na fase de aceleração (em torno de 5 – 8 horas) e no período de desaceleração (por volta de 8 – 14 horas), o pico exotérmico ocorre devido à hidratação do C₃S e da formação de C-S-H e CH. No período final (> 14 horas), a taxa exotérmica diminui e tende a ser estável (SORIANO *et al.*, 2013; XU *et al.*, 2016).

Figura 7: Fluxo de calor das pastas executadas (a) e detalhe do pico exotérmico (b).

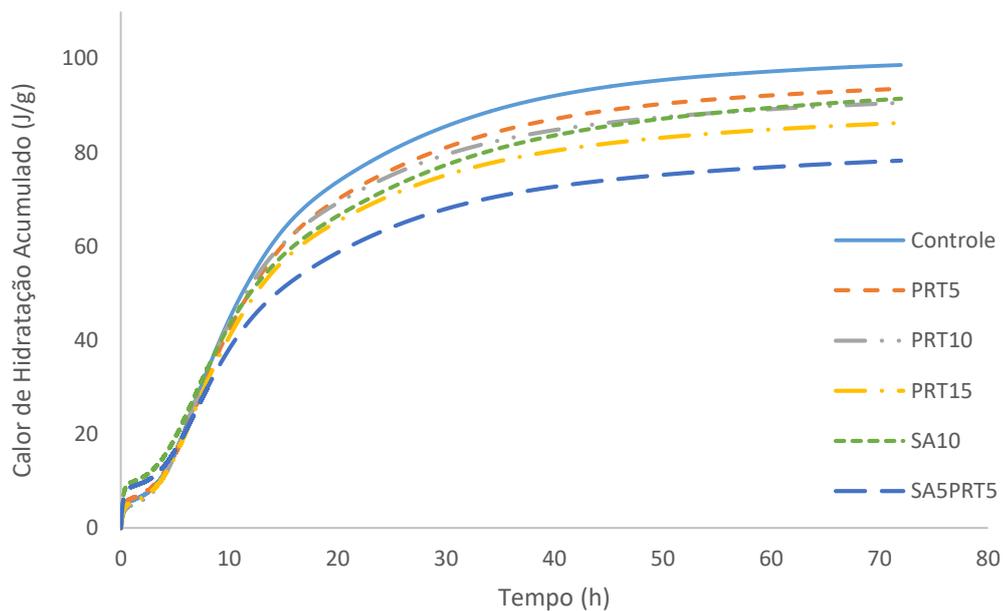


Fonte: O Autor (2023).

Os gráficos expostos na Figura 7 demonstram um adiantamento do pico exotérmico das pastas contendo MCS em relação à pasta controle, isso pode indicar uma diminuição no período de latência e uma aceleração das reações de hidratação do C_3S e da formação de C-S-H. Infere-se que o PRT funcionou como um nucleador, acrescentando pontos extras de precipitação no sistema. Além disso, percebe-se uma maior intensidade e amplitude do pico representando a pasta controle, o que indica uma reação exotérmica mais intensa e prolongada e que a adição de SA e/ou PRT nas misturas diminuiria os calores de hidratação envolvidos.

A Figura 8 indica o calor de hidratação acumulado das pastas, onde os resultados reforçam os indicados na Figura 7. Como era de se esperar, a mistura que acumula maior quantidade de calor é a de controle, sem a adição de MCS. Com isso é possível afirmar que a adição de PRT e SA em misturas cimentícias diminui o calor de hidratação acumulado das misturas. Tal fato é de grande relevância no contexto de concretos de alto desempenho, uma vez que, devido à grande quantidade de cimento Portland utilizado nos traços, o calor liberado nas reações de hidratação pode ser prejudicial às misturas.

Figura 8: Calor de hidratação acumulado das pastas.

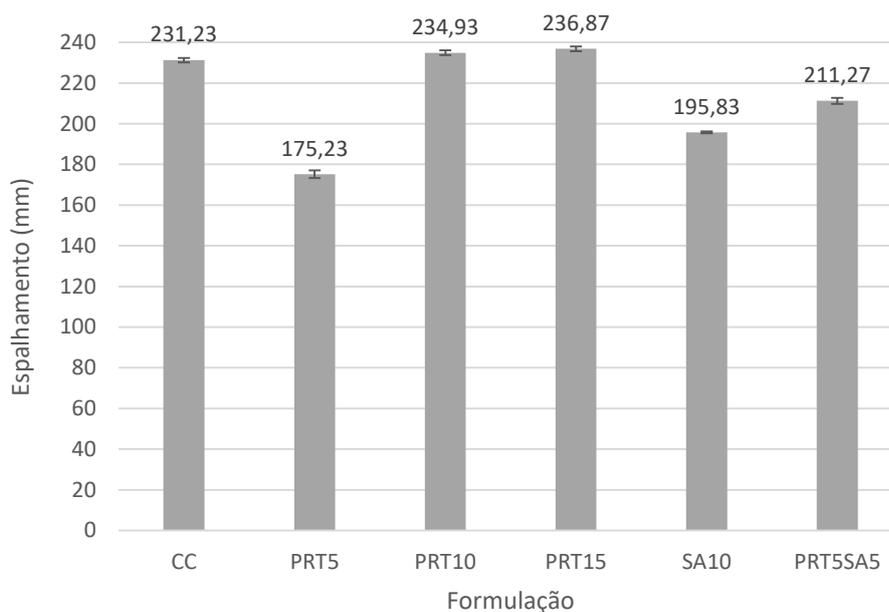


Fonte: O Autor (2023).

2.3.3. Trabalhabilidade

A Figura 9 expõem os resultados do ensaio de índice de consistência das misturas cimentícias fabricadas.

Figura 9: Índice de consistência médio dos traços produzidos.



Fonte: O Autor (2023).

Comparando-se as três formulações com a mesma quantidade de superplastificante (1,2% do peso do cimento) - CC, PRT 5 e SA10 – fica evidente uma diminuição da trabalhabilidade com a adição dos materiais cimentícios suplementares. Há uma redução de trabalhabilidade de 24,22%, com o uso de 5% de PRT, e de 15,31% com o uso de 10% de SA.

Analisando os resultados referentes aos traços com PRT é evidente que quanto maior a quantidade de resíduo incorporado à mistura, maior é a necessidade de adição de superplastificante. As formulações CC, PRT10 e PRT15, que apresentam trabalhabilidade muito similar, necessitam de 1,2, 1,6 e 1,8% (relativos ao peso do cimento) de SP-II, respectivamente. Contudo, todas as misturas mostraram-se moldáveis e trabalhabilidade adequada para uso.

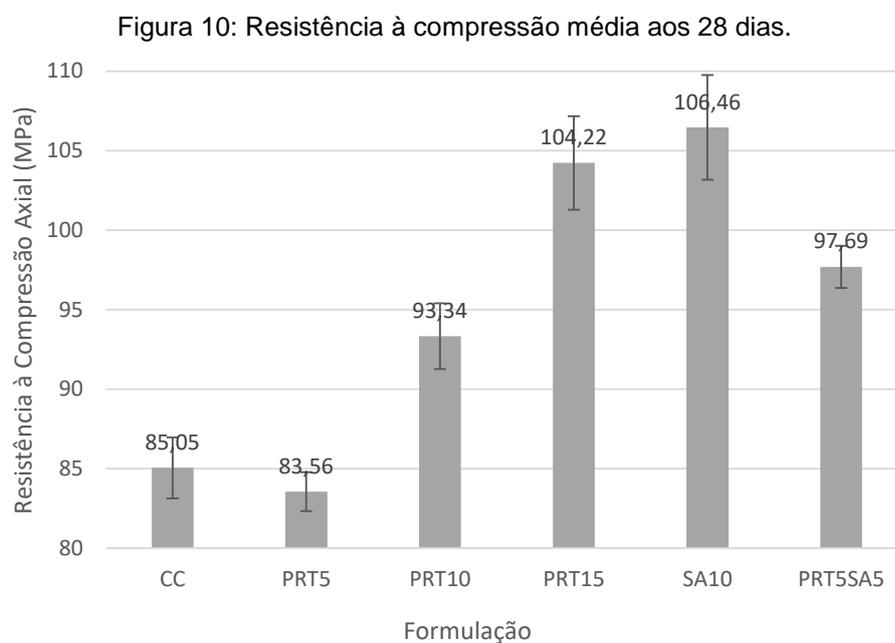
Tendo em vista os resultados apresentados, entende-se que o PRT é deletério à fluidez da mistura. Ma *et al.* (2020); Ge *et al.* (2015); Duan, Hou, Xiao e Li (2020) e Olofinnade *et al.* (2016) afirmam que por ser mais absorvente e por apresentar partículas de formato irregular, devido ao processo de pulverização, o PRT prejudica a trabalhabilidade dos traços.

Apesar das diferenças de espalhamento e de necessidade de aditivo apresentadas pelas formulações, todos os traços são passíveis de execução. Considerando-se que o teor máximo de aditivo utilizado foi de 1,8% e que de acordo com o fabricante recomenda-se o uso até 2,2% (TECNOSIL, 2015), caso

seja necessário uma maior fluidez das misturas recomenda-se utilização de maior quantidade de aditivo.

2.3.4. Resistência à Compressão Axial

A Figura 10 apresenta os resultados de resistência à compressão axial obtidos aos 28 dias de cura.



Fonte: O Autor (2023).

As misturas que apresentam melhores desempenhos nessa idade são as com presença de 15% de PRT e 10% de SA, com um ganho resistência de 22,54 e 25,17% em relação ao CC, respectivamente. Tendo em vista esse fato, entende-se que ambas as adições minerais agem como pozolanas na mistura, reagindo com hidróxido de cálcio e formando novos silicatos de cálcio hidratados. Além disso, partículas não reativas funcionam como fíleres ocupando espaços vazios nas formulações.

A comparação dos dados referentes às amostras com resíduos de tijolos indica que quanto maior a quantidade de PRT incorporado, melhor o desempenho da mistura. Há ganho de resistência à compressão de 11,70% do PRT10 e 24,72% do PRT15, ambos em relação ao PRT5. Esse comportamento indica que as reações pozolânicas estão ocorrendo de maneira proporcional às adições, abrindo-se, então, a possibilidade de incorporação de uma quantidade maior de resíduos nos traços. Com relação à formulação que utiliza simultaneamente os dois MCS (PRT5SA10), ela apresenta desempenho intermediário tendo valor

médio de resistência superior que o CC, o PRT5 e o PRT10 e inferior que PRT15 e SA10.

A ANOVA realizada rejeitou a hipótese que não há diferenças significativas entre as médias calculadas, com isso prosseguiu-se a análise estatística dos dados com os resultados do Teste de Tukey expostos na Tabela 8.

Tabela 8: Teste de Tukey para os resultados de resistência à compressão aos 28 dias.

	CC	PRT5	PRT10	PRT15	SA10	PRT5SA5
CC		0,910	4,00E-04	4,39E-09	2,97E-09	6,41E-06
PRT5	1,423		1,10E-04	3,11E-09	2,10E-09	2,59E-06
PRT10	7,889	8,835		2,94E-05	7,07E-06	0,156
PRT15	18,260	18,670	9,840		0,770	0,013
SA10	18,730	19,160	10,980	1,869		0,002
PRT5SA5	11,060	11,830	3,647	5,463	6,859	

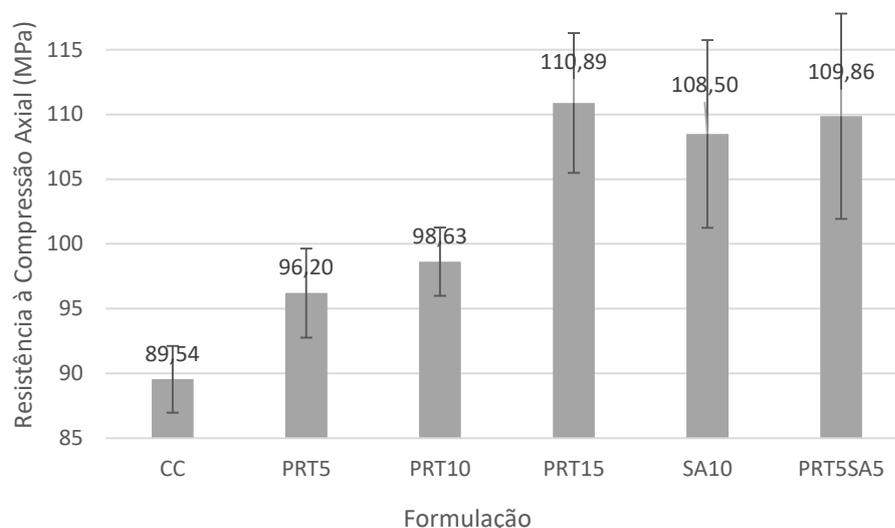
Abaixo da diagonal os escores "Q" utilizados no Teste de Tukey. Acima da diagonal os "p" valores. Em negrito os cruzamentos onde as médias são significativamente diferentes.

Fonte: O Autor (2023).

A análise indica que três comparações de médias não apresentam diferenças estatísticas entre si, são elas: CC e PRT5; PRT10 e PRT5SA5; SA10 e PRT15. Com isso é possível afirmar que quatro das cinco formulações com o pó reciclado apresentam ganhos estatísticos reais de resistência à compressão aos 28 em relação ao compósito controle. Além disso, o Teste de Tukey, confirma a hipótese de não haver diferenças estatísticas entre o traço SA10 e PRT15, o que indica um desempenho similar entre eles.

A tendência dos resultados aos 28 dias se confirma aos 91 dias, conforme exposto na Figura 11. Os traços compostos com MCS, em seus diversos teores, apresentam médias superiores à referência, o que novamente indica ocorrência de atividade pozolânica nas misturas.

Figura 11: Resistência à compressão média aos 91 dias.



Fonte: O Autor (2023).

As formulações PRT5, PRT10, PRT15, SA10 e PRT5SA5 apresentam ganho de resistência axial médio de 7,43; 10,16; 23,84; 21,17 e 22,69%, respectivamente, em relação ao CC. Novamente o aumento na adição de PRT nos traços favoreceu o desempenho das misturas, sendo a mistura PRT15 a de melhor desempenho dentre todas, com valor médio de resistência superior ao SA10, esse apresentando a terceira maior média aos 91 dias.

Em comparação ao traço SA10, o traço PRT15 apresenta média de desempenho 2,20 % maior, já o traço PRT5SA5 apresenta resistência média 1,25% maior que a formulação contendo somente sílica ativa. Esse fato indica grande potencial de substituição de sílica ativa pelo resíduo de tijolo.

A pozolanicidade e o efeito fíler são pontos chave na análise de resistência à compressão de compósitos cimentícios com presença de PRT (XUE *et al.*, 2014). Yang, Liu e Ma (2020) indicam que o desempenho de concretos com até 15% de substituição do cimento pelo pó reciclado de cerâmicas vermelhas mostram-se similares ou melhores que o grupo controle, os autores atribuem esse fato à pozolanicidade do resíduo e ao efeito fíler. Estudos indicam que substituições de cimento Portland por PRT em percentuais de até 15% do peso do cimento tendem a contribuir, ou pelo menos não prejudicar, a performance das misturas, principalmente em idades mais avançadas (LETELIER *et al.*, 2018; LIU, S. *et al.*, 2017; OLOFINNADE *et al.*, 2016).

A análise de variância rejeita a hipótese de que não há diferença significativa entre os resultados médios. O Teste de Tukey se encontra apresentado na Tabela 9.

Tabela 9: Teste de Tukey para os resultados de resistência à compressão aos 91 dias.

	CC	PRT5	PRT10	PRT15	SA10	PRT5SA5
CC		0,652	0,352	0,004	0,009	0,005
PRT5	2,168		0,992	0,048	0,119	0,072
PRT10	2,957	0,790		0,121	0,276	0,175
PRT15	6,946	4,779	3,989		0,993	1,000
SA10	6,169	4,002	3,212	0,777		1,000
PRT5SA5	6,613	4,446	3,656	0,333	0,444	

Abaixo da diagonal os escores "Q" utilizados no Teste de Tukey. Acima da diagonal os "p" valores. Em negrito os cruzamentos onde as médias são significativamente diferentes.

Fonte: O Autor (2023).

Aos 91 dias, quatro comparações de médias mostram-se significativamente diferentes, sendo três dessas relativas ao CC (PRT15, SA10 e PRT5SA5), o que reforça a situação de ganho de desempenho com a adição mineral às formulações. Novamente não é possível identificar diferenças estatisticamente significantes entre as médias do PRT15 e do SA10 o que avigora o fato de o resíduo de tijolo ser um potencial substituinte das adições minerais tradicionais.

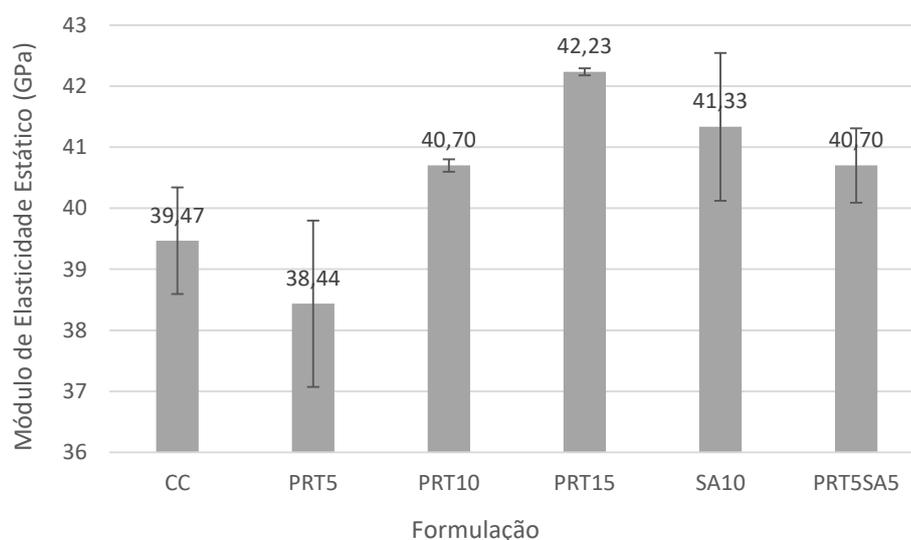
Comparando-se os resultados médios de compressão aos 28 e 91 dias, nota-se um aumento na resistência de 5,28; 15,13; 5,67; 6,39; 1,92 e 12,46% para as formulações CC, PRT5, PRT10, PRT15, SA10 e PRT5SA5, respectivamente.

O menor ganho percentual de resistência axial à compressão é do traço SA10, com isso infere-se que as reações pozolânicas e/ou a nucleação com a presença de sílica ativa ocorre de maneira mais acelerada, com maior ganho de desempenho em nas primeiras idades. No outro extremo têm-se os traços com 5% de PRT, esses apresentam os maiores ganhos percentuais de resistência, o que leva ao entendimento que nesses casos a reação pozolânica envolvendo o resíduo dá-se de maneira mais lenta. De acordo com Zhao *et al.* (2021), o PRT apresenta desempenho aprimorado com relação à resistência à compressão em idades mais avançadas, em comparação a outros MCS.

2.3.5. Módulo de Elasticidade Estático

A Figura 12 apresenta os resultados médios de módulo de elasticidade estático aos 28 dias.

Figura 12: Módulo da elasticidade estático médio aos 28 dias.



Fonte: O Autor (2023).

Seguindo a tendência apresentada pelos resultados de compressão axial aos 91 dias, as formulações que apresentam os maiores resultados no módulo de elasticidade aos 28 dias são a PRT15, a SA10, a PRT5SA5 e a PRT10, nessa ordem, e todas elas com a presença de adições minerais. Módulos de elasticidade superiores indicam materiais mais rígidos e com uma menor deformação na fase elástica. É possível, também, relacionar altos valores de módulo de elasticidade com materiais mais resistentes mecanicamente, uma vez que esse parâmetro tende a acompanhar a resistência à compressão do material avaliado.

Com relação à formulação de referência, os traços PRT5, PRT10, PRT15, SA10 e PRT5SA5 apresentam uma variação de -2,61; 3,12; 6,99; 4,17 e 3,12 %, respectivamente. Novamente é possível observar uma melhoria no desempenho das misturas proporcional à quantidade de PRT adicionada. Infere-se que esse melhor desempenho dos compósitos cimentícios com adições minerais deva-se às reações pozolânicas que ocorrem e possibilitam a formação de novos silicatos de cálcio hidratados, conferindo assim maior rigidez a tais formulações.

A ANOVA dos resultados de módulo de elasticidade refuta a hipótese que não há diferença entre as médias apresentadas. A apresenta os resultados do Teste de Tukey.

Tabela 10: Teste de Tukey para os resultados de módulo estático de elasticidade aos 28 dias.

	CC	PRT5	PRT10	PRT15	SA10	PRT5SA5
CC		0,722	0,459	0,014	0,121	0,459
PRT5	1,992		0,083	0,003	0,021	0,083
PRT10	2,662	4,373		0,256	0,919	1,000
PRT15	5,972	7,333	3,310		0,741	0,256
SA10	4,029	5,596	1,367	1,943		0,919
PRT5SA5	2,662	4,373	0,000	3,310	1,367	

Abaixo da diagonal os escores "Q" utilizados no Teste de Tukey. Acima da diagonal os "p" valores. Em negrito os cruzamentos onde as médias são significativamente diferentes.

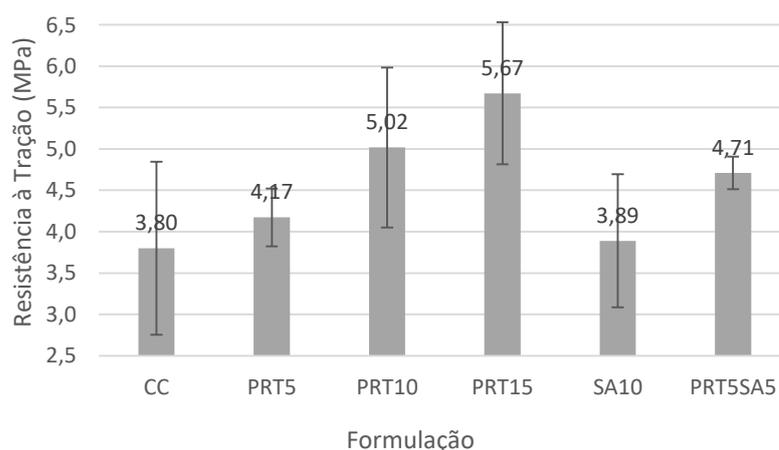
Fonte: O Autor (2023).

De acordo com a análise realizada, três resultados médios apresentam diferenças significativas entre si: PRT15 e CC, PRT15 e PRT5 e SA10 e PRT5. Com isso, reforça-se o entendimento que as melhores formulações são aquelas com maior quantidade de adição mineral e que o desempenho do traço com 15% de resíduo de tijolo é similar, e algumas vezes superior, à mistura com 10% de sílica ativa.

2.3.6. Resistência à Tração por Compressão Diametral

Os resultados de resistência à tração encontram-se expostos na Figura 13. Nota-se um maior desvio padrão nas médias dos resultados obtidos em relação aos demais testes executados, tal fato deve-se à metodologia do ensaio realizado que favorece a variabilidade dos valores de resistência à tração obtidos por CP.

Figura 13: Resistência à tração média aos 28 dias.



Fonte: O Autor (2023).

As médias apresentadas demonstram que as maiores resistências obtidas advêm das misturas com a presença de PRT. Em comparação ao CC, os traços com adição de resíduos de tijolos apresentam ganhos que vão de 9,73 à 49,21%.

Com relação ao uso de SA, há indicação de que o uso de PRT apresenta desempenho superior nos casos avaliados. A média de resistência à tração de todos os traços com resíduo cerâmico é superior à formulação que conta apenas com a sílica ativa, esse fato se dá em porcentagens que variam desde 7,20% até 45,76%.

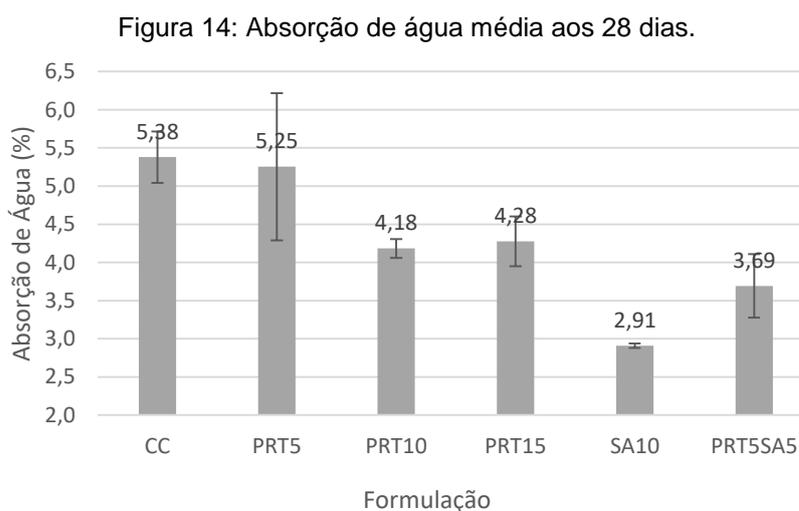
Trabalhando com substituição do aglomerante convencional por PRT em porcentagens até 30%, Xue *et al.* indicam pequenas perdas de resistência à tração nas substituições de 10 e 15%, 1,41 e 4,23% respectivamente. Já Rani e Jeniffer (2016) relatam aumentos na resistência à tração com a utilização de PRT em substituição ao CPC.

A ANOVA confirmou a hipótese de não haver diferença estatística entre as médias não sendo necessário proceder o Teste de Tukey para a variável resistência à tração.

Os resultados de caracterização mecânica são corroborados pela pozolanidade apresentada pelos resíduos utilizados. A melhora de desempenho dos traços contendo PRT, em relação à referência, pode ser explicada, justamente, pela reatividade desse pó e pela formação de novos produtos de hidratação responsáveis pela resistência mecânica e durabilidade (C-S-H).

2.3.7. Absorção de Água

Os resultados médios de absorção de água aos 28 dias encontram-se expostos na Figura 14.



Fonte: O Autor (2023).

Novamente o pior desempenho entre as misturas analisadas é o do compósito sem a adição de nenhum MCS, o traço de referência, sendo seguido

pelo traço com menor quantidade de adição mineral, o PRT5. Esse apresenta o maior percentual de absorção de água entre os traços fabricados. A formação de novos compostos a partir das reações pozolânicas favorece a estrutura de poros dos materiais, conforme demonstrado pelo ensaio de porosimetria exposto na Figura 16. Sendo assim a absorção de água média dos traços com adição mineral diminui.

Tendo em vista as formulações com adição mineral, aquelas que utilizam SA em sua composição são as que apresentam melhores resultados. Conforme exposto na Figura 9, os traços com a presença de pó reciclado de tijolo são os que apresentam uma maior perda de trabalhabilidade. A partir disso, infere-se que a maior absorção de água do PRT é transportada para as misturas que dele advêm, fato que é contrabalanceado pelas reações pozolânicas.

A absorção de água reflete o volume e a conectividade dos poros nas matrizes cimentícias. Estudos indicam que a utilização de PRT em compósitos cimentícios tem a capacidade de reduzir a absorção de água preenchendo poros (GYÖRGY *et al.*, 2019; MA *et al.*, 2020; ORTEGA *et al.*, 2018).

A análise de variância recusa a hipótese que as médias não têm diferenças significativas entre si, com isso procede-se o Teste de Tukey exposto na Tabela 11.

Tabela 11: Teste de Tukey para os resultados de absorção de água aos 28 dias.

	CC	PRT5	PRT10	PRT15	SA10	PRT5SA5
CC		0,9994	0,07733	0,1145	0,000383	0,009196
PRT5	0,4635		0,1313	0,1906	0,00062	0,01594
PRT10	4,379	3,915		0,9999	0,05566	0,7961
PRT15	4,037	3,574	0,3415		0,03711	0,6654
SA10	9,038	8,575	4,66	5,001		0,3824
PRT5SA5	6,172	5,709	1,793	2,135	2,866	

Abaixo da diagonal os escores "Q" utilizados no Teste de Tukey. Acima da diagonal os "p" valores. Em negrito os cruzamentos onde as médias são significativamente diferentes.

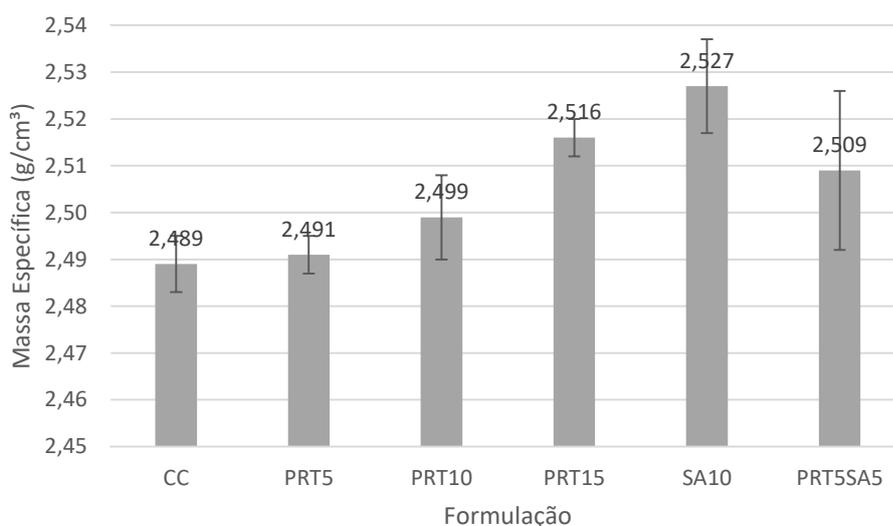
Fonte: O Autor (2023).

O resultado do Teste de Tukey reforça a maior efetividade da adição de SA no desempenho de absorção de água. Quatro comparações de médias mostram-se significativamente diferentes, todas elas envolvem traços com a adição de sílica ativa, sendo elas: SA10 e CC; SA10 e PTR5; SA10 e PRT15 e PRT5SA5 e CC.

2.3.8. Massa Específica e Porosimetria por Intrusão de Mercúrio

A Figura 15 apresenta os resultados médios de massa específica, aos 28 dias, obtidos por picnometria à gás Hélio. A diferença entre os resultados do CC (menor) e o SA10 (maior) é de 1,52%, onde os traços contendo PRT apresentam performance intermediária. Todas as formulações apresentam média acima do usualmente obtido em concretos adensados mecanicamente, 2,4 g/cm³ (BAUER, 2015).

Figura 15: Massa específica média aos 28 dias.



Fonte: O Autor (2023).

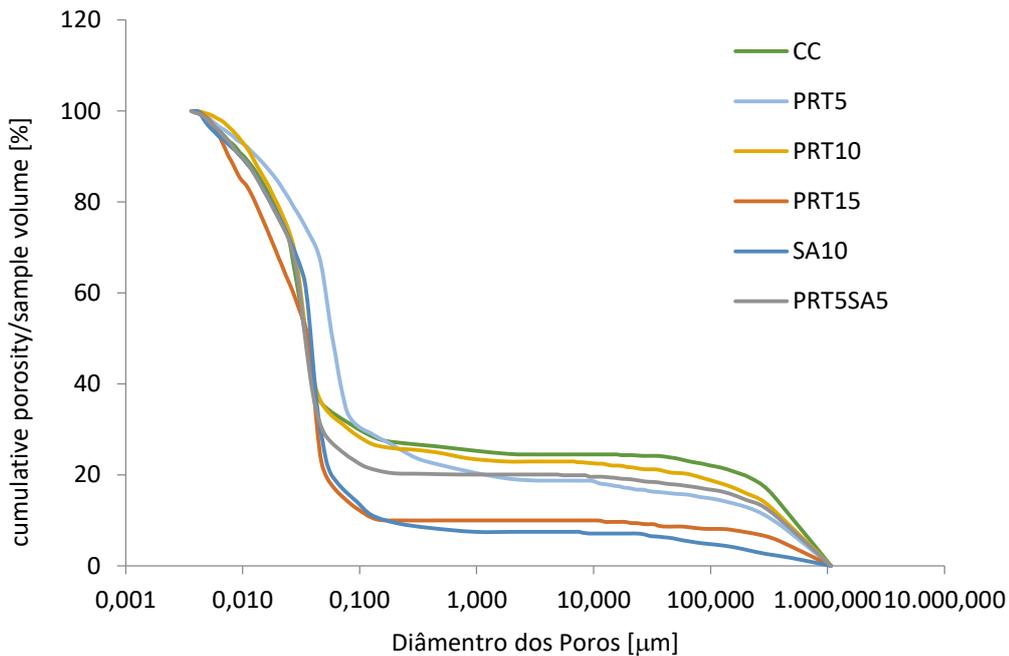
Novamente obtém-se um resultado inferior do CC com relação às formulações contendo sílica ativa e pós reciclados no quesito absorção de água. Por outro lado, um aumento na quantidade de MCS nos traços causa uma melhora no desempenho. Entende-se que esses resultados se devem a uma densificação ocorrida nas misturas com a utilização de adições minerais. Atribui-se esse fenômeno às reações pozolânicas ocorridas e a uma possível presença de adições não reagentes aos 28 dias, que poderiam funcionar como fíleres.

Os resultados de massa específica são corroborados pelos de absorção de água (Figura 14) e porosimetria (Figura 16). O CC é o traço que apresenta maior absorção de água, maior percentual de poros com diâmetros maiores e menor massa específica. Uma quantidade maior de poros com diâmetros maiores denota maior quantidade de espaços vazios e, conseqüentemente, uma menor massa específica. Ao ser exposto à submersão, esses espaços vazios são preenchidos com água, resultando em uma maior absorção. Raciocínio similar pode ser

utilizado para o traço SA10, que apresenta resultados diametralmente opostos ao CC, e para as misturas com PRT, que apresentam desempenho intermediário.

A Figura 16 apresenta a distribuição percentual dos poros em cada uma das formulações fabricadas. É possível identificar duas regiões principais com a presença de picos: entre 0,010 e 0,100 μm e 100,000 e 1.000,000 μm ; e uma região secundária: entre 0,100 e 1,000 μm .

Figura 16: Distribuição Percentual de Poros aos 28 dias.



Fonte: O Autor (2023).

Nota-se que para poros com diâmetros entre 0,010 e 0,100 μm os traços que se apresentam percentualmente maiores são o SA10 e o PRT15, já no intervalo entre 100,000 e 1.000,000 μm as formulações CC, PRT5 e PRT10 mostram-se mais presentes indicando uma presença percentual relativamente maior de poros maiores nessas misturas. Entende-se que os C-S-H advindos das reações pozolânicas melhorem a estrutura de poros nos traços com adições minerais, com isso, formulações com quantidades maiores de MCS resultam em uma estrutura de poros mais fechada, com diâmetros menores.

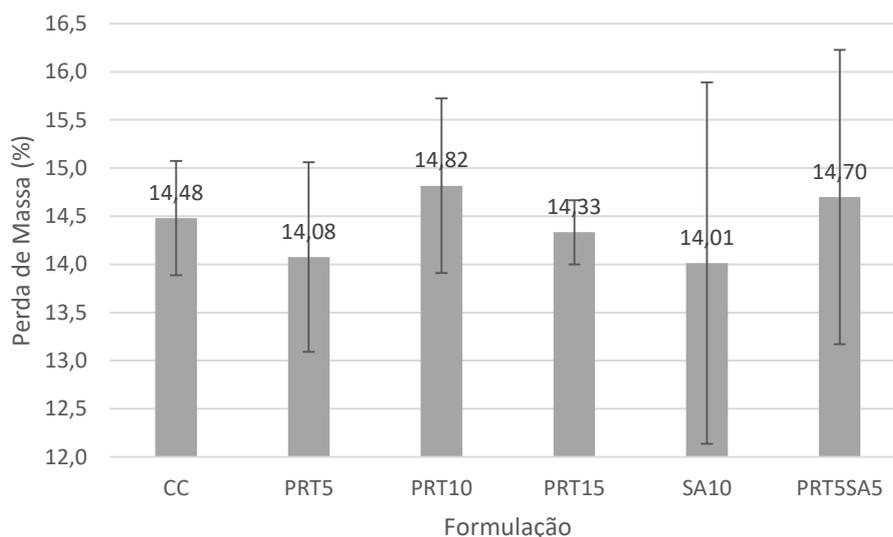
Corroborando os resultados apresentados, Ma *et al.* (2020) indicam que, devido a pozolanicidade e ao efeito fíler proveniente da adição de PRT em compósitos cimentícios, há um refinamento da microestrutura de poros dos traços e, conseqüentemente, uma diminuição na absorção de água dessas misturas.

Segundo os autores esse refinamento seria inversamente proporcional à finura dos resíduos.

2.3.9. Ataque Ácido

A perda de massa média dos CP, após o ataque com ácido sulfúrico, está exposta na Figura 17.

Figura 17: Perda de massa média dos CP após ataque ácido.



Fonte: O Autor (2023).

Os resultados obtidos encontram-se todos próximos. Esse fato confirma-se, principalmente, quando levado em conta o desvio padrão dos resultados médios. A diferença percentual entre o traço com melhor desempenho (SA10) e de pior desempenho (PRT10) é de 0,81%. Sendo assim, entende-se que a utilização de materiais cimentícios suplementares não afeta a resistência dos traços com relação à ataque com ácido sulfúrico.

A ANOVA indicou não haver diferença estatística entre as perdas de massa médias, não sendo, assim, necessária a realização do Teste de Tukey para a variável em análise.

2.4. Conclusões

Tendo em vista os resultados obtidos, é possível afirmar que os objetivos propostos foram cumpridos integralmente. Foi possível avaliar o efeito da incorporação de pós reciclados de tijolos em compósitos cimentícios de alto desempenho e comparar a performance desse pó reciclado à sílica ativa. Os principais resultados dessa pesquisa apontam que:

- O PRT se mostrou reativo, tendo em vista os ensaios de pozolanicidade realizados (NBR 12653 e variação da condutividade elétrica das soluções). A termogravimetria das pastas corrobora os ensaios de pozolanicidade e indica um menor percentual de hidróxido de cálcio nas misturas com presença de MCS, esse fato deve à ocorrência de reações pozolânicas;
- A calorimetria das pastas indica uma aceleração das reações de hidratação do cimento quando há presença de PRT e SA. Além disso há uma maior liberação de calor na pasta executada apenas com cimento Portland, o que indica que os MCS utilizados diminuem o calor de hidratação das misturas;
- A trabalhabilidade das misturas é negativamente afetada pela introdução de PRT e SA. Contudo é possível obter misturas com trabalhabilidade adequada para uso com a utilização de aditivos superplastificantes;
- Os resultados mecânicos indicam que os desempenhos das misturas com os pós reciclados de tijolo se mostram semelhantes ou superiores que os da mistura de controle, reforçando a reatividade dos MSC utilizados. Com relação às misturas com sílica ativa, o desempenho do PRT mostrou-se, também, semelhante e em algumas situações superior, como por exemplo a resistência à compressão aos 91 dias. Destacam-se os resultados obtidos pelo traço PRT15 e PRT5SA5, esses obtiveram bons resultados no que diz respeito aos ensaios de resistência à compressão, tração e módulo de elasticidade, obtendo performances superiores à referência e em alguns casos superiores ao SA10;
- Os resultados de absorção de água e massa específica dos compósitos corroboram os resultados de caracterização mecânica obtidos. Novamente os compósitos com a presença de PRT obtiveram resultados superiores aos da referência. Nesses ensaios específicos a mistura de melhor desempenho é a SA10. A porosimetria por intrusão de mercúrio indicou um refinamento da estrutura de poros com a utilização das adições, com isso diminui-se a absorção de água dos materiais;

- Os resultados do ataque ácido no corpos-de-prova indicam não haver influência das adições sobre a perda de massa dos CP avaliados.

Como indicação de estudos futuros, entende-se como importante a execução de ensaios de durabilidade em misturas que utilizem PRT. Além disso, outros ensaios de pozolanicidade podem ser realizados no intuito de corroborar a pozolanicidade dos resíduos de tijolos. Entende-se ainda como uma possibilidade a realização de traços utilizando o PRT como substituinte do cimento Portland ou em misturas álcali ativadas.

3. Possibilidades de Uso de Pó Reciclado Cimentício na Fabricação de Compósitos Cimentícios de Alto Desempenho

3.1. Introdução

O cimento é um dos materiais mais utilizados no planeta, ficando atrás apenas da água, um dos componentes básico das misturas cimentícias, sendo o principal material de construção empregado mundialmente (PROŠEK *et al.*, 2019; SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018). Com isso, estima-se que sua produção anual, em 2019, tenha sido de 4,1 bilhões de toneladas (U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2020), o que implica em um consumo *per capita* global de aproximadamente 532 kg.

O processo de fabricação de cimento consiste na queima de mistura composta por rocha calcária, argila e minério de ferro. Essas três matérias primas, a aproximadamente 1500°C, originam o clínquer que juntamente ao gesso formam o Cimento Portland Comum (CPC). Inata à produção do clínquer está a emissão de CO₂, que ocorre devido a descarbonatação da rocha calcária. A produção de uma tonelada do material gera, em média, 0,7 toneladas de anidrido carbônico (BORDY *et al.*, 2017; HE *et al.*, 2019; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O gás carbônico é um dos principais causadores do efeito estufa, sendo responsável por mais de 80% desses poluentes. Estima-se que o cimento seja responsável por cerca de 5% das emissões totais de CO₂, podendo esse número variar de 3 até 8% (BORDY *et al.*, 2017; HE *et al.*, 2019; PROŠEK *et al.*, 2019). De todo dióxido de carbono emitido na cadeia produtiva do concreto, de 80 a 90% correspondem à fabricação de cimento (LETELIER *et al.*, 2017).

Ainda com relação à produção do cimento, é importante notar que as principais matérias primas empregadas são não renováveis, e que a escassez ou dificuldade de obtenção dos insumos necessários causa variações significativas no valor final do produto (DEE, 2015).

Além de todos os problemas ambientais causados pela fabricação/consumo de cimento, têm-se ainda as questões ligadas à geração de resíduos de construção de demolição (RCD) nas obras civis. Em 2017 e 2018, no Brasil, a produção *per capita* diária de RCD foi de 0,594 e 0,585 kg, respectivamente, o que totalizou mais de 44 milhões de toneladas de resíduos somente no ano de 2018 (ABRELPE, 2019). Metade de todos os resíduos

industriais podem ser compostos por RCD, desses até 65% são formados por produtos cimentícios (KWON *et al.*, 2015).

A vida útil de uma estrutura pode ser estimada entre 50 e 100 anos de idade. Enquanto as nações em desenvolvimento têm grande potencial de geração de RCD devido às novas construções, países com desenvolvimento consolidado concentram sua geração em demolições e conseqüentemente novas edificações (WANG, J.; MU; LIU, 2018). Na Europa estima-se uma produção de aproximadamente 180 milhões de toneladas anuais, já na China 2,5 bilhões de toneladas (GASTALDI *et al.*, 2015; GE *et al.*, 2015; WANG, J.; MU; LIU, 2018).

A maior parte dos estudos de reaproveitamento de RCD focam na utilização desses como agregados reciclados graúdos em concretos, sendo incipientes os estudos realçando o aproveitamento das frações finas do resíduo (GASTALDI *et al.*, 2015; PROŠEK *et al.*, 2019). Essas frações finas são inerentes à própria fabricação dos agregados reciclados (DUAN *et al.*, 2020; KIM; CHOI, 2012), sendo necessário um esforço maior no reaproveitamento dessas, uma vez que podem compor até 30% de todo RCD (GASTALDI *et al.*, 2015; LIANG *et al.*, 2021).

Se no processo produtivo de agregados reciclados, os materiais cimentícios são mais adequáveis à utilização do que as cerâmicas vermelhas, no caso do uso de pós reciclados como materiais cimentícios suplementares (MCS) essa tendência se inverte. Os materiais provenientes de cerâmicas queimadas são potencialmente pozolânicos e reativos (LUM *et al.*, 2018; XIAO *et al.*, 2018b), por sua vez, os pós reciclados cimentícios (PRC), em geral, necessitam de queima e procedimentos específicos para serem utilizados (LETELIER *et al.*, 2017; WANG, J.; MU; LIU, 2018; XUAN; SHUI, 2011).

3.1.1. Possibilidades de utilização de pós cimentícios reciclados

Para utilização de PRC na fabricação de pastas, argamassas e concretos, na substituição do CPC, duas possibilidades apresentam-se. A primeira, e mais simples delas, é a utilização dos resíduos como fíleres e/ou contando com uma possível reatividade advinda de partículas anidras ou de reações com materiais pozolânicos (BORDY *et al.*, 2017; OKSRI-NELFIA *et al.*, 2016; PROŠEK *et al.*, 2019).

A segunda consiste em submeter o material hidratado a um tratamento térmico, em temperaturas mais baixas do que as utilizadas no processo de clinquerização, o que pode fornecer produtos que reagem com a água originando

novos produtos de hidratação (GASTALDI *et al.*, 2015; HE *et al.*, 2019; WANG, J.; MU; LIU, 2018).

O processo de desidratação dos produtos de hidratação ocorre de maneira progressiva com o aumento de temperatura. De 30 a 105°C, a água evaporável e uma parte da água de ligação evaporam. Considera-se geralmente que a água evaporável é completamente eliminada a 120°C. Entre 110 e 170°C, ocorre a decomposição do gesso, da etringita e a perda de água de parte dos aluminatos hidratados. De 180 a 300°C, ocorre a perda de água encadeada pela decomposição do C-S-H e dos aluminatos. De 450 a 550°C, ocorre a desidroxilação da Portlandita. De 700 a 900°C, a descarbonatação do carbonato de cálcio (HE *et al.*, 2019; LETELIER *et al.*, 2017; SHUI *et al.*, 2009).

A temperatura ideal de tratamento do RCD ainda é tema de debate e discordância entre os pesquisadores. Wang, Mu e Liu (2018) e He *et al.* (2019) afirmam que a melhor temperatura de tratamento se encontra na casa do 450°C. Nessa temperatura, o desempenho mecânico e de durabilidade de pastas fabricadas com 100% de aglomerante reciclado se igualaria às pastas fabricadas com CPC.

Ainda segundo Wang, Mu e Liu (2018) e He *et al.* (2019), após o tratamento a 450°C, a tobermorita 1,4 nm perde água ligada quimicamente e torna-se tobermorita 0,96 nm. Já na jennita ocorre um desarranjo do seu sistema cristalino. A tobermorita de 0,96 nm e a jennita desordenada podem reagir com a água e reformar o C-S-H. No PRC tratado a temperaturas mais altas, o desempenho e a grande quantidade de CaO no material pode ser prejudicial à integridade do cimento reciclado.

Por outro lado, Xuan e Shui (2011) descrevem melhor desempenho do PRC tratado a 800°C. A partir dessa temperatura há queda de desempenho mecânico, contudo nenhuma das temperaturas de tratamento possibilitou desempenho similar ao CPC. Os autores afirmam ainda que, quanto maior a temperatura de tratamento, maior a necessidade de água nas misturas e mais rapidamente acontecem as reações. Letelier *et al.* (2017) expõem que a temperatura de tratamento tem pouca influência em misturas fabricadas com baixas taxas de substituição do cimento (5, 10, 15%). Para os autores, variáveis como granulometria do PRC são muito mais relevantes, contudo, nenhuma das configurações atinge o nível qualidade da mistura referência apenas com CPC.

Shui *et al.* (2009) afirmam que após os 800°C há perda de desempenho devido à formação de wollastonita. Para os autores, com o aumento da temperatura de tratamento do PRC é necessária uma maior quantidade de água para se atingir trabalhabilidades adequadas. Além disso a reação nos pós reciclados dá-se de maneira mais acelerada com o aumento da temperatura de queima.

Ao trabalharem com PRC não processado termicamente, Bordy *et al.* (2017) informam que o uso de pó reciclado não afeta a trabalhabilidade das misturas. Os calores de hidratação diminuem à medida que o nível de substituição do CPC aumenta, isso condiz com o fato de que as misturas que contam com um maior percentual de PRC apresentam menor reatividade e, conseqüentemente, pior desempenho.

Ainda com materiais que não passaram por queima, Prošek *et al.* (2019) defendem ser possível a substituição parcial do cimento comum (no caso 50%) por PRC. A presença de adições minerais (cinzas volantes e escória) na mistura incrementa a formação de C-S-H nas imediações dos grãos do pó reciclado. Relata-se perda de resistência à compressão, contudo há um aumento na resistência à tração e uma diminuição na retração.

Com relação à emissão de CO₂, as vantagens na substituição do cimento Portland por pó reciclado cimentício são pungentes. He *et al.* (2019) relatam diminuição de 94% e 76% nas emissões de CO₂ na fabricação de pós reciclados queimados a 450 e 800°C, respectivamente, em relação à fabricação de clínquer. Gastaldi *et al.* (2015), afirmam ser possível mitigar as emissões em 25% em relação a fabricação do CPC, utilizando temperatura de queima de 1500°C.

O presente trabalho objetiva avaliar a possibilidade de substituição de 20% do cimento Portland de alta resistência inicial (CP-V) por pós reciclados cimentícios, na fabricação de compósitos cimentícios de alto desempenho. Para tanto, utiliza-se de três tipos de PRC (sem tratamento térmico, tratado a 450 e a 800°C) e sílica ativa.

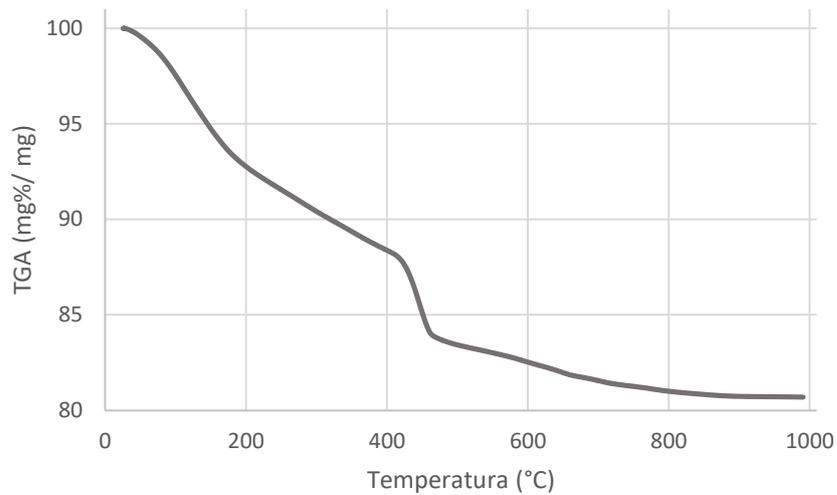
3.2. Materiais e Métodos

Para moldagem dos corpos de prova (CP) utilizou-se 4 potenciais aglomerantes, três reciclados e um convencional. O tradicional trata-se de cimento Portland de alta resistência inicial CP-V da marca Brennand (Cimentos Nacional) – denominado doravante CPC. Os PRC foram fabricados a partir de pasta cimentícia de CP-V da marca supracitada, com fator A/C igual a 0,45 – valor escolhido por ocasião de moldagem. Após 28 dias de cura submersa os CP foram rompidos e secos em estufa a 100 °C. Após esse procedimento os fragmentos foram britados em um triturador de mandíbula.

O material resultante da britagem foi colocado em um moinho de bolas (10 kg por batelada) por dois períodos de uma hora, a 90 rpm. Para que o material atingisse granulometria próxima a do aglomerante comercial foi necessário a utilização de um moinho planetário, modelo PULVERISETTE, marca Fritsch. Frações de 200 g permaneceram nesse moinho por 4 períodos de 10 minutos, totalizando 40 minutos de moagem. Para tanto utilizou-se 25 esferas (20 mm) de óxido de zircônio e rotação de 300 rpm. A opção pela fabricação do resíduo deu-se pela dificuldade de obtenção de resíduos cimentícios sem nenhum tipo de contaminação por outros materiais.

O PRC foi ainda submetido a ensaio de Termogravimetria no equipamento marca Hitashi modelo STA 7000 Series, vide gráfico na Figura 18. A temperatura durante os ensaios variou de 30 °C até 1000 °C, com taxa de aquecimento de 10°C/minuto e fluxo de nitrogênio de 180 mL/min. Os resultados indicam um perda brusca de massa em temperatura próxima aos 400 °C, o que indica transformação da tobermorita, com perda de água, e desidroxilação da Portlandita (GASTALDI *et al.*, 2015; HE *et al.*, 2019; WANG, J.; MU; LIU, 2018). A partir disso, e baseado na literatura, definiu-se temperaturas para o tratamento térmico.

Figura 18: Termogravimetria do PRC.



Fonte: O Autor (2023).

O mesmo equipamento de termogravimetria foi utilizado no intuito de realizar ensaios em pastas, de cimento, PRC (20% do peso do cimento) e água, com fator A/C de 0,33, desmoldadas com 24 horas e após cura de 28 dias. Os resultados obtidos, por meio da Equação 3, permitem obter a quantidade de hidróxido de cálcio (CH %) nas misturas (VOGLER *et al.*, 2022).

$$CH(\%) = M1 \left(\frac{74}{18} \right) + M2 \left(\frac{100}{44} \right) \quad (3)$$

Em idade avançada, aproximadamente 6 meses, dois dos três PRC passaram por tratamento térmico. Para tanto utilizou-se um forno a GLP, marca GRION, com capacidade de atingir 1300 °C. A temperatura de tratamento dos resíduos foi de 450 (PRC450) e 800°C (PCR800) e a taxa de aquecimento do forno consistiu em 10 °C/min. Após atingida a temperatura de tratamento, os resíduos permaneceram no forno por 3 horas. Posteriormente ao resfriamento natural, os PRC – assim como o resíduo que não passou por tratamento térmico (PRC0) – foram acondicionados em bombonas plásticas até momento da utilização.

A massa específica dos aglomerantes, bem como dos demais materiais utilizados, foi aferida por meio de picnometria a gás Hélio, com a utilização do Picnômetro Multipycnometer MVP-6DC Quantachrome. Os resultados obtidos estão expostos na Tabela 12.

Tabela 12: Massa específica real das matérias primas utilizadas.

Aglomerante	CPC	PRC0	PRC450	PRC800	Areia
Massa Específica Real (g/cm ³)	3,04	2,38	2,37	2,13	2,64

Fonte: O Autor (2023).

A fluorescência de Raios X foi realizada nos materiais pulverulentos no intuito de se quantificar a quantidade de óxidos presentes nas amostras. Para isso utilizou-se o método de pastilhas fundidas de tetraborato de lítio. Em tal ensaio utilizou-se equipamento da marca Bruker, modelo S2 Ranger, os resultados obtidos estão expostos na Tabela 13.

De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014a) e com a Tabela 13, os materiais reciclados não se enquadram em nenhuma das classes de pozolanas apresentadas em norma, uma vez que não totalizam ao menos 50% de óxidos de silício, alumínio e de ferro.

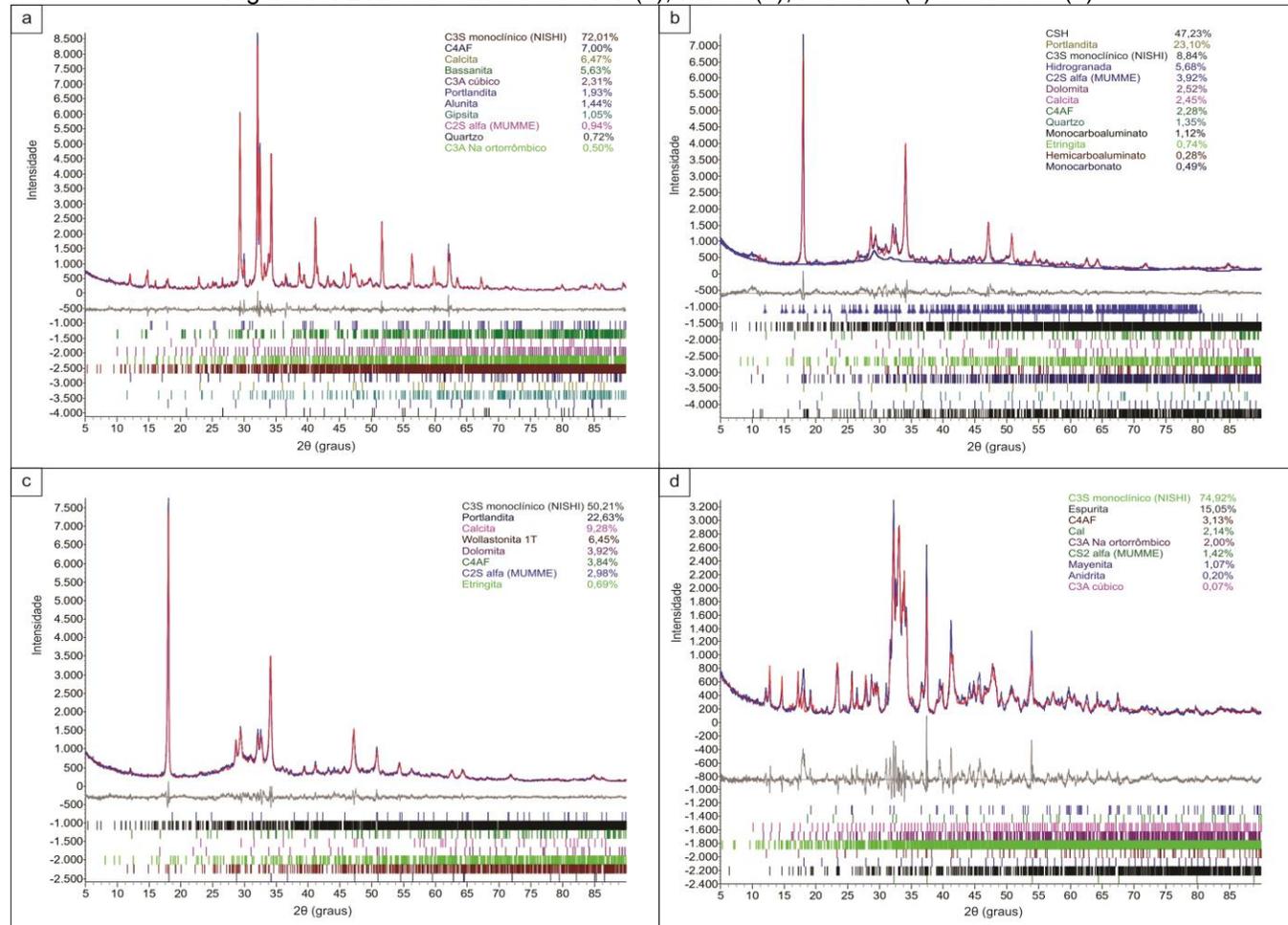
Tabela 13: Composição das matérias primas pulverulentas utilizadas.

Material	Composição (%)									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	SrO	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂
Cimento Portland	23,29	6,45	4,99	55,92	2,51	0,61	0,39	1,65	1,66	2,5
PRC0	12,67	2,55	4,42	75,67	-	0,12	0,43	-	2,63	0,34
PRC450	13,39	2,72	4,33	74,94	-	0,12	0,4	-	2,76	0,3
PRC800	13,36	2,64	4,38	75,39	-	0,13	0,4	-	2,5	0,32

Fonte: O Autor (2023).

Os pós reciclados, bem como o cimento CPV, foram submetidos a difração de raios X. Para tanto utilizou-se o difratômetro Shimadzu XRD-7000, sendo utilizado um tubo de raios X de cobre (Cu) com tensão de 40,0 kV e corrente elétrica de 30,0 mA, com varredura por passo de 0,02θ, variando de 5 a 90°, na velocidade de 5 s/passos. A Figura 19 demonstra os resultados obtidos nos DRX do CPV (a), e dos PRC 0 (b), 450 (c) e 800 (d), os picos identificam-se pelas cores da legenda e pela barra abaixo do gráfico.

Figura 19: DRX das amostras. CPV (a), PRC0 (b), PRC450 (c) e PRC800 (d)



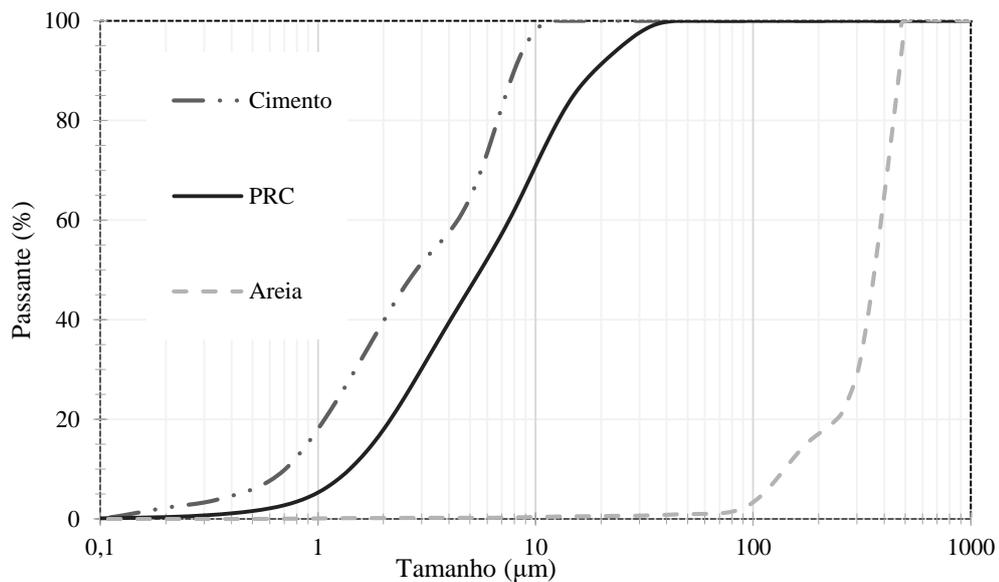
Fonte: O Autor (2023).

A composição do CPV é típica, sendo composto primariamente por C_3S , responsável pela resistência à compressão nas primeiras idades, característica comum a cimentos de alta resistência inicial (ARI). Demais componentes secundários se fazem presentes, por exemplo, C_2S , C_4AF e o gesso – responsável pelo controle da pega. O DRX do PRC0 reforça a ideia de baixa reatividade desse resíduo. Os principais componentes desse material são os produtos de hidratação de um cimento, CSH e Portlandita. É possível perceber a presença de 8,84% de C_3S residual, proveniente de cimento anidro, essa parcela fornece algum grau de reatividade ao resíduo.

O DRX dos pós reciclados tratados termicamente comprovam certa influência do tratamento, uma vez que grandes quantidades de C_3S são identificadas, 50,21 e 74,92 %, para PRC450 e PRC800, respectivamente. Esse C_3S identificado é similar ao presente no CPC, com isso entende-se que o tratamento térmico é capaz de reativar a reatividade dos resíduos cimentícios. Tratamentos térmicos entre 300 e 400 °C tendem a desidroxilação do CSH, já o processo completo ocorre a temperaturas maiores que 600 °C (GIRAUDO *et al.*, 2018; REN; WANG; DIPAOLO, 2013). Contudo é importante notar que não há presença de gesso nos dois resíduos, além disso há presença de CaO, essa situação contribui negativamente para o fato de ambos pós reciclados apresentarem endurecimento quase instantâneo.

A granulometria dos constituintes é apresentada na Figura 20 e foi avaliada por meio de meio granulômetro a laser CILAS 1090 LASER, via úmida. O material proveniente de RCD apresentou diâmetro médio de 8,12 μm , d_{50} igual a 5,60 μm e o d_{90} igual a 18,66 μm .

Figura 20: Granulometria dos materiais utilizados.



Fonte: O Autor (2023).

Já o ensaio de área superficial pelo método BET indicou um resultado de $1,63 \text{ m}^2/\text{g}$ para o CPV, $11,35$, $10,81$ e $4,59 \text{ m}^2/\text{g}$ para PRC0, PRC450 e PRC800, respectivamente. O aumento na área superficial dos aglomerantes reciclados, em relação ao CPV, já era prevista por Shui *et al* (2009), é importante frisar que não houve nova moagem dos PRC após tratamento térmico.

Quartzo moído, um subproduto da britagem do quartzo, foi utilizado como agregado fino, tendo apresentado massa específica real média de $2,64 \text{ g/cm}^3$, módulo de finura de 1,04 – o que classifica a areia como fina – e massa unitária solta de $1513,82 \text{ kg/m}^3$. Como aditivo superplastificante (SP) optou-se pela utilização do Silicon ns high 400, da marca Tecnosil, que deve ser usado entre 0,55 e 2,2% do peso do cimento, o SP possui massa específica entre 1,07 e 1,11 g/cm^3 , pH entre 2 e 4 e teor de cloretos solúveis em água menor que 0,15% (TECNOSIL, 2015).

O traço de referência foi dosado por empacotamento de partículas, com a utilização do Software EMMA. Para tanto utilizou-se metodologia de Andreassen modificada e q-valor de 0,28 no intuito de obter uma mistura com boa trabalhabilidade (VANDERLEI, 2004).

A substituição do cimento CP-V por PRC nos traços com aglomerante reciclado foi de 20% do peso do cimento, porcentagem essa indicada como preferencial na literatura consultada (GASTALDI *et al.*, 2015), manteve-se o

mesmo valor de relação A/C para todos os traços. A Tabela 14 expõem a sigla compósitos fabricados, sendo as substituições feitas por peso. A trabalhabilidade das combinações foi aferida no ensaio de *flow table*, sendo adotadas as indicações apresentadas na NBR 13276 (ABNT, 2016). Todos os traços contaram com uma mesma quantidade de aditivo superplastificante: 1,5% do peso do cimento.

Tabela 14: Traços executados.

Sigla	CCC	PRC0	PRC450	PRC800
Traço	Compósito Controle	Substituição de 20% de CPC por PRC0	Substituição de 20% de CPC por PRC450	Substituição de 20% de CPC por PRC800

Fonte: O Autor (2023).

Para os ensaios de desempenho mecânico e de durabilidade fabricou-se corpos de prova (CP) cilíndricos de 5 x 10 cm. O compósito referência, fabricado com CPC, apresenta o traço de 1:1,95 e fator A/C de 0,33 e consumo de materiais de 639,94; 1.242,04 e 211,18 kg/m³, de cimento Portland, areia e água, respectivamente. Após desforma, os CP foram curados de maneira submersa em água saturada com hidróxido de cálcio até a data dos ensaios.

O calor de hidratação de pastas fabricadas com os quatro aglomerantes foi medido por meio de calorímetro da marca Calmetrix, modelo I-Cal 4000 HPC. Essa aparelhagem é capaz de realizar medições simultâneas em até quatro de pastas de cimentos, argamassas ou concretos em frascos de 125ml. Os ensaios foram realizados em conformidade com a ASTM C1679 e C1702 (ASTM, 2017a, b).

A compressão axial foi obtida aos 07 e 28 dias, segundo o preconizado na NBR 5739 (ABNT, 2018b). O módulo de elasticidade foi medido pautando-se na norma NBR 8522 (ABNT, 2008) e o ensaio de tração por compressão diametral adotou o recomendado na NBR 7222 (ABNT, 2011), ambos ocorrendo aos 28 dias. Todos os ensaios mecânicos foram realizados em prensa universal de ensaios da marca EMIC com capacidade de 300 kN.

A densidade do concreto endurecido foi aferida por meio de picnometria a gás Hélio, já a absorção de água por imersão pautou-se na norma NBR 9778 (ABNT, 2009), todos os ensaios ocorreram aos 28 dias.

Aferiu-se a perda de massa por ataque ácido dos corpos de prova por meio de imersão deles em ácido sulfúrico (solução com concentração de 0,5% de ácido). As massas dos corpos foram avaliadas antes do ensaio e após sete dias submersos.

Para a realização de MEV fez-se necessário a moldagem de pastas com os três PRC, essa foram formuladas com fator A/C de 0,6. Durante a moldagem foi possível observar que a mistura contendo o PCR800 endureceu completamente ainda durante a moldagem, possuindo tempo de início e fim de pega menores que 5 minutos, esse período de endurecimento das misturas mostrou-se inversamente proporcional às temperaturas de queima.

O problema da pega rápida é recorrente no contexto de uso de PRC que passam por tratamento térmico. A explicação reside na rápida hidratação da partículas de PCR desidratadas e no aumento da quantidade de CaO com o aumento da temperatura de tratamento (BOGAS; CARRIÇO; PEREIRA, 2019; SHUI *et al.*, 2009; VYŠVAŘIL *et al.*, 2014). Além disso, a falta de um controlador de pega (gesso) nos pós reciclados contribui para esse comportamento.

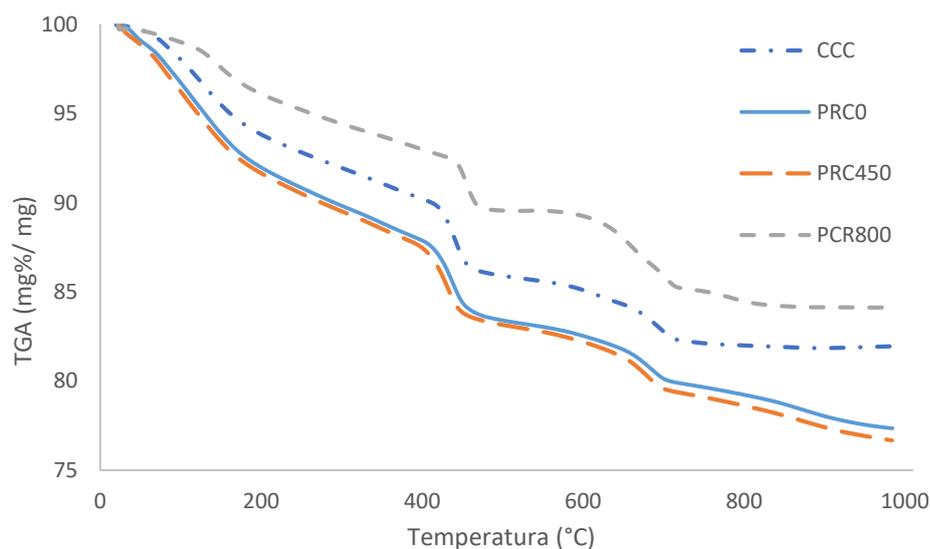
Para entendimento de potenciais diferenças significativas entre as médias dos resultados, realizou-se uma análise de variância (ANOVA). Nessa análise é necessário pressupor duas hipóteses: (H_0) que as médias sejam iguais e (H_1) que há alguma diferença significativa entre elas. Para tanto o nível de significância utilizado foi de 5%. Nos casos onde rejeitou-se H_0 , foi realizado o Teste de Tukey, ao nível de significância de 5%, para identificar entre quais médias há diferença significativa. Essa análise foi executada para os resultados de resistências à compressão, à tração, módulo de elasticidade, absorção de água e ataque ácido.

3.3. Resultados

3.1.1. Termogravimetria do PRC

A Figura 21 indica os resultados de termogravimetria das pastas analisadas. É importante frisar que a quantidade de CH nos traços está diretamente ligada à ocorrência, ou não, de reação pozolânica nas misturas.

Figura 21: Termogravimetria das pastas contendo PRC.



Fonte: O Autor (2023).

É possível vislumbrar três fases distintas na Figura 21. Na primeira, entre 80 e 200 °C, ocorre a perda da água livre. Já na segunda ocorre a desidroxilação do CH entre 400 e 500 °C, na última fase, de 600 a 800 °C, sucede a descarbonatação do CaCO_3 (RUPASINGHE *et al.*, 2017; WANG, X. *et al.*, 2021).

Utilizando-se da Equação 3 obtêm-se as porcentagens de CH nas pastas fabricadas, vide Tabela 15.

Tabela 15: Porcentagem de hidróxido de cálcio nas misturas.

Traço	CH (%)
CCC	24,79
PRC0	25,90
PRC450	25,89
PRC800	24,96

Fonte: O Autor (2023).

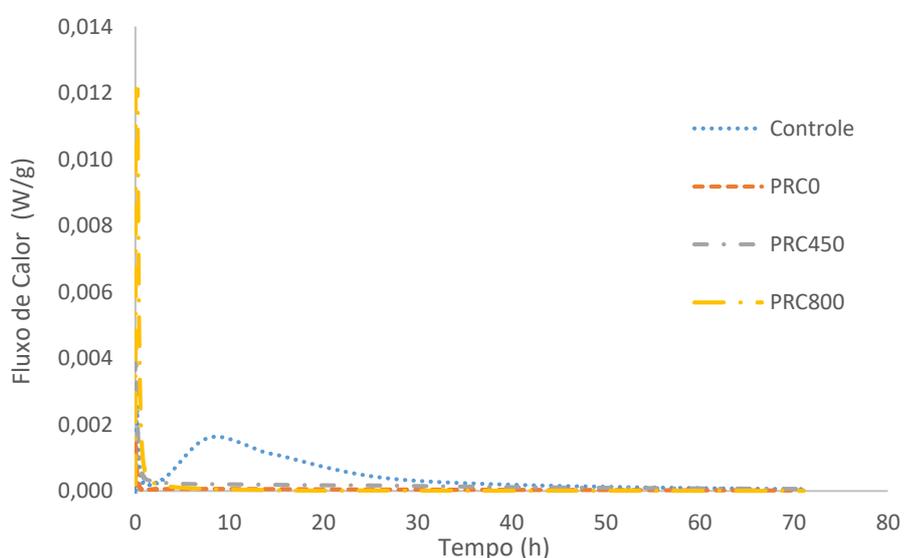
Compreende-se que em todas as misturas houve aumento na quantidade de CH presente em relação à referência. Esses valores indicam o não consumo

de CH. Com isso, infere-se, como esperado, a não ocorrência de reações pozolânicas ou a fraca ocorrências dessas.

3.3.2. Calorimetria das Pastas

A Figura 22 representa o fluxo de calor nas pastas fabricadas. É possível notar o comportamento típico do cimento Portland que compõe a pasta de controle. Esse comportamento é caracterizado por dois picos principais, um devido à dissolução exotérmica do material e as reações precoces de hidratação e outro ocorre devido à hidratação do C_3S e da formação de C-S-H e CH (SORIANO *et al.*, 2013; XU *et al.*, 2016).

Figura 22: Fluxo de calor nas pastas fabricadas.



Fonte: O Autor (2023).

Já as pastas compostas pelos PRC apresentam comportamentos distintos entre si. A pasta composta pelo pó reciclado sem tratamento térmico (PRC0) apresenta baixíssimo fluxo de calor em comparação as demais pastas, com isso, entende-se que esse pó tenha baixa reatividade, sendo essa composta apenas por partículas de cimento anidro não hidratados na fabricação do resíduo como comprovado pelo DRX.

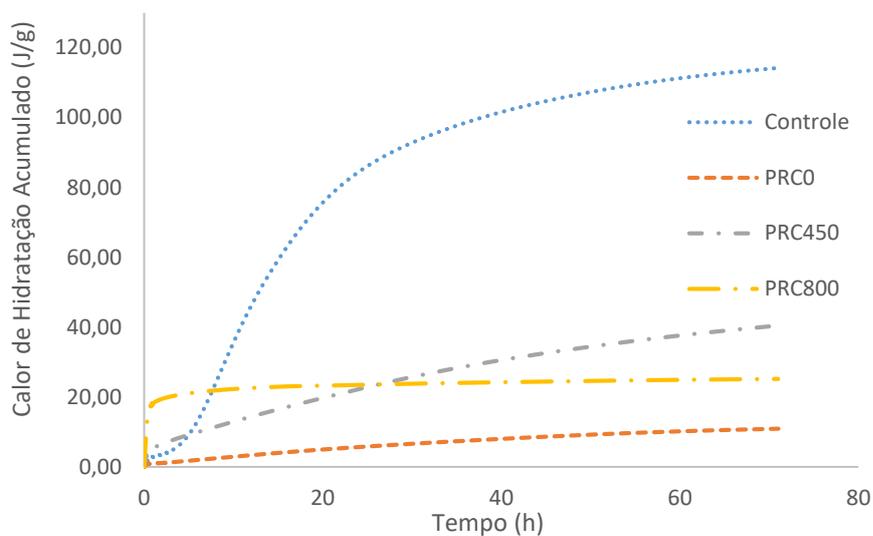
Já os pós que passaram por tratamento térmico, PRC450 e PRC800, apresentam intensos picos nos momentos iniciais da reação. Contudo esses picos apresentam baixa amplitude, o que caracteriza uma reação instantânea. Esse fato corrobora o resultados de DRX que demonstram a ausência de um controlador de pega e um acentuado percentual de C_3S nos pós tratados termicamente. Esse comportamento indica uma reação exotérmica intensa, porém curta, dos pós

tratados termicamente, além disso é possível notar que quanto maior a temperatura de tratamento dos resíduos, maior a liberação de calor, uma vez que maior é a presença de C_3S .

A Figura 23 demonstra o acúmulo de calor na reação de hidratação das pastas. É válido lembrar que as pastas são compostas pelo pós puros com água, ou seja, a pasta controle é composta por 100% de CPV, a pasta PRC0 por 100% de pó de PRC sem tratamento térmico, a pasta PRC450 por 100% de pó de PRC com tratamento térmico a 450°C e a pasta PRC800 por 100% de pó de PRC com tratamento térmico a 800°C.

Como esperado, o PRC0 é aquele que apresenta a menor emissão de calor durante a reação, o que corrobora a ideia de uma baixa reatividade dele. O traço que acumula maior quantidade de calor é o de controle, sendo assim, *a priori* é possível afirmar que a incorporação de PRC em traços contendo cimento Portland diminui o calor de hidratação das misturas. Esse fato é importante, principalmente na conjuntura de CAD, uma vez que compósitos, em geral, apresentam grande calor de hidratação. Contudo, quando observados os primeiros 60 minutos da reação, verifica-se que o calor liberado pela pasta PRC450 e PRC 800 é superior ao calor liberado pelas pastas Controle e PRC0. Isso deve-se ao fato do tratamento térmico ter impulsionado a formação de C_3S e CaO e não haver componentes de controle de pega nesses traços. Esta afirmação corrobora com os resultados encontrados pela DRX e Trabalhabilidade. Praticamente todo calor de hidratação do PRC800 é liberado nos momentos iniciais, grande parte do calor do PRC450 é também liberado no início da reação, contudo ainda há liberação de calor deste último ao longo do tempo.

Figura 23: Calor de hidratação acumulado nas pastas fabricadas.

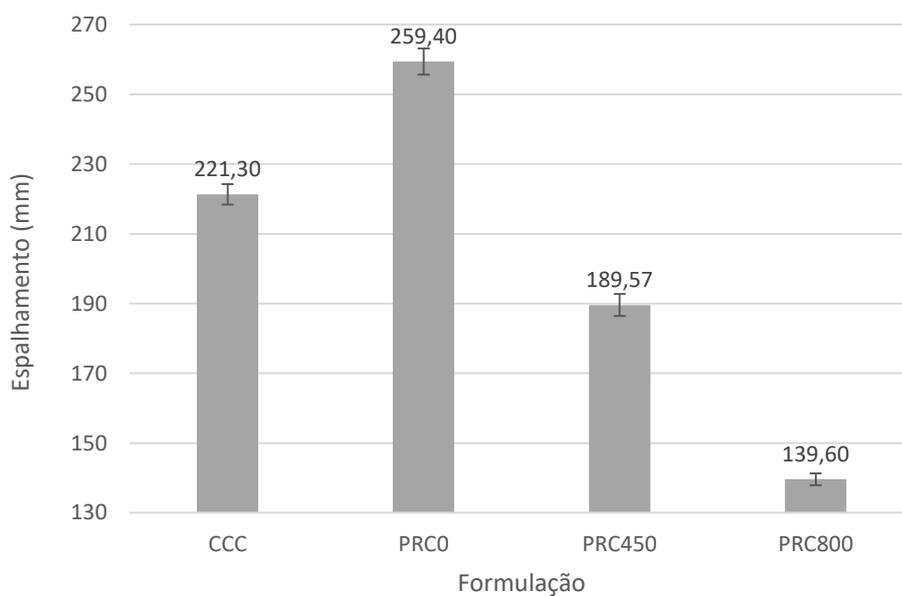


Fonte: O Autor (2023).

3.3.3. Trabalhabilidade

A Figura 24 representa os espalhamentos das argamassas obtidos a partir de ensaio de *flow table*. É importante frisar que todos os traços foram fabricados com 1,5% de aditivo superplastificante.

Figura 24: Índice de consistência médio dos traços.



Fonte: O Autor (2023).

Inicialmente, nota-se que a mistura com a maior trabalhabilidade é aquela que utiliza PRC sem o tratamento térmico, sendo o espalhamento dessa 17,21; 36,81 e 85,81% maior que os traços CCC, PRC450 e PRC800, respectivamente. Esse resultado mostra-se dentro do esperado, uma vez que o pó reciclado sem tratamento térmico é pouco reativo. Com isso, no traço PRC0, a quantidade de regente hidráulico é menor.

Analisando-se os pós reciclados tratados termicamente fica clara a perda de trabalhabilidade em comparação ao CCC. PRC450 e PRC800 apresentam 14,32 e 36,92% de perda de trabalhabilidade, respectivamente. Além disso, conforme descrito por Xuan e Shui (2011) e Shui *et al.* (2009), a necessidade de água aumenta com o acréscimo na temperatura de queima dos resíduos.

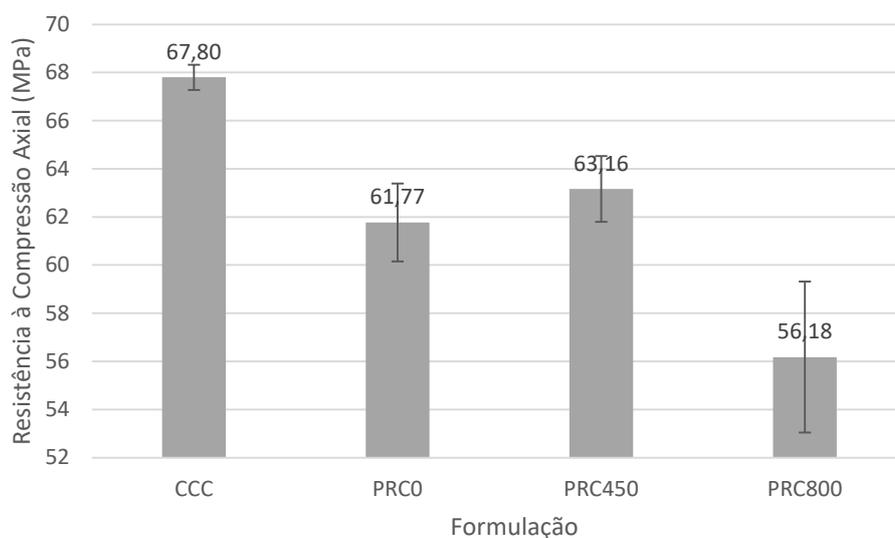
A tendência de perda de trabalhabilidade com a utilização de PCR tratado termicamente é bem conhecida na literatura, podendo ser explicada por sua superfície irregular, pela rápida hidratação do seus componentes desidratados, pela presença de CaO livre e etringita e pela ausência de um controlador de pega, fatos esses evidenciados pelo DRX e calorimetria dos materiais (CARRIÇO *et al.*, 2020; SERPELL; ZUNINO, 2017; WANG, J.; MU; LIU, 2018; XUAN; SHUI, 2011). Todos esses fatores expostos intensificam-se com o aumento da temperatura de tratamento. Além disso, os PRC possuem maior área superficial, o que também aumenta a demanda por água.

Apesar das diferenças expostas os traços mostraram-se moldáveis. Infere-se que a perda de trabalhabilidade nas misturas PRC possa ser revertida com o aumento na quantidade de aditivo superplastificante utilizado.

3.3.4. Resistência à Compressão

A Figura 25 e a Figura 26 expõem os resultados de resistência à compressão axial aos 07 e 28 dias, respectivamente.

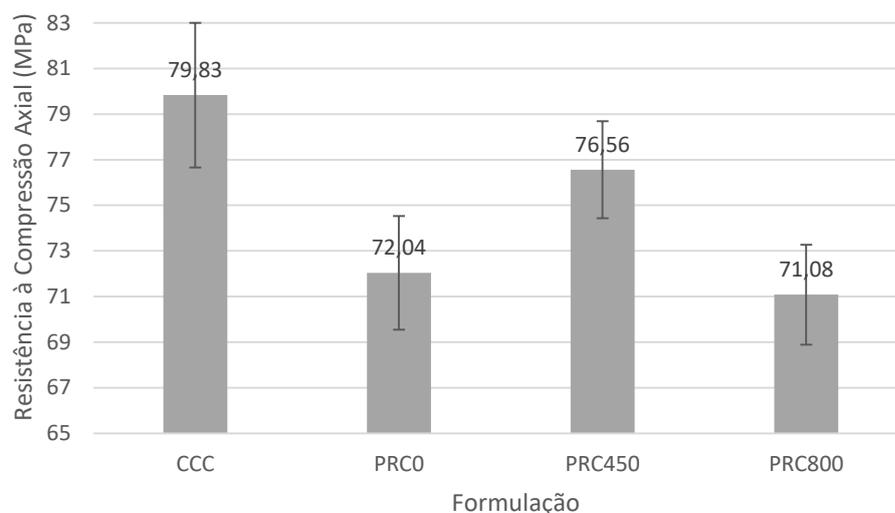
Figura 25: Resistência à compressão média aos 07 dias.



Fonte: O Autor (2023).

Os valores médios obtidos aos 07 dias indicam perda de resistência média com o uso dos PRC. Essa perda se mostra mais acentuada no traço que utiliza o PRC800 e menos relevante na mistura com PRC450. As perdas de desempenho, com relação ao CCC, são de 8,89; 6,84 e 17,14% para PRC0, PRC450 e PRC800, respectivamente. Entre os compósitos cimentícios com o pó reciclado há uma variação de 11,06% entre o traço de maior e menor resistência. Contudo, tendo em vista uma substituição de 20% de cimento Portland pelo PRT, entende-se que os resultados são aceitáveis, uma vez que atingem valores maiores que 80% da resistência do CCC (54,24 MPa).

Figura 26: Resistência à compressão média aos 28 dias.



Fonte: O Autor (2023).

Aos 28 dias, a tendência apresentada aos 07 dias se repete. Novamente a substituição de CPC por PRC causou uma perda de desempenho nos traços fabricados. Infere-se que a justificativa para esse comportamento seja a menor reatividade dos pós reciclados em relação ao CPC e a rápida reação dos mesmos. Além disso, novamente o compósito fabricado com o PRC800 é aquele que apresenta o menor valor médio entre os estudados. Em relação ao CCC as misturas PRC0, PRC450 e PRC800 apresentam uma perda de performance de 9,76; 4,10 e 10,96%, respectivamente. Entre as misturas com presença de PRC a diferença máxima entre as resistências médias foi de 7,16%. Contudo, novamente, todas as misturas atingiram mais de 80% da resistência do CCC, o que equivale a 63,84 MPa.

Dividindo-se o consumo de CPC dos traços pelas resistências obtidas é possível obter taxa de rendimento das misturas executadas (resistência específica): 0,125 MPa/kg; 0,141 MPa/kg; 0,150 MPa/kg e 0,139 MPa/kg de cimento Portland para CCC, PRC0, PRC450 e PRC800, respectivamente. Nota-se que o todas as misturas com PRC apresentam uma maior taxa de resistência por kg de cimento Portland utilizado que a mistura de controle. Esse fato reforça o potencial de substituição que esses pós reciclados apresentam, sendo esse potencial de grande apelo ambiental.

Dentre os resultados de resistência à compressão expostos, infere-se que o PRC450 é aquele que apresenta maior adequabilidade para ser utilizado como

substituto do CPC, uma vez que apresenta menor perda de desempenho em relação à referência, quando avaliada a resistência à compressão.

Dos 07 para os 28 dias todos os compósitos cimentícios apresentam ganho de resistência média à compressão. Essa melhora de performance foi de 17,74; 16,62; 21,22 e 26,52% para as misturas CCC, PRC0, PRC450 e PRC800, respectivamente.

Conforme evidenciado pelo DRX e pela calorimetria, os pós tratados termicamente são reativos. Contudo apresentam pega quase instantânea, essa ocorrendo durante a moldagem das misturas (pós ricos em C_3S e sem controladores de pega). Esse fato é uma possível explicação para a performance inferior desses traços, principalmente do PRC800 (BOGAS; CARRIÇO; PEREIRA, 2019; SHUI *et al.*, 2009; VYŠVAŘIL *et al.*, 2014). Essa reação acelerada, ocorre potencialmente durante a mistura, em período anterior a moldagem dos corpos-de-prova e antes das reações do CPC. Sendo assim, os produtos de hidratação do PCR 450 e do PCR800, principalmente, não contribuem plenamente para a resistência mecânica das argamassas.

As análises de variância realizadas para os resultados de resistência à compressão aos 07 e 28 dias rejeitam a hipótese de que não há diferença significativa entre as médias obtidas. Sendo assim, procedeu-se o Teste de Tukey, os resultados encontram-se expostos na Tabela 16 e Tabela 17.

Tabela 16: Teste de Tukey para os resultados de resistência à compressão axial aos 07 dias.

	CCC	PRC0	PRC450	PRC800
CCC		0,01987	0,06886	0,000331
PRC0	5,472		0,8086	0,02924
PRC450	4,208	1,264		0,008864
PRC800	10,54	5,072	6,336	

Abaixo da diagonal os escores "Q" utilizados no Teste de Tukey. Acima da diagonal os "p" valores. Em negrito os cruzamentos onde as médias são significativamente diferentes.

Fonte: O Autor (2023).

Aos 07 dias, quatro comparações de médias mostram-se significativamente diferentes: CCC e PRC0, CCC e PRC800, PRC0 e PRC800 e PRC450 e PRC800. Corrobora-se, portanto, duas tendências. A primeira é que o PRC800 apresenta o pior desempenho em os MCS estudados, a segunda é que o PRC450 apresenta desempenho adequado para servir como substituinte do CPC, uma vez que não diferença estatística significativa entre os resultados dele e o CCC.

Tabela 17: Teste de Tukey para os resultados de resistência à compressão axial aos 28 dias.

	CCC	PRC0	PRC450	PRC800
CCC		0,002444	0,2846	0,00063
PRC0	6,266		0,04271	0,9125
PRC450	2,634	4,194		0, 009278
PRC800	7,264	0,9249	5,306	

Abaixo da diagonal os escores "Q" utilizados no Teste de Tukey. Acima da diagonal os "p" valores. Em negrito os cruzamentos onde as médias são significativamente diferentes.

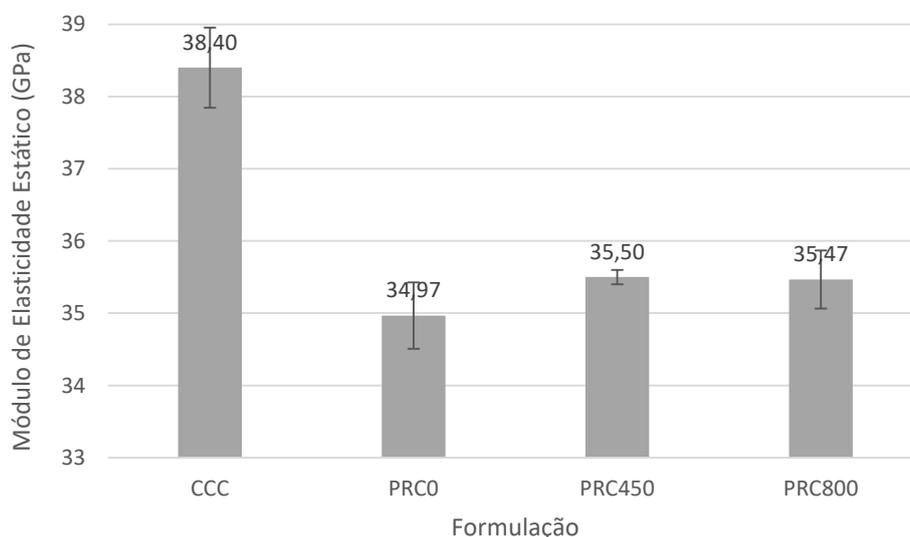
Fonte: O Autor (2023).

Já aos 28 dias há diferenças estatísticas significativas entre os resultados médios das seguintes moldagens: CCC e PRC0, CCC e PRC800, PRC450 e PRC0 e PRC450 e PRC800. Novamente, o traço PRC450 é o único que apresenta performance estatisticamente similar ao CCC. PRC0 e PRC800 mostram-se estatisticamente iguais enquanto diferem-se do CCC e do PRC450.

3.3.5. Módulo de Elasticidade

A Figura 27 demonstra os resultados de módulo de elasticidade estático obtidos para as formulações fabricadas.

Figura 27: Módulo da elasticidade estático médio aos 28 dias.



Fonte: O Autor (2023).

Dividindo-se o consumo de CPC dos traços pelos módulos de elasticidade obtidos é possível obter as seguintes taxas: 0,060 GPa/kg; 0,068 GPa/kg; 0,069 GPa/kg e 0,069 GPa/kg de cimento Portland para CCC, PRC0, PRC450 e PRC800, respectivamente. Nota-se que o todas as misturas com PRC apresentam

uma maior taxa de módulo de elasticidade por kg de cimento Portland utilizado que a mistura de controle. Esse fato reforça os resultados de resistência à compressão das misturas, que também apresentam essa tendência.

Como esperado, os resultados médios de módulo de elasticidade acompanham a tendência explicitada pelos valores de resistência à compressão. O compósito de referência é o que apresenta o maior módulo de elasticidade sendo seguido pelas médias do PRC450, PRC800 e PRC0. Tendo como referência o traço CCC, as misturas PRC0, PRC450 e PRC800 apresentam resultados 8,94; 7,56 e 7,64% menores, respectivamente.

Foi necessária a realização do Teste de Tukey – vide Tabela 18– uma vez que a ANOVA rejeitou a hipótese que não há diferença significativa entre os módulos de elasticidade médios apresentados.

Tabela 18: Teste de Tukey para os resultados de módulo de elasticidade aos 28 dias.

	CCC	PRC0	PRC450	PRC800
CCC		3,74E-05	0,000129	0,000119
PRC0	14,25		0,447	0,497
PRC450	12,04	2,213		0,9996
PRC800	12,17	2,075	0,1383	

Abaixo da diagonal os escores "Q" utilizados no Teste de Tukey. Acima da diagonal os "p" valores. Em negrito os cruzamentos onde as médias são significativamente diferentes.

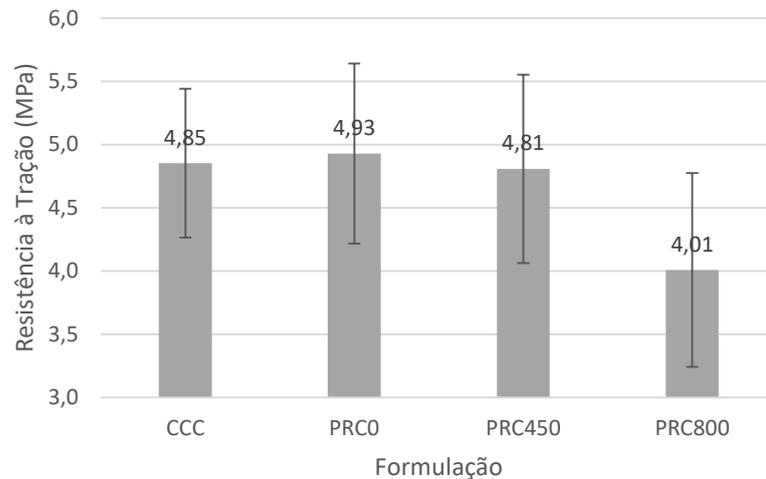
Fonte: O Autor (2023).

Analisando-se a Tabela 18 nota-se que somente o CCC é estatisticamente diferente das demais misturas. Além disso não há diferença estatisticamente relevante entre os traços contendo PRC, o que indica que não há diferença significativa entre as médias do compósitos cm PRC.

3.3.6. Resistência à Tração

Os resultados médios de resistência à tração, obtidos por ensaios de compressão diametral, encontram-se expostos na Figura 28.

Figura 28: Resistência à tração média aos 28 dias.



Fonte: O Autor (2023).

A análise dos dados demonstra que pequenas variações de resistência média à tração ocorrem entre os traços CCC, PRC0 e PRC450. O PRC0 apresenta média 1,64% maior que a moldagem referência, PRC450 e PRC800 obtiveram médias 0,84 e 17,32% menores que o CCC, respectivamente.

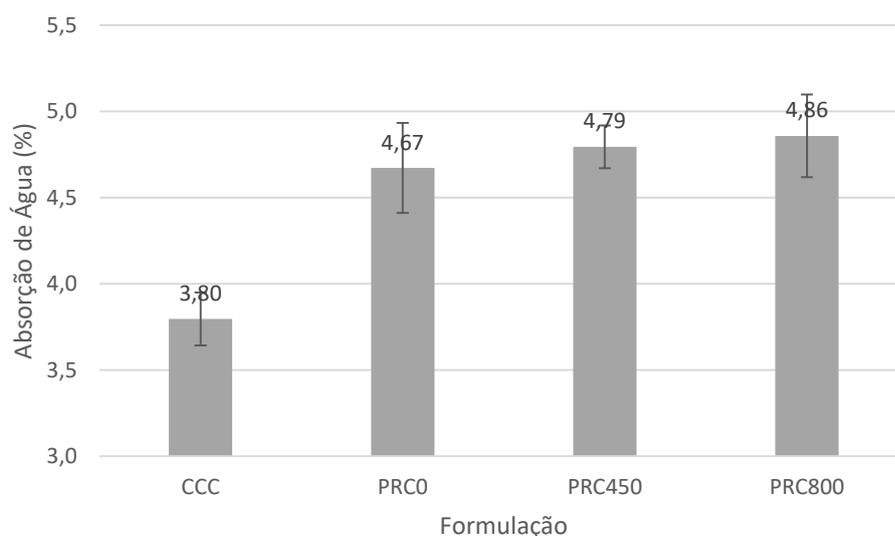
Liang *et al.* (2021) afirmam que a incorporação de pós reciclados cimentícios e cerâmicos aos traços causam perdas de desempenho mecânico às misturas. Contudo essas perdas estariam mais fortemente atreladas à resistência à compressão, sendo de menor monta em características como resistência à flexão, essa tendência é confirmada também por Letelier *et al.* (2016). Por outro lado, Carriço *et al.* (2020) relatam perdas gerais de desempenho mecânico com o uso de PRC.

A ANOVA não encontrou diferenças significativas entre os resultados médios, confirmando a hipótese (H_0). Com isso não é necessário a realização do Teste de Tukey para essa variável. Isso corrobora a hipótese de que a substituição de 20% de CPC por PRC não influencia na resistência à tração dos traços fabricados.

3.3.7. Absorção de Água

A absorção média de água, aos 28 dias, dos CP fabricados está exposta na Figura 29.

Figura 29: Absorção média aos 28 dias.



Fonte: O Autor (2023).

Igualmente, esse ensaio, indicador de durabilidade dos traços dos compósitos, sugere uma maior qualidade da mistura formulada utilizando-se apenas CPC. O traço de controle apresenta a menor percentagem de absorção de água entre as análises realizadas. Uma maior quantidade de produtos de hidratação, oriundos de um material aglomerante mais reativo, e a pega antecipada dos PRC tratados termicamente justifica tal acontecimento. Tendo em vista a referência, os traços PRC 0, 450 e 800 têm uma absorção de água 20,26; 26,05 e 27,89% maiores, respectivamente.

Considerando-se apenas as formulações com a presença de PRC, a que apresenta pior desempenho é a PRC800 sendo seguida pelo PRC450 e pelo PRC0. Contudo, o Teste de Tukey, realizado mediante a reprovação da hipótese H_0 na ANOVA, indica não haver diferença significativa entre as médias dos traços que utilizam PRC. Em relação ao CCC as médias dos traços com PRC mostram-se estatisticamente diferentes, conforme Tabela 19.

Tabela 19: Teste de Tukey para os resultados de absorção de água aos 28 dias.

	CCC	PRC0	PRC450	PRC800
CCC		0,003188	0,001332	0,000903
PRC0	7,51		0,8657	0,68
PRC450	8,599	1,089		0,9822
PRC800	9,115	1,605	0,5159	

Abaixo da diagonal os escores "Q" utilizados no Teste de Tukey. Acima da diagonal os "p" valores. Em negrito os cruzamentos onde as médias são significativamente diferentes.

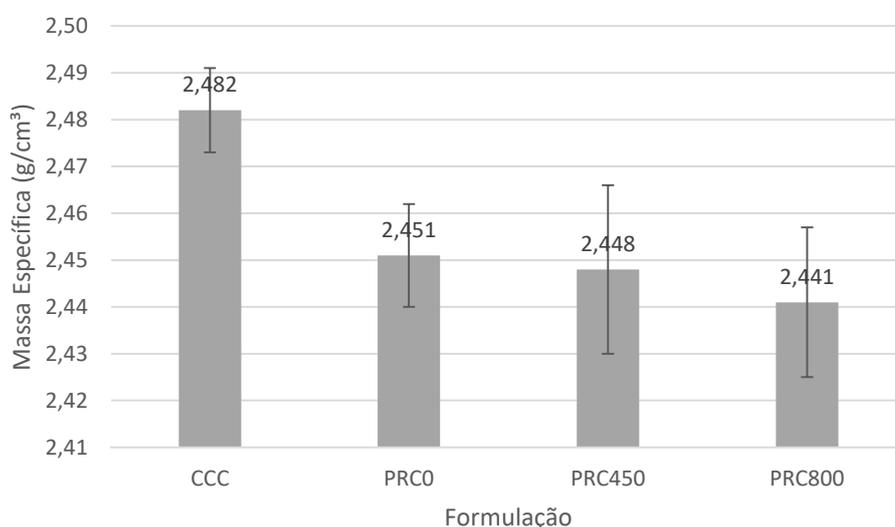
Fonte: O Autor (2023).

Wu *et al.* (2021) indicam que traços com a presença de pós reciclados de concreto apresentam-se mais porosos e com uma maior absorção de água em relação a misturas somente com cimento Portland. Isso se deveria à menor quantidade de produtos de hidratação formados com o uso de RCD. É posto que quanto maior a substituição de CPC por PRC, maiores são os efeitos deletérios relativos à absorção e porosidade. No mesmo viés, Bordy *et al.* (2017) indicam aumento de porosidade com o uso dos PRC.

3.3.8. Massa Específica

A massa específica média dos compósitos cimentícios fabricados está exposta na Figura 30.

Figura 30: Massa específica média aos 28 dias.



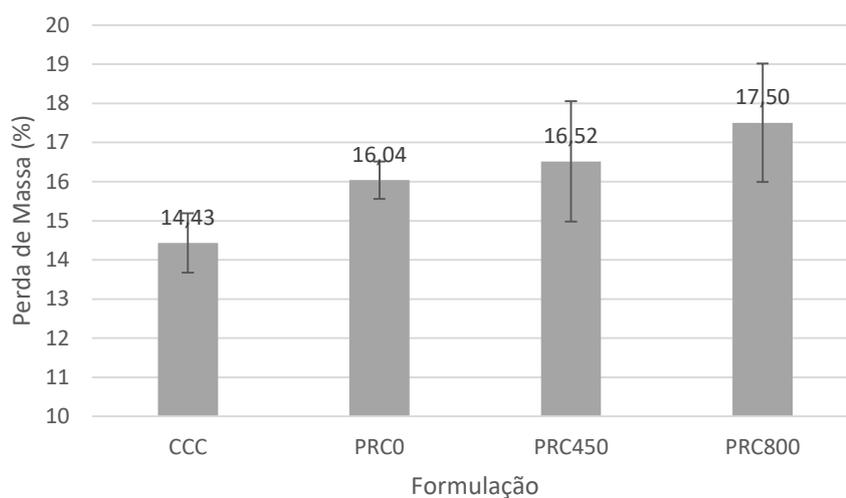
Fonte: O Autor (2023).

Corroborando os resultados de absorção de água e de massa específica dos aglomerantes utilizados, os valores de massa específica média indicam uma maior massa específica do traço que utiliza apenas CPC em comparação com os traços que utilizam PRC. A maior quantidade de produtos de hidratação formados com a utilização somente do cimento Portland justifica a densificação da mistura. Em relação ao CCC, os traços PCR0, PCR450 e PCR800 são 1,25; 1,37 e 1,65% menos densos, respectivamente.

3.3.9. Ataque Ácido

A Figura 31 expõe os resultados da perda de massa causada pelo ataque com ácido sulfúrico.

Figura 31: Perda de massa média devida ao ataque com ácido sulfúrico.



Fonte: O Autor (2023).

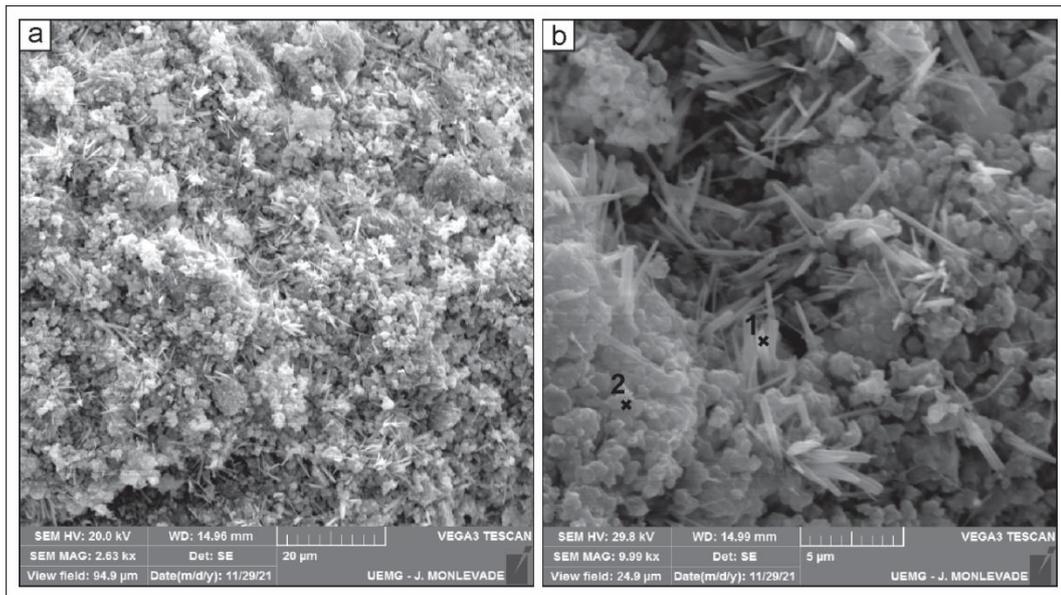
A análise demonstra que a substituição de CPC por PRC prejudica a resistência ao ataque ácido das misturas analisadas. A perda de massa, em relação ao traço de referência, do PRC0, PRC450 e PRC800 é 11,15; 14,48 e 21,28% menor, respectivamente.

O desempenho inferior dos compósitos que utilizam-se de pós reciclados pode ser atribuído ao pior desempenho dos pós em relação ao cimento comum, conseqüentemente, infere-se uma durabilidade menor dos compósitos fabricados com PRC. Contudo, de acordo com a ANOVA realizada, não foi encontrada diferença estaticamente relevante entre os resultados médios, o que indica uma manutenção do desempenho entre as misturas, mesmo com a diferença entre as médias.

3.3.10. MEV/EDS

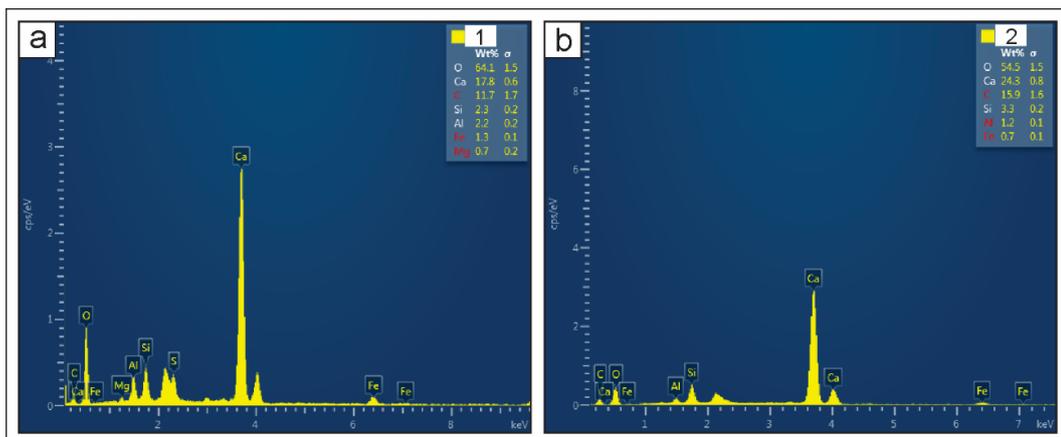
A amostra PRC0 (Figura 32) apresenta textura esponjosa e porosa, típica de gel de C-S-H, e agulhas com formato típico de etringita. Localmente este gel apresenta suaves picos de alumínio e ferro na análise pontual por EDS, o que indica uma possível presença de carboaluminato de cálcio e ferro (Figura 33a). A etringita apresenta os típicos picos de O, Al, Si S e Ca (Figura 33b).

Figura 32: Imagens de elétrons secundários da amostra PCR0. (a) imagem geral e (b) imagem de detalhe com indicação dos pontos das análises EDS presentes na Figura 33.



Fonte: O Autor (2023).

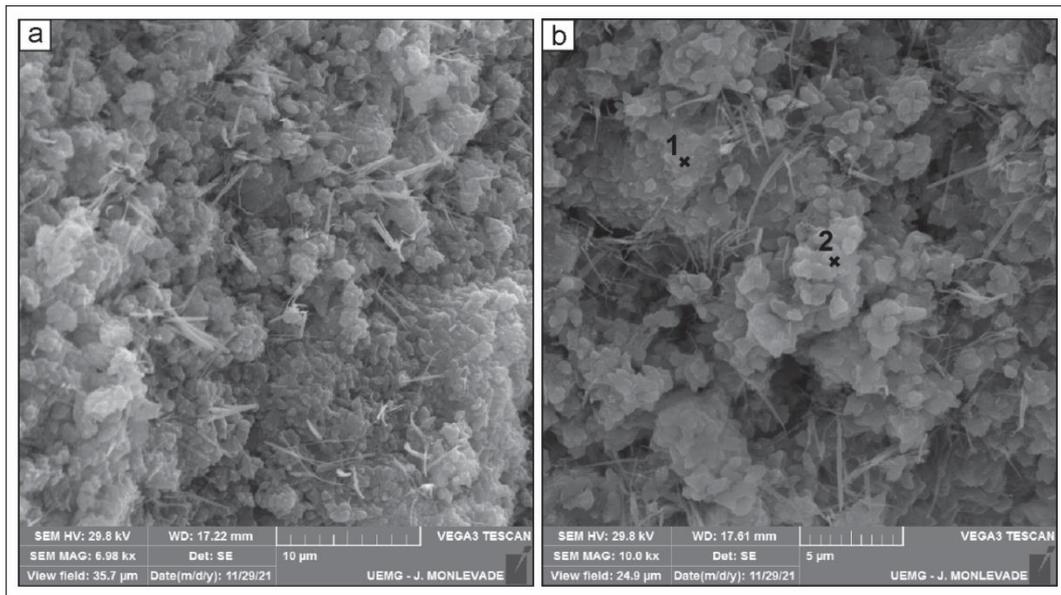
Figura 33: Padrões EDS obtidos na amostra PCR0, indicados na Figura 1b. (a) C-S-H. (b) Etringita.



Fonte: O Autor (2023).

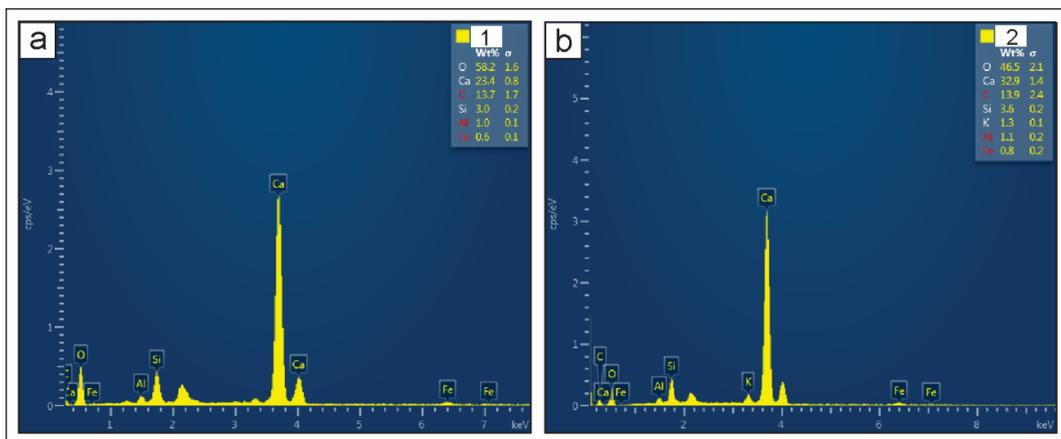
A amostra PCR450 (Figura 34) apresenta menor densidade de etringita em comparação com a PCR0. Observa-se predomínio da matriz esponjosa de gel de C-S-H, com picos característicos de Si e Ca (Figura 35), e picos suaves de Al e raros de K. As agulhas de etringita da amostra PCR450 são predominantemente mais finas, esparsas e alongadas do que observado na amostra PCR0.

Figura 34: Imagens de elétrons secundários da amostra PCR450. (a) imagem geral e (b) imagem de detalhe com indicação dos pontos das análises EDS presentes na Figura 35.



Fonte: O Autor (2023).

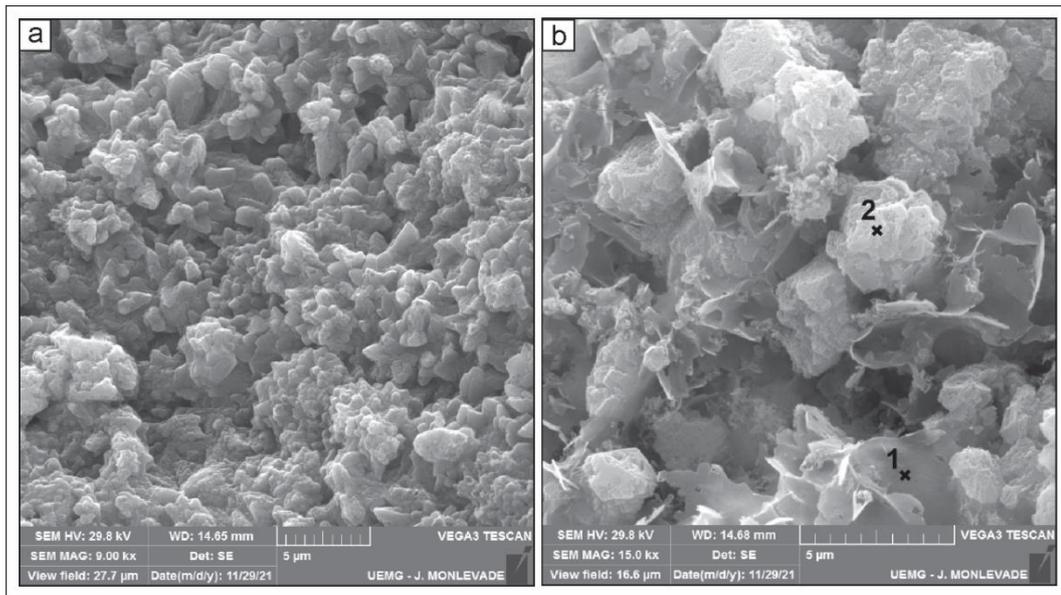
Figura 35: Padrões EDS obtidos em análises pontuais, indicadas na Figura 3b, em C-S-H da amostra PCR450.



Fonte: O Autor (2023).

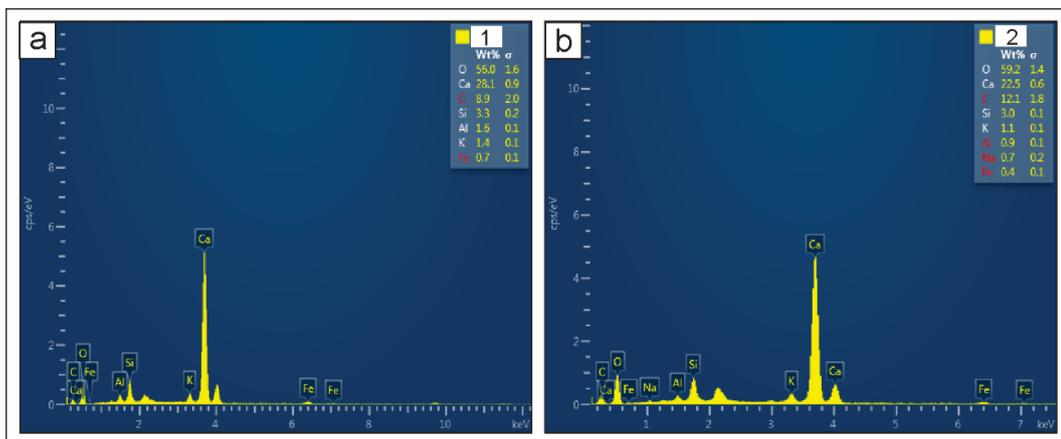
A amostra PCR800 (Figura 36) apresenta grande quantidade de estrutura esponjosa, o que pode ser indicativo de uma proporção maior de gel de C-S-H nesta amostra. O grande diferencial de textura desta amostra com relação ao PCR0 e PCR450 é a inexistência de etringita, e a presença de partículas de textura lamelar (Figura 36b), que podem ser correlacionadas a uma possível presença de monossulfato. A Figura 37 indica o EDS realizado em dois pontos da amostra.

Figura 36: Imagens de elétrons secundários da amostra PCR800. (a) imagem geral e (b) imagem de detalhe com indicação dos pontos de análises EDS presentes na Figura 37.



Fonte: O Autor (2023).

Figura 37: Padrões EDS obtidos em análises pontuais, indicadas na Figura 3b, em C-S-H da amostra PCR800.



Fonte: O Autor (2023).

3.4. Conclusões

A presente pesquisa avaliou a possibilidade de utilização de pós reciclados provenientes de cimento hidratado na produção de novos compostos cimentícios. Os resultados apontam que é possível utilizar os PRC, tratados ou não, em novos compósitos. Os principais pontos elucidados foram:

- O DRX dos pós reciclados indicou que o tratamento térmico foi efetivo em proporcionar reatividade aos resíduos. Considerável percentual de C_3S foi criado nos pós tratados termicamente em relação ao resíduo que não passou por tratamento;
- A calorimetria das pastas formadas pelo CPC e pelos PRC expõe uma forte reação exotérmica nos momentos iniciais de hidratação das pastas PRC450 e PRC800, o que indica pega rápida desses materiais. Tal fato confirma as informações do DRX, uma vez que há grandes percentuais de C_3S nesses resíduos e nenhum composto retardador de pega, gesso, por exemplo;
- A trabalhabilidade é negativamente afetada pela introdução dos PRC. A composição desses, bem como o formato e rugosidade das partículas, contribui negativamente para o quesito avaliado. Contudo, entende-se que ajustes no tipo e na quantidade de aditivo superplastificante sejam suficientes para mitigar/sanar tal situação;
- De forma geral há uma diminuição de resistência à compressão das misturas compostas com PRC em comparação com o grupo controle. Entende-se que isso se deva à pega instantânea por parte dos PRC tratados termicamente e da baixa reatividade do PRC0. Contudo, a resistência específica dos traços compostos pelos pós reciclados é superior à referência. Como sugestão de estudo futuros, coloca-se a possibilidade de utilização dos PRC tratados termicamente com a adição de um controlador de pega;
- Os ensaios indicadores de durabilidade acompanham os resultados de resistência à compressão. As misturas com PRC apresentam desempenho inferior em relação à referência. Novamente, entende-se que é possível a melhoria de desempenho com a introdução controladores de pega nos PRC tratados termicamente.

Como sugestão de estudos futuros, além da introdução de controladores de pega nas misturas, entende-se ser interessante a avaliação de outras temperaturas de queima dos PRC, mais estudos de durabilidade podem ser

avaliados nas misturas realizadas, além disso os PRC tratados apresentam boas possibilidades que serem os únicos aglomerantes de um traço, possibilidade essa que deve ser avaliada.

4. Considerações Finais

A presente tese de doutorado teve como objetivo principal avaliar as possibilidades de uso de pós reciclados advindos de RCD na composição de compósitos cimentícios de alto desempenho. Historicamente estes materiais utilizam grandes quantidades de cimento Portland e adições minerais em seus traços. Para simular e projetar a aplicação de RCD com predominância de cerâmica vermelha e RCD com predominância de argamassas e concreto, neste trabalho, colocou-se como opção a utilização de pós reciclados de tijolo e cimento hidratado para adição ou substituição nessas misturas. Várias foram as perguntas motivadoras da pesquisa – ver item 1.1. A seguir é apresentado um resumo dos principais pontos do trabalho e as respostas para os questionamentos realizados.

De forma geral ambos os pós, PRT e PRC, se mostraram potencialmente utilizáveis em compósitos de alto desempenho. Os ensaios demonstram que o PRT é um material pozolânico, o que possibilitou a substituição da sílica ativa – uma das principais e mais eficientes adições minerais na atualidade – pelo resíduo.

Os pós reciclados de tijolos melhoraram o desempenho dos traços que os contêm em relação ao traço de referência, o qual não utiliza adição mineral. Os ensaios de pozolanidade atestam a reatividade do material. Já os ensaios mecânicos e de durabilidade demonstram uma melhora geral no desempenho dos traços com adição de PRT. O PRT demonstrou um bom desempenho em relação à sílica ativa, sendo um potencial substituinte desse material em compósitos cimentícios.

Os PRC, apesar de não apresentarem desempenho similar aos PRT, se mostraram passíveis de serem utilizados em substituição ao cimento Portland. Eles foram submetidos à tratamento térmico a 450 e 800 °C, que se mostrou satisfatório, uma vez que conseguiu reativar esse resíduo cimentício que já passara por hidratação. Os ensaios indicam amplo percentual de C_3S criado nos pós tratados termicamente em comparação ao pó não tratado.

Um fato que desabona o uso dos PRC é a perda de desempenho mecânico das misturas. Esse fato se deve, principalmente, a pega quase instantânea por parte do PRC450 e PRC800 e a inatividade do PRC0. Esses pós não são compostos por controladores de pega, portanto, infere-se que uma possibilidade de melhoria de desempenho seja a introdução desses nas misturas.

Este trabalho possibilitou o avanço no entendimento de como resíduos não comumente utilizados se comportam em compósitos cimentícios, os resultados indicam que há possibilidade de diminuição do uso de adições minerais tradicionais e de cimento Portland comum com a utilização de RCD.

Vislumbram-se diversas possibilidades de continuidade de pesquisa: desenvolvimento de dosagens com RCD reais produzidos pela indústria; substituição de cimento Portland por PRT; ensaios de durabilidade aprofundados nos traços com RCD; estudos aprofundados relativos à pozolanicidade e reatividade desses pós; introdução de controladores de pega nas misturas com PRC; compósitos que misturem os dois pós avaliados, PRC e PRT; utilização desses rejeitos em misturas não cimentícias, álcalis ativados, por exemplo; formulação de traços sem a presença de cimento Portland; balanço energético entre a reciclagem de RCD e a fabricação de materiais usualmente utilizados; dentre outras possibilidades.

As vantagens ambientais na reciclagem de RCD são enormes, uma vez que a parcela de granulometria pulverulenta dos RCD, historicamente, não tem uma utilização usual. Cada vez mais a responsabilidade ambiental é um fator fundamental na indústria da construção civil, sendo este trabalho uma contribuição ao avanço do conhecimento nessa área. O presente estudo fornece uma contribuição para sociedade avançar em direção aos objetivos da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas, principalmente no que tange o consumo e produção sustentáveis.

5. Referências

ABNT. *NBR 12653: Materiais Pozolânicos - Requisitos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2014a.

ABNT. *NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do Índice de consistência*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

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

ABNT. *NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2018a.

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

ABNT. *NBR 5752 - Determinação do Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias*. Rio de Janeiro: ABNT, 2014b.

ABNT. *NBR 7222: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ABNT. *NBR 8522: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão*. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ABNT. *NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ABNT. *NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ABNT. *NBR NM 45: Determinação da massa unitária e do volume de vazios*. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ABRELPE. *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil - 2007*. . São Paulo: [s.n.], 2007.

ABRELPE. *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil - 2008*. . São Paulo: [s.n.], 2008.

ABRELPE. *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil - 2009*. . São Paulo: [s.n.], 2009.

ABRELPE. *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil - 2010*. . São Paulo: [s.n.], 2010.

ABRELPE. *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil - 2011*. . São Paulo: [s.n.], 2011.

ABRELPE. *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil - 2012*. . São Paulo: [s.n.], 2012.

ABRELPE. *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil - 2013*. . São Paulo: [s.n.], 2013.

ABRELPE. *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil - 2014*. . São Paulo: [s.n.], 2014.

ABRELPE. *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil - 2015*. . São Paulo: [s.n.], 2015.

ABRELPE. *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil - 2016*. . São Paulo: [s.n.], 2016.

ABRELPE. *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil - 2017*. . São Paulo: [s.n.], 2017.

ABRELPE. *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil - 2018/2019*. . São Paulo: [s.n.], 2019.

ABRELPE. *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil - 2020*. . São Paulo: [s.n.], 2020.

ABRELPE. *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil - 2021*. . São Paulo: [s.n.], 2021.

ABRELPE. *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil - 2022*. . São Paulo: [s.n.], 2022.

ALIABDO, A. A.; ABD-ELMOATY, A. E. M.; HASSAN, H. H. Utilization of crushed clay brick in concrete industry. *Alexandria Engineering Journal*, v. 53, n. 1, p. 151–168, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2013.12.003>>.

ANDREW, R. M. Global CO₂ emissions from cement production. *Earth System Science Data*, v. 10, n. 1, p. 195–217, 26 jan. 2018. Disponível em: <<https://www.earth-syst-sci-data.net/10/195/2018/>>.

ASTM. *C-311- Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or*

Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete. West Conshohocken, Pensilvânia, EUA: ASTM, 2002.

ASTM. *C 1897-20 Standard Test Methods for Measuring the Reactivity of Supplementary Cementitious Materials by Isothermal Calorimetry and Bound Water Measurements*. [S.I.]: ASTM, 2021.

ASTM. *C1679 - Standard Practice for Measuring Hydration Kinetics of Hydraulic Cementitious Mixtures Using Isothermal Calorimetry*. West Conshohocken, Pensilvânia, EUA: [s.n.], 2017a.

ASTM. *C1702 - Standard Test Method for Measurement of Heat of Hydration of Hydraulic Cementitious Materials Using Isothermal Conduction Calorimetry*. West Conshohocken, Pensilvânia, EUA: [s.n.], 2017b.

ASTM. *C618 - Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. West Conshohocken, Pensilvânia, EUA: ASTM, 2019. Disponível em: <<https://www.astm.org/Standards/C618.htm>>.

BAUER, L. A. F. *Materiais de Construção*. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

BEZERRA, A. C. DA S. *et al.* Effect of partial replacement with thermally processed sugar cane bagasse on the properties of mortars. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 22, n. 1, 2017. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762017000100415&lng=en&tlng=en>.

BOGAS, J. A.; CARRIÇO, A.; PEREIRA, M. F. C. Mechanical characterization of thermal activated low-carbon recycled cement mortars. *Journal of Cleaner Production*, v. 218, p. 377–389, maio 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652619303580>>.

BORDY, A. *et al.* Cement substitution by a recycled cement paste fine: Role of the residual anhydrous clinker. *Construction and Building Materials*, v. 132, p. 1–8, fev. 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.080>>.

BRASIL. Resolução CONAMA Nº 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. , 2002, p. 7.

CARRIÇO, A. *et al.* Mortars with thermo activated recycled cement: Fresh and mechanical characterisation. *Construction and Building Materials*, v. 256, p.

119502, set. 2020. Disponível em:

<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061820315075>>.

CBIC. *Cimento - Consumo, Produção e Valores de Materiais de Construção*.

Disponível em: <<http://www.cbicdados.com.br/menu/materiais-de-construcao/cimento>>.

COUTINHO, A. S. *Fabrico e Propriedades do Betão*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 1997.

DEPARTAMENTO DE ESTUDOS ECONÔMICOS - DEE. *Mercado de insumos para cimento: Aspectos estruturais e exercício empírico*. Brasília: [s.n.], 2015.

DUAN, Z. *et al.* Study on the essential properties of recycled powders from construction and demolition waste. *Journal of Cleaner Production*, v. 253, p. 119865, abr. 2020. Disponível em:

<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652619347353>>.

EDWARDS, P. *Global Cement Top 100 Report 2017 - 2018*. Disponível em:

<<http://www.globalcement.com/magazine/articles/1054-global-cement-top-100-report-2017-2018>>. Acesso em: 9 set. 2019.

FUNK, J. E.; DINGER, D. R. *Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions*. Nova Iorque: Springer Science & Business Media, 1994.

GARCIA, E. *et al.* Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV): Uma Alternativa como Material Pozolânico. *Cerâmica Industrial*, v. 19, n. 04, p. 31–38, 2014.

GASTALDI, D. *et al.* An investigation on the recycling of hydrated cement from concrete demolition waste. *Cement and Concrete Composites*, v. 61, p. 29–35, ago. 2015. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.04.010>>.

GE, Z. *et al.* Influence of ground waste clay brick on properties of fresh and hardened concrete. *Construction and Building Materials*, v. 98, p. 128–136, 2015.

Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.100>>.

GE, Z. *et al.* Mix design of concrete with recycled clay-brick-powder using the orthogonal design method. *Construction and Building Materials*, v. 31, p. 289–293, 2012. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.01.002>>.

GIRAUDO, N. *et al.* Dehydration and dehydroxylation of C-S-H phases

synthesized on silicon wafers. *Applied Surface Science*, v. 433, p. 589–595, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.10.039>>.

GOMES, C. L. *Avaliação mecânica e de durabilidade de concretos fabricados com resíduo de construção e demolição e cinza de casca de arroz*. 2019. 60 f. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2019.

GYÖRGY, D. *et al.* Influence of water to binder ratio on mechanical properties of blended cements with brick powder waste. 2019, [S.l.: s.n.], 2019. p. 020091. Disponível em: <<http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5118099>>.

HE, Z. *et al.* Comparison of CO₂ emissions from OPC and recycled cement production. *Construction and Building Materials*, v. 211, p. 965–973, jun. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.289>>.

HEIKAL, M.; ZOHDY, K. M.; ABDELKREEM, M. Mechanical, microstructure and rheological characteristics of high performance self-compacting cement pastes and concrete containing ground clay bricks. *Construction and Building Materials*, v. 38, p. 101–109, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.114>>.

IMBABI, M. S.; CARRIGAN, C.; MCKENNA, S. Trends and developments in green cement and concrete technology. *International Journal of Sustainable Built Environment*, v. 1, n. 2, p. 194–216, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2013.05.001>>.

JUENGER, M. C. G.; SNELLINGS, R.; BERNAL, S. A. Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights. *Cement and Concrete Research*, v. 122, n. May, p. 257–273, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.008>>.

KIM, Y. J.; CHOI, Y. W. Utilization of waste concrete powder as a substitution material for cement. *Construction and Building Materials*, v. 30, p. 500–504, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.042>>.

KWON, E. *et al.* A study on development of recycled cement made from waste cementitious powder. *Construction and Building Materials*, v. 83, p. 174–180, maio 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.086>>.

LETELIER, V. *et al.* Combined effects of recycled hydrated cement and recycled aggregates on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building*

Materials, v. 132, p. 365–375, fev. 2017. Disponível em:
<<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.010>>.

LETELIER, V. *et al.* Influence of Waste Brick Powder in the Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete. *Sustainability*, v. 10, n. 1037, p. 1–16, 2018.

LIANG, C. *et al.* The utilization of active recycled powder from various construction wastes in preparing ductile fiber-reinforced cementitious composites: A case study. *Case Studies in Construction Materials*, v. 15, p. e00650, dez. 2021. Disponível em:
<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214509521001650>>.

LIU, Q. *et al.* Investigation of using hybrid recycled powder from demolished concrete solids and clay bricks as a pozzolanic supplement for cement. *Construction and Building Materials*, v. 73, p. 754–763, 2014. Disponível em:
<<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.066>>.

LIU, S. *et al.* The Role of Sintered Clay Brick Powder During the Hydration Process of Cement Pastes. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, v. 41, n. 2, p. 159–165, 7 jun. 2017. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s40996-017-0049-0>>.

LNEC. *Guia para utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos*. Lisboa: LNEC, 2009.

LUM, C. *et al.* Potential use of brick waste as alternate concrete-making materials : A review. *Journal of Cleaner Production*, v. 195, p. 226–239, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.193>>.

LUXÁN, M. P.; MADRUGA, F.; SAAVEDRA, J. Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. *Cement and Concrete Research*, v. 19, n. 1, p. 63–68, jan. 1989. Disponível em:
<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0008884689900665>>.

MA, Z. *et al.* Mechanical properties and water absorption of cement composites with various fineness and contents of waste brick powder from C&D waste. *Cement and Concrete Composites*, v. 114, p. 103758, nov. 2020. Disponível em:
<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095894652030264X>>.

MALHOTRA, V. .; MEHTA. *Advances in concrete technology*. Canadá: Gordon and Breach Publishers, 1996. v. 1.

- MEHTA; AİTCIN, P.-C. Principles Underlying Production of High-Performance Concrete. *Cement, Concrete and Aggregates*, v. 12, n. 2, p. 70–78, 1990. Disponível em: <<http://www.astm.org/doiLink.cgi?CCA10274J>>.
- MEHTA; MONTEIRO, P. J. M. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. 4ª ed. Nova Iorque: McGraw-Hill Professional Publishing, 2014.
- MENG, T. *et al.* Comparison of technical properties of cement pastes with different activated recycled powder from construction and demolition waste. *Cement and Concrete Composites*, v. 120, p. 104065, jul. 2021. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946521001347>>.
- MEYER, C. The greening of the concrete industry. *Cement and Concrete Composites*, v. 31, n. 8, p. 601–605, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.12.010>>.
- NAVRÁTILOVÁ, E.; ROVNANÍKOVÁ, P. Pozzolanic properties of brick powders and their effect on the properties of modified lime mortars. *Construction and Building Materials*, v. 120, p. 530–539, set. 2016. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061816307875>>.
- OKSRI-NELFIA, L. *et al.* Reuse of recycled crushed concrete fines as mineral addition in cementitious materials. *Materials and Structures*, v. 49, n. 8, p. 3239–3251, 17 ago. 2016. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1617/s11527-015-0716-1>>.
- OLIVEIRA, A. M. W. *et al.* Verificação da resistência à compressão em concreto com adição de fíler calcário. 2017, Recife: Conferência Nacional de Patologias e Recuperação de Estruturas, 2017. p. 9.
- OLOFINNADE, O. M. *et al.* Structural Properties of Concrete Containing Ground Waste Clay Brick Powder as Partial Substitute for Cement. *Materials Science Forum*, v. 866, p. 63–67, ago. 2016. Disponível em: <<https://www.scientific.net/MSF.866.63>>.
- ORTEGA, J. M. *et al.* Long-term effects of waste brick powder addition in the microstructure and service properties of mortars. *Construction and Building Materials*, v. 182, p. 691–702, set. 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061818315587>>.
- PARIS, J. M. *et al.* A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete. *Journal of Cleaner Production*, v. 121, p. 1–18,

2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.013>>.

PROŠEK, Z. *et al.* Role of lime, fly ash, and slag in cement pastes containing recycled concrete fines. *Construction and Building Materials*, v. 201, p. 702–714, mar. 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061818332227>>.

RAHHAL, V. F. *et al.* Complex Characterization and Behavior of Waste Fired Brick Powder-Portland Cement System. *Materials*, v. 12, n. 10, p. 1650, 21 maio 2019. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1944/12/10/1650>>.

RANI; JENIFER. Mechanical Properties of Concrete with Partial Replacement of Portland Cement by Clay Brick Powder. *International Journal of Engineering Research and*, v. V5, n. 02, 3 fev. 2016. Disponível em: <<http://www.ijert.org/view-pdf/14726/mechanical-properties-of-concrete-with-partial-replacement-of-portland-cement-by-clay-brick-powder>>.

RAVAL, A. D.; PATEL, I. N.; PITRODA, P. J. Ceramic Waste : Effective Replacement Of Cement For Establishing Sustainable Concrete Ceramic Waste : Effective Replacement Of Cement For. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, v. 4, n. June 2013, p. 75–80, 2013.

REAL, R. P. *Avaliação da utilização da cinza de casca de arroz como adição mineral em concreto de alto desempenho*. 2018. 76 f. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2018.

REN, F.; WANG, J. J.-A.; DIPAOLO, B. P. Thermal Expansion Study and Microstructural Characterization of High-Performance Concretes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 25, n. 10, p. 1574–1578, out. 2013. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0000693>>.

RILEM. Recommendation I2I-DRG. Guidance for demolition and reuse of concrete and masonry. Specifications for concrete with recycled aggregates. *Materials and Structures*, v. 27, p. 557–559, 1994.

ROBAYO-SALAZAR, R. A.; RIVERA, J. F.; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R. Alkali-activated building materials made with recycled construction and demolition wastes. *Construction and Building Materials*, v. 149, p. 130–138, set. 2017. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061817310073>>.

- RODRIGUEZ-CARVAJAL, J. Fullprof: A Program for Rietveld Refinement and Pattern Matching Analysis. 1990, Toulouse: [s.n.], 1990. p. 127.
- RUPASINGHE, M. *et al.* Investigation of strength and hydration characteristics in nano-silica incorporated cement paste. *Cement and Concrete Composites*, v. 80, p. 17–30, 2017. Disponível em:
<<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.02.011>>.
- SALES, A. T. C.; FILHO, R. DOS S. A. Efeito do pó de resíduo cerâmico como adição ativa para o concreto. *Ambiente Construído*, v. 14, n. 1, p. 113–125, 2014.
- SALLES, P. V. *Avaliação Mecânica e de Durabilidade de Concretos Fabricados com Resíduos de Construção e Demolição*. 2018. 82 f. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2018.
- SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, v. 114, p. 2–26, dez. 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884618301480>>.
- SERPELL, R.; ZUNINO, F. Recycling of hydrated cement pastes by synthesis of α' -H-C₂S. *Cement and Concrete Research*, v. 100, p. 398–412, out. 2017. Disponível em:
<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S000888461730056X>>.
- SHAN, Y. *et al.* Peak cement-related CO₂ emissions and the changes in drivers in China. *Journal of Industrial Ecology*, v. 23, n. 4, p. 959–971, 8 ago. 2019. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jiec.12839>>.
- SHUI, Z. *et al.* Cementitious characteristics of hydrated cement paste subjected to various dehydration temperatures. *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 1, p. 531–537, jan. 2009. Disponível em:
<<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.016>>.
- SKIBSTED, J.; SNELLINGS, R. Reactivity of supplementary cementitious materials (SCMs) in cement blends. *Cement and Concrete Research*, v. 124, n. May, p. 105799, 2019. Disponível em:
<<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105799>>.
- SORIANO, L. *et al.* Effect of pozzolans on the hydration process of Portland cement cured at low temperatures. *Cement and Concrete Composites*, v. 42, p.

41–48, set. 2013. Disponível em:

<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946513000930>>.

SUMMERBELL, D. L.; BARLOW, C. Y.; CULLEN, J. M. Potential reduction of carbon emissions by performance improvement: A cement industry case study. *Journal of Cleaner Production*, v. 135, p. 1327–1339, nov. 2016. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652616308423>>.

TECNOSIL. *Boletim Técnico. Silicon ns high 400*. . Itupeva: [s.n.], 2015.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho. *Concreto: Ciência e Tecnologia*. 3ª ed. São Paulo: IBRACON, 2016. p. 1902.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. *Mineral Commodity Summaries 1996*. . Reston, VA.: [s.n.], 1996.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. *Mineral Commodity Summaries 1997*. . Reston, VA.: [s.n.], 1997.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. *Mineral Commodity Summaries 1998*. . Reston, VA.: [s.n.], 1998.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. *Mineral Commodity Summaries 1999*. . Reston, VA.: [s.n.], 1999.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. *Mineral Commodity Summaries 2000*. . Reston, VA.: [s.n.], 2000.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. *Mineral Commodity Summaries 2001*. . Reston, VA.: [s.n.], 2001.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. *Mineral Commodity Summaries 2002*. . Reston, VA.: [s.n.], 2002.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. *Mineral Commodity Summaries 2003*. . Reston, VA.: [s.n.], 2003.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. *Mineral Commodity Summaries 2004*. . Reston, VA.: [s.n.], 2004.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. *Mineral Commodity Summaries 2005*. . Reston, VA.: [s.n.], 2005.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. *Mineral Commodity Summaries 2006*. . Reston,

VA.: [s.n.], 2006.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. *Mineral Commodity Summaries 2007*. . Reston, VA.: [s.n.], 2007.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. *Mineral Commodity Summaries 2008*. . Reston, VA.: [s.n.], 2008.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. *Mineral Commodity Summaries 2009*. . Reston, VA.: [s.n.], 2009.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. *Mineral Commodity Summaries 2010*. . Reston, VA.: [s.n.], 2010.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. *Mineral Commodity Summaries 2011*. . Reston, VA.: [s.n.], 2011.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. *Mineral Commodity Summaries 2012*. . Reston, VA.: [s.n.], 2012.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. *Mineral Commodity Summaries 2013*. . Reston, VA.: [s.n.], 2013.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. *Mineral Commodity Summaries 2014*. . Reston, VA.: [s.n.], 2014.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. *Mineral Commodity Summaries 2015*. . Reston, VA.: [s.n.], 2015.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. *Mineral Commodity Summaries 2016*. . Reston, VA.: [s.n.], 2016.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. *Mineral Commodity Summaries 2017*. . Reston, VA.: [s.n.], 2017.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. *Mineral Commodity Summaries 2018*. . Reston, VA.: [s.n.], 2018.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. *Mineral Commodity Summaries 2019*. . Reston, VA.: [s.n.], 2019.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. *Mineral Commodity Summaries 2020*. . Reston, VA.: [s.n.], 2020.

VANDERLEI, R. D. *Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem*

e propriedades mecânicas. 2004. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2004.

VIEIRA, A. R. *Estudo sobre as reações pozolânicas de argilas calcinadas: contributo para o desenvolvimento de geomateriais*. 2013. 177 f. Universidade de Coimbra, 2013.

VOGLER, N. *et al.* Description of the concrete carbonation process with adjusted depth-resolved thermogravimetric analysis. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 147, n. 11, p. 6167–6180, 17 jun. 2022. Disponível em: <<https://link.springer.com/10.1007/s10973-021-10966-1>>.

VYŠVAŘIL, M. *et al.* Physico-mechanical and microstructural properties of rehydrated blended cement pastes. *Construction and Building Materials*, v. 54, p. 413–420, mar. 2014. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006181301177X>>.

WANG, J.; MU, M.; LIU, Y. Recycled cement. *Construction and Building Materials*, v. 190, p. 1124–1132, nov. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.181>>.

WANG, X. *et al.* Effect of silica fume and nano-silica on hydration behavior and mechanism of high sulfate resistance Portland cement. *Construction and Building Materials*, v. 279, p. 122481, abr. 2021. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061821002415>>.

XIAO, J. *et al.* Mechanical properties of concrete mixed with recycled powder produced from construction and demolition waste. *Journal of Cleaner Production*, v. 188, p. 720–731, jul. 2018a. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652618309582>>.

XIAO, J. *et al.* Utilization potential of aerated concrete block powder and clay brick powder from C&D waste. *Construction and Building Materials*, v. 188, p. 117721, mar. 2018b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117721>>.

XU, Z. *et al.* Effects of nano-silica on hydration properties of tricalcium silicate. *Construction and Building Materials*, v. 125, p. 1169–1177, out. 2016. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061816314325>>.

XUAN, D. X.; SHUI, Z. H. Rehydration activity of hydrated cement paste exposed to high temperature. *Fire and Materials*, v. 35, p. 10, 2011.

XUE, C. Z. *et al.* The Study of the Construction Waste Brick Powder's Activity. *Advanced Materials Research*, v. 1079–1080, p. 309–311, dez. 2014. Disponível em: <<https://www.scientific.net/AMR.1079-1080.309>>.

YANG, D.; LIU, M.; MA, Z. Properties of the foam concrete containing waste brick powder derived from construction and demolition waste. *Journal of Building Engineering*, v. 32, p. 101509, nov. 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352710219323332>>.

YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC). *Cement and Concrete Research*, v. 56, p. 29–39, 2014.

ZHANG, J. *et al.* Performance Enhancement of Recycled Concrete Aggregates through Carbonation. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 27, n. 5, 2015. Disponível em: <[http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001296](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001296)>.

ZHAO, Y. *et al.* Long-term hydration and microstructure evolution of blended cement containing ground granulated blast furnace slag and waste clay brick. *Cement and Concrete Composites*, v. 118, p. 103982, abr. 2021. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946521000512>>.

ZHU, P. *et al.* Investigation of using recycled powder from waste of clay bricks and cement solids in reactive powder concrete. *Construction and Building Materials*, v. 113, p. 246–254, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.040>>.

ZHU, Y. G. *et al.* Influence of silane-based water repellent on the durability properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 35, n. 1, p. 32–38, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.008>>.

ZIMING, H. *et al.* Research progress on recycled clay brick waste as an alternative to cement for sustainable construction materials. *Construction and Building Materials*, v. 274, p. 122113, mar. 2021. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061820341167>>.

