



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PABLO BORBA DE BARROS GÓES

**ESTUDO DE PASTAS DE CIMENTO COM A UTILIZAÇÃO DE FINOS DE
AGREGADOS RECICLADOS**

Recife

2023

PABLO BORBA DE BARROS GÓES

**ESTUDO DE PASTAS DE CIMENTO COM A UTILIZAÇÃO DE FINOS DE
AGREGADOS RECICLADOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de doutor em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro.

Recife

2023

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

G598e Góes, Pablo Borba de Barros.
Estudos de pastas de cimento com a utilização de finos de
agregados reciclados / Pablo Borba de Barros Góes, 2023.
176 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco.
CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife,
2023.

Inclui referências e apêndices.

1. Engenharia Civil. 2. Partículas finas. 3. Resíduos de
construção e demolição. 4. Microestrutura. 5. Resistência a
compressão. 6. Módulo de elasticidade I. Carneiro, Arnaldo Manoel
Pereira (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG / 2023 - 277

PABLO BORBA DE BARROS GÓES

**ESTUDO DE PASTAS DE CIMENTO COM A UTILIZAÇÃO DE FINOS DE
AGREGADOS RECICLADOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de doutor em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas.

Aprovado em: 29/09/2023.

BANCA EXAMINADORA

Participação por videoconferência
Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro (Orientador - Presidente)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Participação por videoconferência
Prof^a. Dr^a. Marlynda Santos de França (Examinadora Externa ao Programa)
Universidade Técnica de Munique

Participação por videoconferência
Prof. Dr. Márcio Santos Barata (Examinador Externo à Instituição)
Universidade Federal do Pará

Participação por videoconferência
Prof^a. Dr^a. Karoline Alves de Melo Moraes (Examinadora Externa à Instituição)
Universidade Federal de Alagoas

Participação por videoconferência
Prof. Dr. Eudes de Arimatéia Rocha (Examinador Externo à Instituição)
Universidade de Pernambuco

Participação por videoconferência
Prof^a. Dr^a. Nathália Bezerra de Lima (Examinadora Externa à Instituição)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a todos que contribuíram para a realização desta tese e para o meu crescimento acadêmico e pessoal, especialmente em um período de desafios extraordinários representados pela pandemia, que nos trouxe a perda de entes queridos e amigos.

Primeiramente, gostaria de expressar minha profunda gratidão ao meu orientador, Professor Arnaldo Carneiro, pela orientação dedicada, apoio incansável e valioso auxílio ao longo deste percurso. Sua orientação foi fundamental para a realização deste trabalho.

Teço meus agradecimentos aos professores membros da banca, Prof. Dr. Eudes de Arimatéia Rocha (Universidade de Pernambuco), Prof.^a Dr.^a Karoline Alves de Melo Moraes (Universidade Federal de Alagoas), Prof. Dr. Márcio Santos Barata (Universidade Federal do Pará), Prof.^a Dr.^a Marylinda Santos de França (Universidade Técnica de Munique) e Prof.^a Dr.^a Nathália Bezerra de Lima (Universidade Federal de Pernambuco) pelas indicações e toda contribuição para o aperfeiçoamento deste trabalho.

Ao professor Paulo Martins e ao técnico Maurílio Moraes do laboratório LAPET, minha sincera gratidão pelos recursos, suporte técnico e oportunidades de aprendizado proporcionados durante os diversos ensaios realizados. Seu conhecimento e disposição foram essenciais para os resultados alcançados.

Ao professor Pedro Guzzo e ao técnico Marcelo Francisco do laboratório LTM, agradeço pelo acesso aos recursos e pela orientação durante os ensaios conduzidos em seu laboratório. Suas contribuições foram inestimáveis para o desenvolvimento desta pesquisa.

Não posso deixar de estender a minha profunda apreciação ao Professor Antônio Acácio, responsável pelo laboratório LabTag, onde pude realizar uma série de ensaios essenciais para essa pesquisa.

Agradeço as empresas Ciclo ambiental e a Elizabeth Cimentos pela doação das matérias primas utilizadas neste trabalho.

Um agradecimento também se faz necessário aos dedicados técnicos e docentes do GTG da Universidade Federal de Pernambuco, cujo esforço contínuo em prol do ensino e da disseminação do conhecimento é digno de reconhecimento.

Aos amigos que a vida me presenteou durante esta jornada - André Patriota, Victor Estolano, Camila Dourado e Felipe Marinho - expresso a minha profunda gratidão pela colaboração, diálogos enriquecedores e apoio constante que foram de importância crucial ao longo deste percurso.

Aos meus pais, Francisco de Assis e Maria de Fátima, e ao meu irmão, Miguel Borba, expresso minha gratidão pelo constante incentivo, amor incondicional e apoio emocional que sempre me forneceram, sem o seu apoio, esta jornada não teria sido possível. Assim como agradeço aos demais alunos do curso de pós-graduação que estiveram comigo durante as disciplinas.

Por fim, agradeço a Deus pelo dom da vida e pela oportunidade de realizar esta pesquisa. Sua orientação invisível e constante proteção foram fundamentais em todos os momentos.

A todos vocês, o meu mais sincero obrigado.

RESUMO

A construção civil é um dos maiores geradores de resíduos sólidos no país, uma forma de reciclar este material é através da produção de agregados reciclados, porém este processo gera uma grande quantidade de partículas finas, sendo a utilização destas o objeto deste estudo. Foram analisadas as características físicas, químicas e microestruturais deste material em diferentes finuras, assim como sua utilização como finos em pastas com diferentes percentuais de substituição. Seu elemento químico predominante é o SiO_2 e através da análise dos difratogramas é possível verificar que o material é bastante cristalino e não apresenta halos amorfos. Essas partículas possuem formato irregulares e contêm cantos afiados que formam fendas e entalhes em forma de V. As análises no estado fresco das pastas evidenciaram que a substituição parcial do cimento por PRH influenciou a coesão das misturas sendo aquelas com menores finuras apresentaram maior coesão e a sua hidratação e o tempo de endurecimento apresentaram resultados mais próximos a pasta de referência com apenas cimento. No estado endurecido, as análises de difração de raios-X (DRX) revelaram a presença de fases cristalinas de alita, calcita, etringita, portlandita e quartzo nas pastas, e a Termogravimetria (TG) indicou um comportamento térmico das pastas com PRH semelhante à com apenas cimento. A resistência à compressão diminuiu com a substituição por PRH, enquanto os módulos de elasticidade dinâmicos e a porosidade de forma geral aumentaram para os percentuais de substituição de 10% possivelmente devido ao efeito microfiller. As pastas com PRH apresentaram menor emissão CO_2 que a pasta de referência. Com base nos resultados, conclui-se que a substituição de 10% de cimento por PRH pode ser uma opção viável, considerando a sustentabilidade e a resistência.

Palavras-chave: partículas finas; resíduos de construção e demolição; microestrutura; resistência a compressão; módulo de elasticidade.

ABSTRACT

The construction industry is one of the largest generators of solid waste in the country. One way to recycle this material is through the production of recycled aggregates. However, this process generates a significant number of fine particles, and the utilization of these particles is the focus of this study. The physical, chemical, and microstructural characteristics of these materials were analyzed at various degrees of fineness, as well as their use as fines in pastes with different replacement percentages. The predominant chemical element is SiO₂, and X-ray diffraction (XRD) analysis indicates that the material is highly crystalline and devoid of amorphous halos. These particles possess irregular shapes and sharp edges that form cracks and notches resembling a V shape. The analyses of the fresh state of the pastes revealed that the partial substitution of cement with these fine particles influenced the cohesion of the mixtures. Mixtures with finer particles exhibited greater cohesion. Their hydration and setting time showed results similar to reference pastes containing only cement. In the hardened state, X-ray diffraction (XRD) analyses unveiled the presence of crystalline phases like alite, calcite, ettringite, portlandite, and quartz in the pastes. Thermogravimetry (TG) indicated a mass loss similar to that of cement. Compressive strength decreased with the substitution of these fine particles, while dynamic modulus of elasticity and porosity generally increased at substitution rates of 10%, possibly due to the microfiller effect. The pastes with RHP showed lower CO₂ emissions than the reference paste. Based on the results, it can be concluded that a 10% substitution of cement with these fine particles may be a viable option, considering sustainability and strength.

Keywords: fine particles; construction and demolition waste; microstructure; compressive strength; elastic modulus.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Crescimento na geração de resíduos de construção e demolição entre os anos de 2010 e 2019. (a) em toneladas/ano e (b) kg/ano/habitante.	30
Figura 2 –	Percentual da produção dos resíduos sólidos no Brasil por região..	31
Figura 3 –	Porcentagem média dos constituintes do entulho.....	33
Figura 4 –	Composição do RCD.	33
Figura 5 –	Curva granulométrica acumulada do pó reciclado de concreto.....	44
Figura 6 –	Curva granulométrica acumulada e diferencial do pó reciclado de tijolos e concretos.	45
Figura 7 –	Curva granulométrica acumulada do pó reciclado com a cinza volante.	45
Figura 8 –	A composição mineral do pó reciclado, obtido através de DRX.....	46
Figura 9 –	Imagem da superfície das partículas de pó reciclado em diferentes graus de ampliação (a) 200x, (b) 2000x, (c) 5000x, (d) 10000x.	48
Figura 10 –	Imagem de MEV de região contendo pó reciclado.....	49
Figura 11 –	Curvas obtidas com base na análise TG-DTA.	50
Figura 12 –	Módulo de elasticidade de concreto com a substituição parcial de cimento por reciclados.	51
Figura 13 –	Resistência a compressão de concreto com a substituição parcial de cimento por reciclados.	51
Figura 14 –	Resistência a flexão de concreto com a substituição parcial de cimento por reciclados.	52
Figura 15 –	Resistência a compressão de concretos com a substituição parcial de cimento por reciclados de concretos e tijolos.	52
Figura 16 –	Resistência a flexão de concretos com a substituição parcial de cimento por reciclados de concretos e tijolos.....	53
Figura 17 –	Resistência a compressão de argamassas com a substituição parcial de cimento por reciclados de concretos e tijolos.	54

Figura 18 –	Calor de hidratação em pastas de cimento com pó reciclado.	55
Figura 19 –	Curvas de distribuição granulométrica das partículas do cimento. ..	67
Figura 20 –	Microscopia eletrônica das partículas de cimento CPV-ARI obtidas com aumentos de 6000 x.	68
Figura 21 –	Difratogramas de raio X do cimento CPV-ARI.	69
Figura 22 –	Curvas de distribuição granulométrica das partículas Ca(OH)_2	70
Figura 23 –	Difratogramas de raio X da Ca(OH)_2	71
Figura 24 –	Pilha de resíduo da construção e demolição no aterro e britador utilizado para produção do agregado reciclado.	72
Figura 25 –	Agregado reciclado produzido.	73
Figura 26 –	Material fino resultante da britagem do RCD.	73
Figura 27 –	Microscopia ótica do PRH “in natura”.	75
Figura 28 –	PRH “in natura” e moído por 1 hora.	75
Figura 29 –	Fluxograma do tratamento das amostras.	76
Figura 30 –	Fluxograma dos ensaios realizados na etapa-I.	77
Figura 31 –	Fluxograma dos ensaios realizados na etapa-II.	78
Figura 32 –	Pastilhas para o ensaio FRX (a) no processo de derretimento em cápsulas de platina, (b) espectrofotômetro de Raios-X e (c) formação das pastilhas.	82
Figura 33 –	Fluxograma do sistema analisado na produção de CO_2	94
Figura 34 –	PRH após ensaio de absorção de água (escala 1:5)	98
Figura 35 –	Distribuição granulométrica do PRH.	100
Figura 36 –	Difratograma (DRX) do pó reciclado	103
Figura 37 –	Variação da condutividade do PRH.	104
Figura 38 –	Perda relativa da condutividade do PRH.	105
Figura 39 –	MEV do Cimento (a), PRHM1H (b, c), PRHM8M (d, e).	106
Figura 40 –	Perda de massa (%) do PRH.	108
Figura 41 –	Curvas TG do PRH e do cimento em estado anidro.	108
Figura 42 –	Comparação de consistência da pasta de cimento e das pastas com substituição parcial por PRHM1H.	110

Figura 43 –	Comparação de consistência da pasta de cimento e das pastas com substituição parcial por PRHM1H, PRHM2H, PRHM4H e PRHM8H.....	111
Figura 44 –	Comparação do enrijecimento das pastas de cimento e com a substituição parcial do PRHM1H.....	112
Figura 45 –	Comparação do enrijecimento das pastas de cimento e com a substituição parcial do PRH.	112
Figura 46 –	Espalhamento das pastas com a substituição parcial do cimento por PRHM1H.....	116
Figura 47 –	Espalhamento das pastas com a substituição parcial do cimento por 20% de PRH.	117
Figura 48 –	Viscosidade das pastas de cimento com a substituição parcial do PRHM1H relação A/C 0,4 (a) viscosidade x taxa de cisalhamento e (b) tensão x taxa de cisalhamento.	117
Figura 49 –	Viscosidade das pastas de cimento com a substituição parcial de PRHM2H, PRHM4H e PRHM8H relação A/C 0,4 (a) viscosidade x taxa de cisalhamento e (b) tensão x taxa de cisalhamento.	118
Figura 50 –	Viscosidade das pastas de cimento com a substituição parcial do PRHM1H relação A/C 0,6 (a) viscosidade x taxa de cisalhamento e (b) tensão x taxa de cisalhamento.	119
Figura 51 –	Viscosidade das pastas de cimento com a substituição parcial de PRHM2H, PRHM4H e PRHM8H relação A/C 0,6 (a) viscosidade x taxa de cisalhamento e (b) tensão x taxa de cisalhamento.	120
Figura 52 –	MEV da pasta de cimento.	122
Figura 53 –	MEV das pastas de cimento com PRHM1H.....	123
Figura 54 –	MEV das pastas de cimento com PRHM8M.	123
Figura 55 –	MEV com EDS das pastas de cimento em torno de uma partícula de PRH.	124
Figura 56 –	Difratograma da pasta de cimento e pastas com a substituição parcial por PRH moído uma hora nos percentuais de substituição de 10% (M1H10), 20% (M1H20) e 30% (M1H30).	125

Figura 57 –	Difratograma da pasta de cimento e pastas com a substituição parcial por PRH moído duas horas nos percentuais de substituição de 10% (M2H10), 20% (M2H20) e 30% (M2H30).	126
Figura 58 –	Difratograma da pasta de cimento e pastas com a substituição parcial por PRH moído quatro horas nos percentuais de substituição de 10% (M4H10), 20% (M4H20) e 30% (M4H30).	126
Figura 59 –	Difratograma da pasta de cimento e pastas com a substituição parcial por PRH moído oito horas nos percentuais de substituição de 10% (M8H10), 20% (M2H80) e e 30% (M8H30).	127
Figura 60 –	Curvas TG e DTA das pastas de cimento e pastas com a substituição parcial por PRHM1H.	128
Figura 61 –	Curvas TG e DTA das pastas de cimento e pastas com a substituição parcial por PRHM2H.	129
Figura 62 –	Curvas TG e DTA das pastas de cimento e pastas com a substituição parcial por PRHM4H.	129
Figura 63 –	Curvas TG e DTA das pastas de cimento e pastas com a substituição parcial por PRHM8H.	130
Figura 64 –	Espectros IV por refletância atenuada (ATR) nas faixas do IV para pastas de cimento com PRHM1H10, PRHM1H20 e PRHM1H30. .	131
Figura 65 –	Espectros IV por refletância atenuada (ATR) nas faixas do IV para pastas de cimento com PRHM2H10, PRHM2H20 e PRHM2H30. .	132
Figura 66 –	Espectros IV por refletância atenuada (ATR) nas faixas do IV para pastas de cimento com PRHM4H10, PRHM4H20 e PRHM4H30. .	132
Figura 67 –	Espectros IV por refletância atenuada (ATR) nas faixas do IV para pastas de cimento com PRHM8H10, PRHM8H20 e PRHM8H30. .	133
Figura 68 –	Resistência à compressão aos 7 dias.	135
Figura 69 –	Resistência à compressão aos 56 dias.	135
Figura 70 –	Módulo de elasticidade dinâmico da pasta de referência e das pastas com substituição parcial por PRH.	138
Figura 71 –	Comparativo entre o módulo de elasticidade dinâmico da pasta de referência e das pastas com substituição parcial por PRH.	138

Figura 72 – Absorção de água das pastas.....	140
Figura 73 – Índice de Vazios das pastas.....	141
Figura 74 – Massa específica das pastas.	141
Figura 75 – Consumo kgCO ₂ eq/kg das pastas de cimento.....	143
Figura 76 – Relação entre a Resistência (MPa)/(GWP).....	145

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Características dos agregados graúdos reciclados.....	36
Tabela 2 -	Características dos agregados miúdos reciclados.	38
Tabela 3 -	Resumo de algumas características encontradas no pó reciclado produzidos com RCD.	42
Tabela 4 -	Composição química do pó reciclado, obtido através de FRX.....	47
Tabela 5 -	As misturas das pastas analisadas no estado fresco.....	64
Tabela 6 -	Arranjo das misturas das pastas analisadas no estado endurecido.....	65
Tabela 7 -	Características físicas e químicas do CPV-ARI.	66
Tabela 8 -	Diâmetro característicos das partículas do CPV-ARI.....	68
Tabela 9 -	Características químicas do Ca(OH)_2.	69
Tabela 10 -	Diâmetro característicos das partículas do Ca(OH)_2.....	70
Tabela 11 -	Diâmetro médio de estudos com pó reciclado empregado em matrizes cimentícias.	74
Tabela 12 -	Características do moinho.....	76
Tabela 13 -	Massa específica do cimento e do PRH.....	79
Tabela 14 -	Composição das pastas utilizadas no ensaio de consistência.	86
Tabela 15 -	Composição das pastas utilizadas no espalhamento.....	88
Tabela 16 -	Composição das pastas utilizadas na análise reológica.	89
Tabela 17 -	Composição das pastas utilizadas no ensaio de resistência.....	90
Tabela 18 -	Massas específicas, unitárias e área superficial específica do PRH.....	97
Tabela 19 -	Absorção e adsorção de água.	99
Tabela 20 -	Diâmetros característicos (D10, D50, D90), heterogeneidade (D90/D10) do PRH.	101
Tabela 21 -	Fluorescência de raios-X.....	101
Tabela 22 -	Equivalente alcalino.	102
Tabela 23 -	Condutividade elétrica, variação da condutividade (Δt) e perda relativa de condutividade ($\% \text{PC}$)_t do PRH.	105
Tabela 24 -	Consistência da pasta de cimento e das pastas com substituição parcial por PRHM1H.	109
Tabela 25	Enrijecimento das pastas moídas por 1 hora.	114

Tabela 26 - Enrijecimento das pastas moídas em diferentes tempos.	114
Tabela 27 - Índice de atividade pozolânica de cal das pastas.	121
Tabela 28 - Resultado dos ensaios resistência a compressão das pastas aos 7dias e 56 dias.	134
Tabela 29 - Resultado do módulo de elasticidade dinâmico.	137
Tabela 30 - Resultado dos ensaios de índice de vazios e absorção.....	140
Tabela 31 - Resultado das simulações de consumo de CO ₂ nas pastas de cimento.....	142
Tabela 32 - Consumo kgCO ₂ eq/kg das pastas de cimento e a resistência mecânica aos 56 dias.....	144

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Conversão massa/volume.....	81
Equação 2 – Massa específica.....	82
Equação 3 – Massa Unitária.....	82
Equação 4 – Absorção de água.....	83
Equação 5 – Lei de Bragg	85
Equação 6 – Perda de condutividade.....	86
Equação 7 – Módulo de elasticidade dinâmico.....	87
Equação 8 – Velocidade de propagação das ondas ultrassônicas.....	97
Equação 9 – Absorção de água.....	98
Equação 10 – Índice de vazios (lv).....	98
Equação 11 – Massa específica (permeabilidade).....	98
Equação 12 – Taxa de enrijecimento.....	113

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/C	Relação água/cimento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
AFm	Monossulfoaluminato de cálcio hidratado
AFt	Sulfoaluminato de cálcio (Etringita)
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ATR	Espectroscopia de refletância total atenuada
C ₂ S	Silicato dicálcico (Belita)
C ₃ A	Aluminato tricálcico (Aluminato)
C ₃ S	Silicato tricálcico (Alita)
C ₄ AF	Ferroaluminato tetracálcico (Ferrita)
CAH	Aluminato de cálcio hidratado
CASH	Silicato aluminato de cálcio hidratado
CH	Hidróxido de cálcio (Portlandita)
CH-I	Cal Hidratado do tipo 1
CP	Cimento Portland
CPs	Corpos-de-prova
CSH	Silicato de cálcio hidratado
DRX	Difratometria de Raios-X
DTA	Análise térmica diferencial
EDS	Espectroscopia de dispersão de energia
EFNARC	<i>European Federation of National Trade Associations Representing Producers and Applicators of Specialist Building Products</i>
FRX	fluorescência de raios-X
GTG	Departamento de Tecnologia e Geociências da Universidade
GWP	Potencial de Aquecimento Global
IAC	Índice de atividade com cal
IAP	Índice de atividade pozolânica

LATEP	Laboratório de Perfil Técnico
LDN	Laboratório de Dispositivos e Nanoestruturas
LTM	Laboratório Integrado de Tecnologia Mineral
MEV	microscopia eletrônica de varredura (MEV)
MO	microscopia óptica
PGRCD	Plano de Gerenciamento de Resíduos da Construção e Demolição Civil
PF	Perda ao Fogo
PRH	Pó reciclado híbrido
PRHM1H	Pó reciclado híbrido moído 1 hora
PRHM2H	Pó reciclado híbrido moído 2 horas
PRHM4H	Pó reciclado híbrido moído 4 horas
PRHM8H	Pó reciclado híbrido moído 8 horas
NBR	Norma técnica brasileira
RAA	Reação álcali-agregado
RCD	Resíduo de construção e demolição
TG	Termogravimetria
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
WBCSD	<i>World Business Council for Sustainable Development</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	23
1.1	JUSTIFICATIVA	25
1.2	HIPÓTESE DA PESQUISA	27
1.3	OBJETIVOS	28
1.3.1	Objetivo Geral	28
1.3.2	Objetivos Específicos	28
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
2.1	RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO: COLETA E RECICLAGEM.....	29
2.1.1	Composição do Resíduo	32
2.2	RESUMO COM AS INFORMAÇÕES IMPORTANTE SOBRE O TÓPICO.....	34
2.3	AGREGADOS RECICLADOS PARA USO EM ARGAMASSAS E CONCRETOS.....	35
2.3.1	Pesquisas com resíduos da construção e demolição como agregados graúdos	36
2.3.2	Dificuldades na utilização de resíduos da construção e demolição em concretos	39
2.4	RESUMO COM AS INFORMAÇÕES IMPORTANTE SOBRE O TÓPICO.....	40
2.5	GERAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DO PÓ RECICLADO HÍBRIDO ...	41
2.5.1	Forma, textura e distribuição granulométrica do pó reciclado	44
2.5.2	Características químicas e mineralogia do pó reciclado	46
2.5.3	Influência do uso do pó reciclado na trabalhabilidade de concretos	49
2.5.4	Termogravimetria do pó reciclado.....	49
2.5.5	Influência do pó reciclado na resistência e módulo de elasticidade de concretos e argamassas	50
2.5.6	Influência da adição do pó reciclado no calor de hidratação.....	54

2.6	RESUMO COM AS INFORMAÇÕES IMPORTANTE SOBRE O TÓPICO.....	55
2.7	USO DE ADIÇÕES (FINOS) NO CIMENTO	56
2.8	USO DE PÓ RECICLADO HÍBRIDO COMO FINO NO CIMENTO	57
2.9	TRANSPORTE DE AGENTES AGRESSIVOS NO CIMENTO.....	58
2.10	CONSUMO DE CO ₂	59
2.11	RESUMO COM AS INFORMAÇÕES IMPORTANTE SOBRE O TÓPICO.....	60
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	62
3.1	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	62
3.1.1	Estado anidro (Objetivo específico: realizar uma caracterização abrangente do pó reciclado híbrido envolvendo aspectos físicos, químicos e mineralógicos)	63
3.1.2	Estado fresco (Objetivo específico: estudar como a incorporação do pó reciclado híbrido afeta a hidratação das pastas de cimento e seu comportamento reológico).....	63
3.1.3	Estado endurecido (Objetivo específico: avaliar a formação dos produtos de hidratação e a composição mineralógica das pastas com substituição parcial do cimento pelo pó reciclado híbrido. além disso, analisar de que forma essa incorporação pode afetar a microestrutura, a porosidade e as propriedades mecânicas dessas pastas)	64
3.1.4	Consumo CO₂ (Objetivo específico: avaliar os efeitos da adição do pó reciclado híbrido na emissão de dióxido de carbono (CO₂) de pastas com sua utilização como material cimentício suplementar).....	66
3.2	MATERIAIS UTILIZADOS	66
3.2.1	Cimento Portland de referência	66
3.2.2	Cal Hidratada	69
3.2.3	Pó Reciclado Híbrido (PRH)	71
3.2.3.1	Obtenção do PRH	72

3.2.3.2	<i>Definição do tamanho das partículas e moagem do PRH.....</i>	<i>73</i>
3.2.3.3	<i>Coleta e limpeza do PRH</i>	<i>74</i>
3.2.3.4	<i>Moagem do pó reciclado híbrido</i>	<i>75</i>
3.3	MÉTODOS UTILIZADOS	76
3.3.1	Conversão dos traços de massa para volume	78
3.3.2.1	<i>Massa Específica (NMR NR 16605:2017) - caracterização física do PRH.....</i>	<i>79</i>
3.3.2.2	<i>Massa Unitária (NMR 16972:2021) - caracterização física do PRH.....</i>	<i>80</i>
3.3.2.3	<i>Absorção de água (NMR 16916:2021) - caracterização física do PRH</i>	<i>81</i>
3.3.2.4	<i>Caracterização Dimensional (granulometria a laser) - caracterização física do PRH.....</i>	<i>81</i>
3.3.2.5	<i>Fluorescência de Raios-X (FRX) - caracterização química do PRH.....</i>	<i>82</i>
3.3.2.6	<i>Difração de Raios-x (DRX) - caracterização mineralógica do PRH.....</i>	<i>83</i>
3.3.2.7	<i>Avaliação da atividade pozolânica por condutividade elétrica (Payá modificado).....</i>	<i>84</i>
3.3.2.8	<i>Análise morfológica das partículas - (MEV) do PRH no estado anidro</i>	<i>85</i>
3.3.2.9	<i>Análise Térmica (TG) do PRH no estado anidro</i>	<i>85</i>
3.3.3	Estudo em pastas.....	85
3.3.3.1	<i>Ensaio de consistência, aparelho de Vicat (ABNT NBR 16606:2018) – (Estado fresco)</i>	<i>85</i>
3.3.3.2	<i>Enrijecimento (ABNT NBR 16607:2018) – (Estado fresco)</i>	<i>87</i>
3.3.3.3	<i>Espalhamento (Mini Slump) – (Estado fresco)</i>	<i>87</i>
3.3.3.4	<i>Análise reológica das pastas – (Estado fresco).....</i>	<i>88</i>
3.3.3.5	<i>Resistência a compressão das pastas (ABNT NBR 7215/2019) – (Estado endurecido)</i>	<i>90</i>
3.3.3.6	<i>Análise microestrutural das pastas (MEV) – (Estado endurecido).....</i>	<i>91</i>
3.3.3.7	<i>Análise termogravimétrica das pastas – (Estado endurecido).....</i>	<i>91</i>
3.3.3.8	<i>DRX das pastas – (Estado endurecido)</i>	<i>92</i>
3.3.3.9	<i>Infravermelho das pastas – (Estado endurecido)</i>	<i>92</i>

3.3.3.10	<i>Índice de atividade pozolânica da cal (ABNT NBR 5751:2015)</i>	93
3.3.3.11	<i>Consumo de CO₂</i>	93
3.3.3.12	<i>Módulo de elasticidade dinâmico por ultrassom</i>	94
3.3.3.13	<i>Permeabilidade: absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica</i>	95
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	97
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO PRH.....	97
4.1.1	Massa unitária, massa específica real e área específica	97
4.1.2	Absorção e adsorção de água.....	98
4.1.3	Distribuição granulométrica.....	99
4.1.4	Fluorescência de Raios-x (FRX).....	101
4.1.5	Difração de raios-x (DRX)	103
4.1.6	Índice de atividade pozolânica – condutividade elétrica	104
4.1.7	Microscopia Eletrônica De Varredura (MEV).....	106
4.1.8	Termogravimetria (TG).....	107
4.2	ESTUDO EM PASTAS – ESTADO FRESCO	109
4.2.1	Consistência normal	109
4.2.2	Enrijecimento.....	111
4.2.3	Espalhamento	115
4.2.4	Viscosidade	117
4.3	ESTUDO EM PASTAS – ESTADO ENDURECIDO	121
4.3.1	Índice de atividade pozolânica – NBR 5751-2015	121
4.3.2	Microscopia Eletrônica De Varredura (MEV) das pastas	122
4.3.3	DRX das pastas	125
4.3.4	TG das pastas	128
4.3.5	Infravermelho.....	131
4.3.6	Resistência a compressão das pastas (ABNT NBR 7215/2019) ...	134
4.3.7	Módulo de elasticidade dinâmico por ultrassom.....	137
4.3.8	Permeabilidade e índice de vazios.....	139
5	CONCLUSÕES	146
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	150

REFERÊNCIAS.....	152
APÊNDICE A – ROMPIMENTO DOS CORPOS DE PROVAS.....	162
APÊNDICE B – PREPARAÇÃO DAS PASTAS PARA O ENSAIO COM O MEV.....	166
APÊNDICE C – RESULTADO DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO DAS PASTAS DE CIMENTO	168
APÊNDICE D – RESULTADO DOS ENSAIOS DE ULTRASSOM DAS PASTAS DE CIMENTO	171
APÊNDICE E – RESULTADO DAS SIMULAÇÕES DE CONSUMO CO ₂	173
APÊNDICE F – DIMENSÕES DO MINI CONE USADO NO ENSAIO DE ESPALHAMENTO	176

1 INTRODUÇÃO

A construção civil possui uma alta demanda de materiais que são retirados de reservas naturais finitas, estima-se que 50% dos recursos naturais extraídos estão relacionados à atividade da construção (Brasileiro; Matos, 2015). Neste sentido é natural procurar meios de substituir alguns destes insumos naturais por materiais alternativos, como os materiais reciclados, a fim de direcionar os processos construtivos para um caminho mais sustentável.

Outro problema é a quantidade de resíduos gerado na indústria da construção civil. De acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), em 2018 foram gerados cerca de 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos no país, que podem ser enviados para aterros sanitários, ou despejados em depósitos irregulares nas cidades, o que causa impactos ambientais (ABRELPE, 2019). A fim de reduzir esses impactos ambientais uma alternativa para a aplicação do Resíduo da Construção e Demolição (RCD) gerado é a sua reutilização dentro dos próprios processos construtivos.

Uma forma de utilizar esses resíduos é na produção de agregados reciclados, que é uma solução fim para esse resíduo. Porém esse processo gera uma grande quantidade de partículas finas, cerca de 35% do volume total do agregado reciclado produzido são materiais finos. As partículas geradas variam de submicrons a milímetros (Heinz; Schubert, 2007).

Os estudos que utilizam finos de RCD oriundos da produção do agregado reciclado costumam analisar as partículas geradas apenas por um tipo de material, normalmente aquelas provenientes dos tijolos e concretos. Porém embora algumas construtoras tenham adotado o Plano de Gerenciamento de Resíduos da Construção e Demolição Civil (PGRCD) em seus canteiros, devido ao trabalho e tempo exigidos para a separação dos resíduos de construção e demolição, isso nem sempre é colocado em prática nos canteiros de obra no Brasil. Assim o material que chega nas empresas de reciclagem pode ser bastante heterogêneo (Zordan, 1997; Lanzellotti *et al.*, 2004a).

A composição desses resíduos inclui materiais diversos como concreto, tijolos, argamassas, cerâmicas entre outros. Consequentemente as partículas finas originadas

da sua reciclagem é um material híbrido, que pode apresentar partículas de natureza inerte, como grãos de areia, e partículas com alguma reatividade (pozolanicidade) como grãos de material cerâmico e cimento ainda anidro.

Em função da possibilidade de o RCD apresentar características pozolânicas ou ser um material inerte, surgiu o desafio para propor parâmetros para sua aplicação. Dentre esses estudos, Liu *et al.* (2014) estabeleceram, a partir dos resultados dos ensaios de Microscopia eletrônica de Varredura (MEV), AFM, Análise térmica diferencial (TG-DTA) e Difractometria de Raios-X (DRX), que quando o pó reciclado possuir na sua composição mais de 40% de tijolos ou outros componentes provenientes de argila, este apresentará propriedades pozolânicas. Desta forma permitindo conhecer sua composição e, assim, sugerir usos para este material.

Já o estudo de Topic *et al.* (2017), comparou a resistência à compressão e o módulo de elasticidade de pastas de cimento, sem adições e com substituição de cimento pelo pó reciclado originado de concretos. Os resultados obtidos demonstraram que a resistência mecânica da pasta com substituição nas proporções de até 20%, foram semelhantes ao resultado da pasta de cimento de referência. A justificativa desse resultado foi o efeito microfiller gerado pela incorporação do pó reciclado às pastas.

Esse efeito ocorre devido ao empacotamento das partículas, onde através da seleção da proporção e do tamanho adequado das partículas os vazios maiores podem ser preenchidos com partículas menores (Hunger, 2010), desta forma deixando um mínimo espaço para água. Isso proporciona uma diminuição da porosidade do concreto e minimiza o consumo de pasta de cimento (Larrard, 2011).

Os fíleres são partículas inertes que não apresentam interação com os produtos de hidratação, apesar de formarem núcleos que favorecem a hidratação do C3S (silicato tricálcico) e C2S (silicato dicálcico) (Ye *et al.*, 2007). Os materiais fíleres para a substituição parcial do cimento comumente utilizados no Brasil são os de origem calcária, sendo seu uso regulamentado pela norma NBR 16697 (ABNT, 2018c).

Existem vários estudos desenvolvidos no Brasil sobre como os fíleres de origem natural são capazes de alterar a hidratação do cimento, tais como os de Wolf (2010) onde o autor investigou o efeito do calcário calcítico em cimentos brancos, o realizado por Jordani (2020), onde foi estudada a Hidratação do cimento Portland na presença de

elevados teores de fíler dolomito com diferentes finuras ou a pesquisa de Schankoski (2017) que estudou concreto autoadensável contendo fíler de britagem.

Porém existem algumas lacunas nos estudos quando se trata de fíler provenientes de materiais alternativos, tais como o pó fino obtido durante a reciclagem do RCD. Em função da necessidade do entendimento do efeito dos finos de RCD nas pastas de cimento, e de qual a sua influência na hidratação do cimento, surge esta pesquisa que analisa como a substituição parcial em diferentes proporções e com diferentes intervalos de finuras influenciam nas reações de hidratação do cimento.

Outro ponto importante a ressaltar foi que a norma NBR 16697 aumentou o teor máximo de filler calcário no cimento do tipo CII-F, cujo teor máximo permitido passou de 10% para 25% (ABNT, 2018c). Desta forma possibilitando a composição de misturas com alto teores de substituição.

Reitera-se ainda a importância de compreender o comportamento das pastas de cimento, com a incorporação de material fino, adições do pó do RCD, para melhor entender seu uso como constituinte para argamassas e concretos.

1.1 JUSTIFICATIVA

Diversos estudos se desenvolveram com a finalidade do uso e aplicação do RCD, como exemplo: a utilização dos resíduos de demolição em concretos usados no aterro de fossos de oleodutos (Zhang *et al.*, 2018), o desenvolvimento de blocos de concreto com a incorporação de RCD (Xuan *et al.*, 2016), blocos de divisórias preparados com altas porcentagens de RCD e resistentes a altas temperaturas (Xiao *et al.*, 2013), concreto produzido com a incorporação do tijolo triturado como agregado (Adamson; Razmjoo; Poursaee, 2015), e a produção de estacas de concreto com agregados reciclados para melhoramento do solo (Medeiros; Balestra; Lima, 2017). Mais recentemente, Teixeira *et al.* (2020) e Souza *et al.* (2021) analisaram concretos preparados com RCD. No entanto, a produção desses agregados reciclados, que podem ser utilizados em argamassas e concretos gera uma grande quantidade de partículas finas, correspondendo a aproximadamente 35% do volume total dos agregados (Heinz; Schubert, 2007).

Alguns estudos com a incorporação desse material em matrizes cimentícias foram realizados por Li *et al.* (2012), Liu *et al.* (2014), Liang *et al.* (2009), Xiao *et al.* (2012) e Sun *et al.* (2017). Esses estudos com adições de RCD podem ser divididos em análises nos estados fresco e endurecido.

No estado fresco: O estudo de Sun *et al.* (2017) considera a influência desses finos na hidratação do cimento, a pesquisa estudou finos provenientes da produção de agregados reciclados de concretos, e verificou que este pó reciclado poderia ser utilizado como material fíler na pasta de cimento, mas por ser poroso verificou que pode reduzir a fluidez da mistura.

A ocorrência desse fenômeno se deve ao fato de que o uso de materiais muito finos pode alterar o empacotamento das partículas resultando em mudanças na trabalhabilidade do concreto (Kwan; Mora, 2001).

Como a adição do RCD tem a característica de adsorver e absorver grandes quantidades de água, ela pode ocasionar a redução da água livre da mistura o que pode ter ocasionado a diminuição na fluidez das amostras analisadas por Sun *et al.* (2017).

No estado endurecido: Nesse estado foi considerado a influência do tamanho das partículas na variação das resistências das pastas de cimento (Li *et al.*, 2012; Liu *et al.* 2014; Xiao *et al.*, 2012; Sun *et al.*, 2017), onde foi possível verificar que o tamanho das partículas possivelmente influenciou na variação das resistências das pastas de cimento com a incorporação dos finos reciclados.

Pode ser observado nesses estudos de materiais cimentícios com a incorporação de finos de RCD, que costumam ser analisadas partículas provenientes de um tipo de material, normalmente de concretos, porém o processo de segregação dos resíduos de construção não costuma ser realizado nos canteiros de obra, desta forma o material que chega nas empresas de reciclagem costuma ter uma composição bastante variada.

Assim esse estudo se justifica pois existe uma lacuna nos trabalhos realizados quando se trata da análise do pó gerado na produção do RCD nas usinas de reciclagem, que produzem este material direto dos resíduos mistos obtidos dos canteiros de obras. E de como a adição do pó reciclado pode influenciar na hidratação do cimento e nas propriedades dos compostos cimentícios.

1.2 HIPÓTESE DA PESQUISA

A produção de cimentos costuma utilizar materiais finos de natureza fíler, principalmente o filler calcário em sua composição. Embora seja um material inerte suas características tais como distribuição granulométrica, tamanho dos grãos, massas específicas e unitárias, superfície específica, forma, textura entre outras têm impacto direto nas propriedades tanto no estado fresco quanto endurecido de pastas, argamassas e concretos feitos com sua utilização.

A introdução desses materiais finos pode alterar as características das misturas como:

I) Estabilidade (evitando a segregação de partículas maiores através de uma distribuição mais uniforme dos materiais);

II) A trabalhabilidade (a adição de materiais finos pode tornar a mistura mais fluida, e se a quantidade de finos for adequada, podem melhorar a sua trabalhabilidade e compactação);

III) E o preenchimento de vazios (Materiais finos através da seleção do tamanho dos grãos podem preencher os vazios entre as partículas maiores na matriz cimentícia. Melhorando a densidade da mistura e reduzindo a sua porosidade).

Com base nesse contexto, levanta-se a hipótese que: *Através da seleção do teor e do tamanho dos grãos do pó reciclado híbrido é possível otimizar seu uso como material cimentício suplementar, alcançando um equilíbrio entre considerações técnicas e ambientais, melhorando propriedades como estabilidade, trabalhabilidade e preenchimento de vazios ao mesmo tempo em que reduz as emissões de dióxido de carbono (CO₂)?*

Essa hipótese sugere que o pó reciclado híbrido tem potencial para ser uma adição valiosa ao cimento, desde que suas características sejam cuidadosamente avaliadas e controladas. A pesquisa busca identificar os melhores teores e tamanhos de grãos do pó reciclado para atingir esse equilíbrio.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Analisar a influência da incorporação do pó reciclado híbrido como material cimentício suplementar no cimento, a fim de propor procedimentos para a otimização do seu uso a partir da variação combinada da finura e do teor de substituição visando encontrar um equilíbrio entre os aspectos técnicos e ambientais.

1.3.2 Objetivos Específicos

O objetivo geral será alcançado através de estudos realizados com o pó reciclado híbrido, a partir das seguintes situações que caracterizam os objetivos específicos.

- Conduzir uma caracterização abrangente do pó reciclado híbrido envolvendo aspectos físicos, químicos e mineralógicos, no estado anidro.
- Analisar como a incorporação do pó reciclado híbrido afeta a hidratação das pastas de cimento e seu comportamento reológico, no estado fresco.
- Avaliar a formação dos produtos de hidratação e a composição mineralógica das pastas com substituição parcial do cimento pelo pó reciclado híbrido, no estado endurecido. Além disso, analisar de que forma essa incorporação pode afetar a microestrutura, a porosidade e as propriedades mecânicas dessas pastas.
- Avaliar os efeitos da adição do pó reciclado híbrido na emissão de dióxido de carbono (CO_2) de pastas com sua utilização como material cimentício suplementar.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo organiza-se em quatro subcapítulos que tratam da definição, geração e das principais características do pó reciclado.

A revisão da literatura proposta apresenta inicialmente a caracterização dos resíduos da construção e demolição, a sua geração, composição, coleta e reciclagem. Em seguida são apresentadas informações sobre a produção de agregados reciclados, suas características e seu uso em argamassas e concretos.

Posteriormente é explicada a origem do pó reciclado, um subproduto da produção dos agregados reciclados, e as características físicas, químicas e mineralógicas do material encontradas em outros estudos. E por fim o uso de materiais finos em cimentos.

2.1 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO: COLETA E RECICLAGEM

Segundo a norma NBR 15116 (2021), pode-se definir resíduos da construção civil como:

“Resíduos provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto, solo, rocha, madeira, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha” (ABNT, 2004, 2021a).

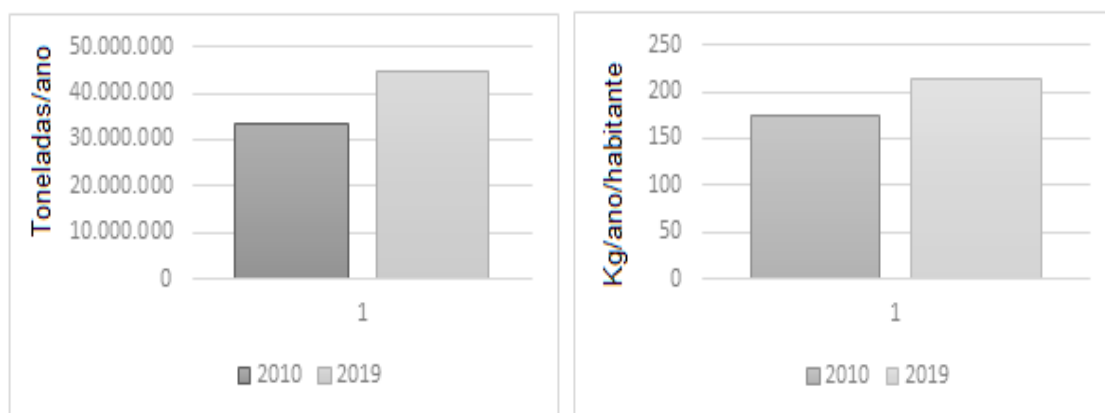
Esse resíduo pode ser gerado tanto na demolição e reforma de obras já existentes quanto provenientes de perdas na execução de novas obras. De acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), em 2020 foram gerados cerca de 82,5 milhões de toneladas de resíduos sólidos no país, que podem ser enviados para aterros sanitários, ou despejados em depósitos irregulares nas cidades, o que causa impactos ambientais. A Secretaria de Saneamento Ambiental, no Brasil, estima que o RCD representa de 51 a 70% da massa dos resíduos sólidos urbanos gerados no país (ABRELPE, 2019).

A disposição inadequada desses resíduos causa inúmeros problemas socioambientais, tais como: a ocupação irregular de áreas urbanas, o exaurimento da capacidade de armazenamento de aterros sanitários, o assoreamento de córregos e rios,

o entupimento de redes de drenagem, a proliferação de vetores de doenças e degradação da paisagem urbana e rural (Oliveira, 2007).

Em um levantamento realizado nos municípios brasileiros entre os anos de 2010 até 2019, os dados mostraram o crescimento de 25% na geração de resíduos da construção civil e demolição nessa década, de 33.377.060 toneladas/ano em 2010 para 44.534.380 toneladas/ano em 2019 (Figura 1). A produção per capita aumentou de 174,3 kg/ano/habitante em 2010 para 213,5 kg/ano/habitante em 2019 (Hendges, 2021). A figura 1 mostra esse crescimento.

Figura 1 - Crescimento na geração de resíduos de construção e demolição entre os anos de 2010 e 2019. (a) em toneladas/ano e (b) kg/ano/habitante



Fonte: Adaptado de Hendges (2021).

Sendo a região Sudeste com a maior geração de resíduos, 49,7%, a região Nordeste vem em seguida com 24,7%, região Sul 10,8%, região Centro-oeste 7,5% e por fim a região Norte apresenta aproximadamente 7,44% do total gerado (Figura 2).

Figura 2 - Percentual da produção dos resíduos sólidos no Brasil por região



Fonte: ABRELPE (2019).

Comparado a países do primeiro mundo, a reciclagem de resíduos no Brasil de materiais de construção ainda é bastante tímida, embora se observe no mercado o interesse de empresas em explorar a reciclagem do RCD e não apenas o negócio de transporte e deposição do material.

Diante, disso, um dos fatores responsáveis pelo pouco interesse das empresas na reciclagem dos resíduos da construção civil é seu baixo valor agregado, isso porque ele costuma substituir a brita e areia que são produtos de custo relativamente baixo, sendo uma situação bem diferente de outros materiais reciclados com alto valor de mercado, como o alumínio por exemplo.

Além disso, um levantamento do Conselho de Sustentabilidade da Federação do Comércio de Bens, Serviços e Turismo do Estado de São Paulo (Fecomercio SP) aponta que entre as principais dificuldades para a venda do agregado reciclado estão a

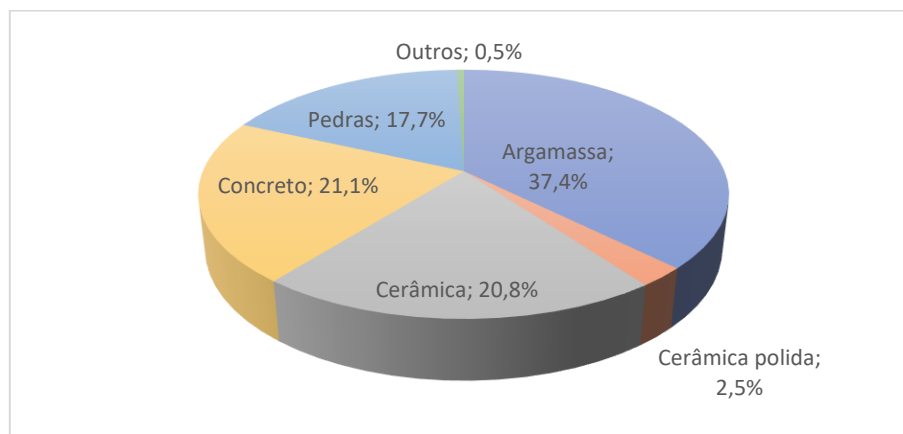
inexistência de legislação que incentive o consumo (31%), a elevada carga tributária (26%) e a falta de conhecimento do mercado (26%) (Niero, 2016).

A reciclagem de RCD para argamassas e concretos já foi bastante estudada e tem se mostrado viável em estudos realizados por brasileiros, tanto do ponto de vista tecnológico como econômico (Ângulo, 2000; Barra, 1996; Buest Neto, 2006; Buttler, 2003; Levy, 1997; Miranda, 2000; Mohamad; Nakanishi; Barbosa, 2012; Zordan, 1997).

Um exemplo é a reciclagem de pavimento asfáltico, introduzida no mercado no início da década de 90 e que hoje é uma realidade nas grandes cidades brasileiras, viabilizando a reciclagem tanto do asfalto quanto dos agregados do concreto asfáltico. (Ângulo, 2005). O aproveitamento do agregado reciclado de RCD em pavimentação apresenta muitas vantagens, tais como: utilização de quantidade significativa de material reciclado, tanto na fração miúda quanto na graúda; simplicidade dos processos de execução do pavimento e de produção do agregado reciclado (separação e britagem primária), sem contar com a preservação das jazidas naturais e a redução nos custos das obras (Carneiro; Burgos; Alberte, 2001).

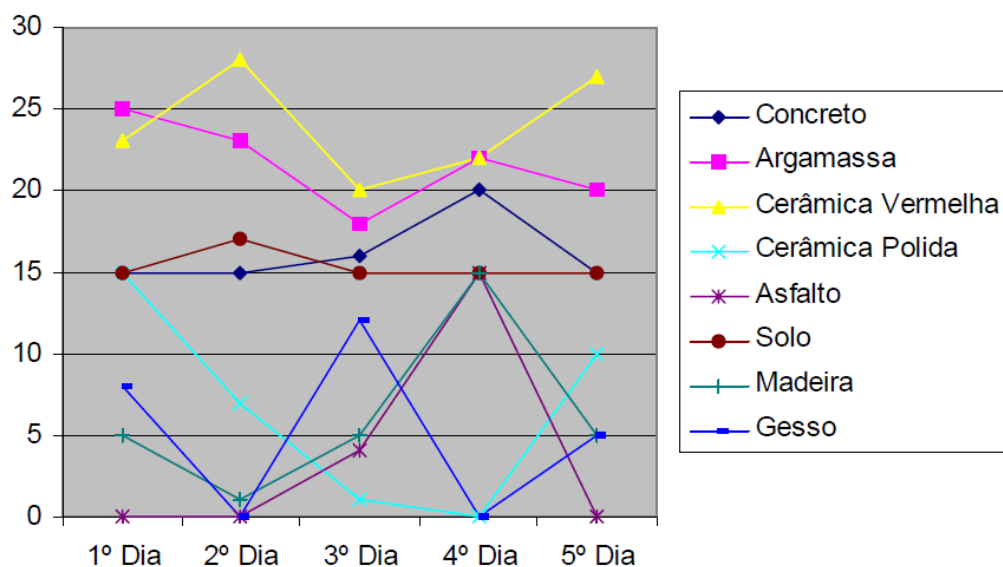
2.1.1 Composição do Resíduo

Devido à grande diversidade de processos existentes na execução de uma obra, o resíduo gerado pela mesma é bastante heterogêneo, alguns estudos tentaram analisar essa diversidade, como o realizado por Zordan (1997) sobre a caracterização da composição do resíduo. Nesse estudo, foram coletadas amostras de depósitos de resíduos de obras e através dos procedimentos descritos na norma NBR 9941 "Redução de Amostra de Campo de Agregados para Ensaio de Laboratório", foi quantificado a média percentual de cada material encontrado (ABNT, 1987). O resultado da caracterização revelou uma predominância das argamassas (37,4%), seguida pelo concreto (21,1%) e pelos materiais cerâmicos não polidos (20,8%), conforme ilustrado na Figura 3 (ABNT, 1987).

Figura 3. Porcentagem média dos constituintes do entulho.

Fonte: Desenvolvimento de fluxograma de beneficiamento de resíduos sólidos da construção civil (2004).

Em uma outra pesquisa realizada por Lanzellotti *et al.* (2004a), foi monitorada a chegada dos resíduos de construção ao longo de cinco dias consecutivos, nos aterros sanitários do município de Niterói-RJ e obteve-se a composição do RCD conforme demonstrado na Figura 4.

Figura 4. Composição do RCD.

Fonte: Desenvolvimento de fluxograma de beneficiamento de resíduos sólidos da construção civil (2004).

Dessa forma, observa-se que a composição do material é heterogênea tanto pela grande quantidade de resíduos diferentes de que é originada, quanto em função da diferença de material depositada no aterro em diferentes datas. Porém apesar da variação em sua composição, um estudo realizado por Lovato *et al.* (2012) sobre a influência de agregados reciclados de diferentes origens nas propriedades mecânicas de concretos, foi verificado que a variação nos resultados encontrados ficou abaixo de 10%, logo, a variabilidade na composição destes resíduos não impedem seu uso.

2.2 RESUMO COM AS INFORMAÇÕES IMPORTANTE SOBRE O TÓPICO

A definição de resíduos da construção civil abrange uma ampla gama de materiais provenientes de construções, reformas, reparos e demolições. Esses resíduos incluem elementos como tijolos, concreto, madeira, vidros, plásticos, entre outros. A composição dos resíduos da construção civil revela a predominância de materiais como argamassas, concretos e elementos cerâmicos não polidos. A compreensão dessa composição é vital para direcionar os esforços de reciclagem e reutilização, bem como para identificar oportunidades de inovação na gestão dos resíduos.

No ano de 2020, houve a geração de 82,5 milhões de toneladas de resíduos sólidos no Brasil. Os resíduos da construção e demolição representam de 51 a 70% da massa total dos resíduos sólidos urbanos gerados. Essa quantidade considerável de resíduos sólidos pode causar sérios danos ambientais se sua disposição não for realizada de maneira apropriada.

Apesar de sua importância, a reciclagem de resíduos de construção ainda enfrenta desafios significativos no Brasil. Isso se deve, em parte, ao baixo valor agregado desses materiais reciclados e a obstáculos como a falta de legislação abrangente e a elevada carga tributária associada. A ausência de um quadro legal sólido para orientar e incentivar a reciclagem de RCD é um obstáculo que precisa ser superado para avançar rumo a uma gestão mais sustentável desses resíduos.

Em resumo, a gestão sustentável de resíduos da construção civil é essencial para minimizar os impactos ambientais adversos decorrentes da geração excessiva desses materiais. Avanços na legislação, incentivos econômicos e conscientização geral são

componentes-chave para promover a reciclagem e reutilização de RCD, contribuindo assim para um ambiente mais limpo e ecologicamente equilibrado.

2.3 AGREGADOS RECICLADOS PARA USO EM ARGAMASSAS E CONCRETOS

Uma forma de utilizar esses resíduos é na produção de agregados reciclados, que é uma solução fim para esse resíduo. Segundo a norma NBR 15116 (2021) pode-se definir o agregado reciclado como “Material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção ou demolição de obras civis, que apresenta características técnicas para a aplicação em obras de edificação e infraestrutura” (ABNT, 2021a).

A importância de utilizar agregados reciclados se deve ao fato de que o concreto é um dos maiores consumidores de insumos existente na construção civil e os agregados costumam ocupar em média $\frac{3}{4}$ do volume do concreto (Neville, 2013). Desta forma a substituição de insumo naturais, como os agregados, comumente utilizados, por materiais alternativos casa com a proposta de desenvolvimento sustentável que tem sido objeto de discussão á vários anos (Neville, 1997).

Estima-se que ao substituir agregados de rochas britadas por agregados reciclados, pode-se evitar que cerca de 95 milhões de toneladas por ano de RCD sejam dispostas em aterros e assim também evitar-se o consumo de recursos naturais não renováveis (Ângulo; Zordan; John, 2000).

Segundo a norma NBR 15115 (2004) é possível utilizar agregados reciclados no Brasil em obras de pavimentação (Camada de reforço do subleito, sub-base e base de pavimentação). Já a 15116 (2021) define seu uso em concretos sem função estrutural (com a exceção dos resíduos pertencentes à subclasse ARCO, que significa Agregado Reciclado de Concreto, que pode, com certas restrições ser utilizado como concreto estrutural) e para obras de enchimento, contrapiso, Calçadas, Blocos de Vedação, Meio-fio, Sarjeta, Canaletas, Mourões, Placas de Muros e outras aplicações com resistências de 10 e 15 MPa aos 28 dias (ABNT, 2004; ABNT, 2021a).

2.3.1 Pesquisas com resíduos da construção e demolição como agregados graúdos

Os agregados reciclados graúdos devido a sua natureza tendem a apresentar uma maior variação nas suas características que os naturais. A Tabela 1 mostra uma síntese de diversos estudos realizados em agregados graúdos reciclados e suas características tais como forma, textura, granulometria, absorção de água e como a sua introdução em concretos afetam a trabalhabilidade e resistência das misturas.

Tabela 1 - Características dos agregados graúdos reciclados

Características		Autor(es)
Forma	Costuma ter um formato mais angular que a dos agregados naturais.	Ravindrarajah; Tam (1985).
	Agregados graúdos reciclados obtidos a partir da britagem de concretos tem formas mais arredondadas à medida que a resistência do concreto original diminuí.	Kikuchi <i>et al.</i> (1988).
	Agregados reciclados de blocos cerâmicos tem forma mais angular e alongada que os naturais.	Barra (1996).
Textura	Geralmente possuem a textura mais rugosa do que os agregados naturais	Pietersen (1998).
Massa específica e unitária	Normalmente apresentam valores um pouco menores que os apresentados pelos agregados naturais.	Bazuco (1999).
	A massa unitária do agregado graúdo reciclado pode ser considerada próxima de um agregado leve.	Machado Jr. <i>et al.</i> (1998).
Granulometria	Composição um pouco mais grossa que os agregados naturais e um módulo de finura um pouco maior.	Lima (1999).
Trabalhabilidade	Precisa de 5 % a mais de água livre para atingir os mesmos índices de consistência da mistura produzida com agregado natural.	Hansen; Narud (1983).

	Requer maior quantidade de argamassa para melhorar a trabalhabilidade devido a maior fricção interna provocada pelo formato mais angular.	Rashwan; Abourizk (1997).
Absorção de água	Entre 3,6 e 8 % para os agregados reciclados de concreto.	Hansen (1992).
	5,8% para agregado de concreto e argamassas.	Quebaud; Buyle-Bodin, (1999).
	Variando de 5 a 15 % para agregados de tijolos cerâmicos britados.	Devenny; Khalaf (1999).
Resistência à compressão	Valores de resistência à compressão de concretos com agregados graúdos reciclados de 5 a 20 % mais baixos que os valores de resistência dos concretos convencionais.	Hansen (1992).

Fonte: O Autor (2023).

De acordo com estudo realizado por Ravindrarajah e Tam (1985), a forma das partículas dos agregados reciclados costuma ser mais angular que a dos agregados naturais. Já os agregados reciclados produzidos por Kikuchi *et al.* (1988) apresentavam um formato mais arredondado. Os agregados graúdos de RCD de forma geral são mais porosos que os naturais (Limbachiya; Leelawat, 2000), desta forma costumam influenciar o comportamento reológico das misturas cimentícias, prejudicando a sua trabalhabilidade (Poon; Kou; Lan, 2006).

Já em outro estudo realizado por López-Gayarre *et al.* (2011) foram produzidos concretos com a substituição de parte do agregado natural graúdo por agregados reciclados de resíduos de construção e demolição, originados principalmente do concreto, e foi verificado que a porcentagem de substituição do agregado reciclado não afetou de forma significativa a resistência à compressão, desde que a relação água/ligante seja mantida constante. No entanto, o módulo de elasticidade é bastante afetado quando a porcentagem de substituição é superior a 50%.

A Tabela 2 mostra diversos estudos realizados em agregados miúdos reciclados e suas características tais como forma, textura, granulometria, absorção de água e como a sua introdução em concretos e argamassas afetam a trabalhabilidade e resistência das misturas.

Tabela 2. Características dos agregados miúdos reciclados.

Característica		Autor(es)
Forma	Formas maiores e mais angulosas.	Hansen; Narud (1983).
Textura	Geralmente mais rugosa e porosa do que a dos agregados naturais.	Hamassaki <i>et al.</i> (1997).
Massa específica e unitária	Geralmente possui valores de 5 a 10 % mais baixos que os valores apresentados pelos agregados naturais.	Bazuco (1999).
Granulometria	Composição granulométrica um pouco mais grossa que os agregados naturais e um módulo de finura um pouco maior.	Bazuco (1999); Lima (1999).
Trabalhabilidade	Menor trabalhabilidade devido a um grande número de partículas angulares.	Huisman; Briston (1981).
	A substituição de apenas 15 a 30 % do material fino reciclado por agregado miúdo natural pode melhorar a trabalhabilidade e o acabamento da mistura de concreto.	Forster (1986).
Absorção de água	Entre 8,3 e 12,1 % para os agregados reciclados de concreto.	Hansen (1992).
	De 12,2 % para agregado de concreto e argamassas.	Quebaud; Buyle-Bodin (1999).
	Taxas de absorção que variam de 22 a 25 %.	Schulz; Hendricks (1992).
Durabilidade	Probabilidade de ter na sua composição partículas não hidratadas de cimento.	Montgomery (1998).
Resistência à compressão	Apresentaram uma redução nas taxas de resistência de até 20 %, quando comparados às mesmas misturas utilizando apenas agregado graúdo reciclado e agregado miúdo natural.	Wainwright <i>et al.</i> (1993).

Fonte: O Autor (2023).

Uma vez que os agregados miúdos reciclados contêm uma grande quantidade de partículas angulares, não constitui surpresa o fato de que concretos elaborados exclusivamente com estes agregados, sejam mais consistentes e conseqüentemente apresentem, menor trabalhabilidade do que concretos preparados com agregados naturais utilizando-se com o mesmo traço (Huisman; Briston, 1981).

Os grãos mais angulares e mais lamelares tendem a prejudicar a consistência do concreto, exigindo então, mais água ou teor de pasta para que os concretos reciclados alcancem a mesma consistência daqueles que utilizam agregados naturais (Lima, 2010; Tam *et al.*, 2007).

Em estudo sobre a substituição parcial do agregado natural por agregado reciclado de concreto na produção de argamassas. Bem como a influência da pré-molhagem dos agregados nas propriedades das argamassas, tais como teor de ar incorporado, consistência, calor de hidratação e resistência. O estudo mostrou que as argamassas preparadas com a substituição de 25% por agregado reciclado tiveram melhorias em suas propriedades devido a capacidade de absorção do agregado poroso, que melhorou a hidratação da pasta de cimento ao redor dos agregados e ajudou a reduzir a porosidade e permeabilidade das misturas (Jochem *et al.*, 2019).

Partículas finas e achatadas também podem reduzir a resistência do concreto quando o agregado tem uma carga aplicada no seu lado achatado (Tam *et al.*, 2007). Porém, nem todas as pesquisas apontam a existência dessas diferenças na forma entre os agregados miúdos naturais e os reciclados, por exemplo, em estudos realizado por Hansen (1992), apontam que não existe grande diferença em relação à forma desses materiais.

2.3.2 Dificuldades na utilização de resíduos da construção e demolição em concretos

Um dos maiores complicadores na utilização do RCD é variabilidade de sua composição e conseqüentemente das propriedades dos agregados reciclados (Ângulo, 2000; Zordan, 1997; Pinto, 1999; Harder; Freeman, 1997; Dorsthorst; Hendriks, 2000). Outro problema é a introdução maciça de gesso na forma de revestimentos ou placas no

Brasil que pode ser um complicador para a reciclagem dos RCD, caso os processos de controle do material não sejam instalados nas centrais de reciclagem (Ângulo, 2000).

Segundo Pauw, Desmyter e Dessel (1996), existe também o fato de uma instalação de reciclagem ter a probabilidade de processar entulhos minerais que contenham agregados potencialmente reativos, que devido a condições especiais no concreto original, ainda não desenvolveram suas reações, e que no novo concreto teriam condições para tal.

Uma possível solução para a remoção de alguns contaminantes presentes nos RCD pode ser o emprego de tanques de depuração por flotação e separadores magnéticos (Quebaud; Buyle-Bodin, 1999); mas, em alguns casos, a retirada das fases contaminantes pode ser algo bem mais complexo, como compostos orgânicos voláteis e hidrocarbonetos (Mulder *et al.*, 2000).

Uma possível solução para reduzir a variabilidade da composição e das propriedades desses agregados pode ser o manejo em pilhas de homogeneização. Desta forma com um adequado controle seria possível o emprego dos agregados reciclado em diversas finalidades, assim valorizando o uso deste material (Ângulo, 2000).

2.4 RESUMO COM AS INFORMAÇÕES IMPORTANTE SOBRE O TÓPICO

Na busca por práticas construtivas mais sustentáveis, a utilização de agregados reciclados pode ser uma das possíveis soluções para lidar com os resíduos de construção e demolição. Os agregados reciclados são definidos como material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção ou demolição, com características técnicas adequadas para aplicação em obras de edificação e infraestrutura.

Uma das vantagens mais notáveis da adoção de agregados reciclados é a significativa redução do descarte inadequado. Estima-se que substituir os agregados naturais pelos reciclados poderia evitar o descarte de aproximadamente 95 milhões de toneladas de resíduos anualmente em aterros. Além disso, essa substituição contribui para a conservação dos recursos naturais não renováveis, alinhando-se assim com os princípios da sustentabilidade.

Entretanto, é crucial considerar as diferenças entre os agregados reciclados e os naturais. Variações nas características, como forma, textura, granulometria e absorção

de água, podem afetar a trabalhabilidade e a resistência das misturas. A forma dos agregados reciclados pode variar, de angular a arredondada, dependendo do estudo e do processo de reciclagem utilizado.

O uso desses agregados não é isento de desafios. Devido a possibilidade de presença de contaminantes é necessário o controle rigoroso na reciclagem. Estratégias como o manejo em pilhas de homogeneização surgem como ferramentas para mitigar a variabilidade dos agregados reciclados, permitindo sua aplicação em diferentes contextos com maior eficácia.

Em resumo, a incorporação de agregados reciclados na indústria da construção é uma abordagem fundamental para atingir práticas mais sustentáveis. Embora desafios técnicos e regulatórios persistam, as vantagens ambientais que eles oferecem indicam um caminho promissor. Com investimentos contínuos em pesquisa, tecnologia e regulamentação, é possível maximizar o potencial dos agregados reciclados.

2.5 GERAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DO PÓ RECICLADO HÍBRIDO

Embora a produção de agregados reciclados seja uma das possíveis soluções para o uso dos resíduos sólidos oriundos da construção civil, esse processo gera uma grande quantidade de partículas finas, cerca de 35% do volume total do agregado reciclado produzido são materiais finos. As partículas geradas variam de submicrons a milímetros (Heinz; Schubert, 2007).

Como mostrado nos trabalhos de Zordan (1997) e Lanzellotti *et al.* (2004b), o material que chega nas empresas de reciclagem é bastante heterogêneo, isso ocorre devido ao trabalho e o tempo necessário para os procedimentos de separação dos resíduos da construção e demolição, desta forma o processo não costuma ser implementado nos canteiros de obra no Brasil. Com isto a composição desses resíduos inclui materiais diversos como concreto, tijolos, argamassas, cerâmicas entre outros. Consequentemente as partículas finas originadas da sua reciclagem são um material híbrido, que pode apresentar partículas de natureza inerte, como grãos de areia, e partículas com alguma reatividade, como a pozolanicidade, como grãos de material cerâmico e cimento ainda anidro.

Em função do pó reciclado ter essa característica híbrida, surgiu o desafio para propor parâmetros para sua aplicação como inerte ou como material pozolânico. Dentre esses estudos Liu *et al.* (2014), estabeleceram a partir dos resultados dos ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), AFM, Análise térmica diferencial (TG-DTA) e Difractometria de Raios-X (DRX), que quando o pó reciclado possuir na sua composição mais de 40% de tijolo de argila, este apresentará propriedades pozolânicas. Liu *et al.* (2014) usaram pó híbrido de concreto-tijolo, como substituição de cimento para investigar as mudanças na fluidez, resistência à compressão e microestrutura do concreto, encontrou que níveis elevados de substituição podem comprometer a fluidez e a resistência do concreto. No entanto, se o nível de substituição estiver dentro do limite de especificação, ou seja, menor que 30%, o concreto pode ainda atender ao requisito de resistência especificado pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM) e pelas normas chinesas.

Já no estudo de Topic *et al.* (2017), comparou a resistência a compressão e o módulo de elasticidade de pastas de cimento, sem adições e com substituição de cimento pelo pó reciclado, os resultados obtidos demonstraram que a resistência mecânica da pasta com substituição nas proporções de até 20 %, foram semelhantes ao resultado da pasta de cimento de referência. A justificativa desse resultado foi efeito microfiller gerado pela incorporação do pó reciclado as pastas.

A Tabela 3 apresenta de forma resumida alguns estudos sobre as características do pó reciclado encontrado em outras pesquisas tais como forma, textura, granulometria, absorção de água.

Tabela 3. Resumo de algumas características encontradas no pó reciclado produzidos com RCD.

Característica		Autor
Forma	Possui formato irregular e bordas irregulares.	Liu <i>et al.</i> (2014).
	A forma do pó reciclado é irregular e sua superfície é grossa.	Liu <i>et al.</i> (2016).
Finura	Maior percentual de tijolos de argila na composição, maior a finura.	Liu <i>et al.</i> (2014).
Granulometria	Curva de distribuição continua semelhante à do concreto e tamanho médio das partículas de 31,4 µm.	Liu <i>et al.</i> (2014).

	Curva de distribuição contínua e tamanho médio das partículas de 12,0 µm.	Topic <i>et al.</i> (2017).
Trabalhabilidade	Maior quantidade de água para manter a consistência em misturas com pó reciclado.	Liu <i>et al.</i> (2014).
	Quando maior a quantidade de pó reciclado menor o espalhamento em função da forma do pó reciclado que é mais irregular.	Zhu <i>et al.</i> (2016).
	Precisa de cerca de 5% a mais de água para manter a trabalhabilidade.	Liu <i>et al.</i> (2014).
Módulo de elasticidade	O Módulo de elasticidade diminuiu com o uso do pó reciclado.	Topic <i>et al.</i> (2017).
Absorção de água	A estrutura porosa deste material pode levar a uma maior absorção de água no estado fresco e reduzir a fluidez da mistura.	Sun <i>et al.</i> (2017).
	A absorção de água do pó reciclado misto costuma ser maior do que a do pó reciclado de materiais homogêneos como aqueles obtidos apenas do concreto por exemplo.	Colangelo; Cioffi (2016).
Resistência à compressão	Maior o índice de resistência quanto maior percentual de tijolos de argila na composição.	Liu <i>et al.</i> (2014).
	As resistências à compressão e à flexão tenderam a diminuir em relação a mistura com material natural.	Zhu <i>et al.</i> (2016).
	A resistência a compressão das amostras diminui com o aumento do percentual de substituição superior a 20%.	Topic <i>et al.</i> (2017).

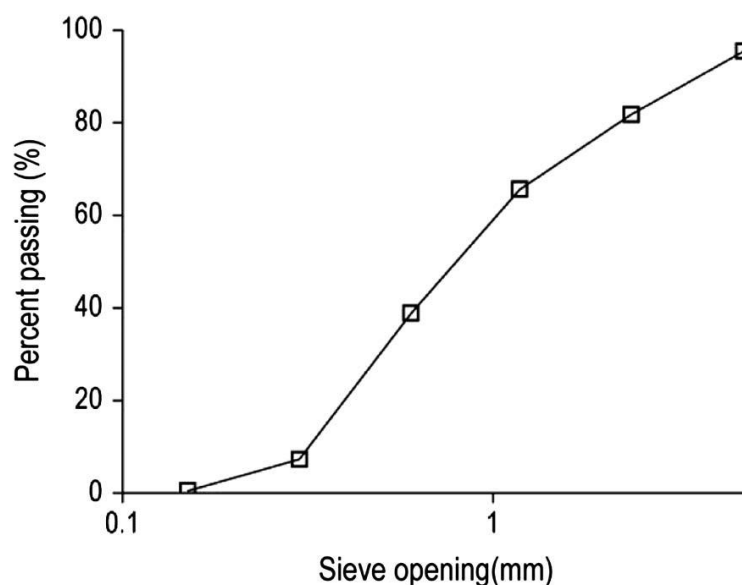
Fonte: O Autor (2023).

As características do pó reciclados apresentadas na Tabela 3 bem como as demais características do material serão discutidas nos itens a seguir.

2.5.1 Forma, textura e distribuição granulométrica do pó reciclado

No estudo realizado por Sun *et al.* (2017), a Figura 5 que representa a curva granulométrica acumulada do pó reciclado de concreto, mostra os tamanhos de partículas do pó reciclado encontram-se distribuídos dentro do intervalo de 0,159 a 200 μm , caracterizado por um valor médio de 14,377 μm . Na pesquisa supracitada, 13,93% do pó é mais fino que 2,5 μm , 40,62% do pó é mais fino que 10 μm , 77,45% do pó passa pela peneira nº 325 (44 μm), e 87,7% passam pela peneira nº 200 (74 μm).

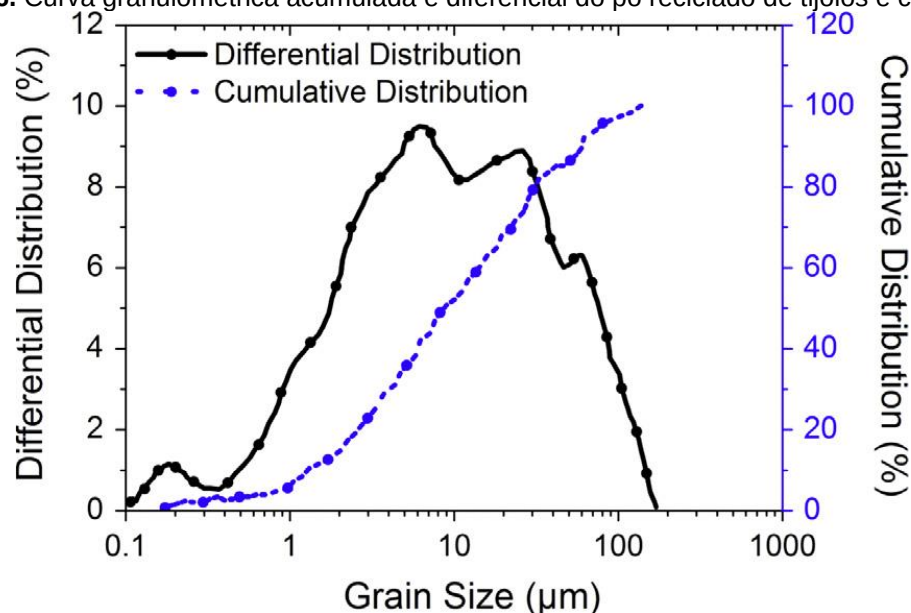
Figura 5. Curva granulométrica acumulada do pó reciclado de concreto.



Fonte: Sun *et al.* (2017).

Já Liu *et al.* (2014) verificaram que a maioria dos grãos tem um tamanho menor que 45 μm (Figura 6). A distribuição dos tamanhos dos grãos que variam de 6 a 25 μm é relativamente uniforme. Com base na distribuição cumulativa, a porcentagem de partículas de tamanho inferior a 10 μm é de cerca de 40%, o que beneficia a atividade de resistência devido ao aumento da razão superfície-volume.

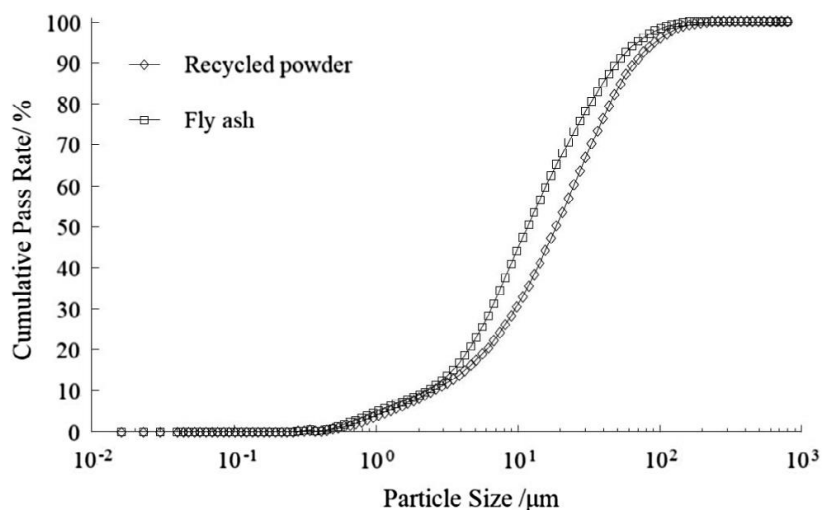
Figura 6. Curva granulométrica acumulada e diferencial do pó reciclado de tijolos e concretos.



Fonte: Liu *et al.* (2014).

Enquanto no trabalho realizado por Zhu *et al.* (2016) o tamanho médio dos grãos foi de 31,4 μm (Figura 7). Por sua vez Topic (2017) verificou que 34% das partículas do pó reciclado eram maiores que 20 μm e apenas 10% eram maiores que 45 μm , com o maior tamanho de grão sendo 130 μm e um tamanho médio dos grãos de 12 μm . A área superficial encontrada para o pó reciclado foi de 412 m^2/kg .

Figura 7. Curva granulométrica acumulada do pó reciclado e cinza volante



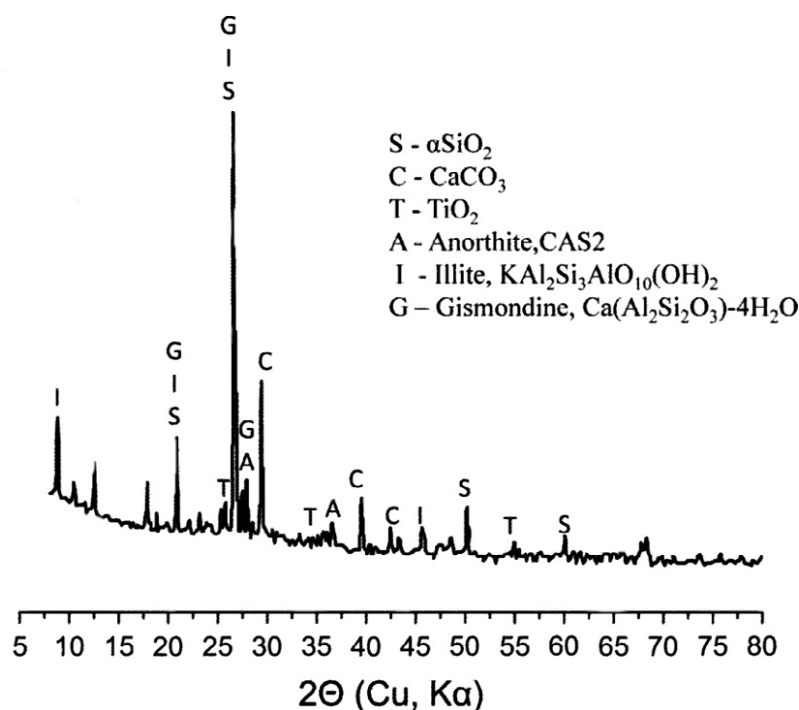
Fonte: Zhu *et al.* (2016).

2.5.2 Características químicas e mineralogia do pó reciclado

Conforme descrito por Zordan (1997), os materiais que compõem a maior parcela dos resíduos da construção dos quais serão originados o pó reciclado híbrido¹ (PRH) são o concreto, tijolos e argamassas, então na sua composição possivelmente irá conter minerais provenientes desses componentes.

Através da DRX realizada por Liu *et al.* (2014), Figura 8, os principais compostos minerais encontrados no pó reciclado foram a Gismondina ($\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), Illita ($\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$), Anortita (CaSi_2) - AlSiO_2 e CaCO_3 , que são comuns em cimentos e tijolos de argila. Entre eles, o SiO_2 está relacionado à atividade pozzolânica, e o CaCO_3 participa da hidratação do C_3A para gerar Monocarboaluminato ($\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$). Também existem alguns pequenos picos de difração mostrando que o pó híbrido contém rutilo (TiO_2), a existência de TiO_2 é possivelmente originária do tijolo. No processo de produção de tijolos de argila na china, o TiO_2 costuma ser usado como corante.

Figura 8. A composição mineral do pó reciclado, obtido através de DRX.



Fonte: Liu *et al.* (2014)

¹A palavra híbrido segundo o dicionário Michaelis significa “Que ou o que é composto de elementos distintos”, levando em consideração esse contexto e pelo resíduo do RCD se tratar de um material formado a partir de diversos componentes o termo híbrido foi escolhido para designar o material estudado.

A composição química do pó reciclado apresenta elementos comumente encontrados em concretos, argamassas e tijolos, em estudo realizado por Liu *et al.* (2014), o elemento dominante no material reciclado é o Si, seguido pelo Ca e Al (Tabela 4). Estes 3 elementos contam por mais de 70% do peso total do pó reciclado de concretos e tijolos de argila. Comparado com cinzas volantes, cimento, pó de tijolo e pó de concreto, o pó reciclado híbrido exibe um espectro mais amplo de produtos químicos na sua composição. Um ponto importante observado por Sun *et al.* (2017) é que comparado ao cimento, os finos provenientes de resíduos da construção têm uma perda ao fogo bastante alta (LOI). Isso provavelmente se deve ao alto teor de carbonato no concreto original ou causado por carbonatação adicional no concreto demolido após a moagem.

Tabela 4. Composição química do pó reciclado, obtido através de FRX.

Elementos	%
SiO ₂	43,85
Al ₂ O ₃	12,64
Fe ₂ O ₃	6,15
CaO	17,86
MgO	2,58
K ₂ O	2,05
Na ₂ O	1,1
TiO ₂	0,67
SO ₃	2,01
P ₂ O ₅	0,22
Cl	0,032

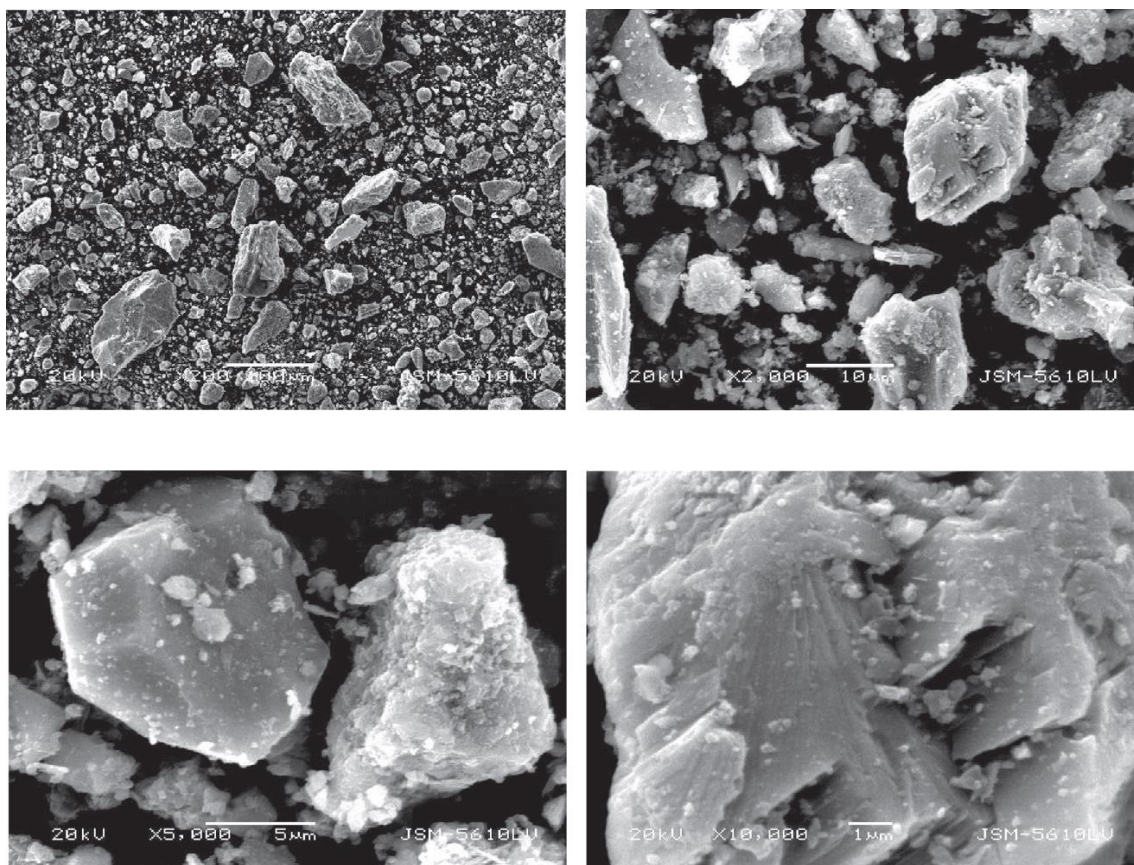
Fonte: Liu *et al.* (2014).

Em relação ao formato das partículas, através do MEV, Figura 9, é possível observar que ao contrário das cinzas volantes, as partículas no pó reciclado não são nem esféricas nem suaves. Em vez disso, eles contêm cantos afiados e bordas irregulares, que formam fendas e entalhes em V. As partículas mais finas costumam ficar nas fendas e entalhes das partículas maiores. Esta configuração única definitivamente aumenta a quantidade de água exigida e dificulta a trabalhabilidade do concreto quando usado com o pó reciclado. Como o tijolo de argila é mais fácil ser moído em partículas mais finas, a quantidade dessas partículas menores aumenta com o acréscimo da proporção de tijolos de argila. Isso explica o crescimento da necessidade de água em amostras com maior porcentagem de tijolos na composição. No entanto, se a porcentagem de pó de concreto

reciclado for muito pequena, não há partículas grossas suficientes para ter seu espaço preenchido pelas partículas mais finas. Consequentemente, a necessidade de água cai (Liu *et al.*, 2014).

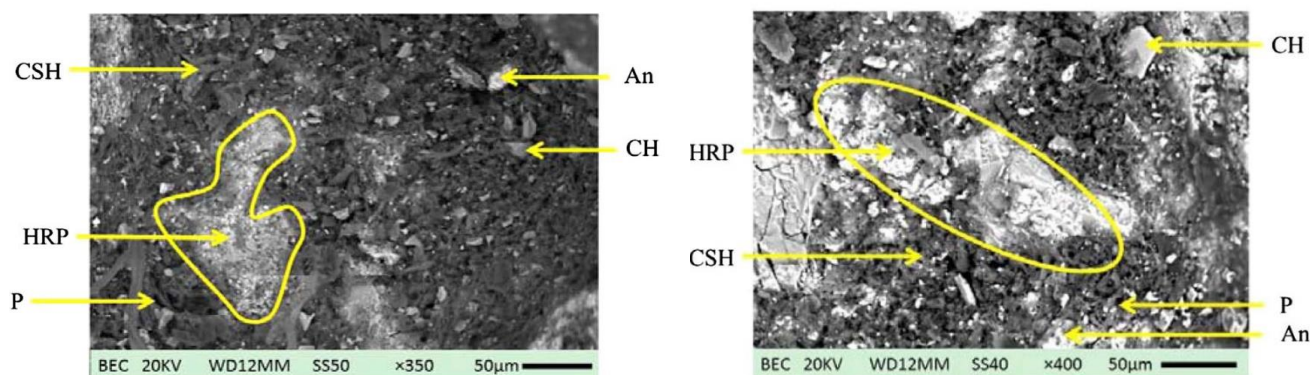
Outro ponto importante que foi observado por Sun *et al.* (2017), no MEV é que a presença do pó reciclado nas matrizes cimentícias faz com que menos fases porosas surjam próximas a essas partículas (Figura 10). Isso sugere que as partículas do pó reciclado podem fornecer locais de precipitação para o C—S—H, que reduz a ocorrência de poros nos limites do pó reciclado. Já o resultado encontrado por Topic *et al.* (2017) foi diferente, haja vista que em suas amostras, a incorporação do PRH afetou negativamente a coesão das misturas. As imagens do MEV revelam um número maior de poros que aquelas com apenas cimento.

Figura 9. Imagem da superfície das partículas de pó reciclado em diferentes graus de ampliação (a) 200x, (b) 2000x, (c) 5000x, (d) 10000x.



Fonte: Liu *et al.* (2014).

Figura 10. Imagem de MEV de região contendo pó reciclado.



Fonte: Sun *et al.* (2017).

2.5.3 Influência do uso do pó reciclado na trabalhabilidade de concretos

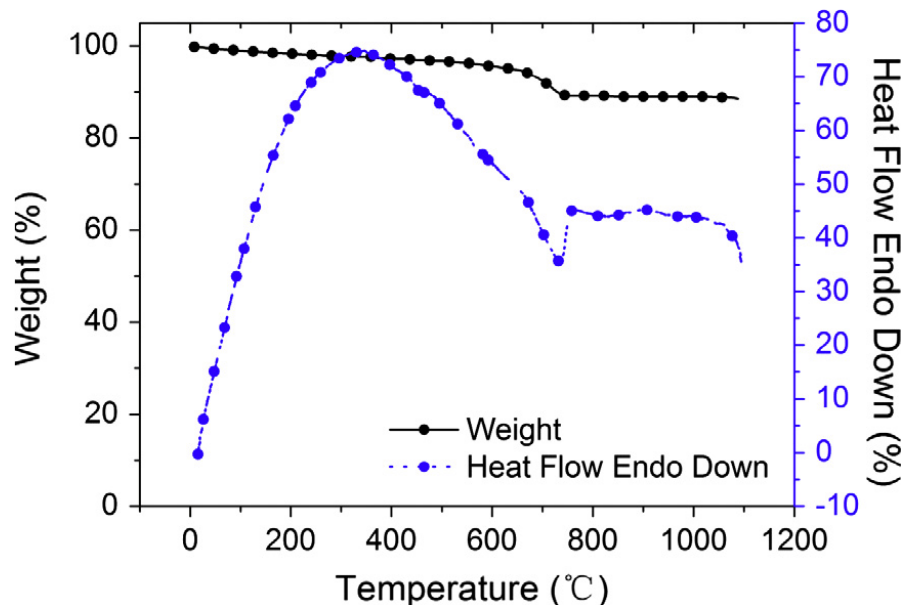
Quando o pó reciclado é usado como adição ao cimento, para manter a trabalhabilidade do concreto é necessário o uso de um maior volume de água, e como se sabe, o alto teor de água tem efeitos deletérios sobre a resistência do concreto. Uma vez que o pó reciclado é adicionado a mistura se faz necessário 5% a mais água na mistura para atingir o mesmo nível de trabalhabilidade (Liu *et al.*, 2014).

Esse comportamento também foi verificado por Zhu *et al.* (2016) e Colangelo e Cioffi (2016), onde o aumento da quantidade de pó reciclado diminuiu o espalhamento das misturas, desta forma, os pesquisadores atribuíram essa redução à forma do pó reciclado, que é irregular e a sua superfície grossa.

2.5.4 Termogravimetria do pó reciclado

Em uma análise de termogravimetria, a curva TG mostra que a perda de massa do pó se estabiliza após 800 °C (Liu *et al.*, (2014). Existe um pico exotérmico a 340 °C, correspondente à queima de partículas de celulose. Quando o tijolo de argila residual é moído em pó, as partículas de celulose são liberadas. A queda acelerada no TG à 740 °C corresponde a decomposição do carbonato de cálcio (CaCO_3). No mesmo tempo, a decomposição de Ilita também pode contribuir para a reação endotérmica em 740 °C. Uma vez que ambas as curvas TG e DTA se mostram estabilizadas após 800 °C, não deve haver mais decomposição depois disso (Figura 11).

Figura 11. Curvas obtidas com base na análise TG-DTA.



Fonte: Liu *et al.* (2014).

2.5.5 Influência do pó reciclado na resistência e módulo de elasticidade de concretos e argamassas

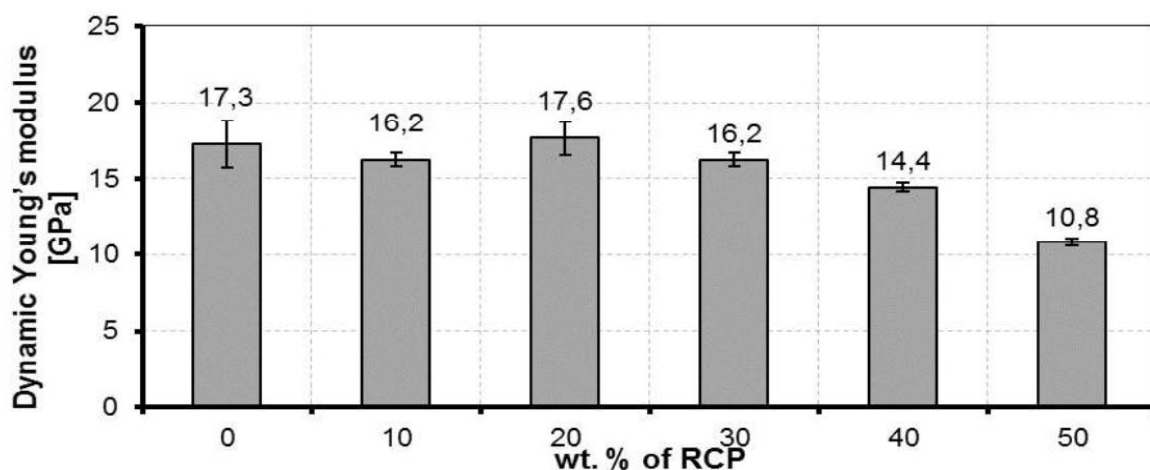
A introdução do uso pó reciclado no concreto, bem como demais adições, pode afetar de forma significativa a resistência e o módulo de elasticidade do concreto. Em seu estudo, Topic *et al.* (2017), procuraram substituir o cimento por partículas finas oriundas da reciclagem do concreto nas proporções de 10%, 20%, 30%, 40% e 50% e verificou sua influência na resistência e no módulo de elasticidade, os resultados obtidos são mostrados nas Figuras 12, 13 e 14. O módulo de elasticidade, Figura 12, se encontrava dentro do desvio padrão comparável com a amostra de referência, porém para percentuais de substituição acima de 30%, o módulo de elasticidade das amostras tendeu a decair, sendo a queda com 50% de substituição foi cerca de 38% menor em comparação com a amostra de referência.

Na Figura 13, as amostras com 10% de substituição exibem uma queda na resistência à compressão de cerca de 35% em comparação com as amostras de referência. Porém com 20% de substituição, a resistência teve uma queda apenas cerca de 25%. Os pesquisadores atribuíram essa melhora ao efeito de microfiller. A resistência

a compressão das amostras com substituição acima de 20% teve uma queda gradual de resistência.

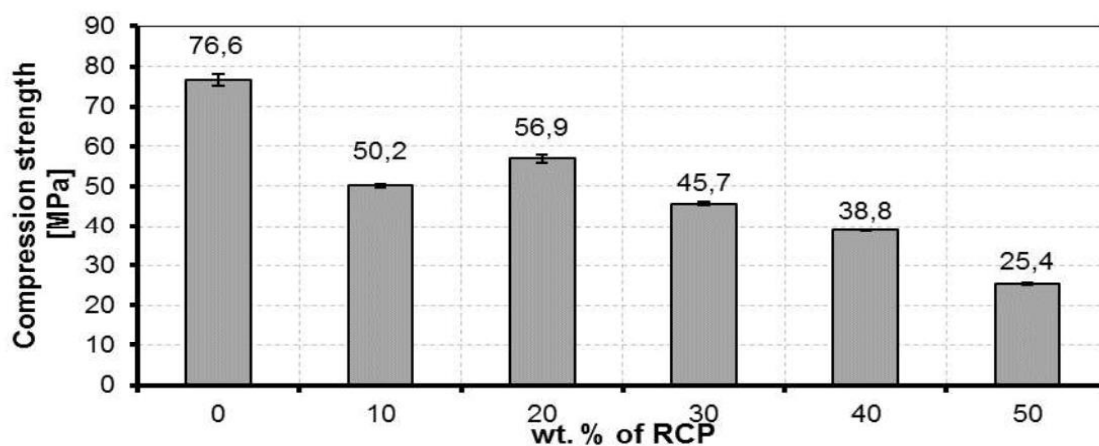
Em relação à resistência a flexão, Figura 14, as misturas com substituição de 10 a 20% de cimento pelo pó reciclado causaram um aumento de cerca de 25 a 40% na resistência à flexão, porém os resultados apresentaram um alto desvio padrão. Amostras com substituição acima de 20% foram comparáveis com as amostras de referência.

Figura 12. Módulo de elasticidade de concreto com a substituição parcial de cimento por reciclados.



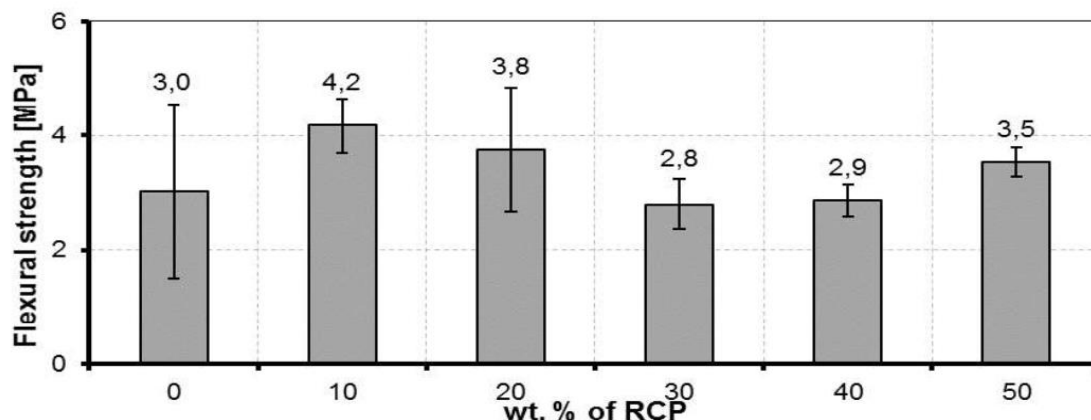
Fonte: Topic *et al.* (2017).

Figura 13. Resistência à compressão de concreto com a substituição parcial de cimento por reciclados.



Fonte: Topic *et al.* (2017).

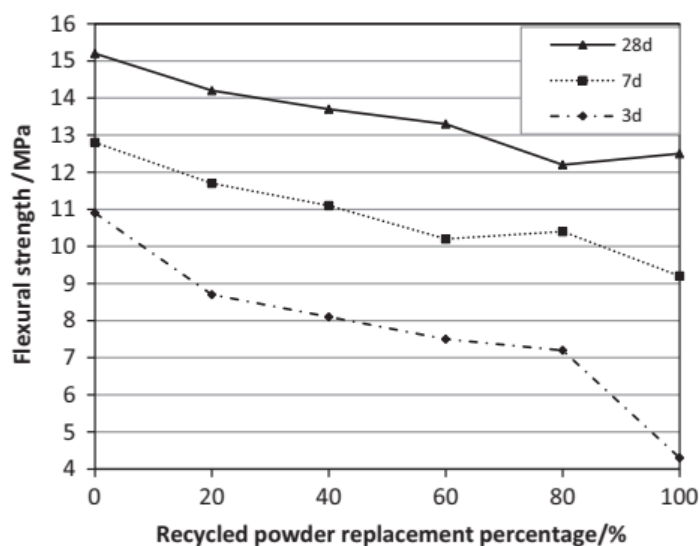
Figura 14. Resistência à flexão de concreto com a substituição parcial de cimento por reciclados.



Fonte: Topic *et al.* (2017).

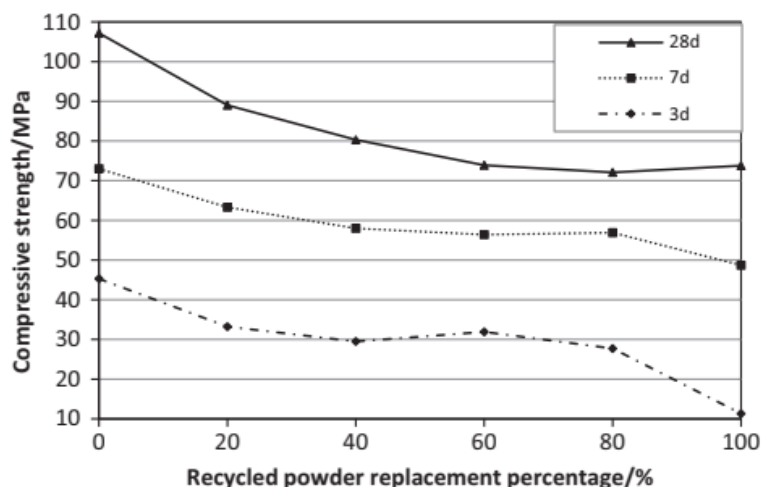
Além disso, Zhu *et al.* (2016) realizaram uma pesquisa com o uso de pó reciclado a partir de resíduos de tijolos de argila e de cimentos em concretos, onde comprovou-se que com o aumento dos percentuais de substituição de cimento pelo pó reciclado as resistências à compressão e à flexão tenderam a diminuir como apresentada nas Figuras 15 e 16, respectivamente.

Figura 15. Resistência a compressão de concretos com a substituição parcial de cimento por reciclados de concretos e tijolos.



Fonte: Zhu *et al.* (2016).

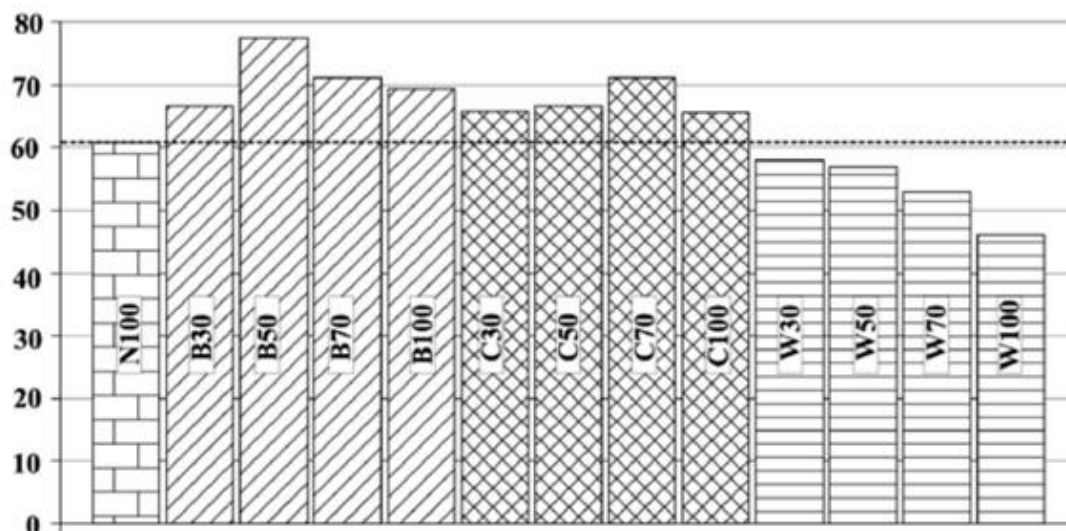
Figura 16. Resistência à flexão de concretos com a substituição parcial de cimento por reciclados de concretos e tijolos.



Fonte: Zhu *et al.* (2016).

Em 2016, Colangelo e Cioffi realizaram a substituição da fração fina de argamassas dos agregados naturais por resíduos de demolição e verificaram que a resistência à compressão de misturas contendo finos de tijolos são melhores do que aqueles mostrados por misturas contendo agregados naturais. Em relação as misturas feitas com agregados derivados de concreto houve um ligeiro decréscimo na resistência e por fim as argamassas preparadas com agregados contendo na mesma mistura finos de concretos e tijolos mostraram diminuição das resistências em relação às amostras de referência, isso ocorreu porque como o objetivo do estudo era produzir argamassas autonivelantes o espalhamento foi mantido constante enquanto foi variado a relação água/ligante, como os agregados mistos apresentaram uma maior absorção de água houve uma queda na resistência destas argamassas. Conforme mostrado na Figura 17, onde N representa os agregados naturais, B (tijolos), C (concretos) e W (misturas de tijolos e concretos).

Figura 17. Resistência à compressão de argamassas com a substituição parcial de cimento por reciclados de concretos e tijolos.



Fonte: Colangelo; Cioffi (2016).

2.5.6 Influência da adição do pó reciclado no calor de hidratação

O calor de hidratação em pastas de cimento com pó reciclado foi analisado por Sun *et al.* (2017), onde foi estudado o calor de hidratação acumulado por 18 horas após as misturas serem realizadas, Figura 18. Foram estudadas 4 pastas, uma com apenas cimento, outras com apenas pó reciclado e duas com substituição de cimento pelo pó reciclado nos percentuais de 30 e 70%. Foi verificado que as amostras com pó reciclado híbrido, principalmente aquela com apenas o pó possuíam um calor de hidratação mais baixo o que o levou à conclusão de que o pó reciclado não se hidrata diretamente com água e, portanto, ele serve principalmente como material de enchimento quando usado em concreto. Já em relação a hidratação no período inicial (0 até 0,5 horas) as pastas com pó reciclado possuem um maior calor inicial, isto significa que comparado ao cimento Portland, o pó reciclado possui uma estrutura mais porosa. Isso pode causar maior absorção de água ou menor fluidez da mistura quando este pó é usado nas misturas.

Figura 18. Calor de hidratação em pastas de cimento com pó reciclado.

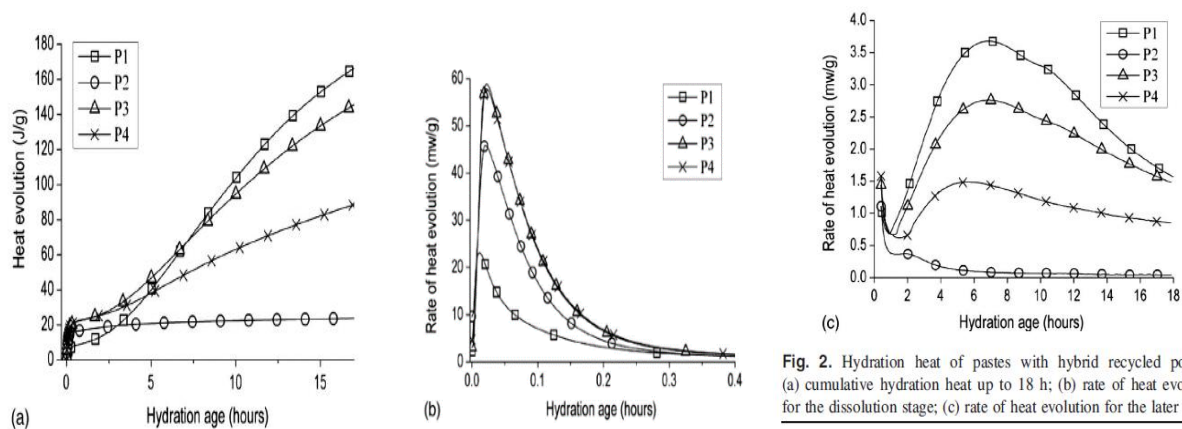


Fig. 2. Hydration heat of pastes with hybrid recycled powder: (a) cumulative hydration heat up to 18 h; (b) rate of heat evolution for the dissolution stage; (c) rate of heat evolution for the later stages

Fonte: Sun *et al.* (2017).

2.6 RESUMO COM AS INFORMAÇÕES IMPORTANTE SOBRE O TÓPICO

O processo de produção dos agregados reciclados gera uma grande quantidade de partículas finas, que podem atuar como um material inerte ou pozzolânico, com a distinção baseada na composição e características microestruturais. A amplitude da distribuição granulométrica é notável, variando desde submicrons até milímetros, sendo os tamanhos predominantes encontrados abaixo de 10 μm .

No entanto, a presença de partículas finas com cantos afiados e bordas irregulares no pó reciclado introduz um desafio significativo para a trabalhabilidade do concreto. Isso exige a incorporação de maiores quantidades de água, influenciando as propriedades mecânicas das misturas finais. A composição química do pó reciclado é rica em elementos provenientes de materiais como concreto, argamassa e tijolos, incluindo Si, Ca e Al. Quando incorporado em matrizes cimentícias, esse pó pode influenciar a coesão das misturas e diminuir a porosidade.

Entretanto, as implicações no desempenho do concreto são variadas. A substituição de cimento pelo pó reciclado pode afetar negativamente a resistência e o módulo de elasticidade. Observa-se uma diminuição gradual na resistência à compressão à medida que o percentual de substituição aumenta. Em alguns casos, a adição de 10% a 20% de pó reciclado resultou em um aumento na resistência à flexão, indicando uma

possível melhoria em certos aspectos. No entanto quando as substituições são superiores a 20% os resultados tendem a serem inferiores as amostras de referência.

2.7 USO DE ADIÇÕES (FINOS) NO CIMENTO

Segundo a especificação da *European Federation of National Trade Associations Representing Producers and Applicators of Specialist Building Products* (EFNARC, 2005) são classificados como finos, partículas sólidas com dimensões inferiores a 0,125 mm, sendo constituídas da combinação das adições e do cimento.

Esses materiais finos contribuem para o aumento da viscosidade e da fluidez nos concretos e argamassas, isso se deve a adsorção de água promovida por sua elevada superfície específica (Moraes, 2010), esse processo ocorre porque as adições têm a característica de adsorver grande quantidade de água o que poderá reduzir a água livre das misturas e promover o aumento da viscosidade e da estabilidade (Khayat; Assad; Daczko, 2004), esse aumento da viscosidade pode ser decorrente do maior contato entre as partículas, que ocasiona um maior efeito de fricção (Yahia *et al.*, 2005).

O uso de materiais finos pode melhorar o empacotamento das partículas, aumentando a fluidez e a trabalhabilidade do concreto (Kwan; Mora, 2001). Isso ocorre porque essas partículas menores podem ocupar os espaços vazios entre as partículas maiores resultando em um arranjo mais eficiente dos grãos (Moraes, 2010).

Outra característica importante é que essas adições podem melhorar a distribuição granulométrica dos sólidos da mistura e desta forma os finos ajudam a uniformizar a distribuição dos produtos da hidratação do cimento, promovendo a formação de uma matriz mais densa (Moosberg-Bustnes *et al.*, 2004).

Porém é importante observar que existe um limite para a incorporação de finos nas misturas, isso ocorre porque embora a adição de finos possa reduzir a fricção interna entre as partículas dos sólidos, caso o limite seja passado pode ocorrer o efeito inverso passando-se a observar o aumento da fricção interpartícula, o que vai afetar negativamente a deformabilidade da mistura (Nehdi; Pardhan; Koshowski, 2004; Moraes, 2010). Esse limite, segundo Yahia *et al.* (2005) é determinado pela granulometria dos

agregados, ou seja, a quantidade de finos deve ser o suficiente para promover o adequado preenchimento dos vazios.

Além da função de preenchimento as adições podem ser utilizadas para complementar a fração fina na distribuição granulométrica das partículas dos agregados (Bigas; Gallias, 2003). Segundo Gallias *et al.* (2000), um ponto também importante a se observar, diz respeito a forma dos finos já que partículas arredondadas apresentam menor demanda de água em decorrência da redução da fricção entre os grãos.

Outro fator que a introdução de finos ao cimento pode influenciar é no processo de nucleação, que é o fenômeno do surgimento de pontos de precipitação na solução ou na superfície do material e caso ocorra de forma heterogênea esse processo ocasiona a formação de pequenos núcleos ou centros de cristalização nos quais os produtos de hidratação começam a se desenvolver (Scherer; Zhang; Thomas, 2012).

Controlar o efeito de nucleação é importante para otimizar as propriedades do concreto pois podem acelerar o início da hidratação, promovendo a formação de núcleos de cristalização. Por outro lado, a falta de nucleação adequada pode levar a uma hidratação lenta e inadequada, afetando negativamente a resistência e a durabilidade do concreto (Levy; Helene, 2000; Levy, 2001). A presença de fíleres como os de origem basáltica na microestrutura da pasta de cimento Portland pode ocasionar o fenômeno de nucleação, ou seja, à deposição de cristais de C-S-H na superfície da partícula (Gozi; Couto; Morales, 2018).

Diante do exposto, nota-se que a incorporação de finos em matrizes cimentícias apesar de trazer benefícios também irá exigir cuidados na sua dosagem sendo a quantidade de água o fator principal a ser considerado.

2.8 USO DE PÓ RECICLADO HÍBRIDO COMO FINO NO CIMENTO

A utilização de finos proveniente de materiais reciclados como substituto parcial ou total dos finos tradicionais do cimento é uma prática que tende a crescer na construção, pois sua utilização pode trazer alguns benefícios tais como: a redução de custos, melhorias as propriedade do cimento como a resistência à compressão e ação de congelamento e descongelamento, desde que o percentual de substituição seja

inferior a 30%, e por fim seu uso ajuda a diminuir a extração de recursos naturais melhorando assim a pegada ambiental do cimento (Cuizhen *et al.*, 2016).

Porém é importante observar que o uso de pó reciclado híbrido assim como outros materiais finos reciclados pode trazer algumas desvantagens, como a possibilidade de afetar as propriedades do cimento caso não seja feita uma boa seleção e preparação do material.

2.9 TRANSPORTE DE AGENTES AGRESSIVOS EM MISTURAS COM CIMENTO

O transporte de agentes agressivos como ácidos, sais e álcalis, através dos poros das pastas de cimento pode causar problemas na estrutura do material e reduzir sua durabilidade. Essas manifestações patológicas podem ser ocasionadas por reações químicas entre os agentes agressivos e os componentes do cimento, ou a processos de degradação física do material como expansão ou dissolução.

Uma forma de mitigar a ação de agentes agressivos em pastas de cimento é através do uso de cimentos resistentes a esses agentes, bem como de um bom dimensionamento da relação água-cimento e consequente redução da porosidade do material. Além disso, é possível utilizar aditivos e revestimentos protetores com o propósito de diminuir a entrada desses agentes agressivos e assim prolongar a vida útil da matriz cimentícia.

Com base nas condições ambientais e a exposição prevista aos agentes agressivos a qual a matriz cimentícia será submetida é possível realizar ensaios com o propósito de verificar a resistência do material a esses agentes agressivos. A incorporação dos finos, como o pó reciclados híbridos, pode alterar a distribuição dos poros e o transporte de agentes agressivos nas matrizes cimentícias, alterando os fatores que controlam a iniciação e propagação do processo de degradação do material, tais como a permeabilidade, o ingresso de íons do concreto e o pH do concreto.

Um exemplo dessa interferência pode ser verificado no estudo realizado por Zhu *et al.* (2016), onde foi investigado o uso do pó reciclado para substituir parcialmente a sílica ativa ou o cimento no concreto afim de desenvolver uma mistura com alto desempenho e que respeite o meio ambiente. O pó reciclado é usado para substituir parte

da sílica ativa e do cimento respectivamente e foi investigada como a substituição afeta a fluidez e resistência das misturas.

Ficou constatado no estudo de Zhu et al (2016) que conforme a taxa de substituição de sílica ativa por pó reciclado aumentou, o espalhamento da mistura diminuiu ligeiramente, as resistências à compressão e à flexão tenderam a diminuir, a retração diminuiu e a resistência à penetração de cloretos também diminuiu. Porém, mesmo assim a resistência à penetração de cloretos da mistura com substituição por pó reciclado de 100% ainda apresentava valores dentro dos limites da norma ASTM C1202 (ASTM, 2019). Com isso é possível inferir que mesmo que a presença do material reciclado possa influenciar de forma negativa algumas das propriedades das misturas cimentícias com o devido controle é possível sua utilização.

2.10 CONSUMO DE CO₂

Segundo os dados da *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD, 2016), a produção de cimento além do consumo de recursos naturais também responde por até 5% das emissões globais de CO₂, onde 50% das emissões ocorrem durante a produção de clínquer, 40% na queima de combustíveis para aquecimento de fornos e 10% advêm do uso de eletricidade e transporte

A maior parte da geração de CO₂ ocorre principalmente durante a produção do cimento (Martirena; Scrivener, 2015). Esse processo costuma ocorrer principalmente durante a decomposição do calcário. Durante essa etapa, o calcário é decomposto em óxido de cálcio (CaO) e dióxido de carbono (CO₂). Essa reação química é conhecida como calcinação e é responsável por uma parcela significativa das emissões de CO₂. A queima de combustíveis para o aquecimento dos fornos também é um grande emissor de CO₂. A queima de combustíveis como carvão, óleo combustível ou gás natural, é realizada para gerar o calor necessário para a reação de formação do clínquer. Essa queima libera CO₂ como um subproduto.

Segundo John (2017), a produção de uma tonelada de clínquer requer mais de uma tonelada de calcário, resultando em cerca de 440 kg de CO₂ liberados na atmosfera durante a calcinação.

A incorporação de materiais cimentícios suplementares é uma ferramenta útil na diminuição da emissão de CO₂ durante a produção do cimento (Mehta; Monteiro, 2014); essa redução pode ocorrer devido aos fatores:

- Alguns materiais cimentícios suplementares reagem com o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento, formando compostos adicionais com propriedades aglomerantes. Isso permite uma redução na quantidade de clínquer necessária na mistura de cimento;
- Redução da temperatura de queima, pois os materiais cimentícios suplementares geralmente têm um baixo conteúdo de carbonato de cálcio, o que significa que exigem menos energia para serem processadas em altas temperaturas em comparação com o calcário utilizado no cimento tradicional;
- Podem aumentar a vida útil do cimento o que pode ocasionar uma menor necessidade de substituição das estruturas feitas com cimento.

Sendo assim é importante analisar além dos fatores técnicos, também como a incorporação do PRH ao cimento pode afetar na emissão de CO₂.

2.11 RESUMO COM AS INFORMAÇÕES IMPORTANTE SOBRE O TÓPICO

A adição de materiais finos (partículas sólidas menores que 0,125 mm) no cimento contribui para aumentar a viscosidade e fluidez de concretos e argamassas. A introdução de materiais finos na matriz cimentícia pode trazer muitas vantagens como otimizam o empacotamento das partículas, preenchendo os espaços vazios entre o cimento. Esse fenômeno resulta em uma melhoria na fluidez e trabalhabilidade do concreto.

A distribuição granulométrica dos materiais finos também desempenha um papel crucial. A uniformização da matriz cimentícia pode ser alcançada, melhorando a formação de uma estrutura mais densa. Essa uniformidade contribui para a distribuição mais homogênea dos produtos da hidratação do cimento.

No entanto, é essencial considerar um limite de incorporação de materiais finos. Um excesso pode levar ao aumento da fricção interpartícula, afetando a deformabilidade da mistura. A morfologia das partículas também é relevante, sendo que partículas arredondadas demandam menos água e permitem um empacotamento mais denso dos grãos.

Uma abordagem inovadora envolve a utilização de pó reciclado híbrido como substituto dos finos tradicionais do cimento. Isso não só pode reduzir custos e melhorar propriedades do cimento, mas também contribuir para a sustentabilidade. No entanto, a seleção e preparação criteriosa desse material são essenciais para garantir seu desempenho eficaz.

Além disso, é importante considerar os efeitos na durabilidade das estruturas. O transporte de agentes agressivos através dos poros das pastas de cimento pode comprometer a integridade e reduzir a vida útil do material. A incorporação de pó reciclado híbrido pode alterar a distribuição de poros e o transporte desses agentes, influenciando a permeabilidade, ingresso de íons e pH do concreto.

Também é relevante reconhecer que a produção de cimento, fundamental para a construção, contribui significativamente para as emissões globais de CO₂. Explorar alternativas como a adição de materiais finos ou a incorporação de pó reciclado não só pode melhorar as propriedades do concreto, mas também contribuir para reduzir os impactos ambientais causados.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este capítulo organiza-se em três subcapítulos que tratam respectivamente do plano experimental, dos materiais utilizados no estudo e dos ensaios realizados. A metodologia proposta apresenta inicialmente o programa experimental adotado, seguido dos materiais utilizados na pesquisa, sua obtenção e tratamento. E na terceira etapa são apresentados os ensaios realizados, sendo inicialmente feita a análise do pó reciclado híbrido em estado anidro e em posteriormente os ensaios em pastas de cimento com a incorporação do pó reciclado híbrido.

Esta pesquisa pode ser classificada metodologicamente como pesquisa experimental e aplicada, com objetivo explicativo e abordagem quantitativa segundo as definições de Rodrigues (2007).

Por se tratar de uma pesquisa onde os conhecimentos adquiridos serão utilizados para a solução de um problema prático ela pode ser considerada aplicada. Como as condições para essa análise serão feitas em laboratório a partir de parâmetros estabelecidos pode ser também classificada como experimental e quantitativa, pois se utiliza de dados que podem ser classificados e analisados.

3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O estudo sobre o uso das partículas finas de resíduos de construção e demolição, o pó reciclado híbrido, foi realizado em duas etapas. A primeira etapa consiste na caracterização do pó reciclado híbrido e suas propriedades físico-químicas e na segunda etapa o seu comportamento quando utilizado como material cimentício suplementar em pastas de cimento.

A introdução de um material cimentício complementar ao cimento altera suas propriedades seja no estado fresco como o empacotamento das partículas, viscosidade, escoamento e hidratação ou no estado endurecido como resistência, módulo de elasticidade e durabilidade, por isso antes de realizar um estudo em concretos é necessário compreender bem como a introdução desse material afeta as matrizes cimentícias, desta forma foi necessário iniciar essa pesquisa com o estudo do PRH em

pastas de cimento. O Programa experimental foi construído com base nos objetivos propostos no item 1.3.

3.1.1 Estado anidro (Objetivo específico: realizar uma caracterização abrangente do pó reciclado híbrido envolvendo aspectos físicos, químicos e mineralógicos)

Apesar de não apresentarem reações químicas com o cimento, as características de materiais de natureza fíler como a distribuição granulométrica, tamanho dos grãos, massa específica, área superficial, forma, textura, entre outras exercem influência nas propriedades de pastas, argamassas e concretos, tanto em seu estado fresco quanto endurecido. Portanto, é necessário iniciar o plano experimental deste estudo com a caracterização do pó reciclado híbrido. Para determinar as características do material, foram realizados ensaios de caracterização física ((massa específica (3.3.2.1), massa unitária (3.3.2.2) e absorção de água (3.3.2.3)), definiu-se sua caracterização dimensional por meio de granulometria a laser (3.3.2.4); composição química através de FRX (3.3.2.5), composição mineralógica por DRX (3.3.2.6), morfologia das partículas por MEV (3.3.2.8), potencial pozolânico por condutividade elétrica (3.3.2.7) e, por fim, a análise térmica (3.3.2.9).

3.1.2 Estado fresco (Objetivo específico: estudar como a incorporação do pó reciclado híbrido afeta a hidratação das pastas de cimento e seu comportamento reológico)

As pastas de cimento foram produzidas variando os teores de água, porcentagem de substituição e finura do PRH. Inicialmente, foi realizado o ensaio de consistência das pastas e determinado o teor de água utilizado no ensaio de enrijecimento, com o objetivo de analisar o gradual endurecimento da massa da mistura. Esse ensaio possibilita acompanhar como a resistência das pastas de cimento evolui em suas fases iniciais, o que é fundamental para compreender como o PRH influencia o comportamento das misturas e no desenvolvimento do processo de endurecimento. Em seguida, foi realizado o espalhamento das pastas por meio do mini cone. Essa análise é importante para verificar a influência do PRH na fluidez das pastas de cimento. Por fim, foram analisadas as propriedades reológicas, como viscosidade e tensão de escoamento das pastas.

Tanto o espalhamento quanto a reologia das pastas servem como indicadores da trabalhabilidade das misturas. Mais informações sobre cada uma dessas análises são mostradas nos itens 3.3.3.1 (ensaio de consistência); 3.3.3.2 (enrijecimento); 3.3.3.3 (espalhamento) e 3.3.3.4 (análise reológica das pastas).

O plano experimental dos ensaios em estado fresco foi feito em duas etapas: A primeira foi analisada como o teor de substituição de cimento pelo PRH afeta as propriedades reológicas das pastas, e para isso, foi tomada uma pasta com apenas cimento de referência e três pastas com teores de substituição de 10%, 20% e 30% de cimento pelo PRH moído por uma hora. Na segunda etapa foi verificada a influência do tamanho das partículas de PRH nas pastas para isso foi fixado o teor de substituição de 20 % (teor intermediário) e variou-se a finura do PRH e foi comparado os resultados com a amostra de referência, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5. As misturas das pastas analisadas no estado fresco.

Primeira etapa		
Pasta	Cimento CPV (%)	PRH (%)
Ref.	100	-
PRHM1H10	90	10
PRHM1H20	80	20
PRHM1H30	70	30
Segunda Etapa		
Ref.	100	-
PRHM1H20	80	20
PRHM2H20	80	20
PRHM4H20	80	20
PRHM8H20	80	20

Fonte: O Autor (2023).

3.1.3 Estado endurecido (Objetivo específico: avaliar a formação dos produtos de hidratação e a composição mineralógica das pastas com substituição parcial do cimento pelo pó reciclado híbrido. além disso, analisar de que forma essa incorporação pode afetar a microestrutura, a porosidade e as propriedades mecânicas dessas pastas)

Para essas análises as pastas de cimento foram produzidas misturas variando as porcentagens de substituição e finura do material. As propriedades mecânicas analisadas foram resistência à compressão (3.3.3.5), módulo de elasticidade (3.3.3.12), a porosidade

foi analisada através da absorção de água por imersão (3.3.3.13), a análise microestrutura por MEV (3.3.3.6), a análise termogravimétrica por TG/DTA (3.3.3.7) e os materiais constituintes das pastas por DRX (3.3.3.8) e infravermelho (3.3.3.9).

O plano experimental dos ensaios em estado endurecido foi realizado através das treze misturas de pastas, a mistura de referência com apenas cimento e doze misturas variando os teores de substituição de cimento pelo PRH em 10%, 20% e 30% e a finura do PRH moído nos tempos de um, duas, quatro e oito horas conforme o arranjo experimental apresentado na Tabela 6.

Tabela 6. Arranjo das misturas das pastas analisadas no estado endurecido.

Nome da amostra	Cimento (%)	PRH (%)	Tempo de moagem
REF	100	0	-
PRHM1H10	90	10	1h
PRHM1H20	80	20	
PRHM1H30	70	30	
PRHM2H10	90	10	2h
PRHM2H20	80	20	
PRHM2H30	70	30	
PRHM4H10	90	10	4h
PRHM4H20	80	20	
PRHM4H30	70	30	
PRHM8H10	90	10	8h
PRHM8H20	80	20	
PRHM8H30	70	30	

Fonte: O Autor (2023).

3.1.4 Consumo CO₂ (objetivo específico: avaliar os efeitos da adição do pó reciclado híbrido na emissão de dióxido de carbono (CO₂) de pastas com sua utilização como material cimentício suplementar)

A avaliação do ciclo de vida por meio do consumo de CO₂ das pastas de cimento e das pastas com substituição parcial por PRH foi realizada com o uso do software openLCA versão 1.10.3, mais informações no item 3.3.3.11.

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Neste trabalho os materiais utilizados foram: cimento Portland CP-V ARI, hidróxido de cálcio (Ca (OH)₂) e o pó reciclado híbrido (PRH).

3.2.1 Cimento Portland de referência

Para essa pesquisa foi utilizado o cimento CPV-ARI, esse cimento é equivalente ao cimento Tipo III especificado pela ASTM C150/C150M (ASTM, 2007). O CPV-ARI foi escolhido devido à necessidade de entender com maior fidelidade a influência da incorporação dos finos de RCD em matrizes cimentícias, por isso a necessidade de utilizar um cimento com o mínimo possível de adições minerais comumente encontradas nos cimentos comercializados.

A Tabela 7 mostra a composições químicas e características físicas do cimento fornecidas pelo fabricante.

Tabela 7. Características físicas e químicas do CPV-ARI.

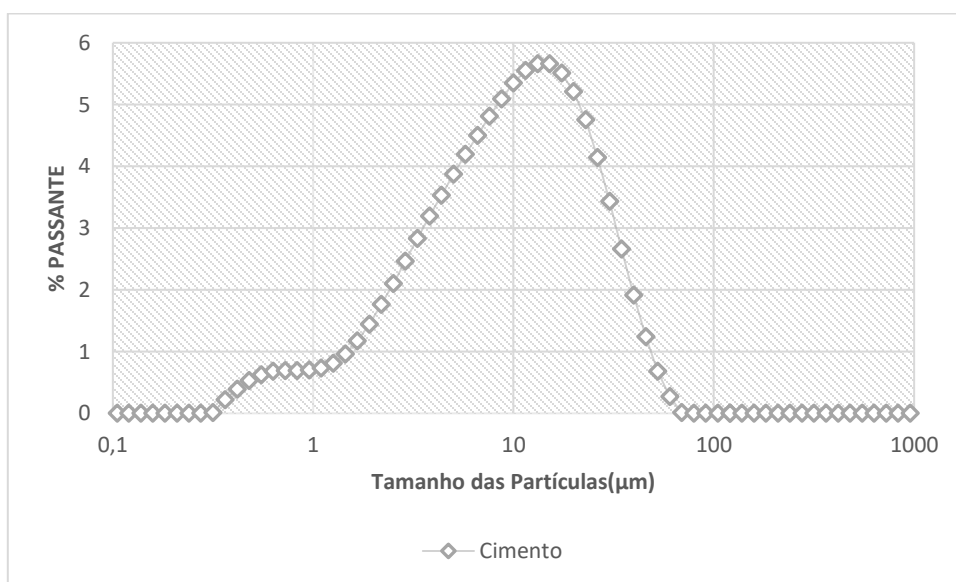
Composição Química do CPV-ARI	
Óxidos Constituintes	CPV
SiO ₂	18,66
CaO	59,97
Na ₂ O	0,17
Al ₂ O ₃	4,34
MgO	5,73
K ₂ O	0,88
Fe ₂ O ₃	2,37
SO ₃	4,28
Resíduo insolúvel	0,79

Perda ao Fogo (P.F)	3,59	
Características físicas do CPV-ARI		
Características físicas	Unidade	Resultado
Massa específica	g/cm³	3,07
Área específica	cm²/g	5430
Início de pega	horas	2
Fim de pega	horas	3
Resistência à compressão 1 dia	MPa	26,3
Resistência à compressão 3 dias	MPa	38,7
Resistência à compressão 7 dias	MPa	44,2
Resistência à compressão 28 dias	MPa	52,9

Fonte: Fornecido pelo fabricante (2023).

Os percentuais de Perda ao fogo ($3,59 < 4,5 \%$), Resíduo insolúvel ($0,79 < 1,0 \%$) e Óxido de magnésio ($5,73 < 6,5\%$), estão dentro dos limites especificados pelas normas NBR NM 18 (ABNT, 2012), NBR 17086 (ABNT, 2023a, 2023b) e NBR NM11-2 (ABNT, 2012). As resistências à compressão aos 1, 3 e 7 dias também estão dentro dos valores especificados pela norma NBR 7215 (ABNT, 2019). A distribuição das partículas e os diâmetros característicos estão presentes na Figura 19 e Tabela 8.

Figura 19. Curvas de distribuição granulométrica das partículas do cimento.



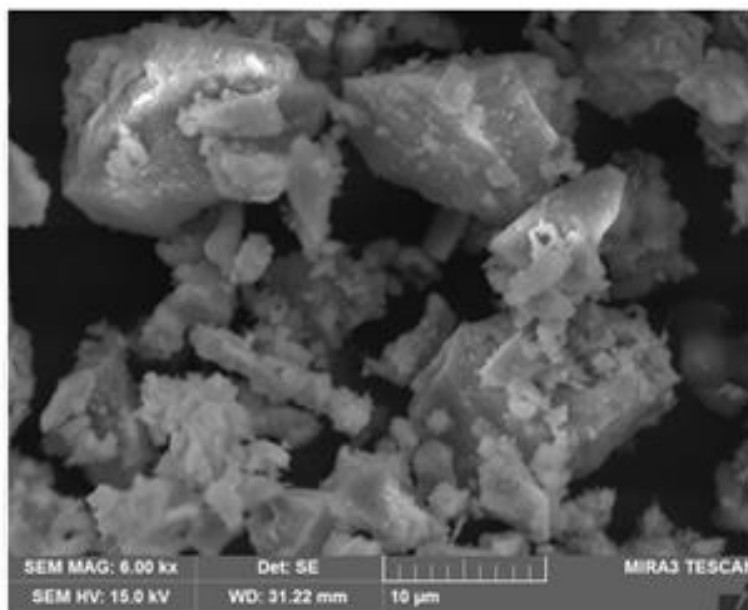
Fonte: O Autor (2023).

Tabela 8. Diâmetro característicos das partículas do CPV-ARI.

Material	D ₁₀ (μm)	D ₅₀ (μm)	D ₉₀ (μm)	D ₉₀ /D ₁₀	Área Superficial específica - S (m^2/kg)
Cimento CPV	2,2	10,5	30,4	14,7	1250

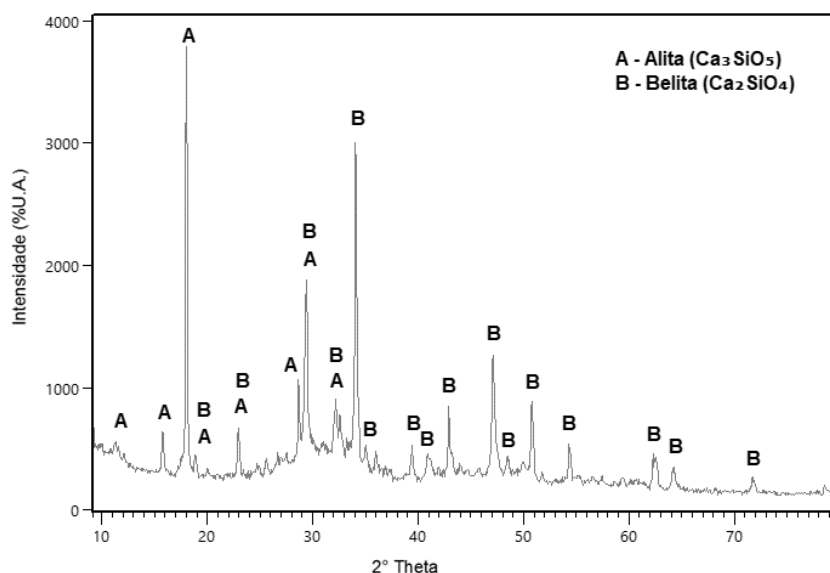
Fonte: O Autor (2023).

A microscopia eletrônica do cimento indica a predominância de partículas angulares e de tamanhos variados, conforme ilustrado na Figura 20.

Figura 20. Microscopia eletrônicas das partículas de cimento CPV-ARI obtidas com aumentos de 6000 x.

Fonte: O Autor (2023).

Além disso, o difratograma do cimento apresentou os picos característicos de alita e belita com intensidades variadas, conforme apresentado na Figura 21.

Figura 21. Difratogramas de raio X do cimento CPV-ARI.

Fonte: O Autor (2023).

3.2.2 Cal Hidratada

Para as análises da atividade pozolânica do pó reciclado híbrido foi utilizada uma cal hidratada comercializadas na região metropolitana de Recife. A Tabela 9 apresenta a composição química do material obtida através de ensaio de FRX.

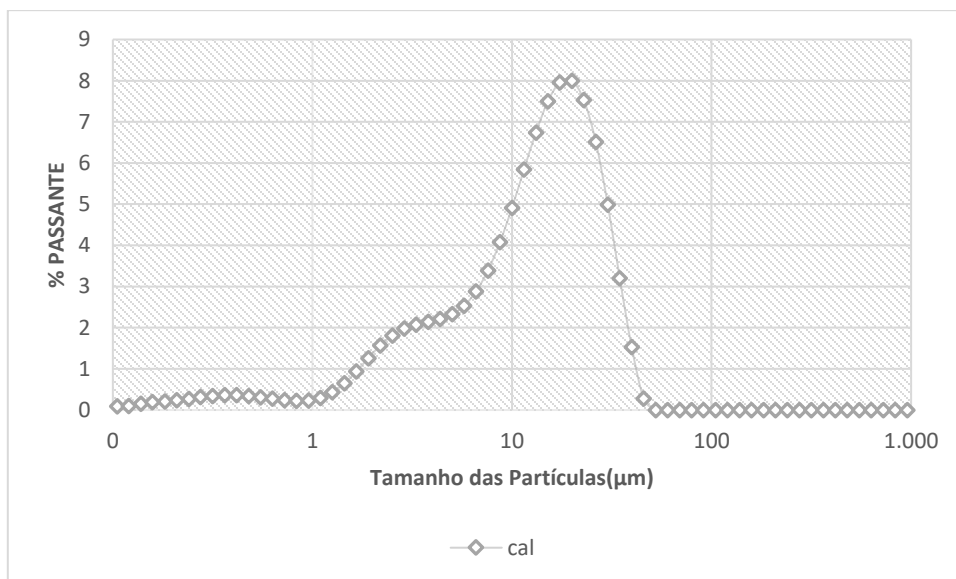
Tabela 9. Características químicas do Ca(OH)_2 .

Óxidos Constituintes	Ca(OH)_2
SiO_2	0,49
CaO	72,45
Al_2O_3	0,32
MgO	0,58
K_2O	0,05
Fe_2O_3	0,09
TiO_2	0,00
Perda ao Fogo (P.F)	25,76

Fonte: O Autor (2023).

A distribuição das partículas e os diâmetros característicos estão apresentados na Figura 22 e Tabela 10.

Figura 22. Curvas de distribuição granulométrica das partículas Ca(OH)_2 .



Fonte: O Autor (2023).

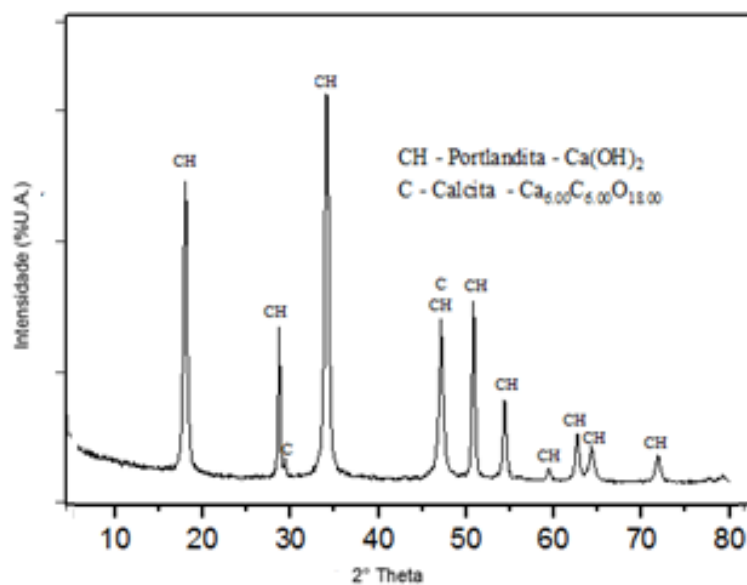
Tabela 10. Diâmetro característicos das partículas do Ca(OH)_2 .

Material	D ₁₀ (μm)	D ₅₀ (μm)	D ₉₀ (μm)	D ₉₀ /D ₁₀	Área Superficial específica - S (m ² /kg)
Ca(OH)₂	2,2	12,5	26,3	11,9	1820

Fonte: O Autor (2023).

O difratograma mostrou a predominância dos picos de Portlandita no hidróxido de cálcio. O CaO foi o óxido predominante na amostra de Ca(OH)_2 .

Figura 23. Difratomogramas de raio X da Ca(OH)_2 .



Fonte: O Autor (2023).

3.2.3 Pó Reciclado Híbrido (PRH)

O resíduo de construção e demolição utilizado na pesquisa trata-se de um subproduto gerado na produção dos agregados reciclados, essas partículas finas foram denominadas de pó reciclado híbrido (PRH), para a análise do material foi realizada a sua cominuição em um moinho de bolas das amostras “in natura” nos tempos de uma, duas, quatro e oito horas ,conforme explicado no item 3.2.3.4, a denominação dada as amostras foram PRHM1H, PRHM2H, PRHM4H e PRHM8H respectivamente.

Nesta etapa são apresentados os procedimentos para a obtenção e produção do PRH.

3.2.3.1 Obtenção do PRH

O material para essa pesquisa foi obtido na Ciclo Ambiental, empresa Pernambucana localizada no município de Camaragibe/PE, que opera no tratamento de resíduos da construção civil.

A empresa trabalha com a britagem para a produção de agregados reciclados (Figura 25a e Figura 25b) gerados a partir dos resíduos de construção e demolição da região metropolitana de Recife (Figura 24), porém esse processo gera uma grande quantidade de partículas finas (Figura 26) que costumam ser usadas como material de aterro, sendo estas o objeto desse estudo. O material para ser utilizado na pesquisa passou por todo o tratamento mostrado na Figura 29.

Figura 24. Pilha de resíduo da construção e demolição no aterro e britador utilizado para produção do agregado reciclado.



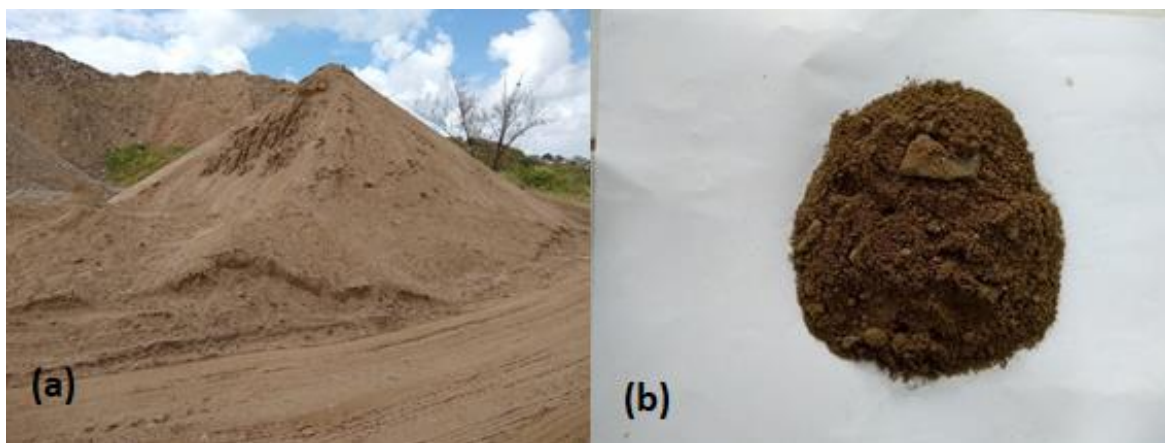
Fonte: O Autor (2023).

Figura 25. Agregado reciclado produzido.



Fonte: O Autor (2023).

Figura 26. Material fino resultante da britagem do RCD .



Fonte: O Autor (2023).

3.2.3.2 Definição do tamanho das partículas e moagem do PRH

O tamanho de partícula é um dos principais parâmetros restritivos para classificação de materiais fíleres, pois influenciam diretamente no refinamento dos poros do cimento e na relação água/ligante. Verificou-se que o tamanho médio dos materiais reciclados varia de 12 a 125 μm conforme os trabalhos mostrados na Tabela 11. Tomando como fundamento os valores encontrados nessas pesquisas e tendo em vista

estudar não apenas a influência das proporções de substituição do cimento pelo pó reciclado híbrido, mas também da finura desse material nas propriedades das matrizes cimentícias optou-se por realizar a cominuição do material em quatro intervalos de tempo: uma, duas, quatro e oito horas.

Tabela 11. Diâmetro médio de estudos com pó reciclado empregado em matrizes cimentícias.

Autor	Origem do pó	Tamanho médio (μm)
Sun (2017)	Concreto	14,38
Liu <i>et al.</i> (2014)	Tijolos de argila e concreto	< 45
Zhu (2016)	Tijolos de argila e cimento	31,4
Topic (2017)	Concreto	12
Serkan <i>et al.</i> (2017)	Materiais cerâmicos	< 125

Fonte: O Autor (2023).

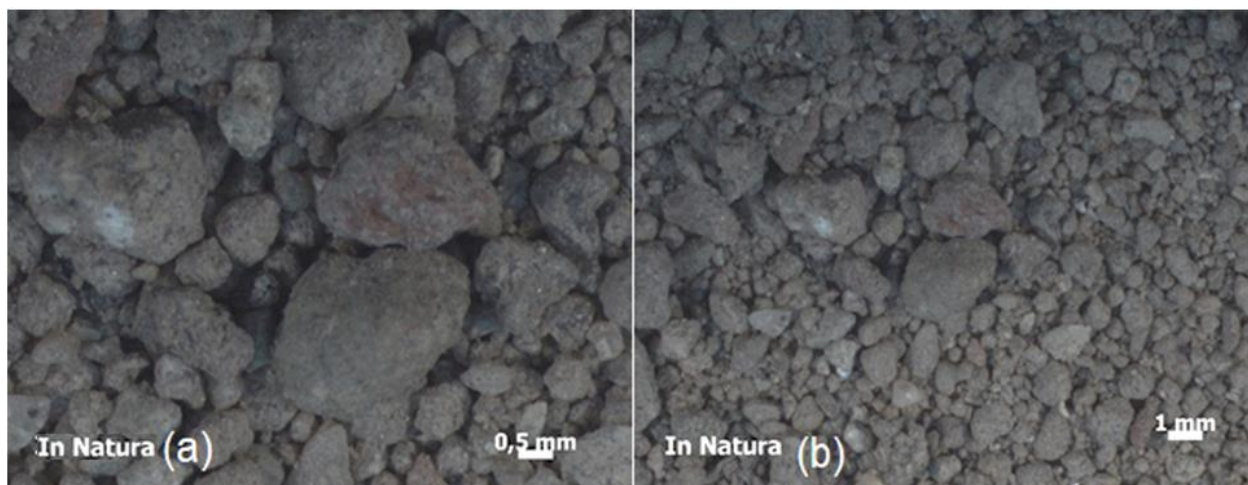
3.2.3.3 Coleta e limpeza do PRH

As partículas finas originadas do processo de britagem para a produção do agregado reciclado são separadas do agregado reciclado através do processo de aspiração. Esse material foi coletado e armazenado no laboratório em bombonas plásticas para evitar contaminação.

O beneficiamento do material foi realizado nas seguintes etapas:

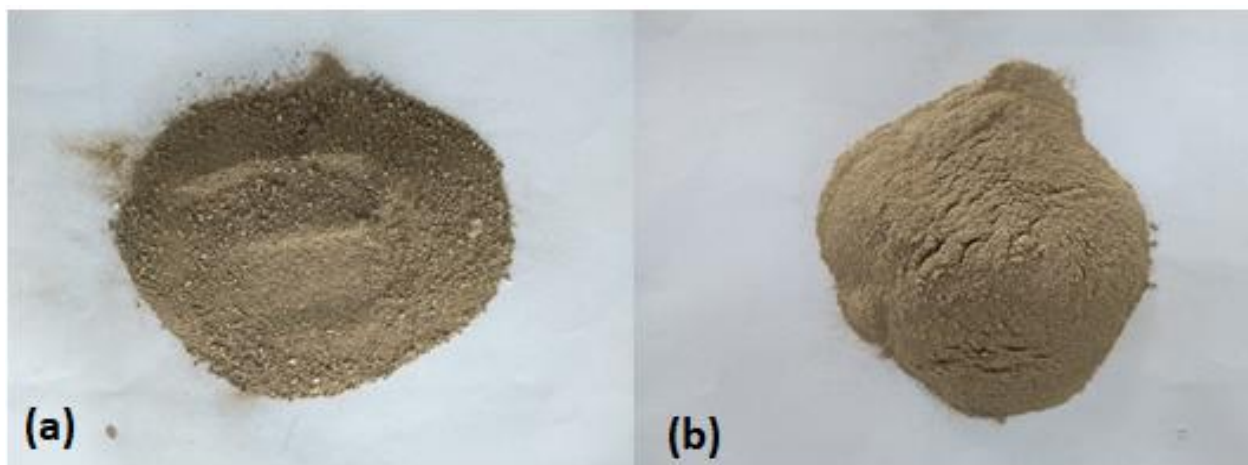
1. Secagem na estufa a uma temperatura de 100 ± 5 °C por 24 horas;
2. Peneiramento do material em peneira de malha 2,4 mm, para a retirada de impurezas como restos de madeira, plástico, folhas entre outros;
3. O material que ficou retido na peneira foi descartado;
4. O material passante da peneira de abertura de 2,4 mm foi submetido aos tratamentos descritos no item 3.2.3.4, essa amostra de PRH sem moagem foi chamada de “in natura” (Figuras 27 e 28).

Figura 27. Microscopia ótica do PRH “in natura”.



Fonte: O Autor (2023).

Figura 28. PRH “in natura” e moído por 1 hora.



Fonte: O Autor (2023).

3.2.3.4 Moagem do pó reciclado híbrido

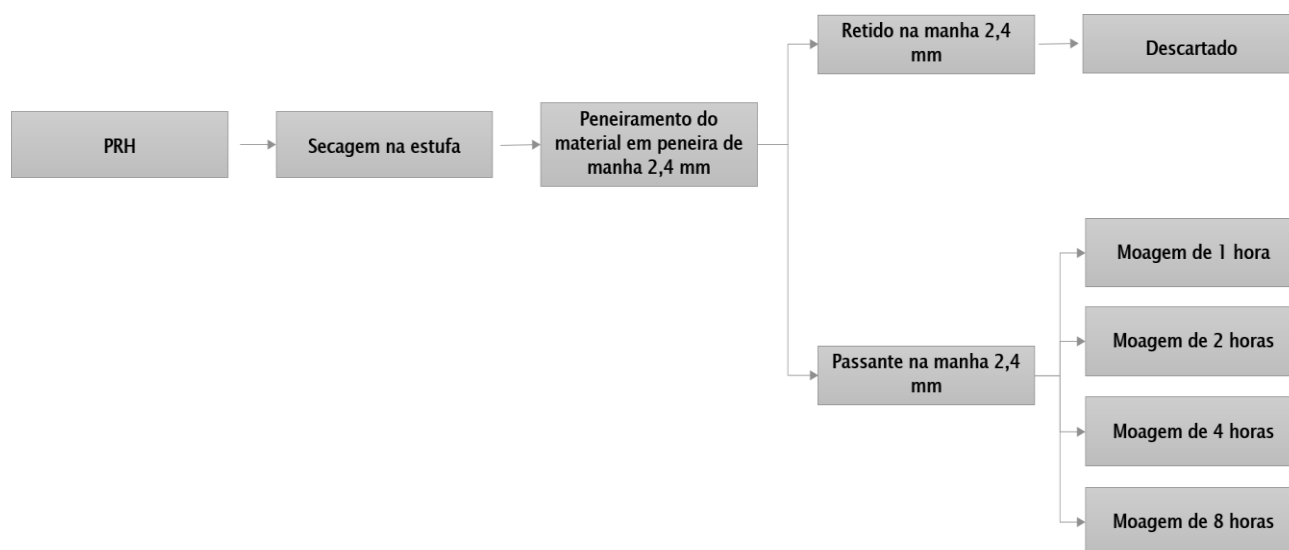
Para a moagem do material empregou-se um moinho rotativo de bolas. Nele foram inseridas cargas de bolas de alumina em três diâmetros distintos, correspondendo a uma massa aproximada de 7900 g, conforme apresentado na Tabela 12. A velocidade de rotação adotada foi de 50 rpm e a duração foi de uma, duas, três, quatro e oito horas. Cada processo de moagem utilizou 1,500 kg de PRH. O respectivo fluxograma de tratamento das amostras está representado na Figura 29.

Tabela 12 Características do moinho.

Corpos moedores				
Tipo	Diâmetro(mm)	Quantidade	Massa (g)	Total (g)
Esferas de alumina	10	294	2,1	617,4
	25	136	11,87	1614,32
	40	55	104,44	5744,2
Total (g)				7975,92

Fonte: O Autor (2023).

No fluxograma da figura 29 é possível verificar o tratamento recebido pelo pó reciclado obtido para a sua utilização na pesquisa.

Figura 29. Fluxograma do tratamento das amostras.

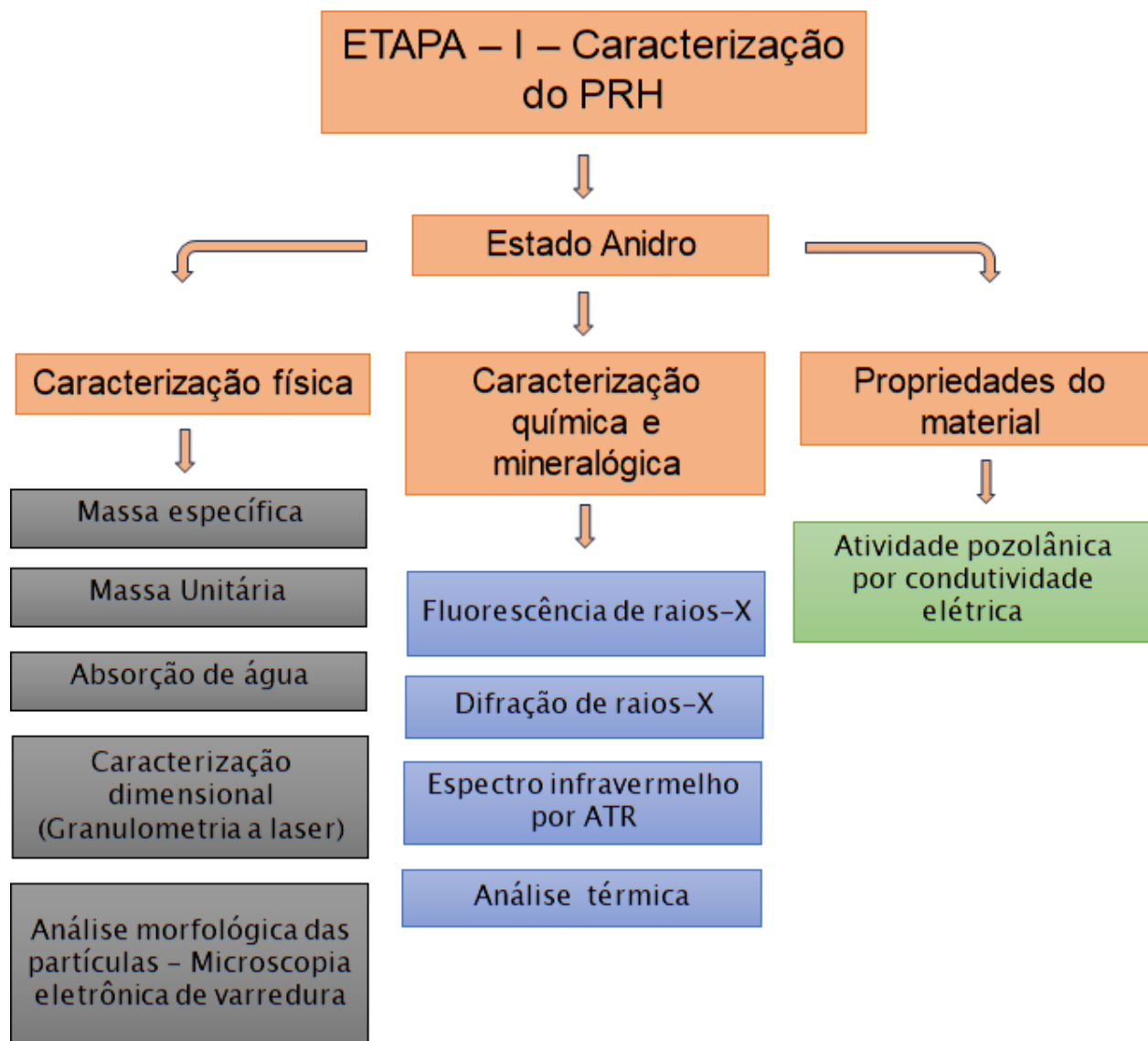
Fonte: O Autor (2023).

3.3 MÉTODOS UTILIZADOS

Nesta etapa apresenta-se os procedimentos utilizados para as análises do pó reciclado híbrido no estado anidro e das pastas de cimento no estado fresco e endurecido. Foram realizados os ensaios físico-químicos com o propósito de investigar as características químicas, mineralógicas, reológicas, mecânicas e microestruturais das pastas estudadas.

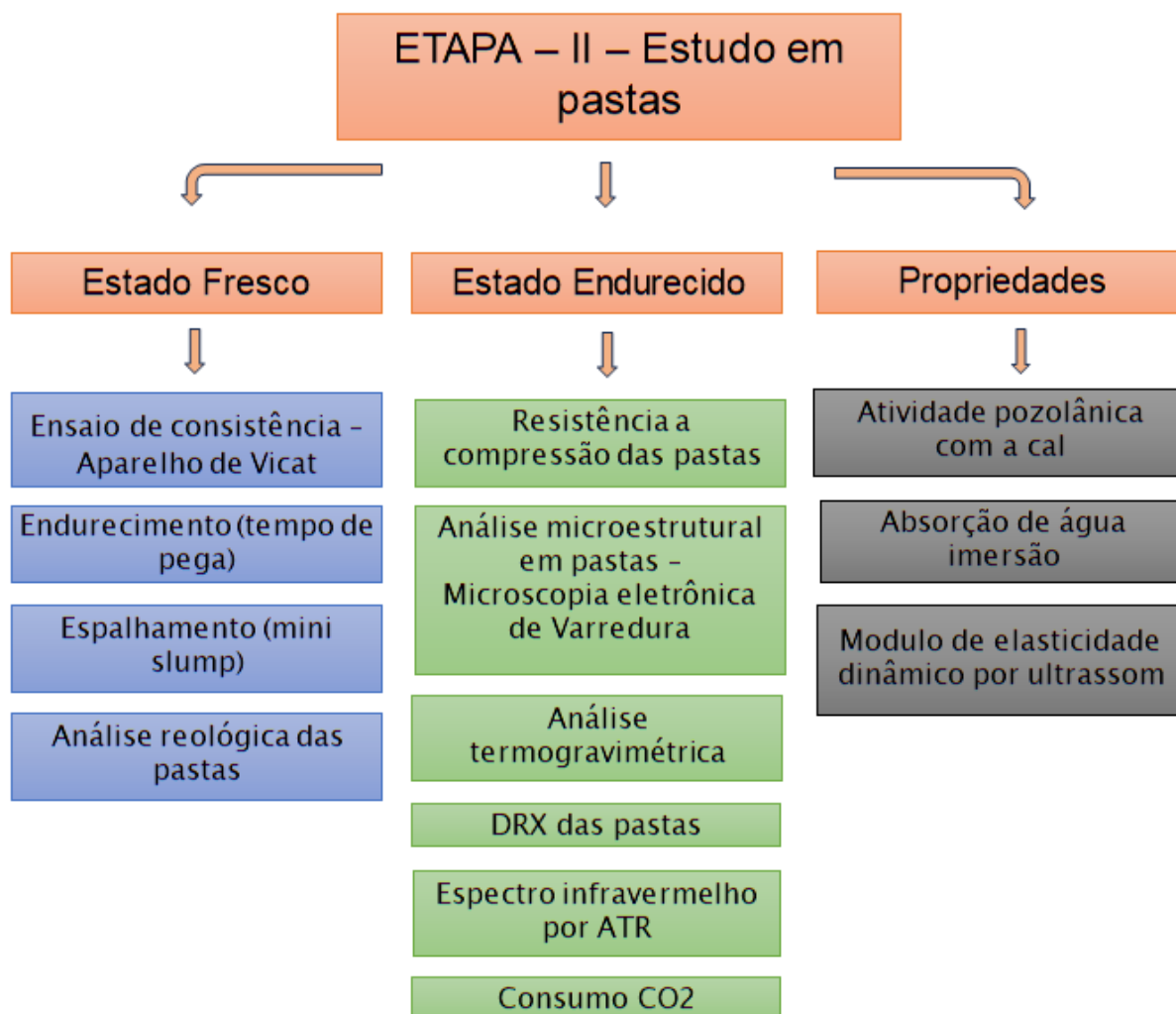
Os fluxogramas apresentados nas Figuras 30 e 31 mostram as etapas do procedimento experimental utilizado neste estudo.

Figura 30. Fluxograma dos ensaios realizados na etapa-I.



Fonte: O Autor (2023).

Figura 31. Fluxograma dos ensaios realizados na etapa-II.



Fonte: O Autor (2023).

3.3.1 Conversão dos traços de massa para volume

Para esse estudo, optou-se em fazer a substituição do cimento pelo PRH em volume, a vantagem desse tipo de substituição é a possibilidade de manter a proporção relativa entre os diferentes componentes da mistura, compensando assim as variações de densidades dos materiais. Para obtenção do traço em volume das pastas estudadas, faz-se necessário a utilização da massa específica das matérias-primas, determinadas

conforme descrito no item 3.3.2.1. Para a conversão dos traços em volume foi utilizada a Equação 01.

Equação 1. Conversão massa/volume.

- (I) 10% de substituição: $0,9 C + 0,1 (\gamma_{matcim} / \gamma_{matprh}) PRH$
- (II) 20% de substituição: $0,8 C + 0,2 (\gamma_{matcim} / \gamma_{matprh}) PRH$
- (III) 30% de substituição: $0,7 C + 0,3 (\gamma_{matcim} / \gamma_{matprh}) PRH$

Onde:

C = Massa do cimento; PRH = massa do pó reciclado híbrido; γ_{matcim} = massa específica do cimento e γ_{matprh} = massa específica do pó reciclado híbrido.

As massas das matérias usadas nas misturas das pastas são apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13. Massa específica do cimento e do PRH.

Material	Massas específica - γ_{mat} (g/cm ³)
PRH	2,57
Cimento	3,07

Fonte: O Autor (2023).

3.3.2 ENSAIOS NO ESTADO ANIDRO (CARACTERIZAÇÃO DO PRH)

A caracterização das amostras do pó reciclado híbrido foi realizada por meio dos seguintes ensaios: fluorescência de raios-X (FRX), massa específica, massa unitária, absorção de água, granulometria, difração de raios-X (DRX), microscopia óptica (MO), índice de atividade pozolânica (IAP) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) com espectroscopia de dispersão de energia (EDS) e infravermelho conforme mostrada na Figura 31.

3.3.2.1 Massa Específica (NMR NR 16605:2017) - caracterização física do PRH

A massa específica é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, excluindo os poros permeáveis. A análise das amostras do PRH foi realizada no LTM (Laboratório Integrado de Tecnologia Mineral) da UFPE segundo os princípios da NMR NR 16605:2017 (Determinação da massa específica utilizando o frasco de Le Chatelier), onde o frasco é preenchido por um líquido que não reage quimicamente com o PRH até que a marca fique entre 0 e 1 cm³, depois é acrescentado o material até a marca ficar entre 18 e 24 cm³ (ABNT, 2017).

Para determinação da massa específica do material, utilizou-se a Equação 02. Foram realizadas 3 repetições para cada material.

Equação 02. Massa específica.

$$D = (M) / (V_f - V_i)$$

Onde:

D = massa do material (g/cm³); M = massa da quantidade do material em g; V_f = volume final e V_i = volume inicial.

3.3.2.2 Massa Unitária (NMR 16972:2021) - caracterização física do PRH

A análise das amostras do PRH foi realizada no LTM (Laboratório Integrado de Tecnologia Mineral) da UFPE segundo os princípios da NMR 16972:2021 (Agregados - determinação da massa unitária e do volume de vazios), onde foi utilizando um recipiente nas dimensões de 22 x 22 x 26,8 cm e peso de 1240 g (ABNT, 2021c). Foi realizada 3 repetições para cada tipo de material. Para determinação da massa unitária utilizou-se a Equação 03.

Equação 03. Massa Unitária.

$$\gamma_{mat} = (m_t - m_{rec}) / V_{rec}$$

Onde:

γ_{mat} = massa unitária do material (g/cm^3); m_t = massa total do recipiente + material (g); m_{rec} = massa do recipiente vazio (g); e V_{rec} = volume do recipiente, que já é conhecido (cm^3).

3.3.2.3 Absorção de água (NMR 16916:2021) - caracterização física do PRH

A absorção de água foi determinada segundo a NMR 16916:2021 (Agregado miúdo - Determinação da absorção de água), onde a absorção é calculada através da Equação 04 (ABNT, 2021b). Foram realizadas 3 repetições para cada material, as análises foram realizadas no LTM (Laboratório Integrado de Tecnologia Mineral) da UFPE.

Equação 04. Absorção de água.

$$A = ((M_s - M) / M) \times 100$$

Onde:

A = absorção de água (%); M_s = massa ao ar da amostra na condição saturado e de superfície seca (g); e M = massa da amostra seca após 24 horas em estufa (g).

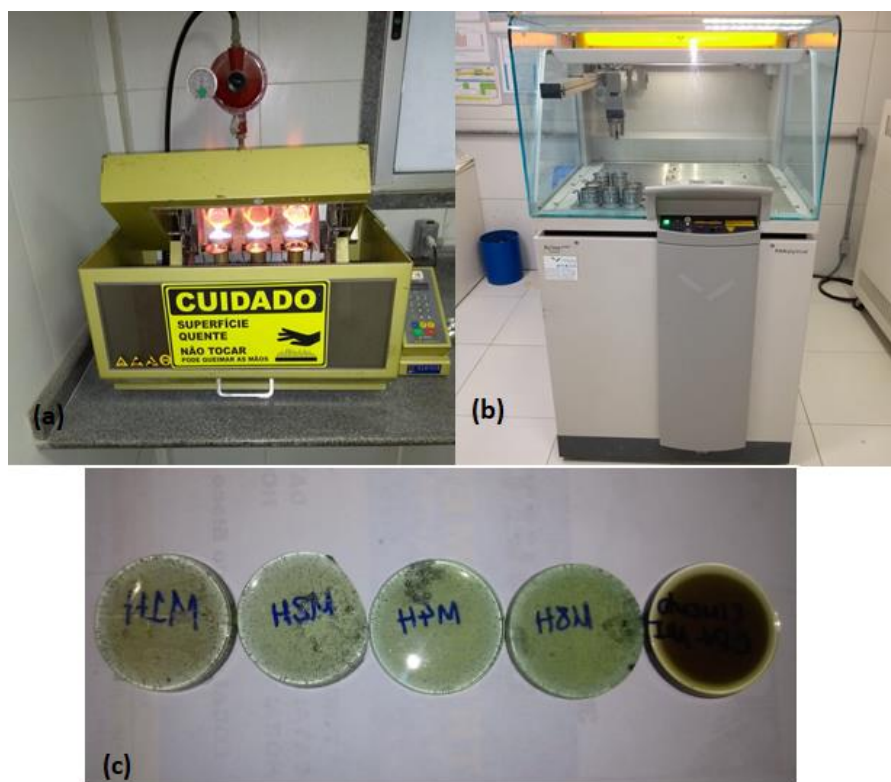
3.3.2.4 Caracterização Dimensional (granulometria a laser) - caracterização física do PRH

A distribuição granulométrica das amostras de PRH foi determinada pelo ensaio de granulometria a laser. Foi utilizado o analisador de partículas mastersize 2000 com capacidade de análise de partículas entre $0.01\mu\text{m}$ e $2000\mu\text{m}$ do LTM (Laboratório Integrado de Tecnologia Mineral) da UFPE. Nessa técnica um feixe de laser é disparado sobre a amostra dispersa (índice de refração das partículas = 1.680), e o tamanho das partículas é determinado pela variação angular dos raios. Para esta análise a dispersão das partículas foi feita por via úmida, utilizando água destilada como dispersante.

3.3.2.5 Fluorescência de Raios-X (FRX) - caracterização química do PRH

Para determinar a composição química das amostras do PRH foi realizado o ensaio de fluorescência de raios-X (FRX). Através deste ensaio é possível quantificar na forma de proporções os elementos que compõem as amostras analisadas. O princípio de funcionamento desta técnica se baseia na aplicação de uma fonte de radiação de elevada energia, na qual possibilita a entrada de fótons de raios-X que atingem os elétrons e os retiram da camada atômica de menor energia fazendo com que essa camada seja preenchida por elétrons de maior energia. Através deste processo ocorre liberação de energia desprendida na forma de fótons de raios X, pelo comprimento da onda ou energia da radiação emitida é possível quantificar os elementos presentes na amostra. Para a análise as amostras foram secadas em uma estufa a 100 ± 5 °C por 24 horas, depois de seca, uma parcela da amostra foi retirada e derretida em cápsulas de platina (Figura 32(a)) formando pastilhas conforme mostrado na Figura 32 (c).

Figura 32. Pastilhas para o ensaio FRX (a) no processo de derretimento em cápsulas de platina, (b) espectrofotômetro de Raios-X e (c) formação das pastilhas.



Fonte: O Autor (2023).

As análises das pastilhas foram realizadas no laboratório de pesquisas da fábrica da Elizabeth em um espectrômetro de fluorescência de raios-X (Figura 32(b)) Rigaku modelo ZSX Primus II, equipado com tubo de Rh e 7 cristais analisadores.

3.3.2.6 Difração de Raios-x (DRX) - caracterização mineralógica do PRH

Através desta técnica é possível caracterizar a estrutura cristalina dos materiais e identificar os minerais existentes em sua composição. Os ensaios das amostras foram realizados no LATEP (Laboratório de Perfil Técnico) da UFPE. Essa técnica se utiliza do fenômeno de espalhamento da radiação eletromagnética, provocada pela interação entre o feixe de raio-X incidente e os elétrons dos átomos componentes de um material. Essa análise se utiliza da lei de Bragg (1913), descrita na Equação 05.

Equação 05. Lei de Bragg.

$$n\lambda = 2 d \sin (\theta)$$

Onde:

λ = comprimento de onda da radiação; d = distância entre os planos atômicos; θ = orientação desses planos em relação ao feixe; e θ = ângulo de Bragg e n = ordem de difração.

Nessa técnica a radiação incide em uma amostra onde são medidos os fótons que são difratados, o equipamento utilizado é o difratômetro que mostra o resultado em forma de um registro gráfico dos sinais que as reflexões originam em detectores eletrônicos de radiação

As amostras selecionadas foram pulverizadas até atingir a dimensões adequadas para a análise da DRX ($< 75 \mu\text{m}$). As análises de difração de raios X (DRX) foram realizadas pelo método do pó no equipamento Bruker D2 PHASER, operando com voltagem de 30 kV e corrente de 10 mA ($P = 300 \text{ W}$), radiação $\text{Cu-K}\alpha = 1,54060 \text{ \AA}$ e utilizando o detector Bruker-AXS-Lynxeye. A faixa de varredura (2θ) foi de 5 a 80° , com passo do goniômetro de $0,02019^\circ$, tempo de contagem por passo de 1,0 s e fenda primária com abertura de 0,2 mm. Foi utilizado um anteparo de 1 mm e rotação constante

da amostra de 10 rpm. Os difratogramas foram indexados usando o programa HighScore Plus e banco de dados COD (REV 2021 466505).

3.3.2.7 Avaliação da atividade pozolânica por condutividade elétrica (Payá modificado)

A atividade pozolânica foi determinada através do método de Payá *et al.* (2001), pela perda de condutividade elétrica de uma solução de hidróxido de cálcio, porém nesta pesquisa foi utilizada a versão modificada desse método, no procedimento desenvolvido por Bastos (2018), onde a condutividade elétrica da mistura é monitorada por 1000 segundos.

Para essa análise, foi utilizado um béquer de vidro de 250 mL de volume com uma rolha de borracha com 3 furos (para a célula de condutividade, o termômetro controlador da temperatura do prato, e o tubo para inserção da amostra) e um agitador magnético, que permite o ajuste da temperatura do prato base e da taxa de agitação. Os dados das medições foram adquiridos e armazenados num Raspberry Pi conectado ao condutivímetro.

Seguindo as orientações de Payá *et al.* (2001), foi preparada uma solução insaturada de hidróxido de cálcio com 800 mg de Ca(OH)_2 por litro de água deionizada (800 mg L^{-1}), a qual foi aquecida até a temperatura de $60 \pm 1^\circ\text{C}$. Após a preparação da mistura foram adicionadas 4 g de PRH na solução e coletadas as medidas de condutividade elétrica em mS/cm obtendo assim as curvas de variação da condutividade e da perda de condutividade com o tempo. A porcentagem de perda de condutividade para um determinado tempo (%PC) t é determinada pela Equação 06.

Equação 06. Perda de condutividade.

$$(\%PC)_t = ((Co - (C_{poza})_t) / Co) \times 100$$

Onde:

$(\%PC)_t$ = perda de condutividade para um determinado tempo; Co = diferença da condutividade inicial; e $(C_{poza})_t$ = condutividade final absoluta.

3.3.2.8 Análise morfológica das partículas - (MEV) do PRH no estado anidro

Através desta técnica é possível realizar a análise da morfologia das partículas. No MEV um feixe de elétrons é incidido sobre a amostra promovendo interações físicas, as quais podem resultar no espalhamento dos elétrons. Durante o espalhamento ocorre a perda da energia cinética dos elétrons para os átomos da amostra, por meio dos elétrons é possível obter imagens da topografia da amostra. Também é possível equipar o MEV com um EDS e realizar a análise química da região da amostra estudada.

Para a análise morfológica das partículas as amostras do PRHM1H e do PRHM8H, as amostras foram colocadas em uma fita de carbono e cobertas com grafite, as leituras foram realizadas em um MEV *JEOL JSM 6460* Scanning Electron Microscope com Oxford INCA Energy EDS em condições de tensão de aceleração variando de 15 a 30 kV. Todas as análises foram realizadas no LDN (Laboratório de Dispositivos e Nanoestruturas) da UFPE.

3.3.2.9 Análise Térmica (TG) do PRH no estado anidro

A técnica analisa a variação de massa (perda ou ganho) de uma substância em função da temperatura, enquanto a substância é submetida a uma programação controlada de alteração da temperatura.

Para a realização da Análise Térmica Diferencial e Termogravimetria, as amostras foram submetidas a uma taxa de aquecimento de 10°C por minuto até atingirem os 1050°C, sob atmosfera de nitrogênio, cada amostra tinha em torno de 20 a 40 miligramas. Os ensaios das amostras foram realizados no LTM (Laboratório Integrado de Tecnologia Mineral) da UFPE.

3.3.3 Estudo em pastas

3.3.3.1 Ensaio de consistência, aparelho de Vicat (ABNT NBR 16606:2018) – (Estado fresco)

Esse ensaio é realizado para determinar a quantidade de água necessária para atingir uma consistência específica nas pastas de cimento, o que está diretamente

relacionado às propriedades do material após o endurecimento. O seu resultando é importante para determinar o teor de água utilizado no ensaio de endurecimento descrito no item 3.3.3.2.

O ensaio foi realizado no laboratório de construção civil no CTG (Centro de Tecnologia e Geociências) da UFPE com uma amostra de 500g das misturas seguindo as normas da ABNT NBR 16606:2018 (ABNT, 2018a). Inicialmente foi determinada a quantidade de água de consistência normal para a amostra de referência que continha apenas cimento Portland CP-V ARI. A pasta é considerada como tendo consistência normal quando a sonda do aparelho de Vicat estiver a uma distância de 6 ± 1 mm da placa de vidro situada na base, após 30s a partir do momento que foi lançada.

A quantidade de água para atingir a consistência normal da pasta padrão foi de 137,5 mL para a massa ensaiada, obtendo a relação água/ligante igual a 0,275. Uma vez que a consistência normal do cimento foi determinada, o valor da água encontrado foi utilizado para o ensaio com a substituição parcial do cimento pelo PRHM1H nas quantidades de 10, 20 e 30% de substituição. Após essa etapa foi fixado o teor de substituição e variou o tamanho do material e então foi verificada como a substituição parcial do cimento pelo PRH pode influenciar na variação da consistência em relação à amostra de referência. A Tabela 14 mostra a composição das pastas utilizadas no ensaio de consistência.

Tabela 14. Composição das pastas utilizadas no ensaio de consistência.

Pasta	Cimento CPV (%)	PRH M1H (%)	PRH M2H (%)	PRH M4H (%)	PRH M8H (%)	Relação água/ligante
Ref.	100	-	-	-	-	0,275
PRHM1H10	90	10	-	-	-	0,275
PRHM1H20	80	20	-	-	-	0,275
PRHM1H30	70	30	-	-	-	0,275
PRHM2H20	80	-	20	-	-	0,275
PRHM4H20	80	-	-	20	-	0,275
PRHM8H20	80	-	-	-	20	0,275

Fonte: O Autor (2023).

3.3.3.2 Enrijecimento (ABNT NBR 16607:2018) – (Estado fresco)

Utilizados as mesmas proporções de substituição do cimento pelo PRH e teores de água do ensaio de consistência (3.3.3.1), foram realizadas no laboratório de construção civil no CTG (Centro de Tecnologia e Geociências) da UFPE misturas para o ensaio de tempo de pega das amostras, a fim de analisar o gradativo endurecimento da massa da mistura.

Esse ensaio possibilita acompanhar como a resistência das pastas de cimento evolui em suas fases iniciais, o que é fundamental para compreender como o PRH influencia no comportamento das misturas e no desenvolvimento do processo de endurecimento. O procedimento utilizado no ensaio foi aquele descrito na norma ABNT NBR 16607:2018 (ABNT, 2018b).

3.3.3.3 Espalhamento (Mini Slump) – (Estado fresco)

O minislump foi utilizado para determinar o espalhamento das misturas. Ele é importante para verificar influência do PRH na fluidez das pastas de cimento, servindo como um indicador de trabalhabilidade, além de ajudar a determinar a quantidade adequada de água a ser adicionada à mistura a fim de obter um espalhamento adequado sem que haja problemas de segregação ou exsudação nas pastas.

O método de mini abatimento foi desenvolvido por Kantro (1980) para a determinação da consistência de pastas de cimento, esse método é composto por um molde troncocônico em acrílico e uma placa de vidro e tem como resultado a média aritmética de duas medidas perpendiculares do diâmetro da abertura das pastas na superfície horizontal plana do vidro.

As proporções de substituição do cimento pelo PRH estão presentes na Tabela 12 e a relação água/ligante foi de 0,4, 0,5 e 0,6. A Tabela 15 mostra a composição das pastas utilizadas no ensaio de espalhamento. O ensaio foi realizado no laboratório de construção civil no CTG (Centro de Tecnologia e Geociências) da UFPE.

Tabela 15. Composição das pastas utilizadas no espalhamento.

Pasta	Cimento CPV(%)	PRH M1H (%)	PRH M2H (%)	PRH M4H (%)	PRH M8H (%)	Relação água/ ligante
Ref.	100	-	-	-	-	0,4
Ref.	100	-	-	-	-	0,5
Ref.	100	-	-	-	-	0,6
PRHM1H10	90	10	-	-	-	0,4
PRHM1H10	90	10	-	-	-	0,5
PRHM1H10	90	10	-	-	-	0,6
PRHM1H20	80	20	-	-	-	0,4
PRHM1H20	80	20	-	-	-	0,5
PRHM1H20	80	20	-	-	-	0,6
PRHM1H30	70	30	-	-	-	0,4
PRHM1H30	70	30	-	-	-	0,5
PRHM1H30	70	30	-	-	-	0,6
PRHM2H20	80	-	20	-	-	0,4
PRHM2H20	80	-	20	-	-	0,5
PRHM2H20	80	-	20	-	-	0,6
PRHM4H20	80	-	-	20	-	0,4
PRHM4H20	80	-	-	20	-	0,5
PRHM4H20	80	-	-	20	-	0,6
PRHM8H20	80	-	-	-	20	0,4
PRHM8H20	80	-	-	-	20	0,5
PRHM8H20	80	-	-	-	20	0,6

Fonte: O Autor (2023).

3.3.3.4 Análise reológica das pastas – (Estado fresco)

Os testes reológicos foram realizados com a utilização do reômetro Brookfield modelo DV-III do LTM (Laboratório integrado de tecnologia mineral) da UFPE, capaz de medir a tensão de cisalhamento e a viscosidade em função da taxa de cisalhamento de um determinado fluido em fluxo. Antes de realizar a mistura foi feito um ajuste na relação água/ligante a fim de obter uma melhor leitura do aparelho, já que ele teria dificuldades

de leitura para amostras muito secas ou muito fluidas. As relações água/ligante definidas para essa pesquisa foram de 0,4 e 0,6.

As pastas produzidas utilizaram as mesmas proporções de mistura mostradas na Tabela 10, para uma massa de 50 g, utilizando as relações água/ligante igual a 0,4 e 0,6, realizando as substituições em volume nas proporções de 10, 20 e 30%. A mistura do material foi realizada através de agitação mecânica à 150 rpm durante o período de um minuto e 30 segundos e então a amostra era mantida em descanso por mais um minuto antes de se realizar a leitura. Para a leitura foi utilizado o spindle 31 (em formato cilíndrico) que se mostrou mais adequado para a leitura tendo em vista o tamanho do recipiente e quantidade de amostra analisada.

Por fim foi obtido através da leitura dados como viscosidade, taxa e tensão de cisalhamento, a partir dos quais foram gerados os gráficos de viscosidade x tensão de cisalhamento. A Tabela 16 mostra a composição das pastas utilizadas no ensaio de reologia.

Tabela 16. Composição das pastas utilizadas na análise reológica.

Pasta	Cimento CPV (%)	PRH M1H (%)	PRH M2H (%)	PRH M4H (%)	PRH M8H (%)	Relação água/ ligante
Ref.	100	-	-	-	-	0,4
Ref.	100	-	-	-	-	0,6
PRHM1H10	90	10	-	-	-	0,4
PRHM1H10	90	10				0,6
PRHM1H20	80	20	-	-	-	0,4
PRHM1H20	80	20				0,6
PRHM1H30	70	30				0,4
PRHM1H30	70	30				0,6
PRHM2H20	80	-	20	-	-	0,4
PRHM2H20	80	-	20	-	-	0,6
PRHM4H20	80	-	-	20	-	0,4
PRHM4H20	80	-	-	20	-	0,6
PRHM8H20	80	-	-	-	20	0,4
PRHM8H20	80	-	-	-	20	0,6

Fonte: O Autor (2023).

3.3.3.5 Resistência à compressão das pastas (ABNT NBR 7215/2019) – (Estado endurecido)

Com a finalidade de estudar o impacto causado pela substituição parcial do cimento pelo PRH na resistência das misturas foram moldadas as amostras apresentadas na Tabela 17, segundo a norma NBR 7215/2019 (ABNT, 2019).

A Preparação dos corpos de prova foi feita conforme estabelece a NBR 7215/2019, onde o cimento foi misturado com a água, durante o período de um minuto, depois a pasta permaneceu em repouso por dois minutos, para em seguida se iniciar a mistura durante aproximadamente dois minutos (ABNT, 2019). Ao término desse tempo a pasta foi transferida para os corpos de prova cilíndricos de 50 x 100 mm.

Para cada mistura foram moldados dez corpos de prova. Logo após a moldagem os corpos de prova eram colocados em uma mesa vibratória por 300 segundos. Após 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e em seguida, as amostras foram transferidas para a cura úmida em reservatório de água onde permaneceram durante 56 dias. Após esse período foi realizado o ensaio de resistência à compressão. A tabela 17 mostra a composição das pastas utilizadas no ensaio de espalhamento.

Tabela 17. Composição das pastas utilizadas no ensaio de resistência.

Pasta	Cimento CPV (%)	PRH M1H (%)	PRH M2H (%)	PRH M4H (%)	PRH M8H (%)	Relação água/ ligante
Ref.	100	-	-	-	-	0,4
PRHM1H10	90	10				0,4
PRHM1H20	80	20				0,4
PRHM1H30	70	30				0,4
PRHM2H10	90	-	10	-	-	0,4
PRHM2H20	80		20			0,4
PRHM2H30	70		30			0,4
PRHM4H10	90	-	-	10	-	0,4
PRHM4H20	80			20		0,4
PRHM4H30	70			30		0,4
PRHM8H10	90	-	-	-	10	0,4
PRHM8H20	80				20	0,4
PRHM8H30	70				30	0,4

Fonte: O Autor (2023).

3.3.3.6 Análise microestrutural das pastas (MEV) – (Estado endurecido)

A análise microestrutural das pastas de cimento por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é uma ferramenta valiosa para compreender as características internas e a composição das pastas em uma escala microscópica. Essa técnica oferece informações sobre a organização dos componentes da pasta de cimento e suas interações, melhora a compreensão dos processos de Hidratação, ou seja, como os compostos presentes no cimento reagem com a água para formar produtos de hidratação além de ser uma ferramenta eficaz para investigar a porosidade das pastas de cimento

As amostras de cimento e PRH foram moldadas em CPs de 5 x 5 cm, então com o auxílio de um disco de serra foi retirada uma amostra de 1 x 1 cm do centro dos CPs. Aos 28 dias a fim de parar a hidratação do cimento, as amostras foram colocadas em acetona e posteriormente liofilizadas, e então deixadas em um dessecador até a data em que foram colocadas dentro da resina. As superfícies das amostras foram lixadas e polidas com pastas diamantadas até estarem lisas e então foram colocadas em uma fita de carbono, as leituras foram realizadas no mesmo aparelho utilizado na análise morfológica das partículas de PRH.

3.3.3.7 Análise termogravimétrica das pastas – (Estado endurecido)

A análise termogravimétrica das pastas de cimento é uma técnica importante para estudar a composição e o comportamento térmico desses materiais. Ela envolve a medição das mudanças de massa de uma amostra à medida que é aquecida sob condições controladas. Ela é especialmente útil na caracterização das pastas de cimento devido à necessidade de identificar as temperaturas em que ocorrem decomposições ou reações químicas nos componentes da pasta de cimento. Isso pode fornecer informações sobre a estabilidade térmica dos produtos de hidratação e outros compostos presentes. Para essa análise, foi realizado o corte dos CPs aos 28 dias e então foi selecionada uma parte no interior das amostras para análise termogravimétrica, o material foi cominuído até atingir um diâmetro inferior a 75 μm . As amostras foram aquecidas a uma taxa de aquecimento de 10°C por minuto até atingirem os 1050°C, sob atmosfera de nitrogênio,

cada amostra tinha em torno de 20 a 40 miligramas. Os ensaios das amostras foram realizados no LTM (Laboratório Integrado de Tecnologia Mineral) da UFPE.

3.3.3.8 DRX das pastas – (Estado endurecido)

A análise de Difração de Raios-X (DRX) das pastas de cimento é uma técnica crucial para a caracterização e compreensão das estruturas cristalinas presentes nesses materiais. Através dele é possível identificar e caracterizar as fases cristalinas presentes nas pastas de cimento. Ela permite determinar quais compostos cristalinos estão formados após a hidratação do cimento e como essas fases contribuem para as propriedades finais do material.

Para essa análise, foi realizado o corte dos CPs aos 28 dias e então foi selecionada uma parte no interior das amostras para análise do DRX, o material foi cominuído com o uso de um pistilo até atingir um diâmetro inferior a 75 μm . O equipamento utilizado na análise foi o Difratorômetro de Raios-X Bruker D2 PHASER. Os parâmetros de entrada utilizados nos ensaios foram:

Tipo de análise: θ -2 θ ; Varredura (em $^\circ$) - 5° até 80° (2 θ); Tempo (em segundos) - 1 s; Incremento (em $^\circ$) - $0,02^\circ$. Os difratogramas foram indexados usando o programa HighScore Plus e banco de dados COD (REV 2021 466505). Os ensaios das amostras foram realizados no LATEP (Laboratório de Perfil Técnico) da UFPE.

3.3.3.9 Infravermelho das pastas – (Estado endurecido)

A espectrometria de infravermelho foi utilizada para a identificação dos materiais constituintes do PRH. O método utilizado na análise foi por espectroscopia de refletância total atenuada (ATR) onde a amostra é posicionada em cima de um cristal com alto índice de refração (entre 2,38 e 4,01 a 2000 cm^{-1}).

O equipamento produz uma radiação que passa através do cristal em direção a amostra e é refletida em sua superfície interna, assim o feixe penetra na camada superficial da amostra e sofre perda de energia naquele comprimento de onda. Para essa análise, foi realizado o corte dos CPs aos 28 dias e então foi selecionada uma parte no interior das amostras para análise de por espectroscopia de refletância total atenuada

(ATR), o material foi cominuído até atingir um diâmetro inferior a 75 μm . Os ensaios das amostras foram realizados no LTM (Laboratório Integrado de Tecnologia Mineral) da UFPE.

3.3.3.10 Índice de atividade pozolânica da cal (ABNT NBR 5751:2015)

A atividade pozolânica das amostras foi realizada através do ensaio de índice de atividade pozolânica com a cal. Os ensaios de IAP foram realizados no Departamento de Tecnologia e Geociências da Universidade (CTG) da UFPE.

O IAP com a cal foi determinado de acordo com as especificações da NBR 5751:2015 - Materiais pozolânicos: determinação da atividade pozolânica com a cal aos sete dias (ABNT, 2015). Foram utilizados os seguintes materiais: hidróxido de cálcio, areia, água deionizada e as amostras de PRH. As quantidades utilizadas foram de 104 g de hidróxido de cálcio, o PRH relativo ao dobro do volume do hidróxido de cálcio e 04 frações de areia normal referente a 234 g. A quantidade de água foi o necessário para manter o índice de consistência de 225 ± 5 mm. Foram moldados três corpos de prova cilíndricos de dimensões 50 mm x 100 mm por traço. Nas primeiras 24 horas os corpos de prova foram mantidos à temperatura de 23 ± 2 °C. Nas 144 horas posteriores, foram mantidos em estufa à temperatura de 55 °C. Após esse período foi realizado o ensaio de resistência à compressão das amostras.

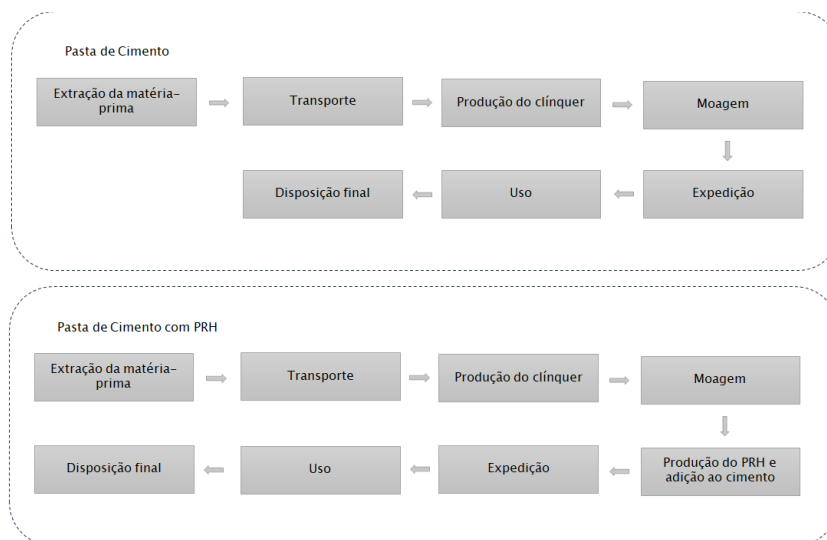
3.3.3.11 Consumo de CO₂

A avaliação do ciclo de vida por meio do consumo de CO₂ das pastas de cimento e das pastas com substituição parcial por PRH foi realizada com o uso do *software* openLCA versão 1.10.3 e utilizou o banco de dados ecoinvent 3.7.1. O fluxograma da Figura 33 mostra a cadeia produtiva dos produtos analisados. Para a avaliação dos processos considerou-se peso em Kg das matérias primas e o consumo de energia em KWh/Kg. O gasto de energia estimado do moinho de bolas foi de 0,000356 kW por hora para cada Kg de material moído.

Para a simulação o *software* considera a produção de CO₂ na fabricação do cimento, do gasto de energia necessário para a cominuição do PRH, da etapa de

aplicação e uso do cimento, de sua vida útil e da disposição final dos resíduos, ou seja, do “berço ao túmulo”.

Figura 33. Fluxograma do sistema analisado na produção de CO₂.



Fonte: O Autor (2023).

3.3.3.12 Módulo de elasticidade dinâmico por ultrassom

O módulo de elasticidade dinâmico relaciona o módulo com a velocidade de propagação de ondas de ultrassom no corpo-de-prova. O módulo de elasticidade dinâmico é uma medida da rigidez do material e sua capacidade de deformação elástica em resposta a forças aplicadas, a incorporação de novos materiais pode alterar de forma significativa seu comportamento, por isso é necessário analisar como o PRH afeta essa propriedade das pastas. O ensaio foi realizado no laboratório de construção civil no CTG (Centro de Tecnologia e Geociências) da UFPE

Antes da realização das leituras foram analisadas a superfície dos corpos de prova, aquelas que não se encontravam perfeitamente planas passaram por um processo de regularização mecânica. Foram realizadas as leituras em 3 amostras por pasta de cimento e o procedimento utilizado foi o descrito na norma ASTM C597 (ASTM, 2016). O aparelho usado nas leituras foi o ultrassom portátil PUNDIT LAB e a frequência utilizada foi de 54 kHz. Foram Registradas as velocidades de propagação da onda, em μ s, em cada um dos corpos de prova. A medição foi realizada com o equipamento posicionado

no modo de transmissão direta onde os transdutores são posicionados nas faces opostas dos corpos de prova. O valor do módulo de elasticidade foi dado com base na Equação 07.

Equação 07. Módulo de elasticidade dinâmico.

$$E_d = \rho V^2 \times ((1 + \mu) \times (1 - 2\mu) / (1 - \mu)) \mu$$

Onde:

E_d = módulo de elasticidade dinâmico (MPa); ρ = massa específica (kg/m³); V = velocidade (km/s); μ = coeficiente de Poisson de 0,2.

Na qual, a velocidade é calculada com base na fórmula da Equação 08.

Equação 08. Velocidade de propagação das ondas ultrassônicas

$$V = L / t$$

Onde:

L = distância entre os pontos de acoplamento dos transdutores em mm; T = tempo registrado em microssegundos.

3.3.3.13 Permeabilidade: absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica

O estudo da absorção em pastas de cimento é de grande importância para a avaliação das propriedades porosas e da durabilidade desses materiais. Esses parâmetros estão diretamente relacionados à porosidade e à permeabilidade das pastas de cimento, o que influencia sua resistência à deterioração.

Os ensaios de absorção de água por imersão, índice de vazios, e massa específica foram realizados na idade de 56 dias conforme as especificações da NBR 9778:2005 - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica (ABNT, 2005). Os ensaios foram realizados no laboratório de construção civil no CTG (Centro de Tecnologia e Geociências) da UFPE

Para cada mistura foram utilizados 3 corpos de prova cilíndricos, nas dimensões 5 x 10 cm. Após o período de cura, os corpos de prova foram secos em estufa a uma temperatura de 100 ± 5 °C durante 72 h para a determinação da massa seca. Em seguida foram resfriados à temperatura ambiente e imersos em água por 72 h. Após a saturação dos corpos de prova, foi determinada a massa saturada com superfície seca (msat) e a massa saturada imersa em água (mi). A absorção de água foi calculada conforme a Equação 09:

Equação 09. Absorção de água (Abs).

$$\text{Abs} = ((\text{msat} - \text{ms}) / \text{ms}) \times 100$$

Onde:

Abs = Absorção de água (%); msat = massa saturada com superfície seca (Kg);
ms = massa seca (Kg)

O índice de vazios é a relação entre o volume dos poros permeáveis e volume total da amostra é calculado pela Equação 10.

Equação 10. Índice de vazios (Iv).

$$\text{Iv} = ((\text{msat} - \text{ms}) / (\text{msat} - \text{mi})) \times 100$$

Onde:

Iv = índice de vazios (%); msat = massa saturada com superfície seca (Kg); ms = massa seca (Kg); mi = massa saturada imersa em água (Kg).

A massa específica foi calculada segundo a Equação 11.

Equação 11. Massa específica (permeabilidade).

$$\rho = \text{ms} / (\text{msat} - \text{mi})$$

Onde:

ρ = massa específica (kg/cm³); msat = massa saturada com superfície seca (Kg);
ms = massa seca (Kg); mi = massa saturada imersa em água (Kg).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo é dividido em quatro subcapítulos que tratam dos resultados obtidos através dos ensaios propostos no capítulo 3. No item 4.1 será descrita a caracterização do pó reciclado híbrido, suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas. No item 4.2 será apresentado os ensaios realizados em pastas de cimento e pastas de cimento com PRH no estado fresco. E por fim, no item 4.3, será mostrado o resultado das análises nas pastas no estado endurecido.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO PRH

4.1.1 Massa unitária, massa específica real e área específica

A Tabela 18 mostra a massa unitária e massa específica do PRH obtidos através dos procedimentos descritos nos itens 3.3.2.1 e 3.3.2.2 e a área superficial específica através da granulometria a laser.

Tabela 18. Massas específicas, unitárias e área superficial específica do PRH.

Material	Massa unitária (g/cm ³)	Massa específica (g/cm ³)	Área superficial específica (m ² /g)
In natura	1,39	-	-
PRHM1H	1,02	2,57	1,01
PRHM2H	0,91	2,57	1,02
PRHM4H	0,76	2,57	1,08
PRHM8H	0,73	2,57	1,29

Fonte: O Autor (2023).

Pode ser observado na Tabela 18 que:

I) Quanto maior o tempo de moagem do material menor a massa unitária, desta forma pode-se dizer que o volume de vazios entre os grãos ficou maior à medida que os grãos diminuíram de tamanho. Esse fenômeno da redução da massa unitária pode ocorrer devido a moagem do material, ao se reduzir o tamanho médio das partículas a área superficial total do material aumenta. O processo de cominuição também pode causar fraturas nas partículas maiores, criando partículas menores e, assim, aumentando

o volume de vazios interparticulares. O aumento na área superficial somado ao aumento na quantidade de partículas individuais e seu formato irregular pode levar a um empacotamento menos denso entre as partículas, resultando em maior porosidade e menor massa unitária.

II) Conforme esperado aumentar a moagem do material não modificou a massa específica dele.

III) O aumento do tempo de moagem do PRH aumentou a sua área superficial específica, porém relacionando apenas a diminuição da massa unitária com o aumento da área superficial era esperado uma diferença maior entre a área superficial específica do PRHM2H e o PRHM4H. Porém conforme já mencionado também existem outros fatores que podem justificar essa diferença, tais como o fato de que a moagem também pode ter ocasionado fraturas nas partículas maiores, criando partículas menores mais irregulares e assim diminuindo a compactação do material, desta forma essa união de fatores pode ter ocasionado essa diminuição significativa entre a massa unitária dessas duas amostras.

4.1.2 Absorção e adsorção de água

A absorção de água foi determinada segundo a NMR 16916:2021 conforme descrito no item 3.3.2.3 (ABNT, 2021b). Após o ensaio material úmido passou a apresentar aparência e consistência de uma argila úmida, conforme mostrada na Figura 34.

Figura 34. PRH após ensaio de absorção de água (escala 1:5)



Fonte: O Autor (2023).

Na Tabela 19 é apresentada a absorção de água do PRH onde foi verificado que:

I) Não houve ganho de resistência nas pastas, o que indica que não há presença de compostos cimentícios não hidratados no PRH.

II) O PRH apresenta uma elevada absorção e adsorção de água. O aumento da finura do material ocasiona o aumento da taxa de sorção (absorção e adsorção ocorrendo de forma simultânea) de água, esse aumento decorre do aumento da área superficial do PRH.

III) Esse aumento da taxa ocorre devido ao fenômeno de adsorção de água promovido pelo aumento na superfície específica dos grãos, pois esse aumento na superfície de contato do PRH proporciona mais pontos de contato onde as moléculas de água podem se adsorver. Nesse processo as moléculas de água são aderidas a superfície de partículas solidas mais não incorporado a sua estrutura interna (Santos; Rocha; Cheriaf, 2007).

Tabela 19. Absorção e adsorção de água.

Material	Absorção e adsorção de água (%)
PRHM1H	19
PRHM2H	22
PRHM4H	24
PRHM8H	26

Fonte: Autor (2023)

4.1.3 Distribuição granulométrica

A Figura 35 mostra a distribuição granulométrica das partículas do PRH obtidas pelo ensaio de granulometria a laser e a Tabela 20 o diâmetro médio e D50 do material. A partir desses dados, foi observado que:

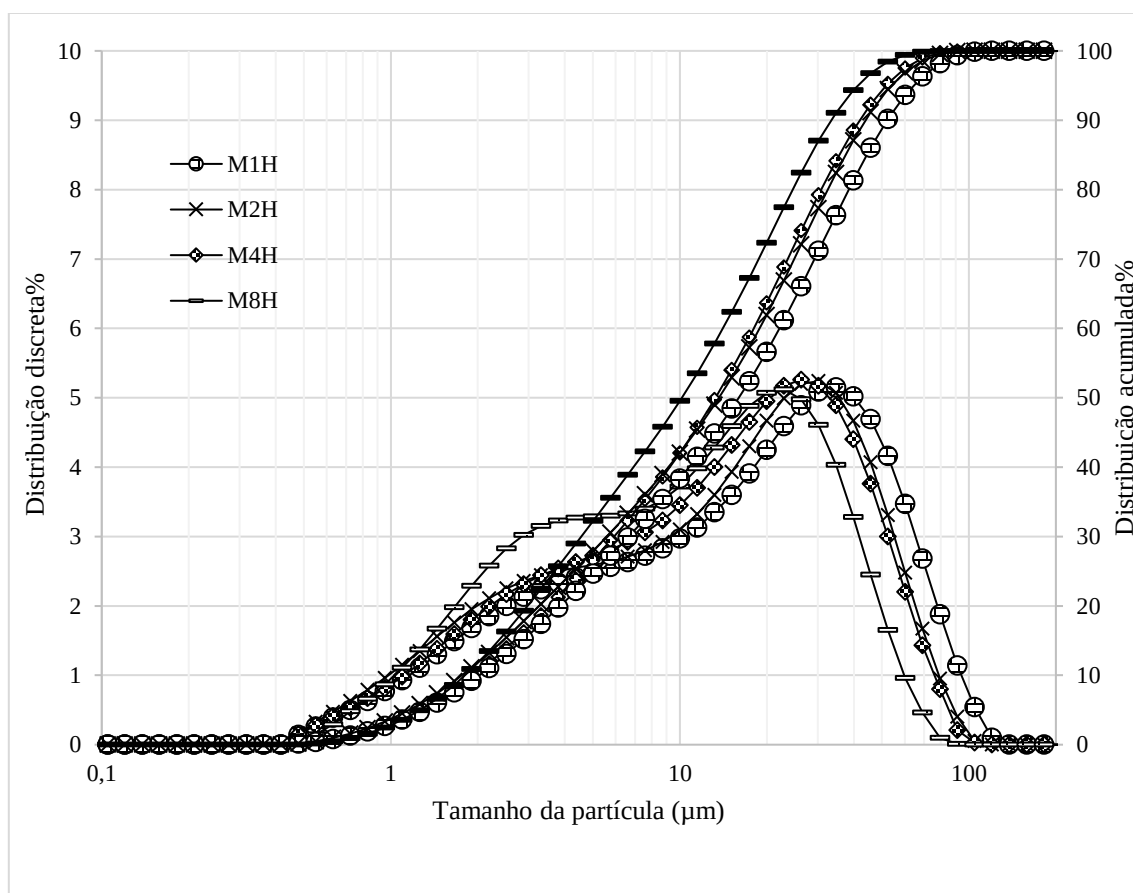
I) Evidencia-se que o material possui uma distribuição de partículas bem graduada e continua. Também é observado que o PRH moído por uma 1 hora possui as partículas com maiores dimensões enquanto o moído por 8 horas as partículas com menores dimensões.

II) Na Figura 35, observa-se que as partículas de PRH moído possuem dimensões que variam de 0,5 a 100 μm , sendo a maior parte delas localizada na faixa entre 5 e 50 μm .

III) A Tabela 20 mostra o diâmetro médio, D10, D50 e D90 do PRH moído, com base nos resultados é verificado que o aumento do tempo de moagem resultou na diminuição do tamanho médio das partículas do PRH.

IV) Com base nos resultados da razão $D90/D10$ é possível verificar que o material possui um coeficiente de uniformidade alto, isso indica que as partículas possuem uma ampla variação de tamanhos, ou seja, a distribuição é mais heterogênea, porém à medida que o tempo de moagem aumenta o coeficiente de uniformidade diminui o que significa que a moagem torna o material mais homogêneo.

Figura 35. Distribuição granulométrica do PRH.



Fonte: O Autor (2023).

Tabela 20. Diâmetros característicos (D10, D50, D90), heterogeneidade (D90/D10) do PRH.

Amostra	M1H	M2H	M4H	M8H
D4,3 (µm)	25.460	21.545	20.763	14.350
D50 (µm)	18.387	15.702	15.256	10.161
D10 (µm)	2.326	2.028	2.224	1.809
D90 (µm)	59.851	50.375	48.021	33.327
D90/ D10	25.731	24.839	21.592	18.423

Fonte: O Autor (2023).

4.1.4 Fluorescência de Raios-x (FRX)

A composição química do PRH foi analisada através da fluorescência de raios-X. Conforme visto por Zordan (1997) os materiais que compõem a maior parcela dos resíduos da construção do qual serão originados o PRH são o concreto^{*1}, tijolos^{*2} e argamassas^{*3}, então o FRX destes materiais também são mostrados na Tabela 21 para efeito de comparação.

Tabela 21. Fluorescência de raios-X.

	PRH				Pó de Tijolos ^{*1}	Pó de Concreto ^{*2}	Pó de Argamassa ^{*3}	Cimento CP V – Elizabeth
	PRHM1H	PRHM2H	PRHM4H	PRHM8H				
Na ₂ O	0,92	0,96	0,92	0,93	1,03	2,01	-	
MgO	0,50	0,52	0,52	0,51	2,73	1,35	-	0,17
Al ₂ O ₃	5,95	6,35	6,34	6,43	16,88	7,13	17,30	5,73
SiO ₂	80,96	79,75	79,99	79,71	66,54	38,61	38,30	4,34
SO ₃	0,28	0,46	0,30	0,28	0,46	1,04	-	18,06
Cl	-	-	-	-	-	0,04	-	4,28
K ₂ O	1,05	1,10	1,07	1,09	2,41	1,57	1,90	
CaO	3,48	3,52	3,49	3,46	4,24	41,22	33,00	0,88
Fe ₂ O ₃	1,80	2,00	2,02	2,13	6,62	3,19	9,50	59,97
P. F	5,06	5,33	5,25	5,46	-	-	-	2,37
Total	100	100	100	100	100	100	100	3,59
								100

^{*1} FRX (Liu *et al.*, 2014), ^{*2} FRX (Liu *et al.*, 2014) ^{*3} FRX (Polito *et al.*, 2010).

Fonte: O Autor (2023).

A Tabela 21 mostra que a moagem do PRH teve pouco impacto na sua composição química e que seus principais componentes também estão presentes nos materiais que comumente são encontrados nos resíduos de construção como o concreto, as argamassas e os tijolos.

Ainda de acordo com a análise química do material é visto que o SiO_2 , Al_2O_3 e CaO , juntos representam quase 90% da composição total do material, sendo o SiO_2 possivelmente proveniente da areia presente no concreto e nas argamassas o elemento de maior valor na composição do material.

Os álcalis presentes no PRH são o Na_2O (óxido de sódio) e o K_2O (óxido de potássio) e o equivalente alcalino é a soma dos teores de Na_2O e K_2O , expressa como um valor percentual em relação à massa de cimento. Ao calcular o equivalente alcalino (Tabela 22) das amostras é verificado que os valores se encontram entre 1,60 e 1,68. Enquanto valor do equivalente alcalino do cimento utilizado na pesquisa é de 0,74.

Tabela 22. Equivalente alcalino.

Amostras	Na_2O	K_2O	EA
PRHM1H	0,92	1,05	1,60
PRHM2H	0,96	1,10	1,68
PRHM4H	0,92	1,07	1,62
PRHM8H	0,93	1,09	1,64
CIMENTO	0,17	0,88	0,74

EA = $\text{Na}_2\text{O} + 0,65 \times \text{K}_2\text{O}$

Fonte: O Autor (2023).

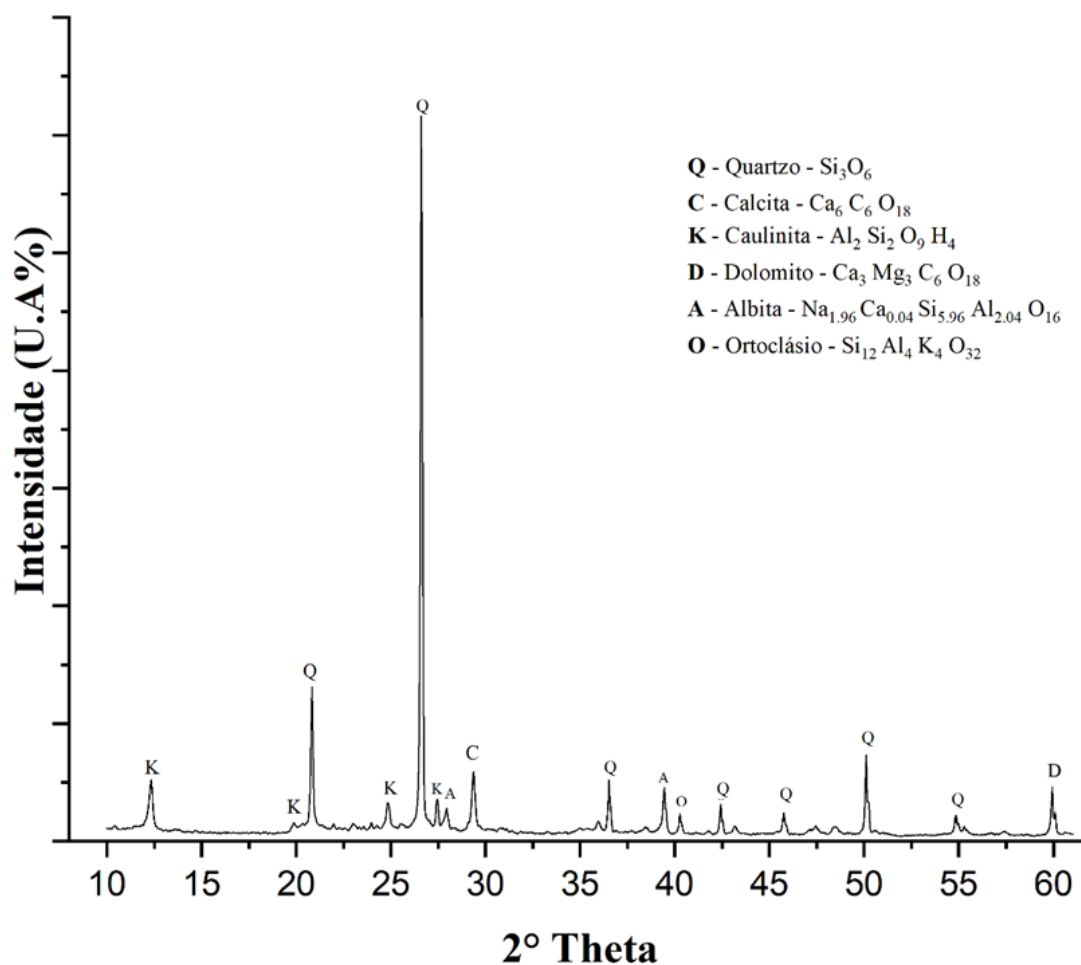
O ideal é manter valor do equivalente baixo, para evitar problemas de expansão devido à reação álcali-agregado (RAA). A norma ASTM C150 estabelece as especificações para o cimento Portland e indica alguns limites para o equivalente alcalino, segundo a norma, se o conteúdo alcalino do cimento for menor que 0,6% a chance de ocorrer uma reação álcalis agregado é baixa, mesmo com a presença de agregados reativos no concreto (ASTM, 2007).

Ainda, segundo Mehta e Monteiro (2014), estudos realizados na Alemanha e Inglaterra mostram que se o conteúdo total de álcalis for inferior a 3 kg/m^3 a possibilidade de ocorrer uma reação álcalis agregado é bastante reduzida.

4.1.5 Difração de raios-x (DRX)

A Figura 36 mostra o resultado da análise do PRH através do ensaio de difração de raios-X, nele é apresentado o difratograma do PRH.

Figura 36. Difratograma (DRX) do pó reciclado.



Fonte: O Autor (2023).

No difratograma do PRH foi verificado que:

I) Por se tratar de um material de composição bastante heterogênea foram detectadas durante a análise uma grande quantidade de picos.

II) Nos ensaios de FRX (tabela 21) foi verificada que a maior parte da composição das amostras era de dióxido de silício, já o ensaio de DRX permitiu verificar uma grande quantidade de picos de sílica cristalina (quartzo) possivelmente proveniente da areia presente nas argamassas e concretos que deram origem ao PRH. Os demais picos

encontrados com base nas cartas padrão existentes no sistema JCPDS cadastradas no ICDD (*international Center for Diffraction data*) foram de quartzo (Si_3O_6); calcita ($\text{Ca}_6\text{C}_6\text{O}_{18}$); caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_9\text{H}_4$); dolomita ($\text{Ca}_3\text{Mg}_3\text{C}_6\text{O}_{18}$); Albita ($\text{Na}_{1.96}\text{Ca}_{0.04}\text{Si}_{5.96}\text{Al}_{2.04}\text{O}_{16}$) e ortoclásio ($\text{Si}_{12}\text{Al}_4\text{K}_4\text{O}_{32}$), sendo estes presentes na cal (calcita), no cimento (calcita, caulinita, dolomita e albita), nos agregados e demais materiais utilizados nas obras de construção.

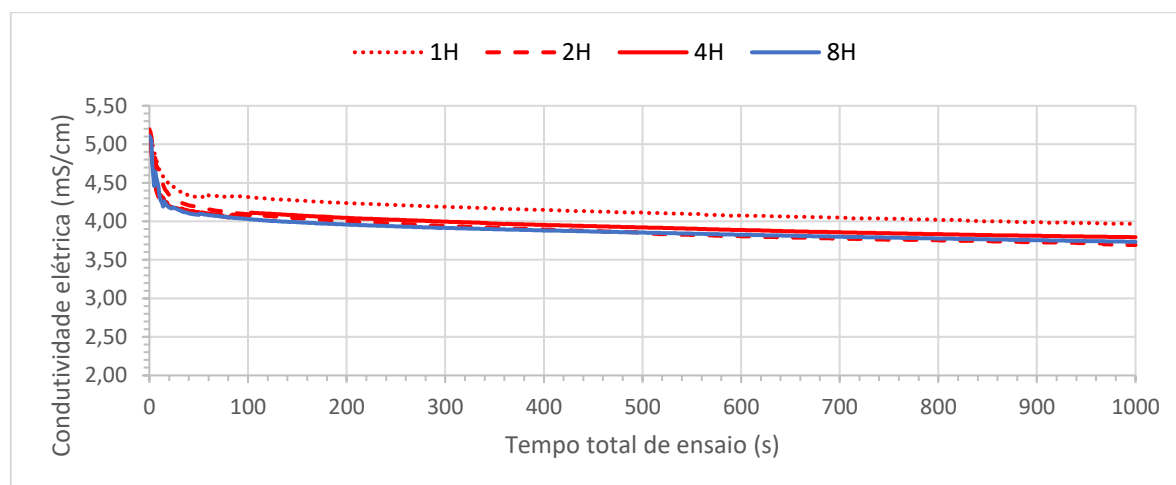
III) Também é possível observar que na amostra não foi detectada a presença de halos amorfos, a sua presença pode ser um indicativo do potencial pozolânico do material. Ou seja, se trata de um material com características mais inertes (Gobbi, 2014).

4.1.6 Índice de atividade pozolânica – condutividade elétrica

No método de Payá *et al.* (2011) modificado é possível identificar a atividade pozolânica do material através da perda de condutividade elétrica do sistema formado pela solução insaturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e por uma amostra do material analisado, conforme descrito no item 3.3.2.7.

A Figura 37 mostra a variação da condutividade do PRH durante o período de 1000 s onde é observado que:

Figura 37. Variação da condutividade do PRH.



Fonte: O Autor (2023).

Houve uma pequena queda na condutividade elétrica, isso indica que a diminuição na concentração de Ca(OH)_2 na solução foi pequena, o que sugere que o hidróxido de cálcio presente na solução não foi consumido de forma significativa pelo pó reciclado híbrido (PRH) o que aponta que o material analisado não possui um alto potencial pozolânico.

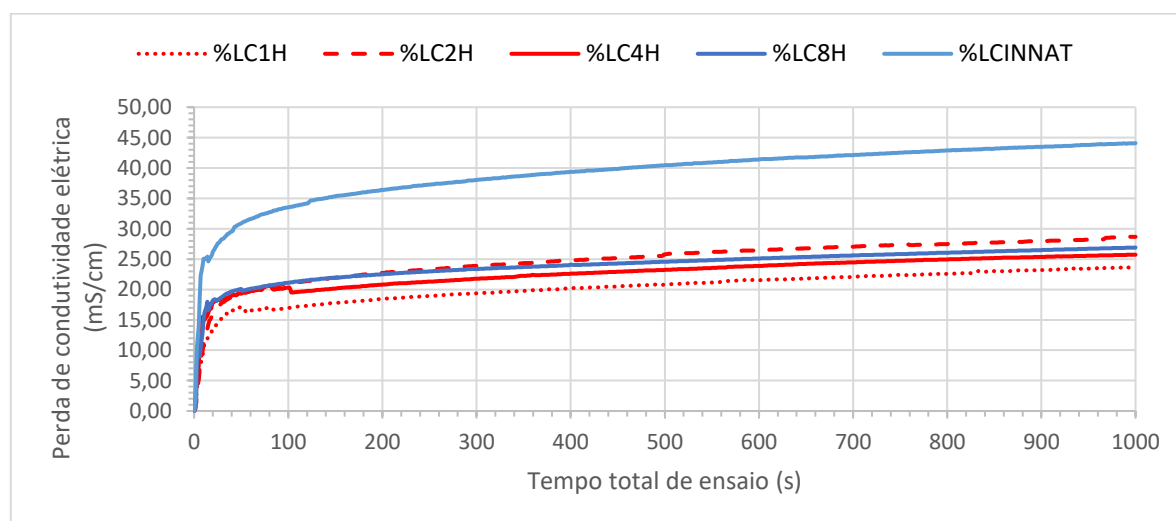
Na Tabela 23 são apresentados os valores de condutividade elétrica durante o tempo de 100 e 1000 s (c100s e c1000s) do PRH após ele ser inserido na solução insaturada de Ca(OH)_2 , além da variação entre a condutividade inicial e final para cada tempo ($\Delta 100$ e $\Delta 1000$), também foram calculadas as perdas relativas de condutividade para 100 e 1000 s com base na Equação 06. Com isso foi representado na Figura 38 as curvas de perda de condutividade de do PRH.

Tabela 23. Condutividade elétrica, variação da condutividade (Δt) e perda relativa de condutividade (%PC)t do PRH.

Amostra	C0s	C100s	C1000s	$\Delta 100s$	$\Delta 1000s$	(%PC)100s	(%PC)1000s
M1H	5,195	4,314	3,968	0,881	1,227	16,958	23,614
M2H	5,177	4,093	3,693	1,083	1,483	20,929	28,656
M4H	5,107	4,070	3,794	1,038	1,313	20,318	25,716
M8H	5,108	4,031	3,734	1,077	1,375	21,093	26,908

Fonte: O Autor (2023).

Figura 38. Perda relativa da condutividade do PRH.



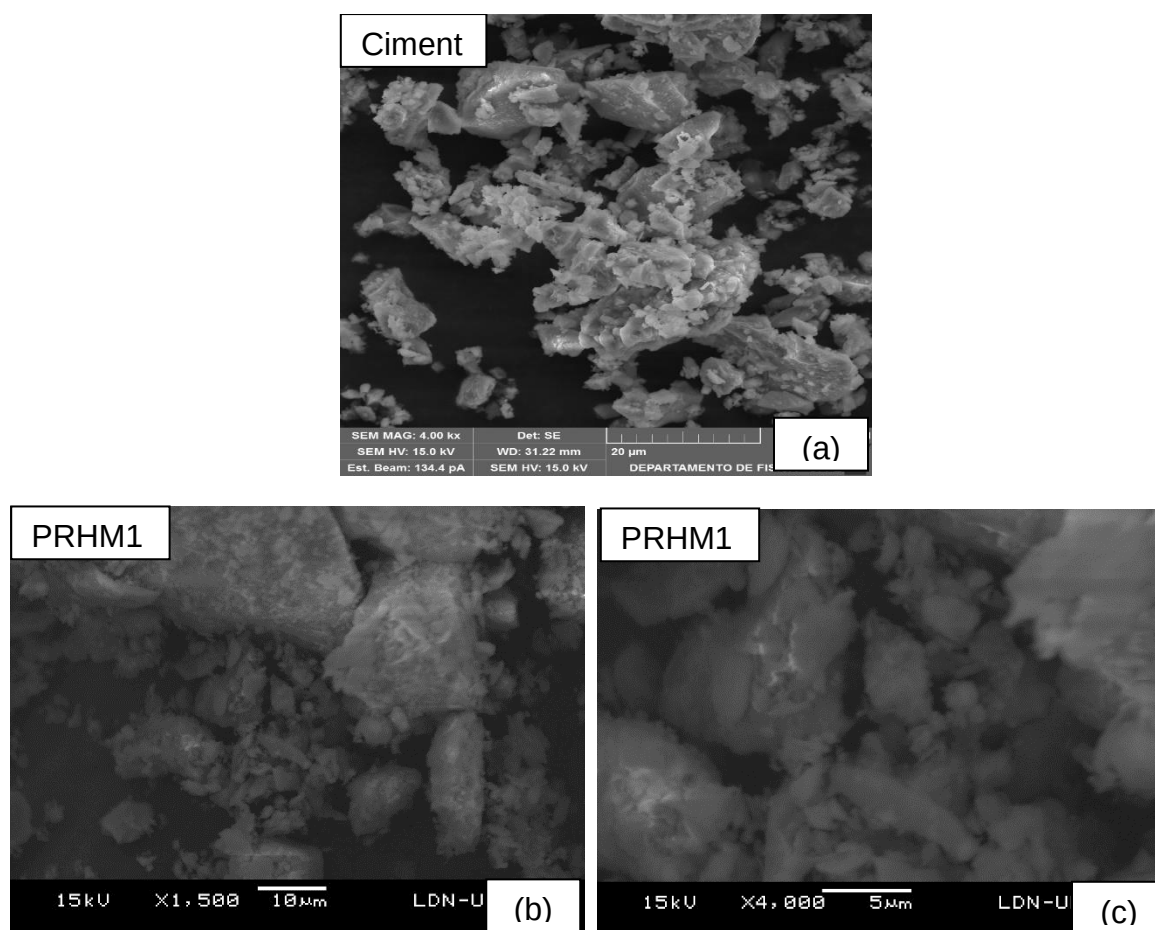
Fonte: O Autor (2023).

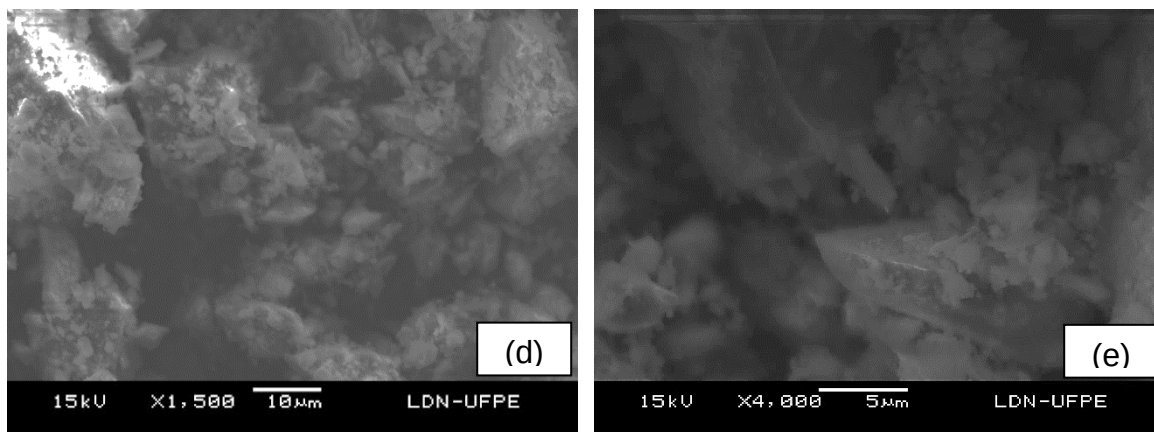
Ao analisar a Figura 38 e a Tabela 23, com base na perda de condutividade elétrica é possível verificar que o PRH apresenta pouca atividade pozolânica e ao conciliar estes resultados em conjunto com aqueles provenientes do ensaio do índice de atividade da cal que serão apresentados no item 4.3.1 (Tabela 28), onde todas as misturas apresentaram uma resistência inferior a 6 MPa é seguro dizer que a atividade pozolânica encontrada não é o suficiente para qualificar o PRH como material pozolânico.

4.1.7 Microscopia Eletrônica De Varredura (MEV)

A Figura 39 mostra as imagens em estado anidro do cimento e do PRH obtidas através do MEV.

Figura 39. MEV do Cimento (a), PRHM1H (b, c), PRHM8M (d, e).



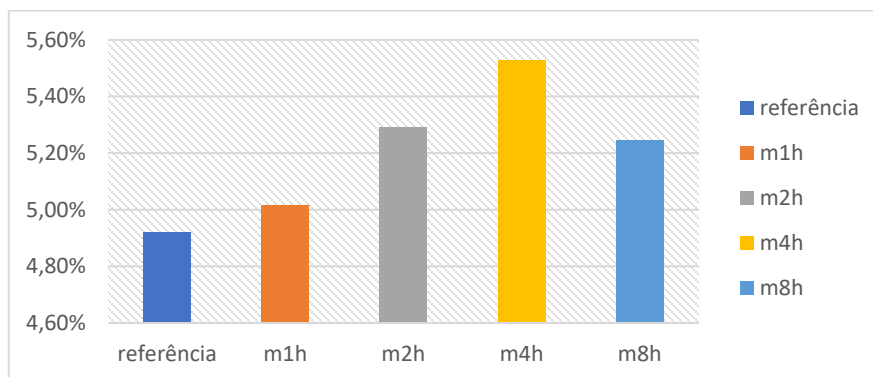


Fonte: O Autor (2023).

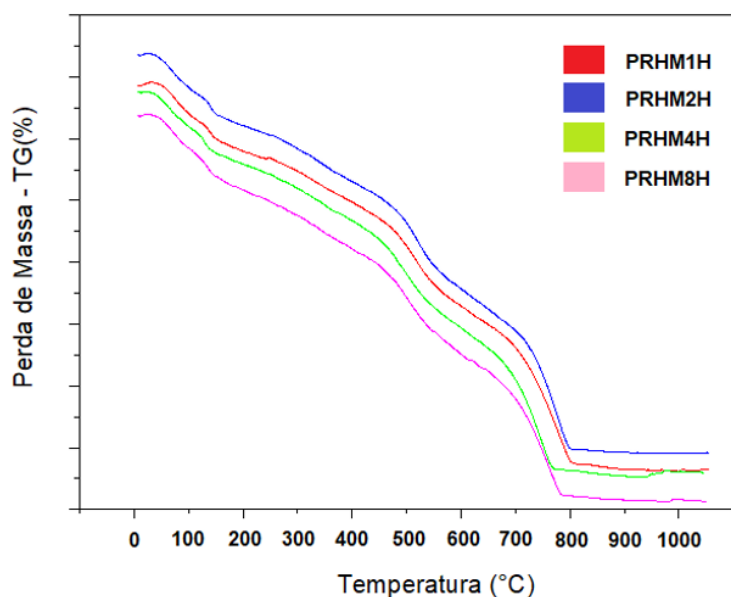
Na Figura 39 (imagem do MEV da partícula de pó reciclado (b), (c), (d) e (e)) foi detectada a presença de algumas partículas de quartzo revestidas de resíduos de materiais cimentícios que ficaram aderidos em sua superfície. É possível observar que as partículas no PRH não possuem formato esféricos nem suave e que contêm cantos afiados e bordas irregulares, que formam fendas e entalhes em V. O formato irregular das partículas verificados no MEV são semelhantes aos encontrados em imagens de outros estudos, como o realizado por Liu *et al.* (2014) e mostrado na Figura 9.

4.1.8 Termogravimetria (TG)

A Figura 40 mostra a perda de massa (%) do PRH em diferentes finuras e a Figura 41 apresenta as curvas TG do PRH e do cimento.

Figura 40. Perda de massa (%) do PRH.

Fonte: O Autor (2023).

Figura 41. Curvas TG do PRH e do cimento em estado anidro.

Fonte: O Autor (2023).

A perda de massa do PRH até a temperatura de 1050 °C encontra-se variando de 5,02% até 5,53% sendo um resultado semelhante a perda de massa do cimento (4,92%). Esse resultado difere bastante do encontrado no estudo realizado por Liu *et al.* (2014), onde a perda de massa do material reciclado ficou em torno 12%. Essa diferença pode ser explicada devido à composição diferente dos resíduos, sendo que o material analisado era rico em resíduo de tijolos de argila. Usualmente materiais ricos em argilominerais consomem apresentar perda de massas elevadas como no estudo

realizado por Medeiros (2009) com argilas provenientes do Rio Grande do Norte. Neste estudo, a Termogravimetria (TG) com a argila mostrou uma taxa de perda ao fogo próxima dos 19%, porém quando houve uma substituição de parte da argila por quartzo, o percentual de perda de massa caiu. Os teores de substituição de argila por quartzo foram de 10%, 20% e 30%, e os valores de perda de massa encontrados foram respectivamente 15,35%, 13,76% e 12,27%.

O material reciclado utilizado neste estudo com base nos resultados encontrados nas análises de DRX e FRX é rico em sílica cristalina (quartzo) que comumente apresenta valores mais baixos de perda de massa.

4.2 ESTUDO EM PASTAS – ESTADO FRESCO

4.2.1 Consistência normal

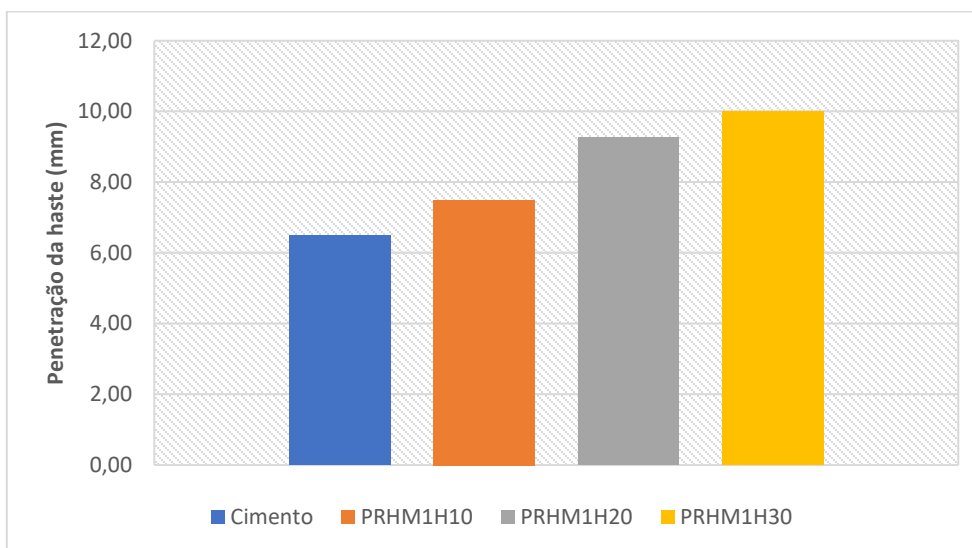
O ensaio de consistência na pasta de cimento foi realizado de acordo com os procedimentos descritos no item 3.3.3.1 e a relação água/ligante obtida foi mantida constante em 0,275 nas pastas com a substituição parcial do cimento por PRHM1H nos percentuais de 10, 20 e 30% do volume afim de verificar a variação da consistência das pastas com PRH. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 24.

Tabela 24. Consistência da pasta de cimento e das pastas com substituição parcial por PRHM1H.

Amostra	Penetração da haste (mm)	Coef. De variação
Cimento	6,50	±0,00
PRHM1H10	7,50	±0,50
PRHM1H20	9,25	±0,75
PRHM1H30	10,00	±0,50

Fonte: O Autor (2023).

Figura 42. Comparação de consistência da pasta de cimento e das pastas com substituição parcial por PRHM1H.



Fonte: O Autor (2023).

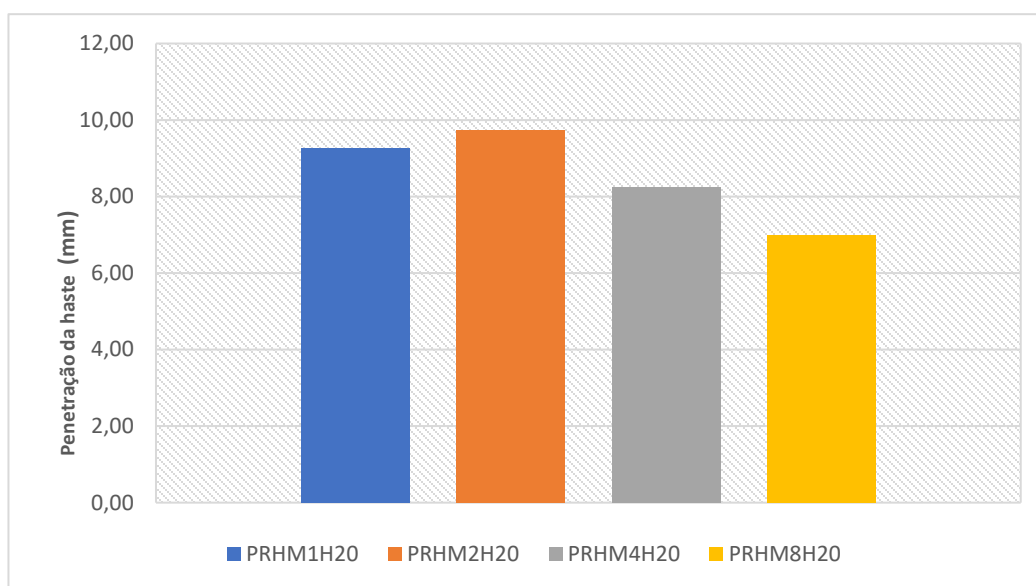
Nas amostras de pastas com a substituição parcial do cimento por PRHM1H houve uma diminuição na coesão à medida que foi aumentado o percentual de substituição da pasta, neste caso a diminuição do teor de ligante na mistura teve efeito preponderante na diminuição da coesão das pastas.

No segundo caso foi mantido constante a relação água/ligante em 0,275 e o percentual de substituição do cimento por PRH de 20% variando o tempo de moagem do PRH em cada pasta. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 25 e Figura 43, onde foi verificado que neste segundo caso embora a média do índice de consistência das pastas com PRHM1H tenha sido menor que a do PRHM2H, os resultados foram muito próximos, mostrando que ambas as pastas possuem uma coesão semelhante. Porém nas pastas com PRHM4H e PRHM8H houve um aumento da coesão com o aumento dos tempos de moagem do PRH de forma que as pastas com PRHM8H tiveram um resultado próximo das pastas com apenas cimento. Alguns fatores que explicam esse comportamento é que a presença de grãos menores ajuda no preenchimento dos espaços vazios nas misturas resultando em uma pasta mais homogênea e coesa, além disto este comportamento pode também estar associado ao aumento da superfície específica e da sorção (absorção e adsorção) de água que ocorre devido a moagem do material.

Amostra	Consistência (mm)	Coef. De variação
PRHM1H20	9,25	$\pm 0,75$
PRHM2H20	9,75	$\pm 0,25$
PRHM4H20	8,25	$\pm 0,25$
PRHM8H20	7,00	$\pm 0,50$

Fonte: O Autor (2023).

Figura 43. Comparação de consistência da pasta de cimento e das pastas com substituição parcial por PRHM1H, PRHM2H, PRHM4H e PRHM8H.



Fonte: O Autor (2023).

4.2.2 Enrijecimento

Após a determinação da consistência normal da pasta de referência, foi realizado o ensaio do tempo de endurecimento as pastas. Os dados dos ensaios do tempo de endurecimento estão apresentados nas Figuras 44 e 45. Da análise conjunta desses gráficos foi verificado que as pastas começam a ter sinais de enrijecimento em tempos diferentes, mas os valores correspondentes ao distanciamento da ponta da agulha até a base, d , medidos em mm, foi aproximadamente constante, com os seguintes valores: 3mm; 5mm e 40mm.

O alcance dessas medidas pelo tempo, foi definido como a taxa de enrijecimento da pasta, TE, calculada pela razão entre a distância d , distanciamento da ponta da agulha

até a base, em milímetros, pelo tempo t , em minutos, que corresponde ao tempo medido para alcançar as distancias 3, 5 e 40mm; assim teremos o TE em mm/mim, conforme a Equação 12. Os dados de TE constam nas Tabelas 26 e 27, respectivamente.

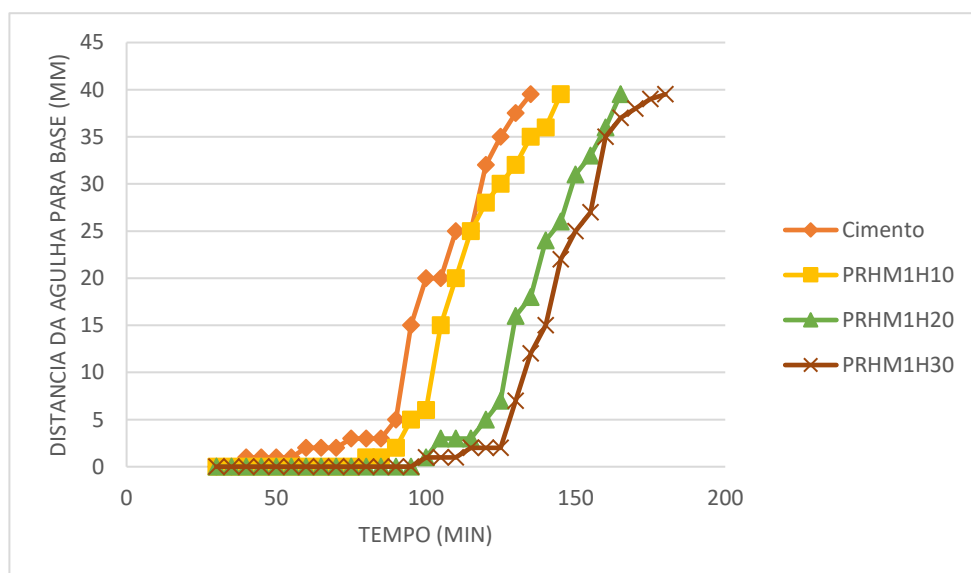
Equação 12. Taxa de enrijecimento.

$$TE = d \text{ (mm)} / t \text{ (mim)}$$

Onde:

d = distância, distanciamento da ponta da agulha até a base (mm); t = tempo (min).

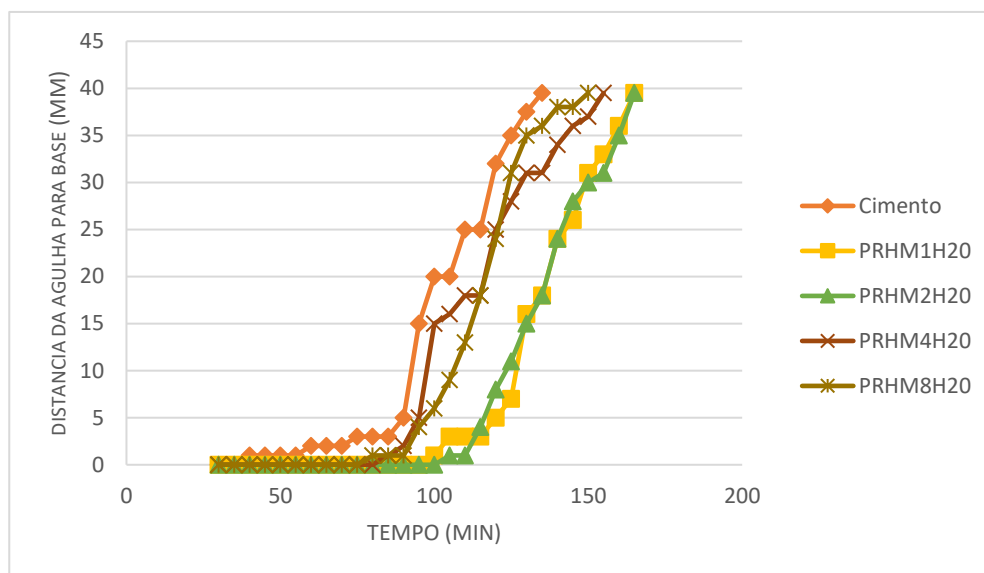
Figura 44. Comparação do enrijecimento das pastas de cimento e com a substituição parcial do PRHM1H.



Fonte:

O Autor
(2023).

Figura 45. Comparação do enrijecimento das pastas de cimento e com a substituição parcial do PRH.



Fonte: O Autor (2023).

Na Figura 44, o teor de substituição do PRH por cimento em volume variou, 10, 20 e 30%, e o PRH utilizado foi aquele com o tempo de moagem de 1 hora. Verifica-se um agrupamento das curvas do seguinte modo, um agrupamento com a pasta de cimento puro e pasta com substituição PRHM1H10, e outro com as curvas da pasta com PRHM1H20 e com a pasta PRHM1H30.

No primeiro agrupamento as pastas de cimento e a PRHM1H10 começam a ter maior enrijecimento a partir dos 90 e 100 min, respectivamente. Sendo que na pasta de cimento agulha atinge 3mm com 60min, 5mm com 90 min e 40mm com 138min. A pasta com PRH1H10 atinge 3mm em 95min, 5mm em 90min, e atinge 5mm também com 90min. A partir de 5mm, ambas atingem 40mm com o tempo aproximado de 138 e 145 min, respectivamente.

No segundo agrupamento as pastas começam a enrijecer a partir de 120 min em relação as pastas do primeiro agrupamento, acréscimo de 20min. A pasta PRHM1H20, atinge 3 mm em 105min, 5 mm em 120min e 40mm em 165 min. A pasta PHRM1H30 atinge 3mm em 115 min, 5 mm em 130 min e 40 mm em 180min.

O segundo agrupamento apresentou um acréscimo no tempo de endurecimento em relação ao primeiro agrupamento de 20min. De forma geral a redução do teor de cimento nas misturas de 10, 20 e 30% resultaram no aumento do tempo de

endurecimento das pastas. Nas Tabelas 26 e 27 constam esses valores e os cálculos da taxa de enrijecimento das misturas.

Tabela 25. Enrijecimento das pastas moídas por 1 hora.

d (mm)	REFE		PRHM1H10		PRHM1H10		PRHM1H10	
	t(mim)	TE	t (mim)	TE	t (mim)	TE	t (mim)	TE
3	60	0,05	65	0,046	110	0,027	125	0,024
5	90	0,056	95	0,053	120	0,042	130	0,0384
40	138	0,289	145	0,276	165	0,242	180	0,223

Fonte: O Autor (2023).

Tabela 26. Enrijecimento das pastas moídas em diferentes tempos.

	REF		PRHM1H20		PRHM2H20		PRHM4H20		PRHM8H20	
D (mm)	t (mim)	TE	t (mim)	TE	t (mim)	TE	t (mim)	TE	t (mim)	TE
3	60	0,05	108	0,028	110	0,0273	90	0,034	90	0,034
5	90	0,056	120	0,042	120	0,042	98	0,051	98	0,051
40	138	0,289	162	0,247	162	0,247	150	0,267	158	0,253

Fonte: O Autor (2023).

Da análise dos dados da Tabela 27 verifica-se que o aumento do teor de PRH, além de aumentar tempo para o início do enrijecimento, se consideramos 5 mm, há uma redução da taxa de enrijecimento, medido para alcançar o valor de 40mm. O PRH interfere no processo de hidratação do cimento, dissolução precipitação.

Na Figura 45, em que foi mantido constante o teor de substituição de 20% do PRH na pasta, e foi variado o tempo de moagem do PRH de 1, 2, 4 e 8 horas, observa-se que o seguinte comportamento das curvas de endurecimento das pastas. Observa-se um agrupamento inicial formado pela pasta de referência, e pelas pastas com os maiores tempos de moagem, 4 e 8 horas, REF, PRHM4H20 e PRHM8H20, e o segundo agrupamento formado pelas pastas com os tempos de moagem de 1 e 2 horas, PRHM1H20 e PRHM2H20.

No primeiro agrupamento a pasta de cimento atingiu 3mm em 60mim, 5mm em 90 mim e 40mm em 138mim. A PRHM4H20 atinge 3mm em 110 mim, 5mm em 120 e 40mm

em 162mim. A pasta PRHM8H20 atingiu 3mm em 90mim, 5mim em 98 mim e 40mm em 150mim.

O segundo agrupamento a pasta PRHM1H20 atingiu 3mm em 108 mim, 5mm em 120mim e 40mm em 162mim. A pasta PRHM2H20 atingiu 3mm em 110 mim, 5mm em 120mim e 40mm em 162mim.

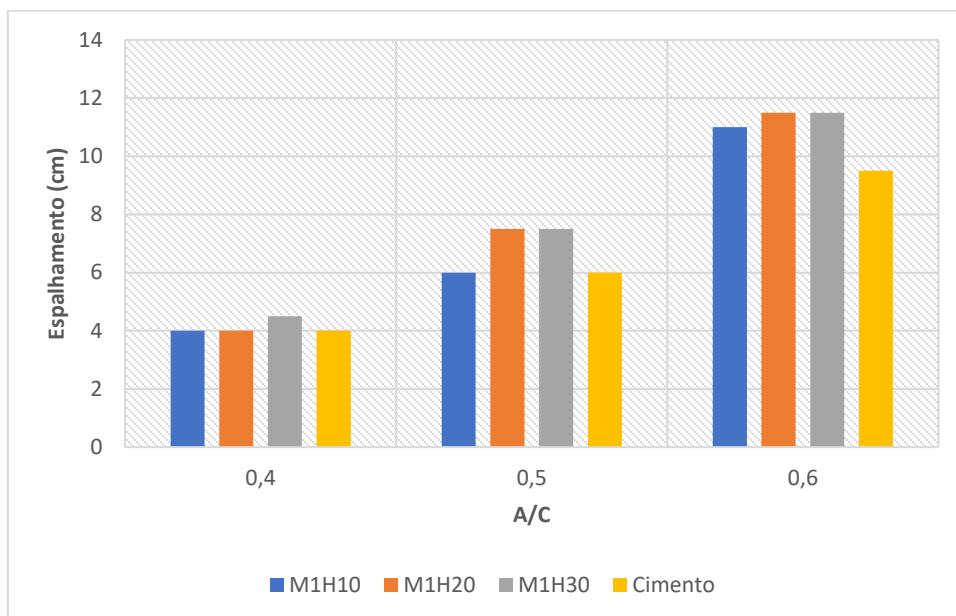
A partir da análise desses dados verifica-se que as pastas com maior tempo de moagem, portanto maior finura contribuiu para a redução do tempo de enrijecimento, ou de endurecimento. Analisando os dados da Tabela 27, que contém a taxa de enrijecimento das pastas, verifica-se que o aumento do tempo de moagem, contribuiu também para a aceleração na taxa de enrijecimento em relação as misturas com pastas preparadas com PRH mais grosso. Esse fato se deve ao aumento da área superficial específica das partículas que acelera o processo de hidratação, resultando em um do enrijecimento mais rápido destas pastas.

4.2.3 Espalhamento

Para o ensaio de espalhamento com minicone foram usadas pastas com 3 relações A/C conforme descrito no item 3.3.3.3 e o resultados são mostradas nas Figuras 46 e 47.

Na Figura 46 são apresentados os resultados do ensaio de espalhamento da pasta de referência e das pastas com substituição do cimento por PRHM1H onde é possível observar que com a relação A/C de 0,4 todas as pastas apresentaram o mesmo comportamento, porém a pasta com 30% de substituição teve um leve aumento no seu espalhamento. Com o aumento da relação A/C as pastas com maiores teores de substituição do cimento pelo PRH passaram a apresentar uma menor consistência e um maior espalhamento esse comportamento está relacionando com a diminuição da quantidade de material ligante na mistura.

Figura 46. Espalhamento das pastas com a substituição parcial do cimento por PRHM1H.

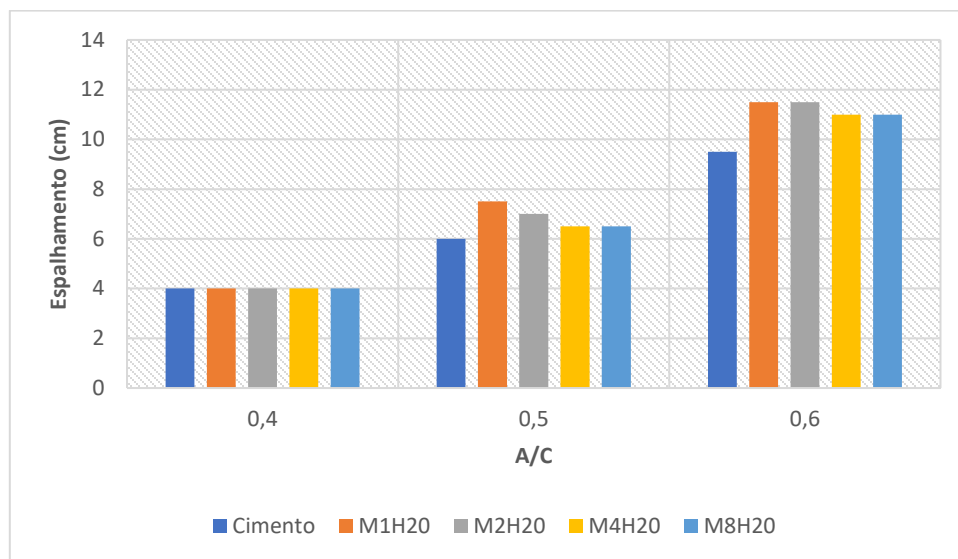


Fonte: O Autor (2023).

Já na Figura 47 apresentados os resultados do ensaio de espalhamento da pasta de referência e das pastas com substituição parcial do cimento por 20% de PRH. Na relação A/C de 0,4 as pastas apresentaram o mesmo comportamento.

Nas relações A/C 0,5 e 0,6 as pastas com PRH de maiores tempos de moagem apresentaram uma maior coesão, porém ainda inferior a pasta de referência, esse comportamento está relacionado ao fato que materiais finos contribuem para o aumento da coesão nas misturas, esse comportamento ocorre porque partículas menores têm uma maior capacidade de preencher os espaços vazios entre as partículas maiores, promovendo um melhor arranjo dos grãos. Essa ação de preenchimento dos espaços vazios por partículas menores resulta em uma pasta mais homogênea e coesa, porém essa melhora na coesão não é o suficiente para compensar a perda de material ligante quando comparado a pasta de referência.

Figura 47. Espalhamento das pastas com a substituição parcial do cimento por 20% de PRH.

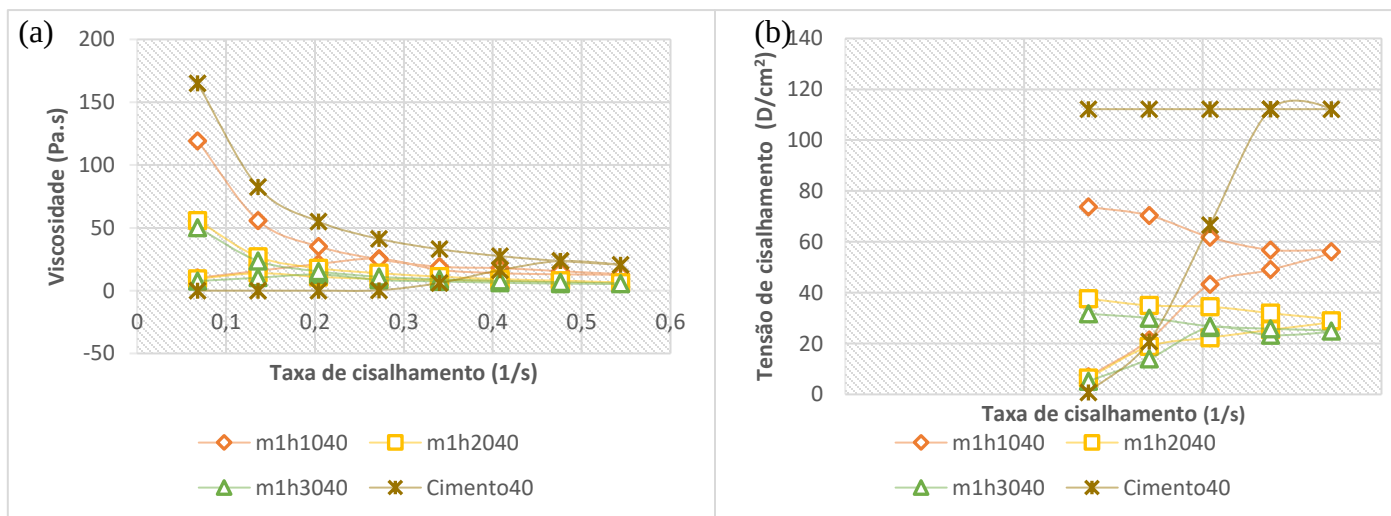


Fonte: O Autor (2023).

4.2.4 Viscosidade

As Figuras 48, 49, 50 e 51 mostram a viscosidade (cP) das pastas em função do aumento da taxa de cisalhamento.

Figura 48. Viscosidade das pastas de cimento com a substituição parcial do PRHM1H relação A/C 0,4 (a) viscosidade x taxa de cisalhamento e (b) tensão x taxa de cisalhamento.



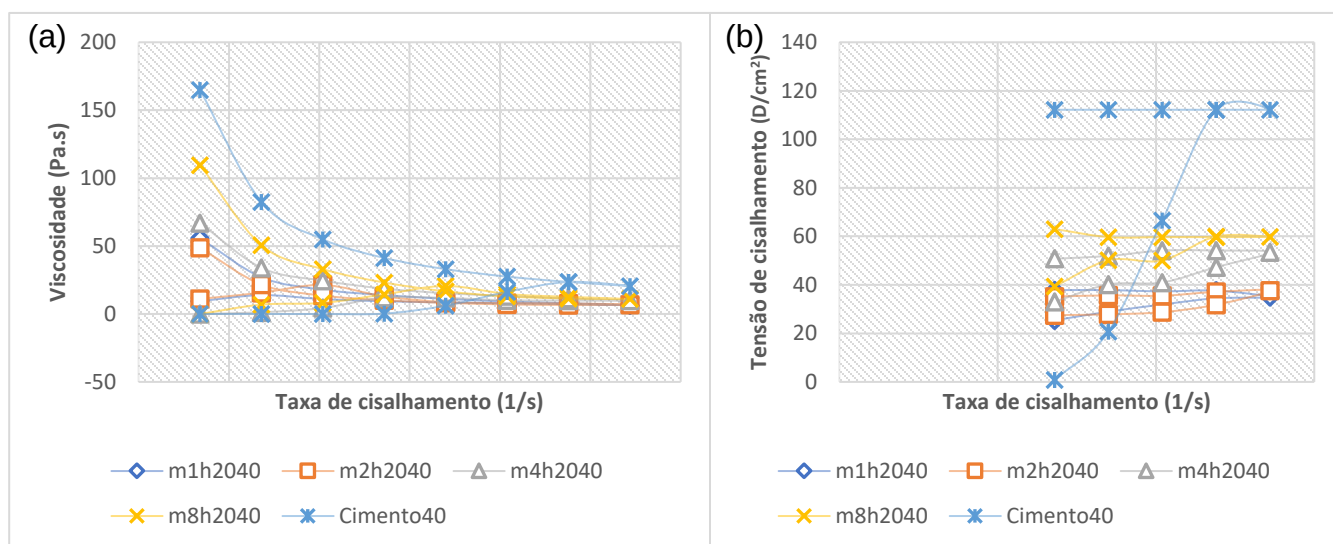
Fonte: O Autor (2023).

GRUPO I (Figura 48) – Substituição do cimento por PRHM1H nas proporções de 10, 20 e 30% em volume com a relação A/C de 0,4. Foi possível observar que na pasta de cimento a viscosidade aumenta com o aumento da taxa de cisalhamento.

Na curva tensão x taxa de cisalhamento da pasta de cimento a tensão de cisalhamento aumenta com o aumento da taxa de cisalhamento, depois permanece constante durante a redução da taxa de cisalhamento.

Além disso, é possível observar nas curvas de viscosidade apresentadas na Figura 48, que com aumento da taxa de substituição do cimento pelo PRH houve uma diminuição da viscosidade das pastas, isso possivelmente ocorre pelo fato de que com a redução da quantidade de cimento nas misturas as pastas se tornam mais fluidas, ou seja, a resistência da pasta ao fluxo diminui.

Figura 49. Viscosidade das pastas de cimento com a substituição parcial de PRHM2H, PRHM4H e PRHM8H relação A/C 0,4 (a) viscosidade x taxa de cisalhamento e (b) tensão x taxa de cisalhamento.



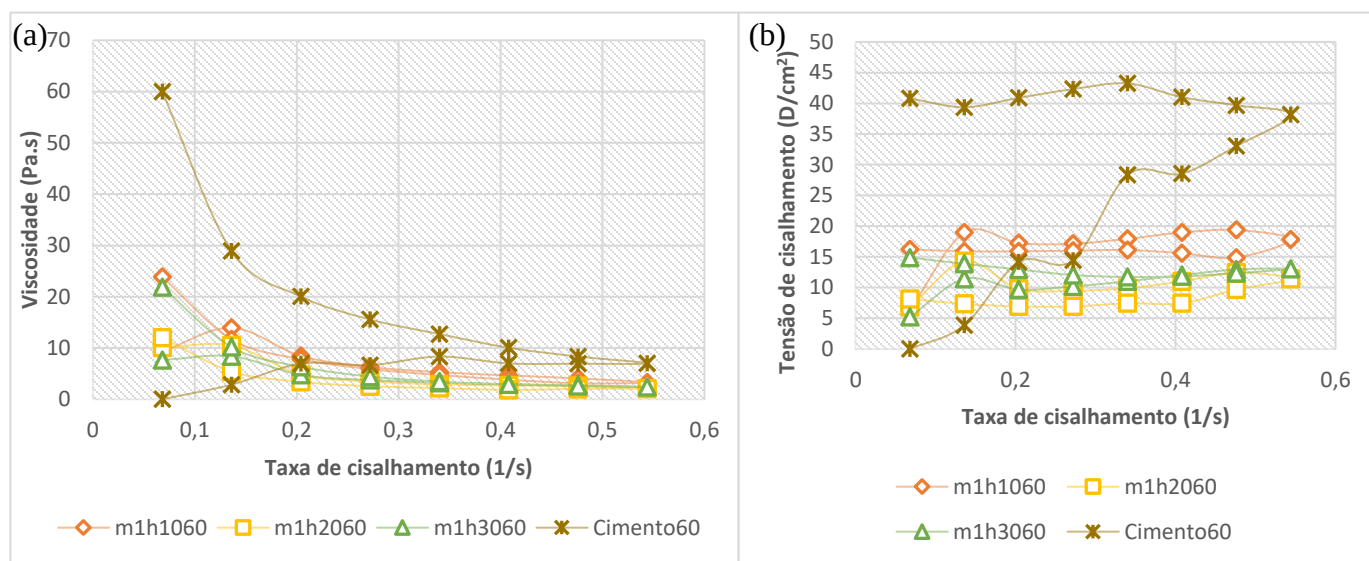
Fonte: O Autor (2023).

GRUPO II (Figura 49) – Substituição de 20% do cimento por PRH com os tempos de moagem de 1h, 2h, 4h e 8h com a relação A/C de 0,4. Foi possível observar que as pastas mantiveram um comportamento semelhante a Figura 48.

Além disso, a aumento no tempo de moagem interferiu na viscosidade das pastas, a pasta de cimento com substituição parcial de cimento pelo PRHM8H apresentou uma viscosidade mais elevada que aquelas com o PRHM1H e PRHM2H este comportamento

pode estar relacionado ao fator de que partículas finas podem aumentar a viscosidade das misturas pelo fato de que partículas de menor dimensão possuem uma maior capacidade de ocupar os espaços vazios entre as partículas maiores, o que pode ter ocasionado uma aglomeração de partículas que pode ter acarretado uma maior resistência ao fluxo.

Figura 50. Viscosidade das pastas de cimento com a substituição parcial do PRHM1H relação A/C 0,6 (a) viscosidade x taxa de cisalhamento e (b) tensão x taxa de cisalhamento.

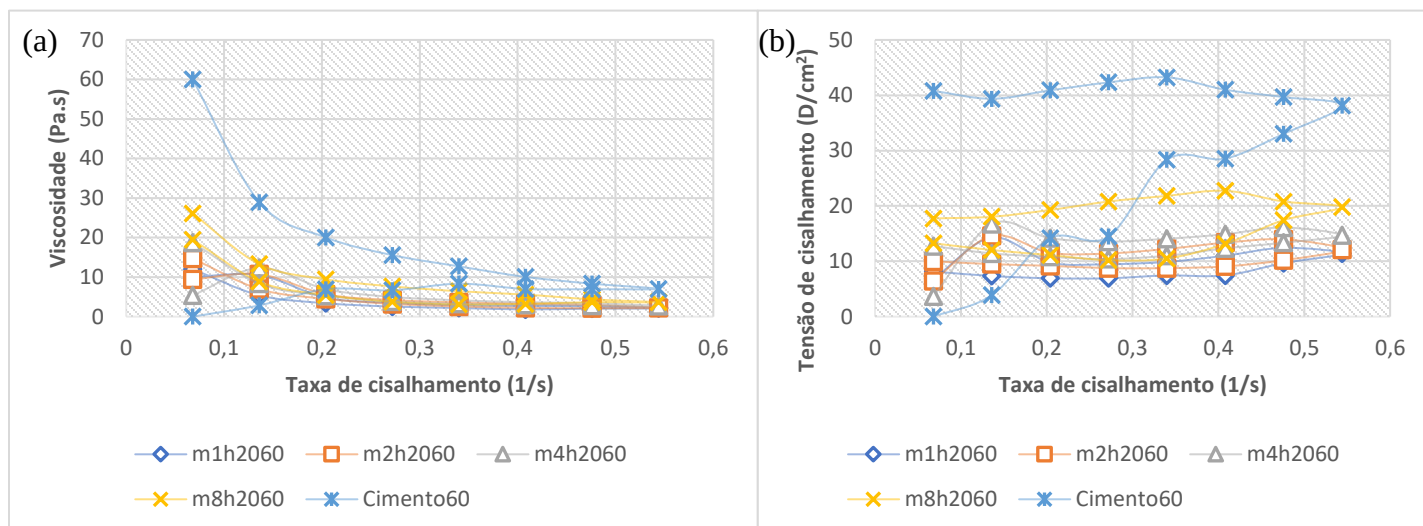


Fonte: O Autor (2023).

GRUPO III (Figura 50) – Substituição do cimento por PRHM1H nas proporções de 10, 20 e 30% em volume com a relação A/C de 0,6. Foi possível observar que as pastas mantiveram um comportamento semelhante as apresentadas na Figura 49, porém com o aumento relação A/C os valores de viscosidade (cP) tiveram uma queda.

Além disso, visto a maior quantidade de água presente no sistema os teores de substituição do cimento pelo PRH não tiveram uma influência tão grande quanto nas pastas com a relação A/C de 0,4, embora os maiores teores de substituição também diminuíssem a tensão e a viscosidade das pastas para a relação A/C de 0,6.

Figura 51. Viscosidade das pastas de cimento com a substituição parcial de PRHM2H, PRHM4H e PRHM8H relação A/C 0,6 (a) viscosidade x taxa de cisalhamento e (b) tensão x taxa de cisalhamento.



Fonte: O Autor (2023).

GRUPO IV (Figura 51) – Substituição de 20% cimento por PRH com os tempos de moagem de 1h, 2h, 4h e 8h com a relação A/C de 0,6. Foi possível observar que as pastas mantiveram um comportamento semelhante as da Figura 50, porém o tempo de moagem teve uma menor influência na viscosidade das pastas.

De maneira geral as pastas de cimento estudadas apresentam um comportamento reológico geralmente associado ao estudo de pastas de cimento nos minutos iniciais a sua hidratação, coerentes com estudos de Sergio *et al.* (2020).

Em resumo, os resultados indicam que o aumento na substituição do cimento pelo PRH resulta em redução da viscosidade, porém essa diferença tende a ser menor na relação A/C 0,6 do que na relação 0,4. Esse comportamento pode ocorrer devido ao fato de que a relação A/C que é um fator crucial na determinação das propriedades de uma pasta de cimento. Uma relação água/ligante menor (0,4, nesse caso) significa que há menos água disponível em relação à quantidade de cimento, o que pode levar a uma interação mais eficiente entre os grãos de cimento e os materiais substitutos, como o PRH. Isso pode resultar em uma maior redução da viscosidade, pois os materiais alternativos podem preencher os espaços entre os grãos de cimento de maneira mais eficaz, além deste fator o formato irregular do PRH também diminui a resistência do material ao fluxo.

Por outro lado, uma relação A/C maior (0,6) implica uma quantidade relativamente maior de água em relação ao cimento. Nesse cenário, o efeito de preenchimento dos espaços entre os grãos de cimento pelo PRH, bem como de seu formato irregular podem ser menos proeminentes, levando a uma redução menos significativa da viscosidade em comparação com a relação A/C mais baixa.

4.3 ESTUDO EM PASTAS – ESTADO ENDURECIDO

4.3.1 Índice de atividade pozolânica – NBR 5751-2015

A fim de verificar se o PRH apresenta potencial pozolânico, além do ensaio de condutividade elétrica também foi realizado o ensaio de determinação da atividade pozolânica com a cal aos 7 dias conforme descrito no item 3.3.3.10, a Tabela 28 mostra as misturas realizadas e os resultados do rompimento dos CPs com PRH e o índice de atividade de cal (IAC).

Tabela 27. Índice de atividade pozolânica de cal das pastas.

Amostra	Mistura	Ca(OH) ₂ (g)	PRH (g)	Areia (g)	Água (g)	Consist. média (mm)	a/agl	Resist. Comp. (MPa)	IAC (%)
1	PRHM1H	104	240,8	936	241,36	220	0,7	0,80	13,31
2								0,90	14,97
3								0,85	14,14
1	PRHM2H					230		0,85	14,14
2								0,90	14,97
3								0,90	14,97
1	PRHM4H					235		0,95	15,80
2								0,90	14,97
3								0,95	15,80
1	PRHM8H					240		1,10	18,30
2								1,00	16,63
3								1,05	17,47

Fonte: O Autor (2023).

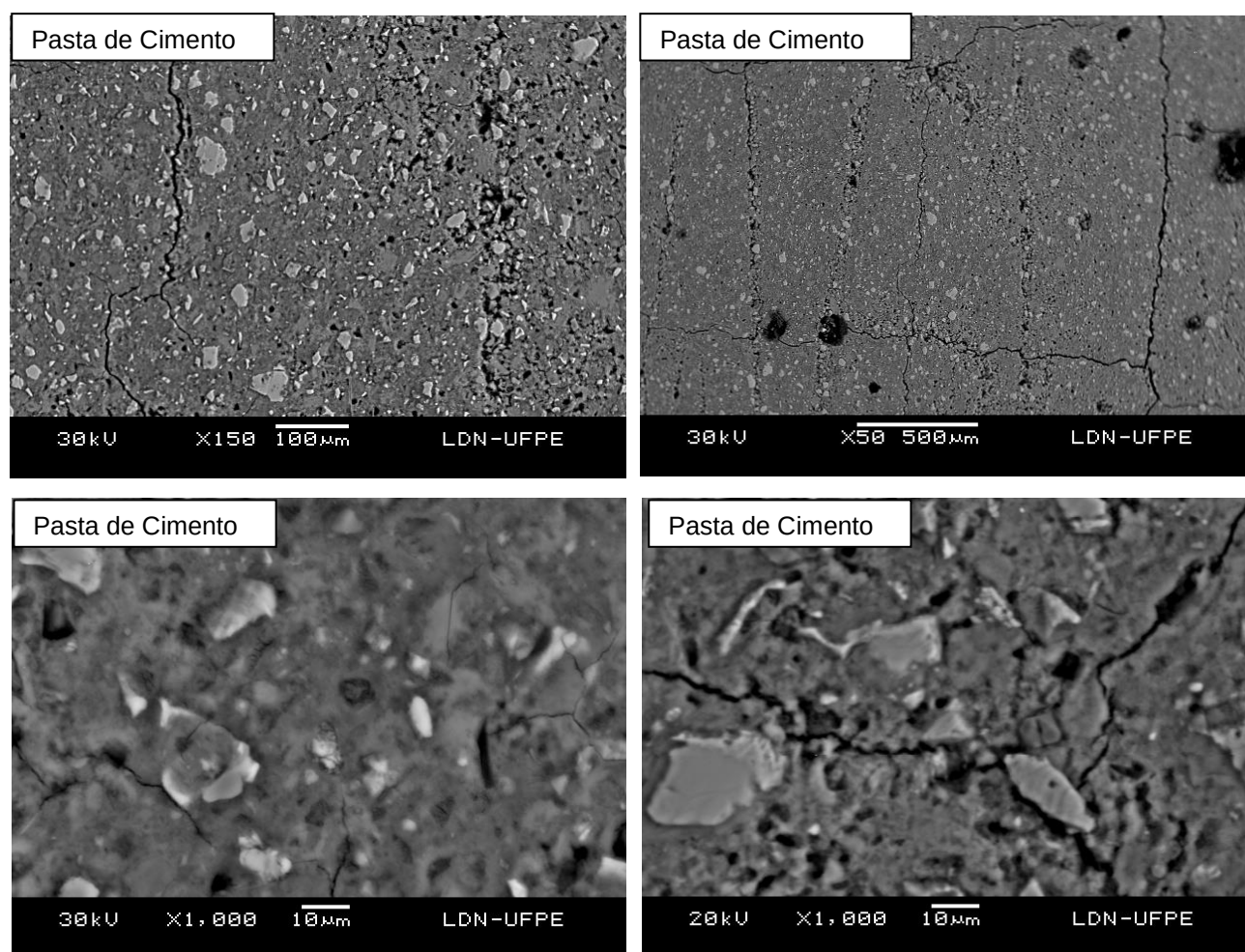
O ensaio de FRX mostra a predominância de dióxido de silício na composição do PRH, enquanto o ensaio de DRX mostra uma grande quantidade de picos de quartzo possivelmente provenientes da areia presente nas argamassas e concretos do resíduo de construção que deu origem ao PRH. Sendo assim, devido a estas características

esperava-se que o material não apresentasse um alto índice de atividade pozolânica. E conforme o esperado, nenhuma das misturas atingiu a exigência mínima da NBR 5751 (ABNT, 2015) de 6 MPa para ser considerado um material pozolânico.

4.3.2 Microscopia Eletrônica De Varredura (MEV) das pastas

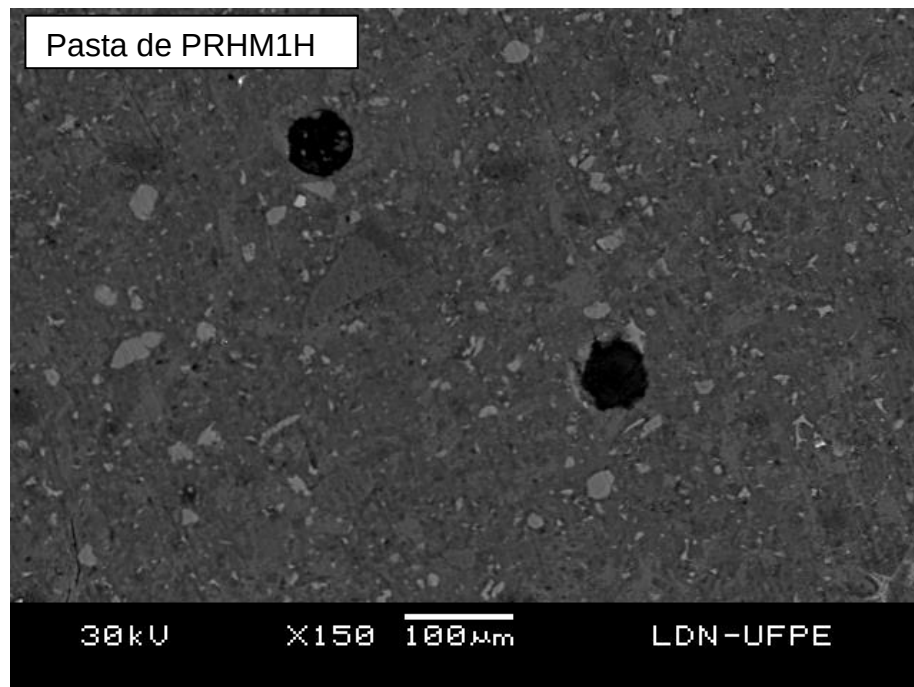
As Figuras 52, 53 e 53 mostram as imagens das pastas de cimento de referência, das pastas de cimento com o PRHM1H e das pastas de cimento com o PRHM8H obtidas através do MEV aos 28 dias, respectivamente.

Figura 52. MEV da pasta de cimento.



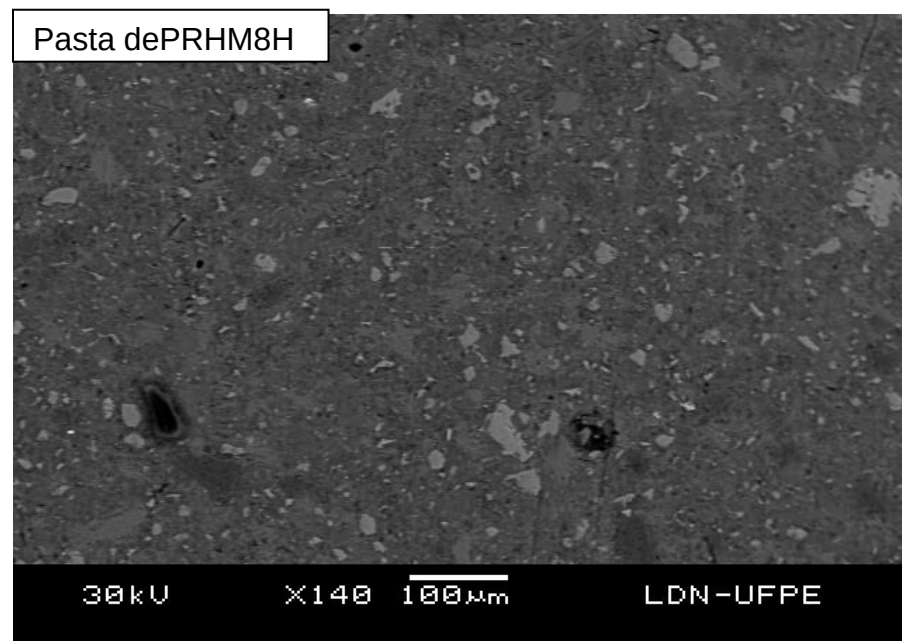
Fonte: O Autor (2023).

Figura 53. MEV das pastas de cimento com PRHM1H.



Fonte: O Autor (2023).

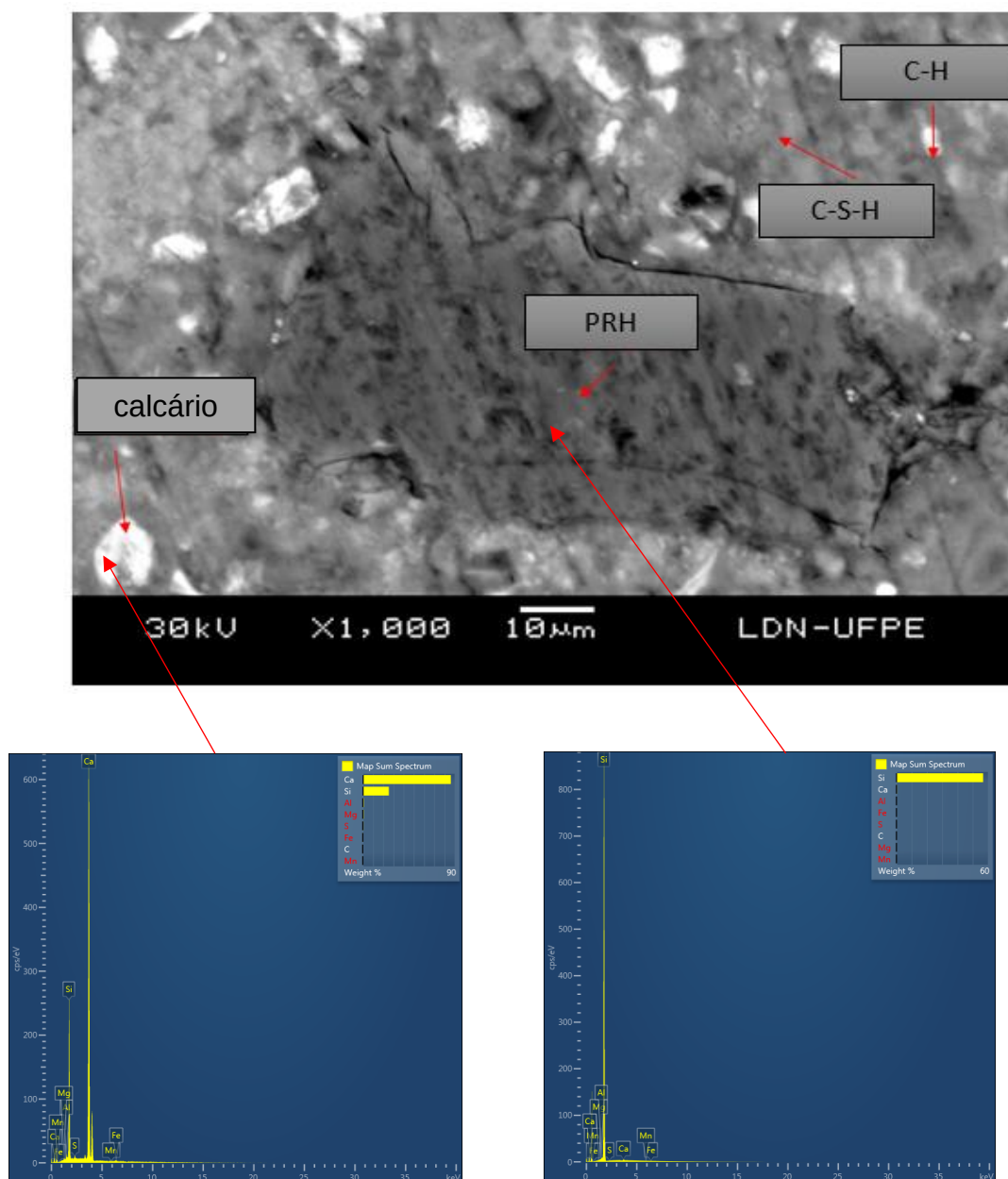
Figura 54. MEV das pastas de cimento com PRHM8M.



Fonte: O Autor (2023).

Nas Figuras 52, 53 e 54 pode-se ver o CH que está em cinza claro, C—S—H aparece em cinza escuro e a fase porosa é escura. Já na Figura 55 a imagem mostra a microestrutura da pasta em torno de uma Partícula de PRH. Também é possível observar o surgimento de uma zona de transição (área escura) entre a partícula do PRH e a pasta de cimento.

Figura 55. MEV com EDS das pastas de cimento em torno de uma partícula de PRH.

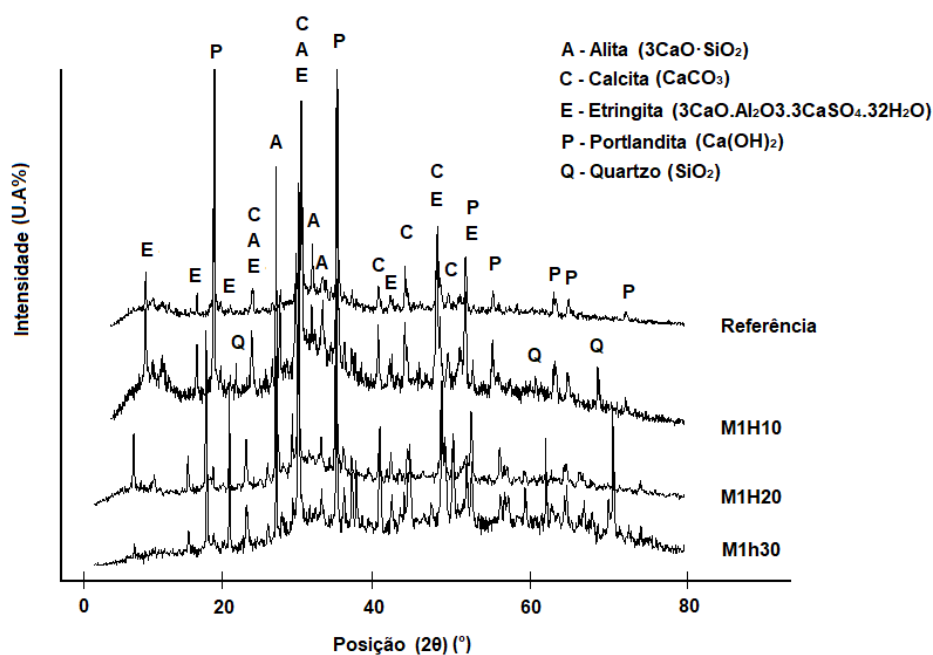


Fonte: O Autor (2023).

4.3.3 DRX das pastas

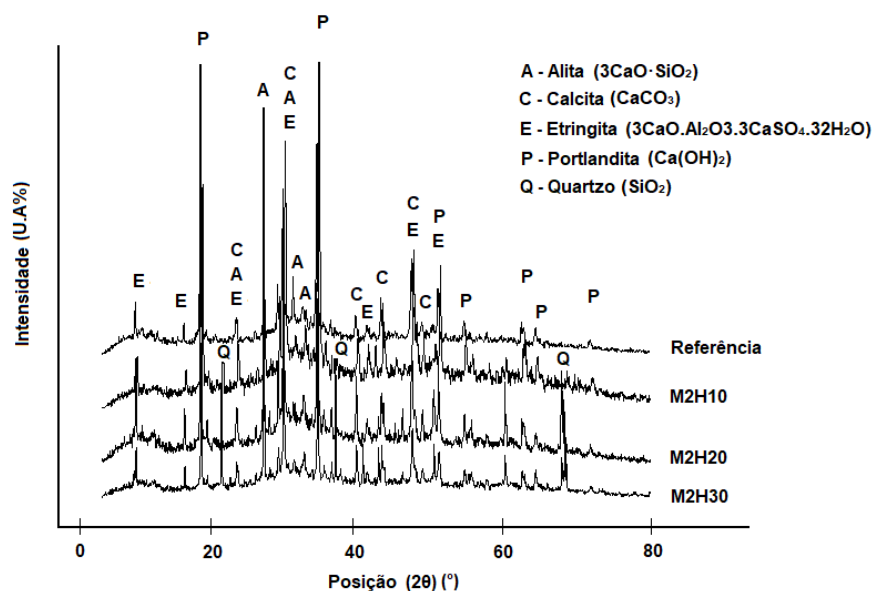
As figuras 56 a 59 apresentam os difratogramas de raio-X das pastas de cimento e pastas com a substituição parcial do cimento pelo PRH aos 28 dias, obtidos conforme os procedimentos descritos no item 3.3.3.8.

Figura 56. Difratoograma da pasta de cimento e pastas com a substituição parcial por PRH moído uma hora nos percentuais de substituição de 10% (M1H10), 20% (M1H20) e 30% (M1H30).



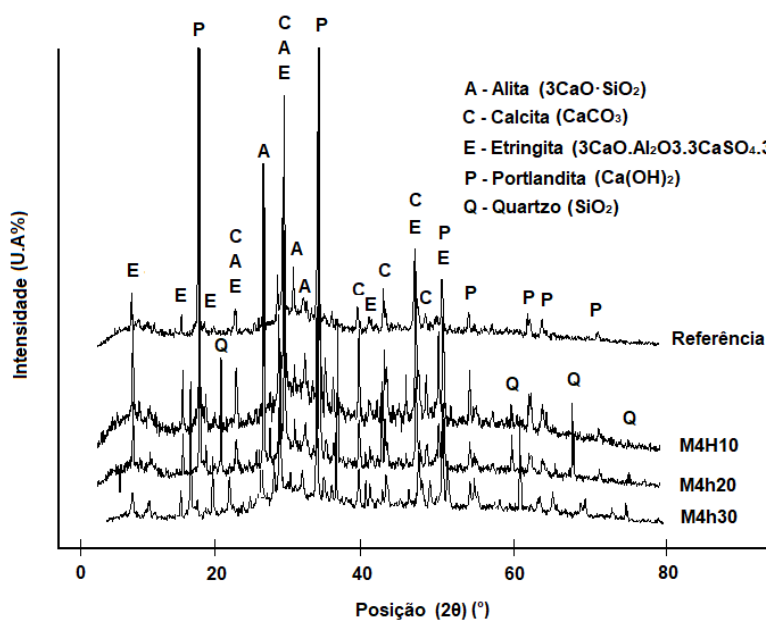
Fonte: O Autor (2023).

Figura 57. Difratoograma da pasta de cimento e pastas com a substituição parcial por PRH moído duas horas nos percentuais de substituição de 10% (M2H10), 20% (M2H20) e 30% (M2H30).



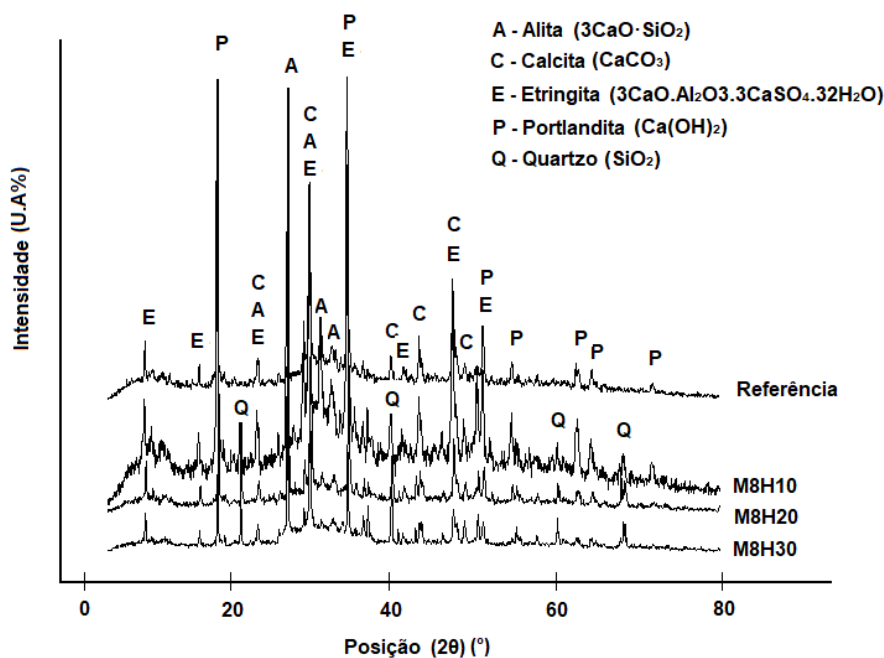
Fonte: O Autor (2023).

Figura 58. Difratoograma da pasta de cimento e pastas com a substituição parcial por PRH moído quatro horas nos percentuais de substituição de 10% (M4H10), 20% (M4H20) e 30% (M4H30).



Fonte: O Autor (2023).

Figura 59. Difratoograma da pasta de cimento e pastas com a substituição parcial por PRH moído oito horas nos percentuais de substituição de 10% (M8H10), 20% (M8H20) e 30% (M8H30).



Fonte: O Autor (2023).

Com base nos difratogramas das Figuras 56 a 59, foi verificado que:

I) Os Picos de Alita (fases cristalinas $2\theta = 16,04^\circ; 18,17^\circ; 27,01^\circ; 29,07^\circ; 29,98^\circ; 31,18^\circ; 32,04^\circ$), Calcita (fases cristalinas $2\theta = 23,05^\circ; 31,42^\circ; 35,9^\circ; 39,4^\circ; 43,15^\circ; 47,10^\circ; 48,49^\circ$) Etringita (fases cristalinas $2\theta = 9,08^\circ; 16,52^\circ; 18,22^\circ; 22,91^\circ; 29,44^\circ; 32,24^\circ; 34,25^\circ; 36,08^\circ; 41,29^\circ; 63,24^\circ$ e $72,16^\circ$) e Portlandita (fases cristalinas $2\theta = 18,05^\circ; 28,69^\circ; 34,11^\circ; 36,56^\circ; 50,84^\circ; 54,39^\circ; 62,64^\circ; 64,23^\circ$ e $71,83^\circ$) estão presentes em todos os difratogramas;

II) O halo amorfo nos difratogramas entre 27° e 36° 2θ caracteriza o C-S-H que não apresenta estrutura cristalina bem definida também está presente em todas as pastas;

III) Os compostos hidratados identificados foram portlandita, etringita e o C-S-H;

IV) Os difratogramas das pastas de cimento com a presença do PRH apresentam quartzo, o que era esperado tendo em vista o resultado encontrado da análise do PRH em estado anidro, onde foi identificado a presença de picos de sílica cristalinos característicos do quartzo;

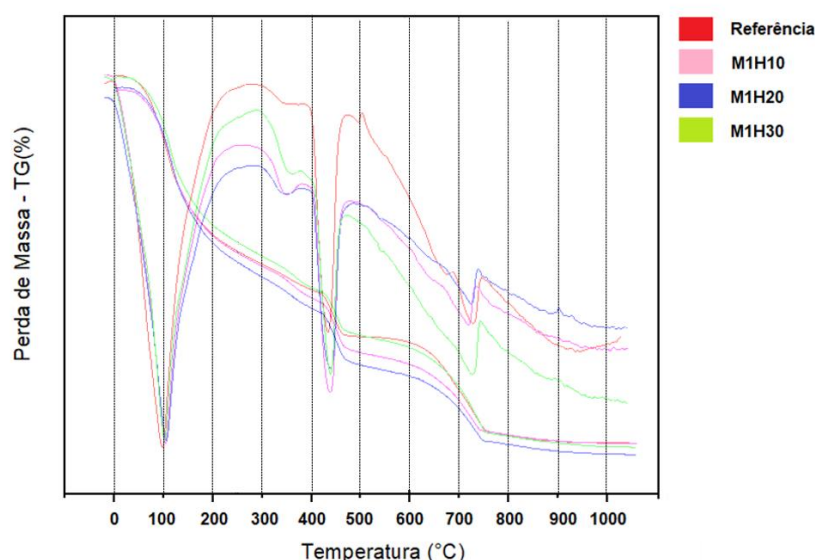
V) A substituição parcial do cimento pelo PRH mantém os difratogramas similares ao da pasta de referência, exceto pela intensidade dos picos característicos dos compostos hidratados e pela identificação do mineral constituinte do PRH o quartzo;

VI) Não existe uma grande diferença na intensidade dos picos de Portlandita da amostra de referência em relação as amostras com a presença do PRH, o que denota que durante o processo de hidratação do cimento o PRH não reagiu com a Portlandita, o que reforça que o material possui uma natureza inerte e não pozolânica.

4.3.4 TG das pastas

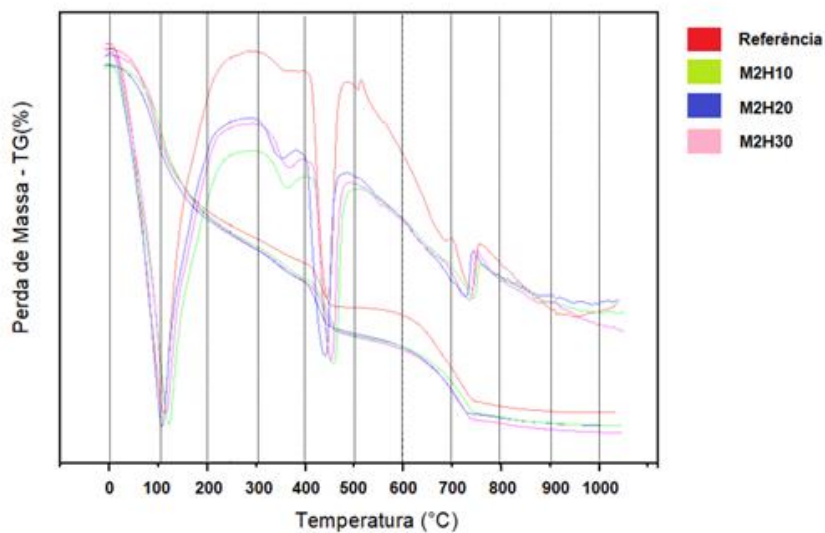
As Figuras 60 a 63 apresentam as curvas termogravimétricas das pastas de cimento e pastas com a substituição parcial do cimento pelo PRH aos 28 dias na temperatura até 1050°C.

Figura 60. Curvas TG e DTA das pastas de cimento e pastas com a substituição parcial por PRHM1H.



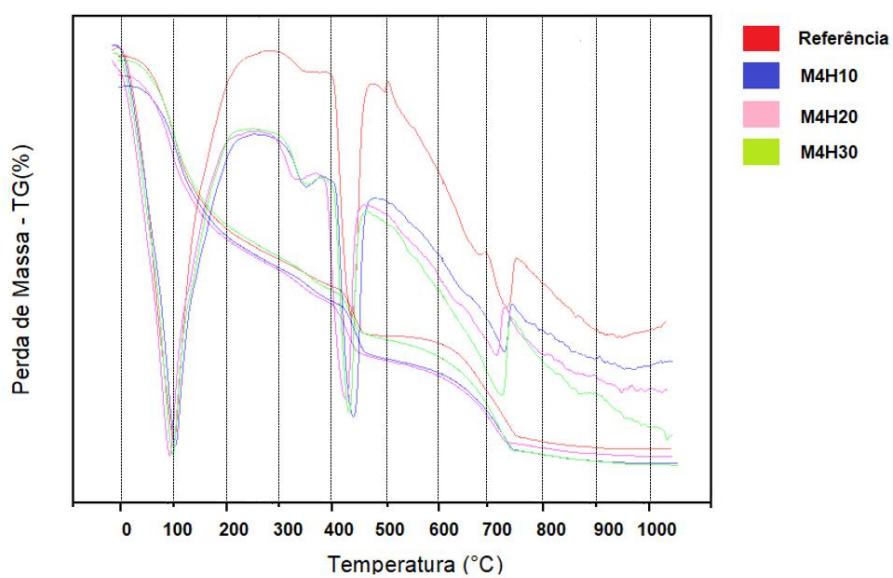
Fonte: O Autor (2023).

Figura 61. Curvas TG e DTA das pastas de cimento e pastas com a substituição parcial por PRHM2H.



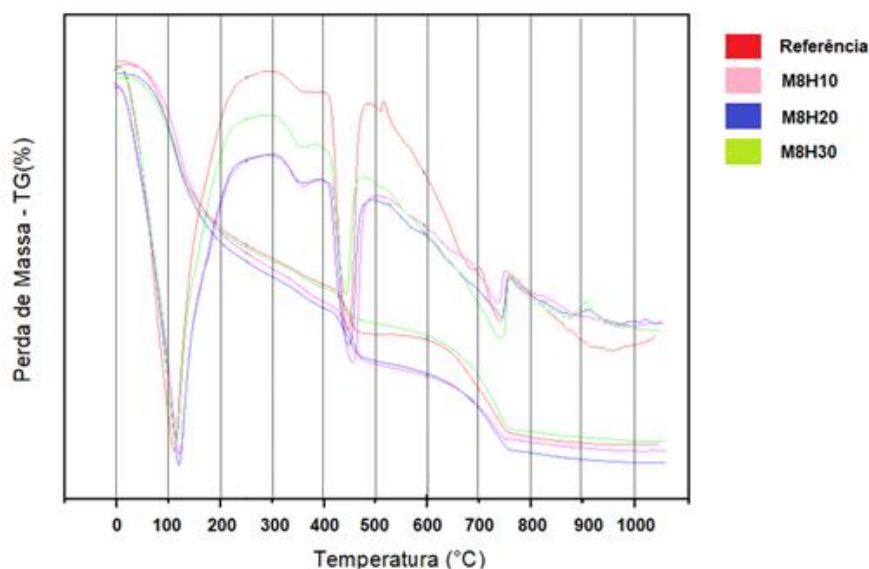
Fonte: O Autor (2023).

Figura 62. Curvas TG e DTA das pastas de cimento e pastas com a substituição parcial por PRHM4H.



Fonte: O Autor (2023).

Figura 63. Curvas TG e DTA das pastas de cimento e pastas com a substituição parcial por PRHM8H.



Fonte: O Autor (2023).

A partir das curvas termogravimétricas apresentadas nas Figuras 60 a 63, é possível detectar a ocorrência dos seguintes eventos térmicos:

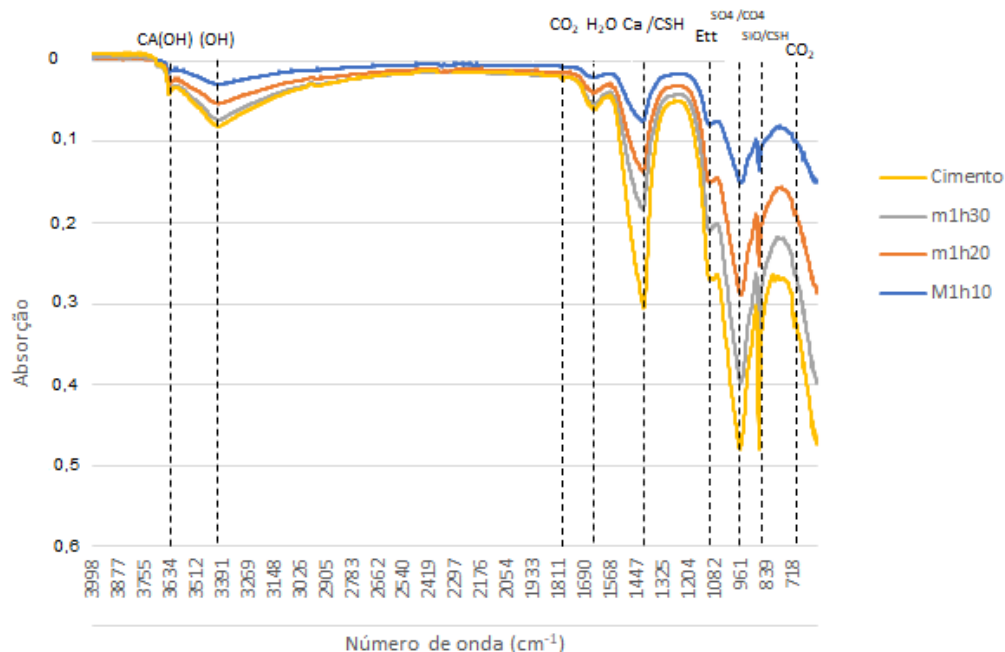
- I) A Perda de água que ocorre entre 50°C e 200°C, início do processo de desidratação do silicato de cálcio hidratado (CSH) e da etrigita;
- II) A Decomposição do hidróxido de cálcio (portlandita) ocorre entre 400°C e 500°C;
- III) Descarbonatação do carbonato de cálcio (calcita) iniciando em torno de 500°C.

As curvas termogravimétricas mostram que as pastas de cimento com substituição parcial pelo PRH têm um comportamento térmico semelhante ao da pasta de cimento de referência. Esse comportamento térmico encontrado nas pastas de cimento está presente em outros estudos de pastas de cimento com adições minerais como os realizados por Hoppe Filho *et al.* (2017), Kabay *et al.* (2021) e Astoveza *et al.* (2022).

4.3.5 Infravermelho

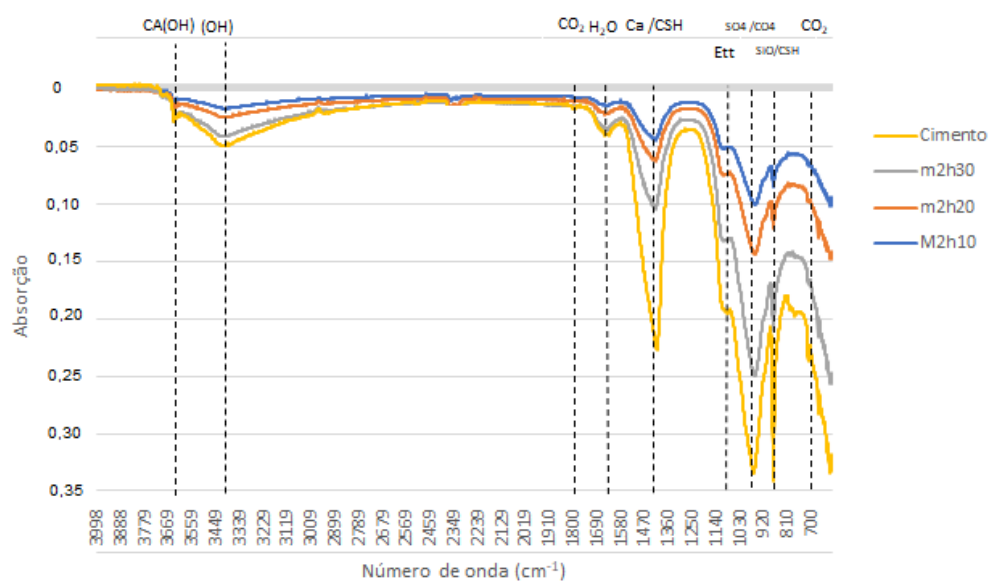
As Figuras 64, 65, 66 e 67 apresentam os espectros na faixa do IV para as pastas de cimento nas faixas de 4000 cm^{-1} até 700 cm^{-1} aos 28 dias. É possível observar nos espectros (Figuras 64 a 67) que não há uma diferença notável entre as intensidades das pastas da banda de 3644 cm^{-1} . Segundo Stepkowska *et al.* (2005) e Andrade *et al.* (2019), essa banda corresponde a portlandita, corroborando os resultados encontrados no Drx, onde a presença do pó reciclado híbrido nas pastas não reagem com a portlandita (CH), consumindo a mesma e gerando (CSH), comportamento comumente associado a materiais de natureza pozolânica. No infravermelho para vibrações da ligação de 3000 cm^{-1} até 3700 cm^{-1} possivelmente trata-se das ligações O-H presentes no Ca(OH)_2 (hidróxido de cálcio) (Trezza; Ferraiuolo, 2003)

Figura 64. Espectros IV por refletância atenuada (ATR) nas faixas do IV para pastas de cimento com PRHM1H10, PRHM1H20 e PRHM1H30.



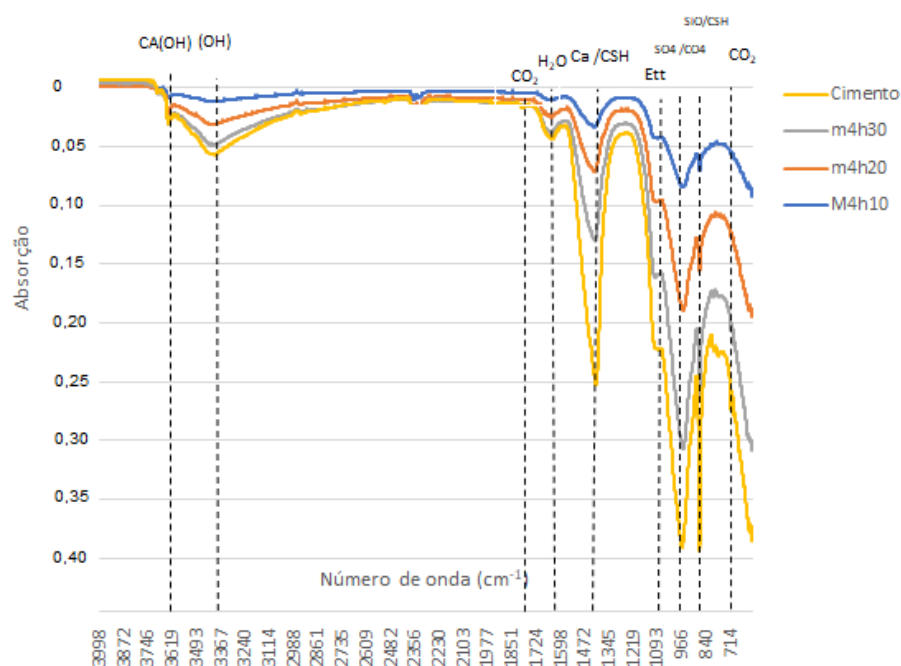
Fonte: O Autor (2023).

Figura 65. Espectros IV por refletância atenuada (ATR) nas faixas do IV para pastas de cimento com PRHM2H10, PRHM2H20 e PRHM2H30.



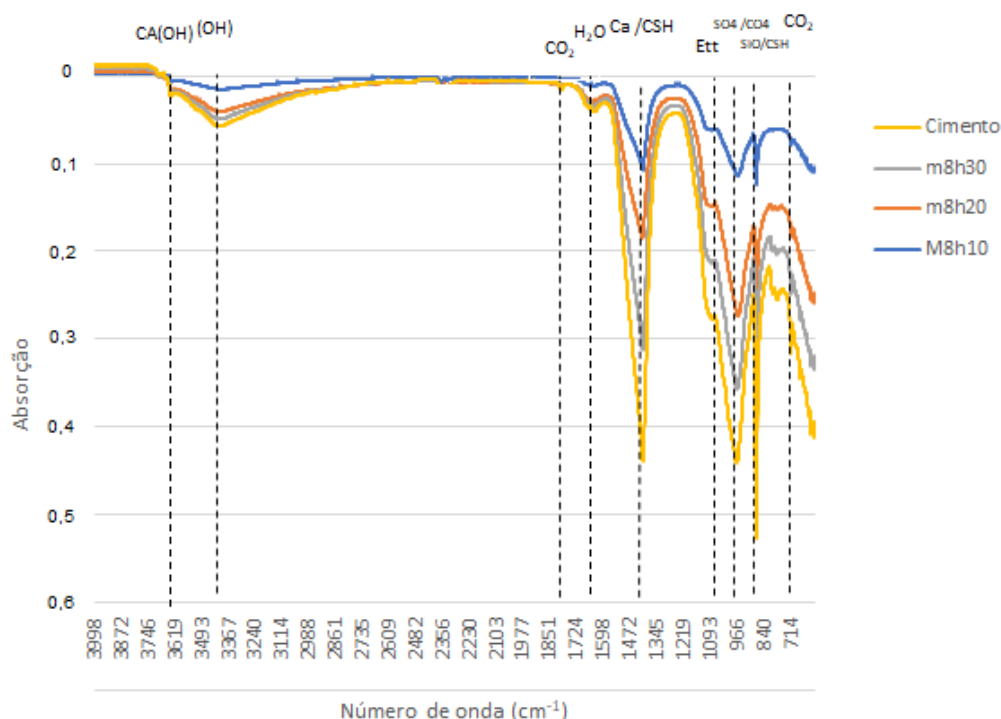
Fonte: Autor (2023)

Figura 66. Espectros IV por refletância atenuada (ATR) nas faixas do IV para pastas de cimento com PRHM4H10, PRHM4H20 e PRHM4H30.



Fonte: O Autor (2023).

Figura 67. Espectros IV por refletância atenuada (ATR) nas faixas do IV para pastas de cimento com PRHM8H10, PRHM8H20 e PRHM8H30.



Fonte: O Autor (2023).

A maior parte dos picos encontrados nas análises está localizada na faixa entre 2000 cm^{-1} e 700 cm^{-1} . Em todas as pastas apareceram picos de CO_2 (1793 cm^{-1}), H_2O (1638 cm^{-1}) e Si pertencente ao estiramento C-S-H (971 cm^{-1}). Por sua vez, o pico (1422 cm^{-1}) está associado possivelmente a calcita, relativa ao filler calcário, que normalmente é adicionado durante a fabricação do cimento ou ao processo de carbonatação (Hoppe Filho *et al.*, 2017). Esses picos também estão presentes no trabalho de Stepkowska *et al.* (2005). Já o pico de 1115 cm^{-1} relatado no estudo de Astoveza *et al.* (2022), foi associado a etringita. Já os picos entre 860 e 880 cm^{-1} estão associadas às fases carbonáticas (Jose *et al.*, 2020).

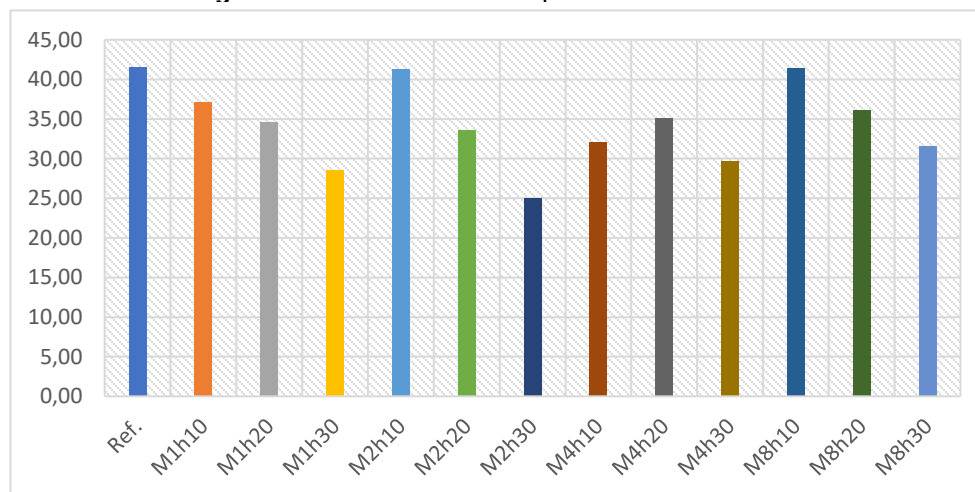
4.3.6 Resistência a compressão das pastas (ABNT NBR 7215/2019)

Os resultados obtidos no ensaio de resistência a compressão das pastas podem ser encontrados no apêndice C, bem como os cálculos de desvio padrão e os coeficientes de variação. As medias obtidas no ensaio de resistência a compressão das pastas aos 7 e 56 dias estão presentes na Tabela 29, assim como, nas Figuras 68 e 69.

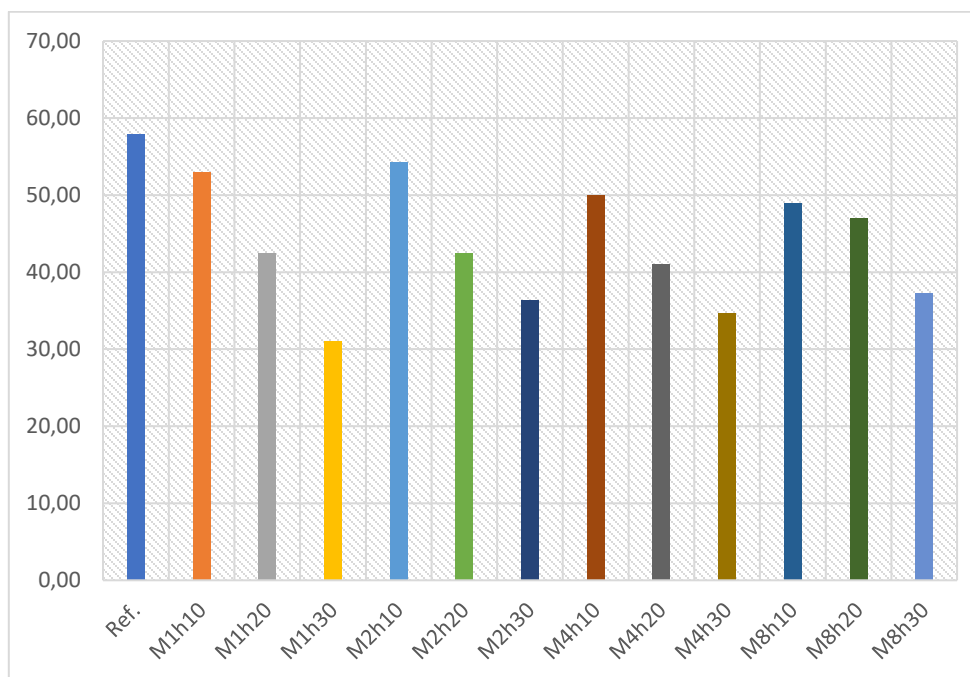
Tabela 28. Resultado dos ensaios resistência a compressão das pastas aos 7dias e 56 dias.

RESISTÊNCIA (MPa)		
Amostra	7 Dias	56 dias
Ref.	41,59	57,95
M1h10	37,15	53,00
M1h20	34,59	42,50
M1h30	28,53	31,00
M2h10	41,35	54,33
M2h20	33,60	42,50
M2h30	24,97	36,33
M4h10	32,11	50,00
M4h20	35,08	41,00
M4h30	29,74	34,67
M8h10	41,47	49,00
M8h20	36,07	47,00
M8h30	31,61	37,33

Fonte: O Autor (2023).

Figura 68. Resistência à compressão aos 7 dias.

Fonte: O Autor (2023).

Figura 69. Resistência à compressão aos 56 dias.

Fonte: O Autor (2023).

Observando os gráficos de resistência à compressão aos 7 e 56 dias, Figura 68 e 69, respectivamente, é possível notar que a finura do pó reciclado híbrido não apresentou uma tendência em relação a sua influência na resistência a compressão das pastas de cimento, porém o percentual de substituição de cimento pelo material reciclado teve um

impacto significativo nas misturas. As pastas aos 7 dias com teores de substituição de 10 % apresentaram uma resistência que variavam de 32,11 a 41,47 Mpa com uma média de 38,02 Mpa, o que representa uma queda de 8,54 % de resistência em relação a pasta de referência. Para teores de substituição de 20 % a resistência variou de 33,60 a 36,07 MPa com uma média de 34,84 MPa o que representa uma queda de 16,24 % de resistência em relação a pasta de referência. Por fim, para teores de substituição de 30 % a resistência variou de 24,97 a 31,61 MPa com uma média de 28,71 MPa o que representa uma queda de 30,97 % de resistência em relação a pasta de referência.

As pastas aos 56 dias com teores de substituição de 10 % apresentaram uma resistência que variava de 49 até 54,33 MPa com uma média de 51,58 MPa o que representa uma queda de 10,99 % de resistência em relação a pasta de referência. Para teores de substituição de 20 % a resistência variou de 41,00 a 47,00 MPa com uma média de 43,25 MPa o que representa uma queda de 25,37 % de resistência em relação a pasta de referência. Por fim para teores de substituição de 30 % a resistência variou de 31 a 37,33 MPa com uma média de 34,83 MPa o que representa uma queda de 39,89 % de resistência em relação a pasta de referência.

Através desses resultados é possível inferir que porcentagens de substituição de cimento por PRH a partir de 30% não são vantajosas pois trazem grande perda na resistência a compressão as pastas. Essa tendencia de queda já era esperada uma vez que ao substituir um material ligante (cimento) por um material filler (PRH) em pequenas quantidades pode trazer benefícios como o refinamento dos poros das matrizes cimentícias e dos produtos de hidratação do cimento; alteração da microestrutura da zona de transição (redução da exsudação, com diminuição da espessura da zona de transição e interferência no crescimento dos cristais) e consequentemente um aumento da densidade da mistura em função do preenchimento dos vazios pelas partículas das adições inferiores às partículas do cimento (Fonseca, 2010). Porém em altos teores de substituição a perda do material ligante passa a influenciar de forma mais significativa a hidratação do cimento.

Essa tendencia de queda de resistência acentuada a partir de 30% de substituição do cimento por material reciclado também pode ser observada em outros estudos como o realizado por J. Topic *et. al.* (2017), onde se substituiu o cimento por partículas finas

oriundas da reciclagem do concreto nas proporções de 10%, 20%, 30%, 40% e 50% e verificou que partir de 30% de substituição houve uma queda de resistência que podia chegar a até 38% em relação a amostra de referência. De forma semelhante no estudo de Zhu *et. al.* (2016) com aumento dos percentuais de substituição as resistências também apresentaram o mesmo comportamento.

4.3.7 Módulo de elasticidade dinâmico por ultrassom

Para o cálculo dos módulos de elasticidade dinâmico, foi inicialmente feita a leitura do tempo de propagação da onda em microssegundos em três corpos de prova para cada mistura seguindo os procedimentos especificados na ASTM C597 e tirada uma média das três leituras conforme mostrado no apêndice D (ASTM, 2016). Em seguida foi calculada a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas conforme a equação 09. E por fim o Módulo de elasticidade dinâmico foi calculado segundo a equação 08, os resultados encontrados estão presentes na Tabela 30.

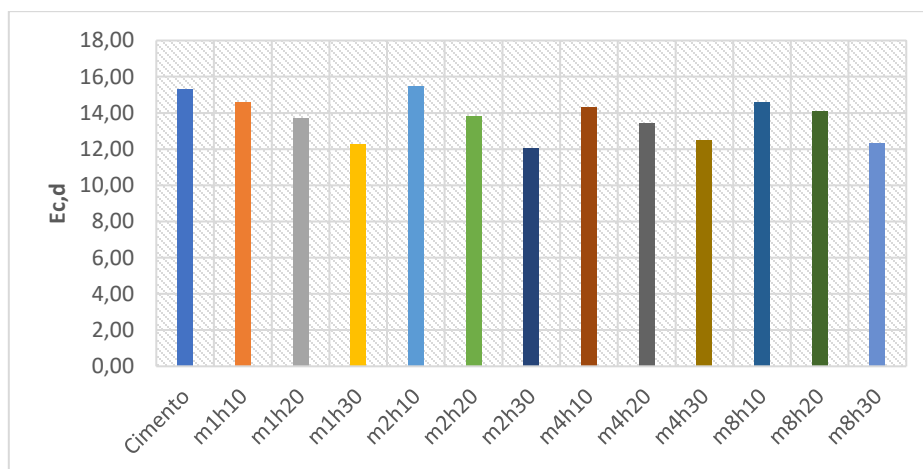
Tabela 29. Resultado do módulo de elasticidade dinâmico.

Amostras	V mm/μs	ρ Massa específica do concreto (Kg/m³)	Ec,d	Perda de Ec
Cimento	3,239741	1,62	15,31	-
m1h10	3,177966	1,60	14,57	4,86%
m1h20	3,138075	1,54	13,69	10,61%
m1h30	3,061224	1,46	12,29	19,70%
m2h10	3,257329	1,62	15,49	-
m2h20	3,147954	1,55	13,79	9,92%
m2h30	3,009027	1,48	12,04	21,36%
m4h10	3,167899	1,58	14,29	6,67%
m4h20	3,131524	1,52	13,42	12,37%
m4h30	3,05499	1,49	12,49	18,44%
m8h10	3,184713	1,60	14,58	4,80%
m8h20	3,184713	1,55	14,12	7,79%
m8h30	3,051882	1,47	12,32	19,56%

Fonte: O Autor (2023).

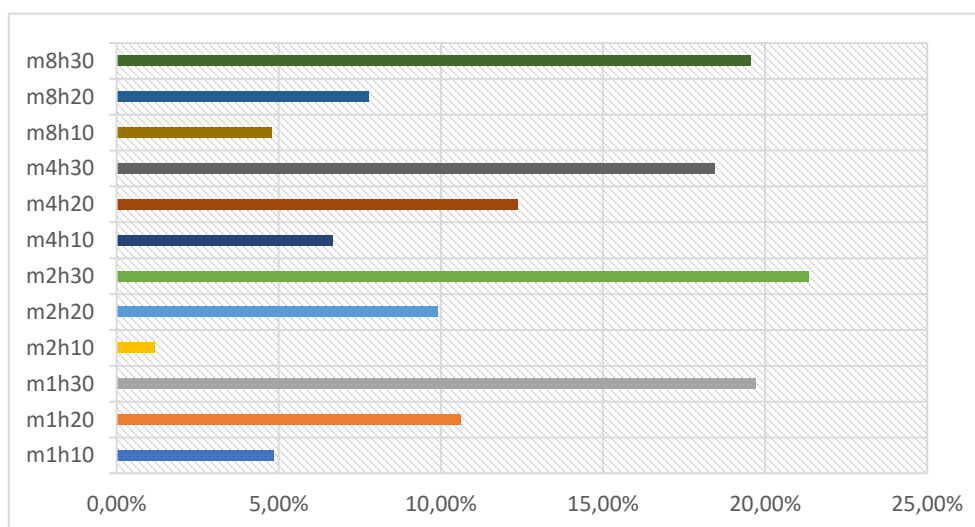
As Figuras 70 e 71 representam o módulo de elasticidade dinâmico da pasta de referência e das pastas com substituição parcial por PRH e o comparativo entre o módulo de elasticidade dinâmico da pasta de referência e das pastas com substituição parcial por PRH, respectivamente.

Figura 70. Módulo de elasticidade dinâmico da pasta de referência e das pastas com substituição parcial por PRH.



Fonte: O Autor (2023).

Figura 71. Comparativo entre o módulo de elasticidade dinâmico da pasta de referência e das pastas com substituição parcial por PRH.



Fonte: O Autor (2023).

Analisando os dados obtidos é possível observar na Figura 70, que a substituição do cimento pelo PRH nas pastas de cimento na proporção de 10% teve pouco impacto nos módulos de elasticidade, sendo esta diferença na maior parte dos casos inferior a 6%. Porém com o aumento dos percentuais de substituição por PRH das pastas o módulo de elasticidade dinâmico decresce, sendo que a substituição por PRH de 20% a queda variou de 7,79% a 12,37% enquanto com 30% de PRH a variação da queda foi de 18,44% a 21,36% em relação a amostra de referência.

A diminuição do módulo de elasticidade segue um padrão apresentada em outros estudos como o de J. Topic *et. al.* (2017). Nesse estudo, houve a substituição do cimento por partículas finas oriundas da reciclagem do concreto em pastas de cimento e os resultados mostraram que o módulo de elasticidade decaiu para valores de substituição acima de 30%, sendo a queda com 50% de substituição foi cerca de 38% menor em comparação com a amostra de referência.

Esse comportamento pode ocorrer porque o equilíbrio entre os diferentes componentes da matriz cimentícia são afetados, influenciando as propriedades mecânicas. Isso pode levar a uma distribuição diferente das fases sólidas e poros, afetando as propriedades mecânicas, incluindo o módulo de elasticidade. Além disso a interface entre o PRH e a matriz cimentícia pode não ser tão eficaz em transmitir forças quanto a interface entre os grãos de cimento. Isso pode resultar em uma diminuição na coesão da matriz e, portanto, na rigidez, afetando assim o módulo de elasticidade.

4.3.8 Permeabilidade e índice de vazios

A Tabela 31 e as Figuras 72 e 73, mostram os resultados dos ensaios de índice de vazios e absorção das pastas de cimento, onde é observado que a absorção de água e os índices de vazios das pastas com a substituição do cimento por PRHM1H na proporção de 10% apresenta melhores resultados que a amostra de referência, isso se deve ao efeito microfiller onde ocorre o empacotamento das partículas e o preenchimento dos vazios diminuindo assim os poros capilares e de gel.

As demais amostras com percentuais de substituição de 20% e 30% conforme mostrado nas Figuras 72 e 73, apresentam uma função crescente, ou seja, à medida que diminuimos a quantidade de cimento nas pastas e aumentamos a quantidade de PRH há

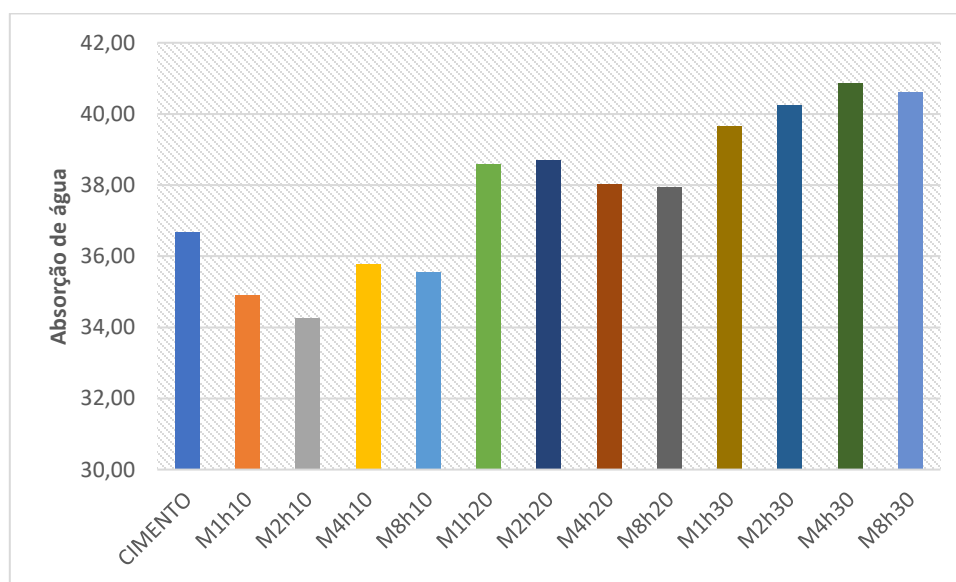
um aumento da porosidade e dos índices de vazios. Esse comportamento se deve ao fato que ao diminuirmos de forma significativa a quantidade do material ligante, a hidratação e posteriormente as propriedades da pasta no estado endurecido passam a ser afetadas de forma cada vez mais significativa.

Tabela 30. Resultado dos ensaios de índice de vazios e absorção.

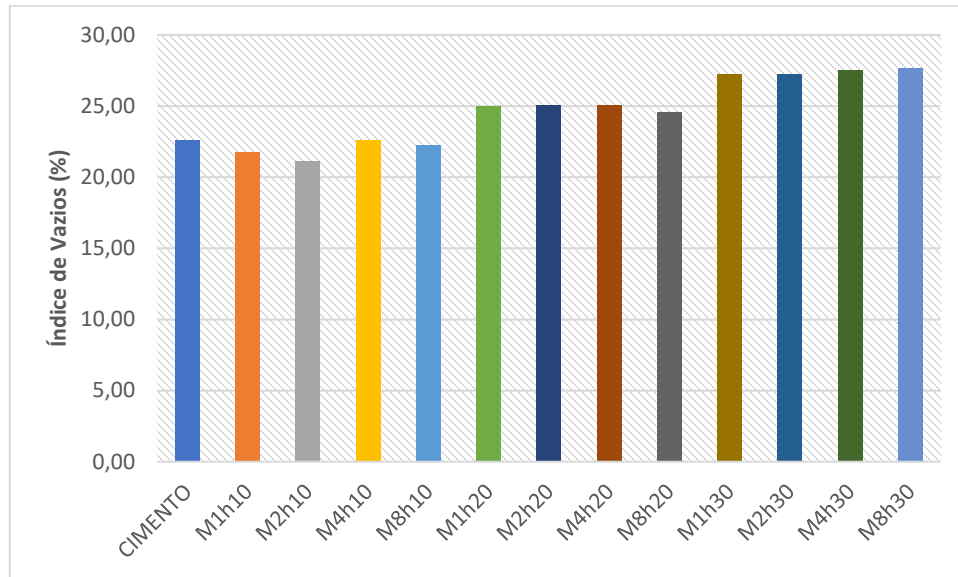
Amostras	Índice de Vazios (%)	Absorção (%)	ρ Massa específica do concreto (Kg/m ³)
CIMENTO	22,63	36,68	1620,87
M1h10	21,78	34,90	1602,69
M1h20	24,99	38,59	1544,39
M1h30	27,21	39,65	1457,73
M2h10	21,12	34,26	1622,09
M2h20	25,03	38,71	1546,45
M2h30	27,24	40,24	1477,59
M4h10	22,61	35,77	1582,19
M4h20	25,02	38,04	1520,25
M4h30	27,49	40,87	1486,74
M8h10	22,26	35,54	1596,93
M8h20	24,53	37,94	1546,71
M8h30	27,63	40,60	1469,29

Fonte: O Autor (2023).

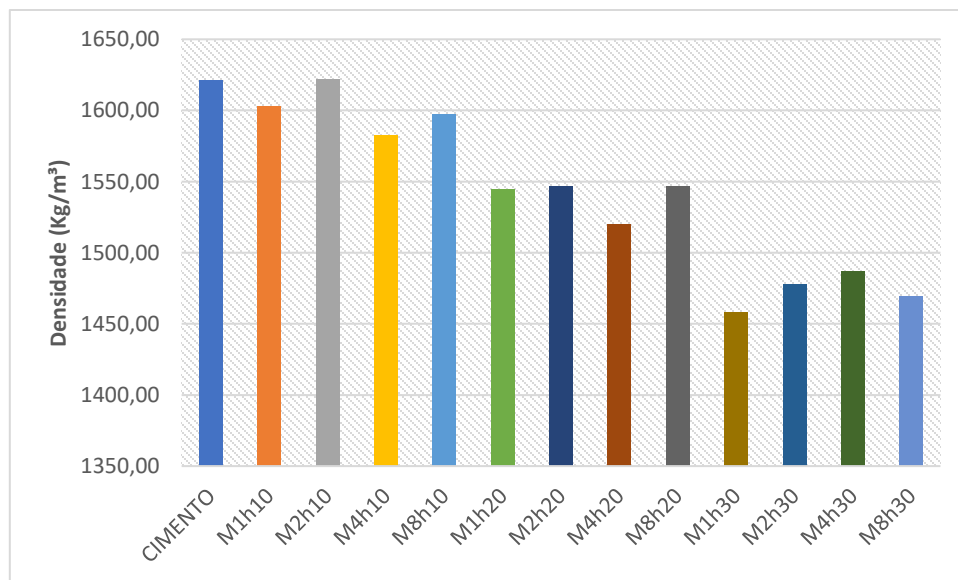
Figura 72. Absorção de água das pastas.



Fonte: O Autor (2023).

Figura 73. Índice de Vazios das pastas.

Fonte: O Autor (2023).

Figura 74. Massa específica das pastas.

Fonte: O Autor (2023).

4.3.9 Consumo CO₂

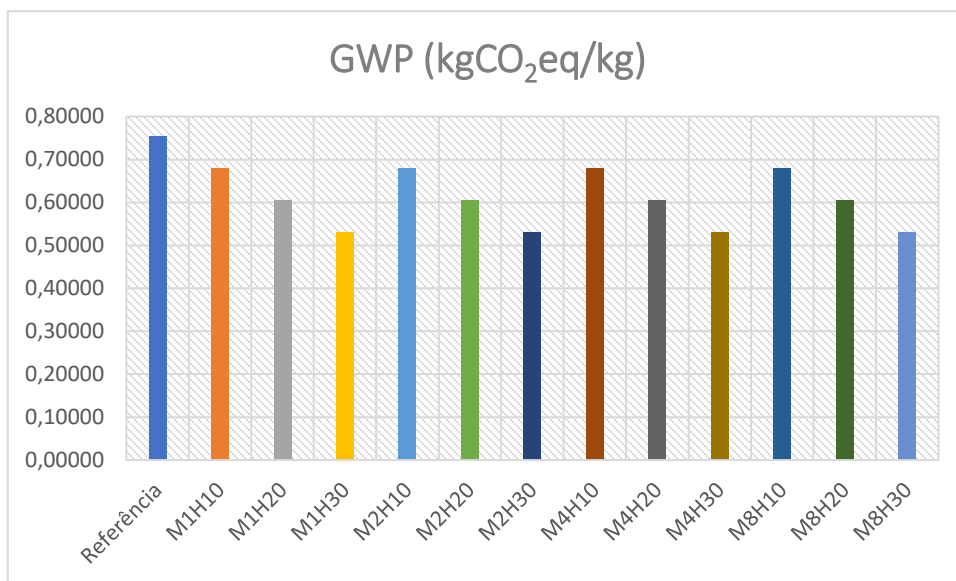
A tabela 32 e a Figura 75 apresentam os resultados das simulações de consumo de CO₂ das pastas de cimento.

Tabela 31. Resultado das simulações de consumo de CO₂ nas pastas de cimento.

Mistura	Cimento	Pó reciclado	Diâmetro	Tempo de moagem	Consumo energético (cominuição)	Consumo energético total (KWh)	GWP (kgCO ₂ eq/kg)
Referência	100	0	0	0	0	0,0278	0,75293
M1H10	90	10	D25	01 hora	0,000356	0,028156	0,67890
M1H20	80	20	D25	01 hora	0,000356	0,028156	0,60480
M1H30	70	30	D25	01 hora	0,000356	0,028156	0,53071
M2H10	90	10	D21	02 horas	0,000712	0,028512	0,67896
M2H20	80	20	D21	02 horas	0,000712	0,028512	0,60486
M2H30	70	30	D21	02 horas	0,000712	0,028512	0,53077
M4H10	90	10	D20	04 horas	0,001424	0,029224	0,67908
M4H20	80	20	D20	04 horas	0,001424	0,029224	0,60499
M4H30	70	30	D20	04 horas	0,001424	0,029224	0,53089
M8H10	90	10	D14	08 horas	0,002248	0,030048	0,67922
M8H20	80	20	D14	08 horas	0,002248	0,030048	0,60513
M8H30	70	30	D14	08 horas	0,002248	0,030048	0,53103

Fonte: O Autor (2023).

Figura 75. Consumo $\text{kgCO}_2\text{eq/kg}$ das pastas de cimento.



Fonte: O Autor (2023).

O valor associado de GWP (Potencial de Aquecimento Global) em $\text{kgCO}_2\text{eq/kg}$ representa uma métrica que avalia o impacto das emissões de gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono (CO_2), ao longo do tempo. Quanto maior o valor do GWP, maior o impacto ambiental.

Com base nos valores encontrados para as pastas de cimento podemos observar o consumo relativo de CO_2 nas diferentes misturas:

- I) A mistura de referência tem um valor de GWP de 0,75293 $\text{kgCO}_2\text{eq/kg}$.
- II) As misturas M1H10, M2H10, M4H10 e M8H10 têm valores de GWP em torno de 0,679 - 0,67922 $\text{kgCO}_2\text{eq/kg}$.
- III) As misturas M1H20, M2H20, M4H20 e M8H20 têm valores de GWP em torno de 0,6048 - 0,60513 $\text{kgCO}_2\text{eq/kg}$.
- IV) As misturas M1H30, M2H30, M4H30 e M8H30 têm valores de GWP em torno de 0,53071 - 0,53103 $\text{kgCO}_2\text{eq/kg}$.

Observa-se, portanto, uma tendência clara de redução no GWP à medida que a substituição do cimento pelo material alternativo (PRH) aumenta. Isso sugere que à medida que mais cimento é substituído, o impacto ambiental associado à produção das

pastas de cimento diminui, uma vez que o material alternativo pode ter um menor impacto de CO₂ em sua produção mesmo levando em conta o consumo energético necessário para a sua cominuição.

Em suma, os valores de GWP mostram como diferentes proporções de substituição e tempos de moagem afetam o impacto ambiental das pastas de cimento. A análise dos valores de GWP pode ajudar a avaliar e comparar o impacto ambiental das diferentes misturas. A Tabela 33 mostra a relação entre o GWP e a resistência das pastas de cimento aos 56 dias.

Tabela 32. Consumo kgCO₂eq/kg das pastas de cimento e a resistência mecânica aos 56 dias.

Misturas	GWP (kgCO ₂ eq/kg)	Cimento (g)	PRH (g)	Resistência (MPa)
Referência	0,75293	1200	0	57,95
M1H10	0,6789	1080	143,35	53,00
M1H20	0,6048	960	286,69	42,50
M1H30	0,53071	840	430,03	31,00
M2H10	0,67896	1080	143,35	54,33
M2H20	0,60486	960	286,69	42,50
M2H30	0,53077	840	430,03	36,33
M4H10	0,67908	1080	143,35	50,00
M4H20	0,60499	960	286,69	41,00
M4H30	0,53089	840	430,03	34,67
M8H10	0,67922	1080	143,35	49,00
M8H20	0,60513	960	286,69	47,00
M8H30	0,53103	840	430,03	37,33

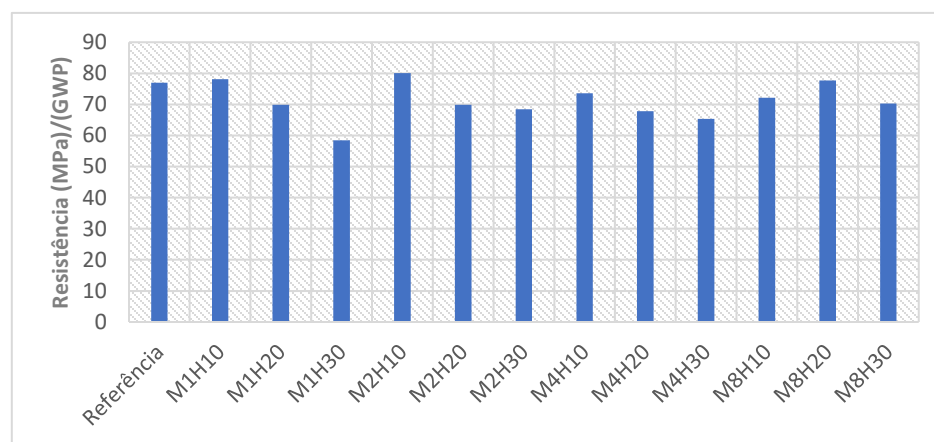
Fonte: O Autor (2023).

É possível observar a partir dos dados apresentados na Tabela 33 que há uma tendência geral de redução no GWP à medida que a substituição do cimento pelo material alternativo (PRH) aumenta. Também é possível notar uma tendência de queda na resistência à compressão das pastas de cimento à medida que a substituição do cimento pelo PRH aumenta. Além disso, a redução do GWP nas misturas com maior substituição do cimento sugere que a substituição tem o potencial de reduzir o impacto ambiental. No entanto, é importante considerar um equilíbrio entre a redução do impacto ambiental e a

manutenção das propriedades mecânicas necessárias para a aplicação específica do concreto.

Com base nesse princípio foi dividida a resistência obtida das pastas pelo potencial de aquecimento global e obtemos a relação mostrada na Figura 76.

Figura 76. Relação entre a Resistência (MPa)/(GWP).



Fonte: O Autor (2023).

A partir dos dados apresentados na Figura 76, foi possível observar que o cálculo da relação entre a resistência à compressão e o GWP (MPa/GWP) permite avaliar o desempenho mecânico relativo em relação ao impacto ambiental das diferentes misturas de pastas de cimento, algumas observações que podem ser observadas através desses dados são:

A relação MPa/GWP fornece uma perspectiva interessante para avaliar o equilíbrio entre desempenho mecânico e sustentabilidade. Misturas com alta relação MPa/GWP podem ser consideradas mais eficientes em termos de desempenho em relação ao impacto ambiental. Desta forma as pode-se dizer que as amostras M1H10, M2H10 e M8H20 acabam apresentando um melhor balanço entre desempenho mecânico e sustentabilidade do que a pasta de referência. Estes resultados são interessantes porque indica que essas misturas conseguem alcançar um nível satisfatório de resistência mecânica enquanto mantêm um impacto ambiental relativamente menor. Isso sugere que essas misturas podem ser escolhas mais sustentáveis em termos de desempenho geral e impacto ambiental.

5 CONCLUSÕES

A pesquisa estudou as propriedades do pó reciclado híbrido proveniente da região metropolitana de Recife/PE e a sua utilização como um material cimentício suplementar de natureza filler em substituição parcial ao cimento. O estudo permitiu analisar a influência da substituição parcial do cimento por PRH em pastas, e como a introdução deste material afetou as propriedades das pastas de cimento tanto no estado fresco como endurecido.

Com base nos resultados obtidos, inicialmente descreve-se as análises pontuais do material em cada fase estudada e propriedades do PRH, e posteriormente apresenta-se as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

PRH no estado Anidro:

- O aumento no tempo de moagem interferiu diretamente na massa unitária, área superficial específica, no diâmetro das partículas, na absorção de água e na distribuição granulométrica do PRH, porém não teve um grande impacto na composição química e na atividade pozolânica do material;
- Os resultados obtidos a partir das análises de massa unitária, massa específica e área específica indicam que o tempo de moagem do material afeta sua massa unitária, causando uma expansão volumétrica devido ao aumento do volume de vazios entre os grãos, à medida que eles diminuem de tamanho;
- O PRH apresenta uma alta taxa de absorção e adsorção de água, sendo proporcional ao aumento da finura do material com maiores tempos de moagem. Esse fenômeno ocorre devido ao aumento da área superficial dos grãos, que retém mais água em sua superfície;
- A absorção de água do material é bastante elevada, esse comportamento também visto por Colangelo e Cioffi (2016), onde os resíduos de construção e demolição de origem mista possuíam um maior valor de absorção de água;
- Quanto à distribuição granulométrica, os resultados mostraram que o PRH possui uma distribuição bem graduada e contínua. O material moído por 1 hora apresentou partículas com maiores dimensões, enquanto o moído por 8 horas

possuiu partículas com menores dimensões. A maior parte das partículas de PRH variou de 0,5 a 100 μm , concentrando-se principalmente na faixa entre 5 e 50 μm ;

- O PRH possui um coeficiente de uniformidade alto, isso indica que as partículas possuem uma ampla variação de tamanhos, porém à medida que o tempo de moagem aumenta o coeficiente de uniformidade diminui;
- A difração de raios-X (DRX) mostrou uma grande quantidade de picos de sílica cristalina (quartzo), possivelmente proveniente da areia presente nas argamassas e concretos que deram origem ao PRH, além de outros componentes comuns em materiais de construção. Não foi detectada a presença de halos amorfos nas amostras analisadas;
- O índice de atividade pozolânica obtido através da condutividade elétrica indicaram que o PRH apresenta pouca atividade pozolânica, não sendo suficiente para classificá-lo como um material pozolânico;
- A microscopia eletrônica de varredura (MEV) revelou que as partículas de PRH apresentam formato irregular, com cantos afiados e bordas irregulares, formando fendas e entalhes em V, semelhantes aos encontrados em outros estudos.
- Por fim, a termogravimetria (TG) mostrou uma perda de massa do PRH até a temperatura de 1050 °C, semelhante à perda de massa do cimento.

Pastas no estado fresco:

- De forma geral, com o aumento do teor de substituição do cimento por PRH, houve uma diminuição na coesão à medida que o percentual de substituição da pasta aumentou;
- Embora as pastas com PRHM1H tenham apresentado uma média de índice de consistência menor que a do PRHM2H, os resultados foram bastante próximos, sugerindo uma coesão semelhante entre elas. No entanto, nas pastas com PRHM4H e PRHM8H, apresentaram um aumento da coesão conforme o tempo de moagem do PRH aumentou, chegando a um resultado mais próximo ao das pastas contendo apenas cimento, isso ocorre porque partículas menores têm uma

maior capacidade de preencher os espaços vazios entre as partículas maiores promovendo um melhor arranjo dos grãos e resultando em uma pasta mais coesa;

- A hidratação das pastas com PRHM4H e do PRHM8H apresentaram resultados mais próximos da pasta com apenas cimento, diferente das pastas com PRHM1H e PRHM2H que tiveram um aumento no seu tempo de endurecimento;
- Os testes de espalhamento mostraram que com a relação A/C de 0,4, todas as pastas apresentaram comportamento semelhante;
- Com o aumento da relação A/C as pastas com os grãos de PRH com maiores finuras obtiveram um menor espalhamento, esse comportamento é semelhante ao encontrado nos ensaios de consistência e reologia;
- Nas pastas com substituição de PRH em diferentes proporções, a viscosidade diminuiu à medida que o teor de substituição do cimento pelo PRH aumentou;
- O aumento no tempo de moagem interferiu na viscosidade das pastas, a pasta de cimento com substituição parcial de cimento pelo PRHM8H apresentou uma viscosidade mais elevada que aquelas com o PRHM1H e PRHM2H este comportamento pode estar relacionado ao aumento na coesão das misturas devido ao efeito do preenchimento dos vazios entre as partículas maiores e como resultado a pasta tende a apresentar uma maior resistência ao fluxo.

Pastas no estado endurecido:

- As pastas com PRH não atingiram a exigência mínima da NBR 5751-2015 para ser considerado um material pozolânico, uma vez que nenhuma das misturas alcançou a resistência de 6 MPa;
- As pastas contendo PRH apresentaram menor fissuração do que as pastas com apenas cimento, indicando que o mesmo contribuiu para a redução da microfissuração das amostras analisadas;
- As análises de DRX indicaram a presença das fases cristalinas Alita, Calcita, Etrigita e Portlandita em todas as pastas, e também mostra que o PRH não reagiu com a Portlandita durante o processo de hidratação;

- As curvas de TG demonstraram comportamento térmico semelhante entre as pastas de cimento e as pastas com PRH.
- Nos testes de Infravermelho, os espectros não apresentaram diferenciação notável entre as intensidades das pastas contendo PRH em relação à pasta de referência;
- A resistência à compressão das pastas com PRH mostrou queda em relação à pasta de referência, com maiores percentuais de substituição resultando em maiores reduções de resistência, porém o aumento na finura do PRH não teve grande impacto na resistência a compressão aos 7 e 56 dias;
- Os módulos de elasticidade dinâmico decresceram com o aumento do percentual de substituição de PRH nas pastas;
- A permeabilidade e os índices de vazios apresentaram resultados melhores nas pastas com substituição de 10% de cimento por PRH, devido ao efeito microfiller. No entanto, nas pastas com maiores percentuais de substituição, a porosidade e os índices de vazios aumentaram significativamente.

Emissão de dióxido de carbono (CO₂):

- Os resultados mostram uma tendência de redução no GWP (Potencial de Aquecimento Global) à medida que a substituição do cimento pelo material alternativo (PRH) aumenta. Isso indica que quanto mais cimento é substituído, menor é o impacto ambiental associado à produção das pastas de cimento;
- A relação entre a resistência à compressão e o GWP (MPa/GWP) oferece uma perspectiva valiosa para avaliar o equilíbrio entre o desempenho mecânico e a sustentabilidade das misturas. Misturas com alta relação MPa/GWP são mais eficientes em termos de desempenho e podem ser exemplos de misturas que apresentam um equilíbrio entre desempenho mecânico e sustentabilidade com base nos parâmetros de resistência a compressão e emissão de CO₂. Elas alcançam um nível satisfatório de resistência mecânica mantendo um impacto ambiental relativamente menor. Isso sugere que essas misturas podem ser escolhas mais sustentáveis em termos de desempenho geral e impacto ambiental.

Com base nos resultados anteriormente apresentados e diante do questionamento levantado na hipótese da pesquisa: através da seleção do teor e do tamanho dos grãos do pó reciclado híbrido é possível otimizar seu uso como material cimentício suplementar, alcançando um equilíbrio entre considerações técnicas e ambientais, melhorando propriedades como estabilidade, trabalhabilidade e preenchimento de vazios ao mesmo tempo em que reduz as emissões de dióxido de carbono (CO₂)?

A resposta à hipótese é afirmativa, indicando que a otimização do uso do pó reciclado híbrido como material cimentício suplementar é viável e pode trazer benefícios técnicos e ambientais para a indústria da construção civil. Sendo assim é possível afirmar que compreender as características do PRH é essencial para sua utilização eficiente em projetos de construção, visando o desenvolvimento de materiais cimentícios mais sustentáveis. Os resultados obtidos nesta pesquisa podem contribuir para promovendo práticas construtivas mais amigáveis ao meio ambiente.

Além disso, a pesquisa destaca a importância de selecionar teores de substituição e tamanhos de grãos apropriados para atingir um equilíbrio entre desempenho técnico e impacto ambiental.

Com isso conclui-se que a utilização do PRH como adição ao cimento requer análises detalhadas e a devida avaliação das necessidades específicas de cada empreendimento, considerando cuidadosamente seus benefícios e limitações. Com um conhecimento abrangente sobre o PRH, novas oportunidades de aplicação podem ser exploradas, impulsionando avanços na construção civil em prol da sustentabilidade e da preservação ambiental.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante seu desenvolvimento a pesquisa apontou alguns estudos que poderão ser realizados no futuro. Neste caso sugere-se:

- Verificação de como a introdução do PRH afeta as propriedades de durabilidade das pastas de cimento, tais como o processo de carbonatação, penetração de sulfetos e cloretos, a sua resistividade elétrica e resistência térmica;
- Estender as análises para da incorporação de cimento com PRH para argamassas e concretos;

- Verificar como a incorporação do pó reciclado híbrido altera a formação e perda da camada de passivação do aço.
- A avaliação do processo de corrosão do aço em matrizes cimentícias com a incorporação do pó reciclado híbrido.

REFERÊNCIAS

- ADAMSON, M.; RAZMJOO, A.; POURSAEE, A. Durability of concrete incorporating crushed brick as coarse aggregate. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 94, p. 426-432, 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C150-07**: Standard Specification for Portland Cement. . United States: ASTM, 2007.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C597 – 16**: Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. United States: ASTM, 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1202 – 19**: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. . United States: ASTM, 2019.
- ANDRADE, D. da S. *et al.* Investigation of C-S-H in ternary cement pastes containing nanosilica and highly-reactive supplementary cementitious materials (SCMs): microstructure and strength. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 198, p. 445-455, 2019.
- ÂNGULO, S. C. **Características de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos**. 2005. São Paulo: USP, 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, 2005.
- ÂNGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. **Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil**. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. Anais [...] São Paulo: IBRACON, 2001.
- ÂNGULO, S.C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. 2000. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000. 155p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS - ABRELPE. **Panorama Dos Resíduos Sólidos No Brasil 2018/2019**. São Paulo: ABRELPE, 2019. 68 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9941:1987**: Redução de Amostra de Campo de Agregados para Ensaio de Laboratório. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004:2004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15112:2004**: Resíduos da construção civil e resíduos volumosos - Áreas de transbordo e triagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15115:2004**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778:2005**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 18: 2012**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751:2015**: Materiais pozolânicos: determinação da atividade pozolânica com a cal aos sete dias. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NR 16605:2017**: Determinação da massa específica utilizando o frasco de Le Chatelier. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16606:2018**: Cimento Portland — Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro: ABNT, 2018a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16607:2018**: Cimento Portland — Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215/2019**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116:2021**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2021a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916 DE 04/2021**: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16972 DE 06/2021**: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17086: 2023**: Cimento Portland — Análise química - Parte 4: Determinação do resíduo insolúvel. Rio de Janeiro: ABNT, 2023a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17086-2: 2023**: Análise química - Parte 2: Determinações por complexometria de óxido férrico, óxido de alumínio, óxido de cálcio e óxido de magnésio. Rio de Janeiro: ABNT, 2023b.

ASTOVEZA, J.; ROMAIN T.; MIGOT-CHOUX, S.; PONTIKES, R. S.; PONTIKES, Y. Iron-rich slag addition in ternary binders of Portland cement, aluminat cement and calcium sulfate. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 153, p. 106689, 2022.

BARBOSA, M. T. G. B.; SANTOS, W. J.; SATHLER, L. M.; TEIXEIRA, K. M. **O Emprego do Rejeito de Mármore Triturado na Confecção de Concreto Auto-Adensável**. In: 54º Congresso Brasileiro do Concreto, CBC, 2012 – Maceió, 2012.

BARRA, M. **Estudio de la Durabilidad del Hormigón de Árido Reciclado em su Aplicación como Hormigón Armado**. 1996. Tese (Doutorado) - Escola Tècnica Superior d' Enginyers de Camins, Canals i Ports, Universidade Politècnica de Catalunya, Barcelona 1996. p. 223.

BASTOS, P. E. A. **Determinação da pozolanicidade por condutividade elétrica do lodo de estações de tratamento de esgoto (ETE) para adição ao cimento portland**. 2018. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

BAZUCO, R. S. **Utilização de agregados reciclados de concretopara a produção de novos concretos**. 1999. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999. 100 p.

BIGAS, J. P.; GALLIAS, J. L. Single-drop agglomeration of fine mineral admixtures for concrete and water requirement of pastes. **Powder Technology**, [s.l.], v. 130, n. 1-3, p. 110-115, 2003.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica [online]**, [s.l.], v. 61, n.358, pp.178-189. 2015.

BUEST NETO, G. T. **Estudo da substituição de agregados miúdos naturais por agregados miúdos britados em concretos de cimento Portland**. 2006 Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2006. 102 p.

BUTTLE, A. M. **Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto - Influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

CARNEIRO, A. P.; BURGOS, P. C.; ALBERTE, E. P. V. Uso do agregado reciclado em camadas de base e sub-base de pavimentos. **Projeto Entulho bom**. Salvador: EDUFBA / Caixa Econômica Federal, 2001. p. 190-227.

COLANGELO, F.; CIOFFI, R. Mechanical properties and durability of mortar containing fine fraction of demolition wastes produced by selective demolition in South Italy. **Composites Part B**, [s.l.], v. 15, p. 12-41, 2017.

CUIZHEN, X.; AIQIN, S.; YINCHUAN, G.; TIANQIN, H. E. Utilization of Construction Waste Composite Powder Materials as Cementitious Materials in Small-Scale Prefabricated Concrete. **Sustainable Building Materials and Technologies**, [s.l.], v. 2016, p. 1-27, 2016.

DEVENNY, A.; KHALAF, F. M. The use of crushed brick as coarse aggregate in concrete. **Masonry International**, [s.l.], v. 12, n. 3, p. 81-84, 1999.

DORSTHORST, B. J. H.; HENDRIKS, C. F. **Re-use of construction and demolition waste in the EU**. In: CIB Symposium: Construction and Environment – theory into EFNARC. The European Guidelines for Self-Compacting Concrete Specification, Production and Use. Reino Unido, 2005.

FONSECA, G. **Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: uma abordagem epistêmica**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Belo Horizonte 2010.

FORSTER, S.W. Recycled Concrete as Aggregate. **Concrete International**, [s.l.], v. 8, p. 34-40. 1986.

GALLIAS, J. L.; KARA-ALI, R.; BIGAS, J. P. The effect of fine mineral admixtures on water requirement of cement pastes. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 30, n. 10, p. 1543- 1549, Oct. 2000

GOBBI, A. **Atividade pozolânica de adições minerais pelas NBR 5751/2012 e NBR 5752/2012: uma análise crítica a partir de métodos complementares**. 2014. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Construção Civil. Paraná, Curitiba, 2014.

GOZI, D. D.; COUTO, A. F. MORALES, G. **Interferência da substituição parcial de cimento Portland por filer basáltico na carbonatação de concretos**. In: 3º Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, Coimbra, Portugal, 2018.

HAMASSAKI, L. T. *et al.* **Uso do entulho como agregado para argamassas de alvenaria**. In: reciclagem na construção civil, alternativa econômica para proteção ambiental. São Paulo, 1997. Anais [...] São Paulo: EPUSP , 1997. p.11-20.

HANSEN T. C. **Recycling of Demolished Concrete and Masonry**. London: E&FN SPON an imprint of Chapman & Hall, 1992. 305p.

HANSEN, T. C.; NARUD, H. Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. **Concrete International- Design and Construction**, [s.l.], v. 5, n. 1 p. 79-83, 1983.

HARDER, M. K.; FREEMAN, L. A. **Analysis of the volume and composition of construction waste arriving at landfill**. In: second international conference buildings and the environment. Paris, 1997. Proceedings [...]. Paris, 1997. p.595-602.

HEINZ, D., SCHUBERT, J. **Finely Ground Sand Fraction of Concrete Rubble as a Supplementary Cementitious Material**. In: Grosse, C.U. (eds). *Advances in Construction Materials*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2007.

HENDGES, A. S. **Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil**. In: VII Congresso Nacional de Educação Ambiental e IX Encontro Nordestino de Biogeografia. EcoDebate. 2021. Disponível em:

<https://www.ecodebate.com.br/2021/06/29/composicao-gravimetrica-dos-residuos-solidos-urbanos-no-brasil/>.

HOPPE FILHO, J.; GOBBI, A.; PEREIRA, E.; TANAKA, R. S.; MEDEIROS, M. H. F. Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte II): Índice de atividade pozolânica com cimento Portland (IAP), difração de raios-X (DRX) e termogravimetria (TG/DtG). **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 3, p. 1-8, 2017.

HUISMAN, C. L.; BRISTON, R.A. **Recycled Portland cement concrete specifications and control**. Federal Highway Administration. Proceedings [...]. Report FHWA. 1981. p. 140-143.

HUNGER, M. **An integral Design Concept for Ecological Self-Compacting Concrete**. PhD Thesis. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2010.

IPEA - INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Da Construção Civil**. Relatório de pesquisa. Brasília: IPEA, 2012. Disponível em:

https://portalantigo.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/120911_relatorio_construcao_civil.pdf. Acesso em: 03 abr. 2023.

JOCHER, L. F.; APONTE, D.; BIZINOTTO, M. B.; ROCHA, J. C. Effects of pre-wetting aggregate on the properties of mortars made with recycled concrete and lightweight aggregates. **Revista Matéria**, [s.l.], v. 24, n. 2, p. 1-10, 2019.

JOHN, V. M. **Materiais de Construção Civil e Princípios da Ciência e Engenharia de Materiais**. Isaia, G. C. (Org). 3. ed. Ibracon: São Paulo, 2017.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na Construção Civil: Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. Tese de Livre Docência. São Paulo: EPUSP, 2000. 113p.

JORDANI, B. **Hidratação do cimento portland na presença de elevados Teores de fíler dolomito com diferentes finuras**. 2020. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia) – Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos, UNISINOS, São Leopoldo. 2020

JOSE, A. M. R.; NIVITHA, J.; KRISHNAN, M.; ROBINSON, R. G. Characterization of cement stabilized pond ash using FTIR spectroscopy. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 263, p. 120136, 2020.

KABAY, N. *et al.* Utilization of pumice powder and glass microspheres in cement mortar using paste replacement methodology. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 282, p. 122691, 2021.

KANTRO, D. L. Influence of Water-Reducing Admixtures on Porperties of Cement Paste – A Miniature Slump Test. **Cement, Concrete and Aggregate**, [s.l.], v. 2, n. 2, 1980, p. 95-102.

KHAYAT, K. H.; ASSAAD, J.; DACZKO, J. Comparison of field-oriented test methods to assess dynamic stability of self-consolidating concrete. **ACI Materials Journal**, [s.l.], v. 101, n. 2, p. 168-176, 2004.

KIKUCHI, M.; MUKAI, T.; KOZUMI, H. **Properties of products containing recycled aggregate**. 2° Reuse of demolition waste v 2-Nihon Daigaku Kaikan Tokyo Japan 1988. Proceedings [...] London: Chapman & Hall, 1988, p 595-604.

KWAN, A. K. H.; MORA, C. F. Effects of various shape parameters on packing of aggregates particles. **Magazine of Concrete Research**, [s.l.], v. 53, n. 2, p. 91-100, 2001.

LANZELLOTTI, R. F. A.; TOREM, M. L.; DA LUZ, A. B. - **Tecnologia de beneficiamento mineral utilizada na produção de agregados reciclados para construção civil**. 59º Congresso Anual da ABM – Internacional, 2004, São Paulo: ABM, 2004a.

LANZELLOTTI, R. F. A.; TOREM, M. L.; DA LUZ, A. B. **Desenvolvimento de fluxograma de beneficiamento de resíduos sólidos da construção civil**. Congresso brasileiro de ciência e tecnologia em resíduos e desenvolvimento sustentável. Florianópolis, SC: ICTR, 2004b.

LARRARD, F. de. **Concrete optimisation with regard to packing density and rheology**. In: 3 RILEM International Symposium on Rheology of Cement Suspensions such as Fresh Concrete, France, v. 1, 2011.

LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. São Paulo: USP, 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, 2001.

LEVY, S. M. **Reciclagem do entulho da construção civil, para utilização com agregados para argamassas e concretos**. São Paulo, 1997. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 147p.

LEVY, S. M.; HELENE, P. R. L. **Durabilidade de concretos produzidos com resíduos minerais de Construção Civil**. In: III Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil: Práticas Recomendadas. São Paulo, SP, 2000, p. 3-14.

LI, W.; XIAO, J.; SUN, Z.; SHAH, S. P. Failure processes of modeled recycled aggregate concrete under uniaxial compression. **Cement and Concrete Composite**, [s.l.], v. 34, n. 10, p. 1149–1158, 2012.

LIANG, Y.; DENG, Z. H.; HUANG, T. J.; ZHAO, J.; YE, J. L.; TENG, J. Z. Experimental study on the force performance of recycled concrete with brick powder and mortar as fine. **Concrete**, [s.l.], v. 3, p. 44-46, 2009.

LIMA, J. A. R. **Avaliação das Consequências da Produção de Concreto no Brasil Para as Mudanças Climáticas**. São Paulo, 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

LIMA, J. A. R. **Proposição de Diretrizes para Produção e Normalização de Resíduo de Construção Reciclado e suas Aplicações em Argamassas e Concretos**. 1999.

Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999. 240p.

LIMBACHIYA, M.C.; LEELAWAT, T. D. **Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. Materials and Structures**, [s.l.], v. 33, p. 574–580, 2000.

LIU, Q.; TONG, T.; LIU, S.; YANG, D.; YU, Q. Investigation of using hybrid recycled powder from demolished concrete solids and clay bricks as a pozzolanic supplement for cement. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 73, p. 754-763, 2014.

LÓPEZ-GAYARRE, F.; LÓPEZ-COLINA, C.; SERRANO-LÓPEZ, M. A.; TAENGUA, E. G.; LÓPEZ MARTÍNEZ, A. Assessment of properties of recycled concrete by means of a highly fractioned factorial design of experiment. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 25, n. 10, p. 3802-3809, 2011.

LOVATO, P. S.; POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C. C.; MASUERO, A. B.; RIBEIRO, J. L. Modeling of mechanical properties and durability of recycled aggregate concretes. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 26, n. 1, p. 437-447, 2012.

MACHADO JR. E. F. *et al.* **Influência do Agregado Graúdo, Proveniente da Reciclagem de Rejeitos de Construção e Demolição (entulho), na Perda do Abatimento do Concreto Fresco e nas Propriedades Mecânicas do Concreto Endurecido**. Anais [...] Reunião do IBRACON. Rio de Janeiro: IBRACON, 1998.

MARTIRENA, J. F.; SCRIVENER K. L., Development and introduction of a low clinker, lowcarbon, ternary blend cement in Cuba. **Advances in cement research**, [s.l.], v. 1, p. 323-329, 2015.

MEDEIROS, R. A. J.; BALESTRA C. E. T.; LIMA, M. G. Applicability of recycled aggregates in concrete piles for soft soil improvement. **Waste Management & Research**, [s.l.], v. 35, p. 56-64, 2017.

MEDEIROS, R. R. **influência do teor de quartzo na expansão por umidade e no comportamento mecânico de massas cerâmicas para uso em blocos furados**. 2009. Tese (Dotourado) - Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina grande, PB, 2009.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 4. ed. São Paulo : IBRACON, 2014.

MIRANDA, L. F. R. **Estudos de fatores que influenciam na fissuração de revestimentos de argamassa com entulho reciclado**. 2000. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo 2000.

MOHAMAD, G.; NAKANISHI, E., Y., B.; BARBOSA, N. L. **Estudo da Viabilidade Técnica da Utilização de Resíduo de Construção em Substituição do Agregado Natural em Concretos**. In: 54º Congresso Brasileiro do Concreto, CBC 2012. Anais [...] Maceió: CBC, 2012.

MONTGOMERY, D. G. **Workability and compressive strength properties of concrete containing recycled concrete aggregate**. Proc. Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate. London: Thomas Telford, 1998. 289–296 p.

MOOSBERG-BUSTNES, H.; LAGERBLAD, B.; FORSSBERG, E. The function of fillers in concrete. **Materials and Structures**, [s.l.], v. 37, n. 266, p. 74-81, 2004

MORAES, K. A. M. **Otimização do uso de adições minerais para a produção de concreto auto adensável**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

MULDER, E. *et al.* **Immobilisation of PAH in waste materials**. In: Waste Materials in Constructions. Proceedings [...]. Inglaterra: WMC, 2000. p. 953-62.

NEHDI, M.; PARDHAN, M.; KOSHOWSKI, S. Durability of self-consolidating concrete incorporating high volume replacement composite cements. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 34, n. 11, p. 2103-2112, 2004.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2. ed. São Paulo: PINI, 1997.

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

NIERO, J. **Reciclagem de resíduos da construção civil economiza recursos naturais e reduz custos**. Fecomercio, 2016. Disponível em <https://www.fecomercio.com.br/noticia/reciclagem-de-residuos-da-construcao-civil-economiza-recursos-naturais-e-reduz-custos>. Acesso em: 20 jun. 2023.

OLIVEIRA, J. C. **Indicadores de Potencialidades e Desempenho de Agregados Reciclados de Resíduos Sólidos da Construção Civil em Pavimentos Flexíveis**. 2007. Tese (Doutorado) - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, UnB, Brasília, 2007. 167 p.

PAUW, C.; DESMYTER, J.; DESSEL J. **Van Reuse of construction and demolition waste as aggregates in concrete, technical and environmental aspects**. Dundee - Escócia junho 1996 Proceedings [...] Ravindra & Thomas Grã Bretanha, 1996. p. 131-140.

PAYÁ, J.; BORRACHERO, M. V.; MONZÓ, J.; PERIS-MORA, E.; AMAHJOUR, F. Enhanced conductivity measurement techniques for evaluation of fly ash pozzolanic activity. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 31, n. 1, p. 41-49, 2001.

PIETERSEN, H. S. *et al.* **Application of Recycled Aggregates in Concrete - Experience from the Netherlands**. Three-Day CANMET/ACI. In: International Symposium on Sustainable Development of the Cement and Concrete Industry. Ottawa, Canadá, 1998. p. 131-146.

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999, 189 p.

POLITO, G.; CARVALHO, A. N. de JR.; BRANDÃO, P. R. G. Caracterização microestrutural da interface argamassa mista/bloco cerâmico. **11Construindo**, Belo Horizonte, v. 2, n. 2, p. 11-17, 2010.

POON, C. S.; KOU, S. C.; LAM, L. Use of Recycled Aggregates in Moulded Concrete Bricks and Blocks. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 16, n. 5, p. 281-289, 2006.

QUEBAUD, M. R.; BUYLE-BODIN, F. **A reciclagem de materiais de demolição: utilização dos agregados reciclados no concreto**. In: Congresso Brasileiro De Cimento (CBC), 5. São Paulo, 1999. Anais [...]. São Paulo: CBC, 1999. 14p.

RASHWAN, M. S.; ABOURIZK, S. The Properties of Recycled Concrete. **Revista Concrete International**, [s.l.], v. 19, n. 7, p. 56-60, 1997.

RAVINDRARAJAH, R. S.; TAM, T. C. Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate. **Magazine of Concrete Research**, [s.l.], v. 37, n. 130, p. 29-38, 1985.

RODRIGUES, W. C. **Metodologia Científica**. Paracambi: FAETEC/IST, 2007.

SANTOS, F. I. G.; ROCHA, J. C.; CHERIAF, M. Influência da cinza pesada empregada em substituição ao agregado natural nos mecanismos de transferência de umidade em argamassas. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 12, n. 2, p. 1-14, 2007.

SCHANKOSKI, R. A. **Estudo de concreto autoadensável contendo filer de britagem: características das partículas, floculação e reologia**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2017.

SCHERER, G. W.; ZHANG, J.; THOMAS, J. J. Nucleation and growth models for hydration of cement. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 42, n. 7, p. 982–993. 2012.

SCHULZ, R. R.; HENDRICKS, F. **Recycling of masonry rubble**: recycling of demolished concrete and masonry. Part 2. Londres: Spon, 1992.

SÉRGIO, J. F.; SINHORELLI, K.; MEDEIROS, G.; AZEREDO, A.; AZEREDO, G. Estudo da reologia de pastas cimentícias contendo resíduo de tijolo cerâmico moído e metacaulim. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 1, p. 1-10, 2020.

SERKAN, S.; HAKAN, O.; MEHMET, E. Utilizing of waste ceramic powders as filler material in self-consolidating concrete. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 149, p. 567-574, 2017.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório Sobre Produção anual de cimento Portland**. 2020. Disponível em: http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2020.pdf . Acesso em: 8 ago. 2023.

SOUZA, L. L.; LOBO, R. R.; MOREIRA, D. A.; BRITO, R. P.; PEREIRA JÚNIOR, A. Study of the technical feasibility of reuse of waste from civil construction and reform. **Research, Society and Development**, [s.l.], v. 10, n. 9, p. e20710917842, 2021.

STEPKOWSKA, E. T.; BLANES, J. M.; REAL, C.; PEREZ-RODRIGUEZ, J. L. Hydration products in two aged cement pastes. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, [s.l.], v. 82, n. 3, p. 731-739, 2005.

SUN, Z.; FENGJUAN, L.; TONG, L.; QI, C. Hydration of Concrete Containing Hybrid Recycled Demolition Powders. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s.l.], v. 29, n. 7, p. 1-8, 2017.

TAM, V. W. Y.; TAM C. M.; Y. WANG. Optimization on proportion for recycled aggregate in concrete using two-stage mixing approach. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 21, n. 10, p. 1928-1939, 2007.

TEIXEIRA, E. C. *et al.* Estudo de concretos preparados com rcd e metacaulim. **Brazilian Journal of Development**, [s.l.], v. 6, n. 8, p. 63407-63414, 2020.

TOPIC, J.; PROSEK, Z.; PLACHY, T. Influence of increasing amount of recycled concrete powder on mechanical properties of cement paste. **IOP Conference Series Materials Science and Engineering**, Czech, v. 236, n. 1, p. 012094, 2017.

TREZZA, M. A.; FERRAIUELO, M. F. Hydration study of limestone blended cement in the presence of hazardous wastes containing Cr(VI). **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 33, n. 7, p. 1039-1045, 2003.

WAINWRIGHT, P. J. *et al.* **Modifying the Performance of Concrete Made with Coarse and Fine Recycled Concrete Aggregates**. Proceedings of the Third International RILEM Symposium. Odense, Denmark, 1993.

WOLF, J. **Influência do calcário na carbonatação de argamassa de cimento branco**. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2010.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT – WBCSD. Global Cement & Concrete Association. **GNR Project Reporting CO2: Total Mineral Components Used to Produce Portland Cement**. 2016. Geneva: WBCSD, 2016. Disponível em: <https://www.wbcscement.org/>. Acesso em: 06 mar. 2023.

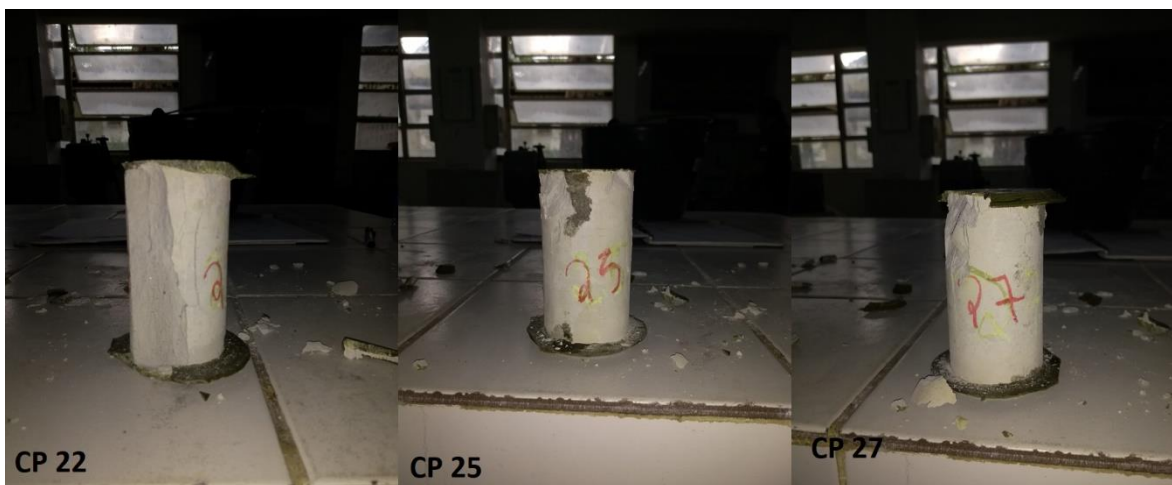
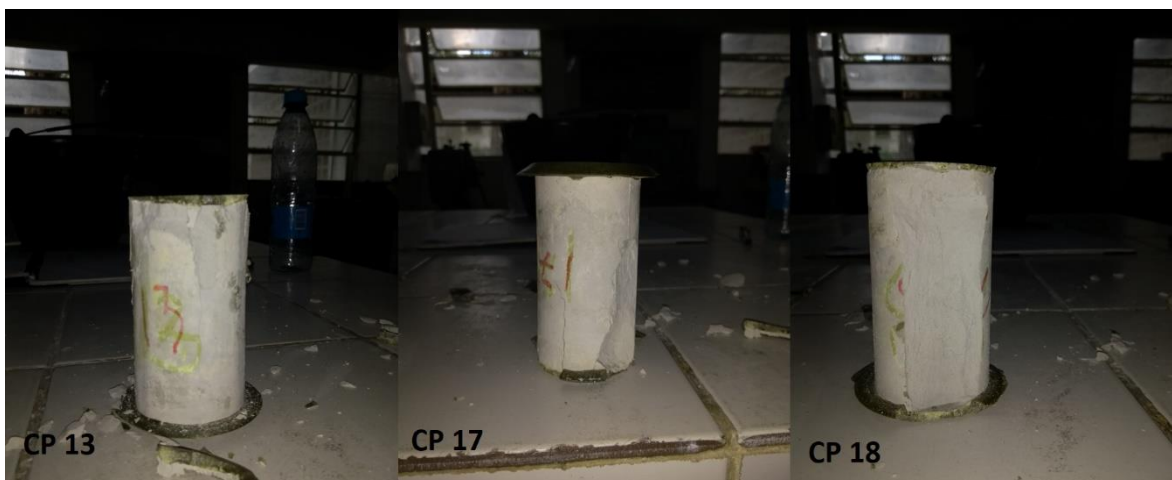
XIAO, J.; LI, W.; FAN, Y.; HUANG, X. An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996–2011). **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 31, p. 364–83, 2012.

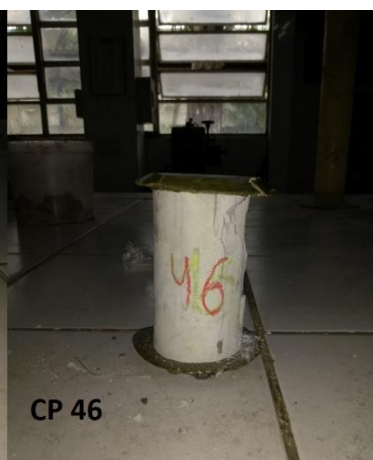
XIAO, Z.; LING, T. C.; POON, C.S.; KOU, S.C.; WANG, Q.; HUANG, R. Properties of partition wall blocks prepared with high percentages of recycled clay brick after exposure to elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 49, p. 56-61, 2013.

XUAN, D.; ZHAN, B.; POON, C. S. Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, [s.l.], v. 65, p. 67-74, 2016.

- YAHIA, A.; TANIMURA, M.; SHIMOYAMA, Y. Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler – effect of powder content and w/c ratio. **Cement and Concrete Research**, [s./], v. 35, n. 3, p. 532-539, 2005.
- YE, G.; LIU, X.; SCHUTTER, G.; POPPE, A. M.; TAERWE, L. Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes. **Cement and Concrete Composites**, [s./], v. 1, p. 1-9, 2007.
- ZHANG, J. X.; WANG, B.; SONG, B. Composition design and performance characterization of a novel backfilling concrete derived from urban construction waste. **Journal of Cleaner Production**, [s./], v. 190, p. 508-516, 2018.
- ZHU, P.; MAOA, X.; QU, W.; LI, Z.; JOHN MAC, Z. Investigation of using recycled powder from waste of clay bricks and cement solids in reactive powder concrete. **Construction and Building Materials**, [s./], v. 133, p. 246–254, 2016.
- ZORDAN, S. E. **A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto**. Dissertação (mestrado). Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997, 140 p.

APÊNDICE A – Rompimento dos corpos de provas



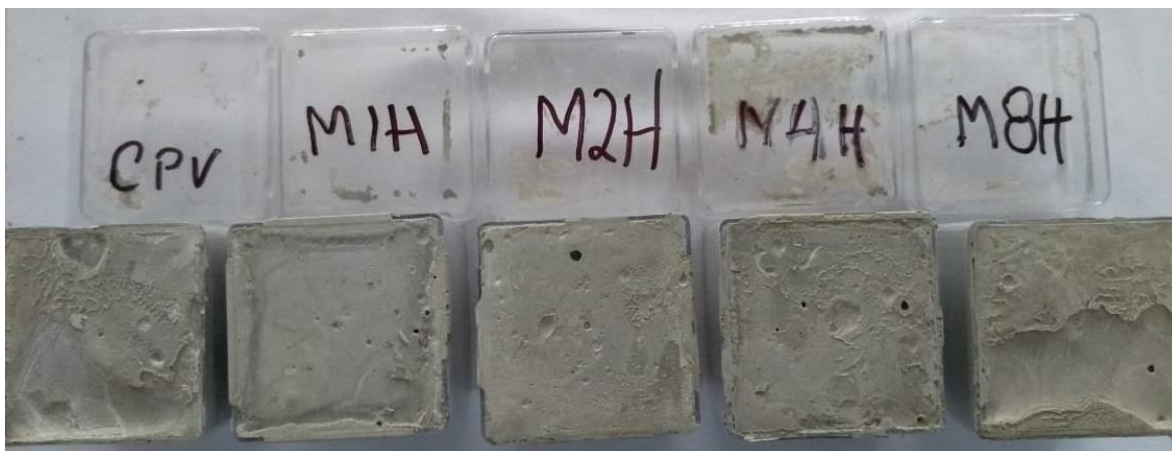




Fonte: O Autor (2023).

APÊNDICE B – Preparação das pastas para o ensaio com o MEV

- As amostras de cimento e PRH foram moldadas em CPs de 5 x 5 cm,



Fonte: O Autor (2023).

- Com o auxílio de um disco de serra foi retirada uma amostra de 1 x 1 cm do centro dos CPs.



Fonte: O Autor (2023).

A fim de parar a hidratação as amostras foram colocadas em cetona e posteriormente liofilizada, e então deixadas em um dessecador até a data em que foram colocadas dentro da resina.



Fonte: O Autor (2023).

As superfícies das amostras foram lixadas e polidas com pastas diamantadas até estarem lisas e então foram colocadas em uma fita de carbono.



Fonte: O Autor (2023).

APÊNDICE C – Resultado dos ensaios de resistência a compressão das pastas de cimento

Resistência a compressão das pastas 7 dias							
Traço		Resistência					
	Amostra	MPa	Média	Desvio Padrão	Coef. De variação	Variação	Média 2
Ref.	1	42,97390	41,590453	2,71417	6,53%	-3,33%	41,59
	2	43,99947				-5,79%	
	3	37,797987				9,12%	
PRHM1 H10	1	35,632362	37,152139	1,32381	3,56%	4,09%	37,15
	2	38,858813				-4,59%	
	3	36,965243				0,50%	
PRHM1 H20	1	35,571735	32,574558	2,96463	9,10%	-9,20%	34,59
	2	28,537024				12,39%	
	3	33,614915				-3,19%	
PRHM1 H30	1	28,277381	27,147711	1,96494	7,24%	-4,16%	28,53
	2	28,7816				-6,02%	
	3	24,384153				10,18%	
PRHM2 H10	1	39,441738	41,348858	1,69452	4,10%	4,61%	41,35
	2	43,559103				-5,35%	
	3	41,045732				0,73%	
PRHM2 H20	1	34,823643	33,601174	1,97586	5,88%	-3,64%	33,60
	2	35,165992				-4,66%	
	3	30,813885				8,30%	
PRHM2 H30	1	31,822787	27,256336	3,2862	12,06%	-16,75%	24,97
	2	24,225248				11,12%	
	3	25,720973				5,63%	
PRHM4 H10	1	30,344433	32,111506	1,97136	6,14%	5,50%	32,11
	2	31,127562				3,06%	
	3	34,862522				-8,57%	
PRHM4 H20	1	34,118069	35,083609	2,5235	7,19%	2,75%	35,08
	2	32,591001				7,10%	
	3	38,541758				-9,86%	
PRHM4 H30	1	18,594196	26,701311	5,79256	21,69%	30,36%	29,74
	2	31,773029				-18,99%	
	3	29,736708				-11,37%	
PRH M8H1	1	41,478639	39,22152	3,1732	8,09%	-5,75%	41,47
	2	41,451959				-5,69%	

	3	34,733962				11,44%	
PRHM8 H20	1	33,142476	36,071113	2,56429	7,11%	8,12%	36,07
	2	39,387654				-9,19%	
	3	35,68321				1,08%	
PRHM8 H30	1	33,68854	31,608307	2,72928	8,63%	-6,58%	31,61
	2	33,383852				-5,62%	
	3	27,75253				12,20%	

Fonte: O Autor (2023).

Resistência a compressão das pastas 56 dias							
Traço		Resistência					
	Amostra	Mpa	Média	Desvio Padrão	Coef. De variação	Variação	Média 2
Ref.	1	58,6607	57,95	0,5019296	0,87%	-1,22%	57,95
	2	57,586				0,63%	
	3	57,6061				0,60%	
PRHM1H 10	1	54	53	2,1602469	4,08%	-1,89%	53,00
	2	50				5,66%	
	3	55				-3,77%	
PRHM1 H20	1	42	40	3,5590261	8,90%	-5,00%	42,50
	2	35				12,50%	
	3	43				-7,50%	
PRHM1 H30	1	29	31	1,4142136	4,56%	6,45%	31,00
	2	32				-3,23%	
	3	32				-3,23%	
PRHM2 H10	1	56	54,3333	1,6996732	3,13%	-3,07%	54,33
	2	55				-1,23%	
	3	52				4,29%	
PRHM2 H20	1	43	38,3333	5,9066817	15,41%	-12,17%	42,50
	2	42				-9,57%	
	3	30				21,74%	
PRHM2 H30	1	37	36,3333	0,942809	2,59%	-1,83%	36,33
	2	35				3,67%	
	3	37				-1,83%	
PRHM4 H10	1	52	50	1,6329932	3,27%	-4,00%	50,00
	2	48				4,00%	
	3	50				0,00%	
PRHM4 H20	1	39	41	1,4142136	3,45%	4,88%	41,00
	2	42				-2,44%	
	3	42				-2,44%	

PRHM4 H30	1	34	34,6667	2,4944383	7,20%	1,92%	34,67
	2	32				7,69%	
	3	38				-9,62%	
PRHM8 H10	1	48	49	0,8164966	1,67%	2,04%	49,00
	2	49				0,00%	
	3	50				-2,04%	
PRHM8 H20	1	48	47	2,1602469	4,60%	-2,13%	47,00
	2	49				-4,26%	
	3	44				6,38%	
PRHM8 H30	1	38	37,3333	0,4714045	1,26%	-1,79%	37,33
	2	37				0,89%	
	3	37				0,89%	

Fonte: O Autor (2023).

APÊNDICE D – Resultado dos ensaios de ultrassom das pastas de cimento

Tempo registrado, em microssegundos.				
	1	2	3	Média
Cimento	31,5	30,5	30,6	30,9
m1h10	31,4	31,2	31,8	31,5
m1h20	32,4	31,8	31,4	31,9
m1h30	31,9	33,2	32,9	32,7
m2h10	30,6	30,9	30,6	30,7
m2h20	32,1	31,8	31,4	31,8
m2h30	32,5	33,8	33,4	33,2
m4h10	31,4	31,9	31,4	31,6
m4h20	32,4	31,9	31,5	31,9
m4h30	32,9	32,4	32,9	32,7
m8h10	31,4	31,4	31,4	31,4
m8h20	31,4	31,5	31,3	31,4
m8h30	32,9	32,5	32,9	32,8

Fonte: O Autor (2023).

velocidade de propagação das ondas ultrassônicas			
	t μ s	L mm	V mm/ μ s
Cimento	30,9	100	3,240
m1h10	31,5	100	3,178
m1h20	31,9	100	3,138
m1h30	32,7	100	3,061
m2h10	30,7	100	3,257
m2h20	31,8	100	3,148
m2h30	33,2	100	3,009
m4h10	31,6	100	3,168
m4h20	31,9	100	3,132
m4h30	32,7	100	3,055
m8h10	31,4	100	3,185

m8h20	31,4	100	3,185
m8h30	32,8	100	3,052

Fonte: O Autor (2023).

	V mm/μs	V^2	ρ Massa específica do concreto (Kg/m3)	$\frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)}$	Ed
Cimento	3,240	10,50	1620,87	0,9	15311,29
m1h10	3,178	10,10	1602,69	0,9	14567,66
m1h20	3,138	9,85	1544,39	0,9	13687,52
m1h30	3,061	9,37	1457,73	0,9	12294,47
m2h10	3,257	10,61	1622,09	0,9	15489,61
m2h20	3,148	9,91	1546,45	0,9	13792,26
m2h30	3,009	9,05	1477,59	0,9	12040,58
m4h10	3,168	10,04	1582,19	0,9	14290,35
m4h20	3,132	9,81	1520,25	0,9	13417,45
m4h30	3,055	9,33	1486,74	0,9	12488,16
m8h10	3,185	10,14	1596,93	0,9	14577,02
m8h20	3,185	10,14	1546,71	0,9	14118,64
m8h30	3,052	9,31	1469,29	0,9	12316,45

Fonte: O Autor (2023).

APÊNDICE E – Resultado das simulações de consumo CO₂

Pasta 100 - Pó reciclado 0				
☐ Flow Fa COD, Chemical Oxygen Demand - Emission to ☒ Impact category climate change - GWP 100a				
Contribution	Process	Amount	Unit	
100.00%	Pasta 100 - Pó reciclado 0 - BR-North-eastern grid	0.75293	kg CO2-Eq	
98.41%	market for cement, sulphate resistant cement, sulphate resistant APOS, S - BR	0.74092	kg CO2-Eq	
00.96%	market for packing, cement packing, cement APOS, S - GLO	0.00721	kg CO2-Eq	
00.63%	electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage APOS, S - BR-Northern grid	0.00475	kg CO2-Eq	
00.00%	market for conveyor belt conveyor belt APOS, S - GLO	3.48905E-5	kg CO2-Eq	
00.00%	market for industrial machine, heavy, unspecified industrial machine, heavy, unspecified APOS, S - RoW	1.33346E-5	kg CO2-Eq	

Pasta 90 - Pó reciclado 10 - D25				
☐ Flow Fa COD, Chemical Oxygen Demand - Emission to ☒ Impact category climate change - GWP 100a				
Contribution	Process	Amount	Unit	
100.00%	Pasta 90 - Pó reciclado 10 - D25 - BR-North-eastern grid	0.67890	kg CO2-Eq	
98.22%	market for cement, sulphate resistant cement, sulphate resistant APOS, S - BR	0.66683	kg CO2-Eq	
01.06%	market for packing, cement packing, cement APOS, S - GLO	0.00721	kg CO2-Eq	
00.71%	electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage APOS, S - BR-Northern grid	0.00481	kg CO2-Eq	
00.01%	market for conveyor belt conveyor belt APOS, S - GLO	3.48905E-5	kg CO2-Eq	
00.00%	market for industrial machine, heavy, unspecified industrial machine, heavy, unspecified APOS, S - RoW	1.33346E-5	kg CO2-Eq	

Pasta 80 - Pó reciclado 20 - D25				
☐ Flow Fa COD, Chemical Oxygen Demand - Emission to ☒ Impact category climate change - GWP 100a				
Contribution	Process	Amount	Unit	
100.00%	Pasta 80 - Pó reciclado 20 - D25 - BR-North-eastern grid	0.60480	kg CO2-Eq	
98.01%	market for cement, sulphate resistant cement, sulphate resistant APOS, S - BR	0.59274	kg CO2-Eq	
01.19%	market for packing, cement packing, cement APOS, S - GLO	0.00721	kg CO2-Eq	
00.79%	electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage APOS, S - BR-Northern grid	0.00481	kg CO2-Eq	
00.01%	market for conveyor belt conveyor belt APOS, S - GLO	3.48905E-5	kg CO2-Eq	
00.00%	market for industrial machine, heavy, unspecified industrial machine, heavy, unspecified APOS, S - RoW	1.33346E-5	kg CO2-Eq	

Pasta 70 - Pó reciclado 30 - D25				
☐ Flow Fa COD, Chemical Oxygen Demand - Emission to ☒ Impact category climate change - GWP 100a				
Contribution	Process	Amount	Unit	
100.00%	Pasta 70 - Pó reciclado 30 - D25 - BR-North-eastern grid	0.53071	kg CO2-Eq	
97.73%	market for cement, sulphate resistant cement, sulphate resistant APOS, S - BR	0.51865	kg CO2-Eq	
01.36%	market for packing, cement packing, cement APOS, S - GLO	0.00721	kg CO2-Eq	
00.91%	electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage APOS, S - BR-Northern grid	0.00481	kg CO2-Eq	
00.01%	market for conveyor belt conveyor belt APOS, S - GLO	3.48905E-5	kg CO2-Eq	
00.00%	market for industrial machine, heavy, unspecified industrial machine, heavy, unspecified APOS, S - RoW	1.33346E-5	kg CO2-Eq	

Pasta 90 - Pó reciclado 10 - D21

☐ Flow Fw COD, Chemical Oxygen Demand - Emission to
☒ Impact category climate change - GWP 100a

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	Pasta 90 - Pó reciclado 10 - D21 - BR-North-eastern grid	0.67896	kg CO2-Eq
98.21%	market for cement, sulphate resistant cement, sulphate resistant APOS, S - BR	0.66683	kg CO2-Eq
01.06%	market for packing, cement packing, cement APOS, S - GLO	0.00721	kg CO2-Eq
00.72%	electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage APOS, S - BR-Northern grid	0.00487	kg CO2-Eq
00.01%	market for conveyor belt conveyor belt APOS, S - GLO	3.48905E-5	kg CO2-Eq
00.00%	market for industrial machine, heavy, unspecified industrial machine, heavy, unspecified APOS, S - RoW	1.33346E-5	kg CO2-Eq

Pasta 80 - Pó reciclado 20 - D21

☐ Flow Fw COD, Chemical Oxygen Demand - Emission to
☒ Impact category climate change - GWP 100a

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	Pasta 80 - Pó reciclado 20 - D21 - BR-North-eastern grid	0.60486	kg CO2-Eq
98.00%	market for cement, sulphate resistant cement, sulphate resistant APOS, S - BR	0.59274	kg CO2-Eq
01.19%	market for packing, cement packing, cement APOS, S - GLO	0.00721	kg CO2-Eq
00.80%	electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage APOS, S - BR-Northern grid	0.00487	kg CO2-Eq
00.01%	market for conveyor belt conveyor belt APOS, S - GLO	3.48905E-5	kg CO2-Eq
00.00%	market for industrial machine, heavy, unspecified industrial machine, heavy, unspecified APOS, S - RoW	1.33346E-5	kg CO2-Eq

Pasta 70 - Pó reciclado 30 - D21

☐ Flow Fw COD, Chemical Oxygen Demand - Emission to
☒ Impact category climate change - GWP 100a

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	Pasta 70 - Pó reciclado 30 - D21 - BR-North-eastern grid	0.53077	kg CO2-Eq
97.72%	market for cement, sulphate resistant cement, sulphate resistant APOS, S - BR	0.51865	kg CO2-Eq
01.36%	market for packing, cement packing, cement APOS, S - GLO	0.00721	kg CO2-Eq
00.92%	electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage APOS, S - BR-Northern grid	0.00487	kg CO2-Eq
00.01%	market for conveyor belt conveyor belt APOS, S - GLO	3.48905E-5	kg CO2-Eq
00.00%	market for industrial machine, heavy, unspecified industrial machine, heavy, unspecified APOS, S - RoW	1.33346E-5	kg CO2-Eq

Pasta 90 - Pó reciclado 10 - D20

☐ Flow Fw COD, Chemical Oxygen Demand - Emission to
☒ Impact category climate change - GWP 100a

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	Pasta 90 - Pó reciclado 10 - D20 - BR-North-eastern grid	0.67908	kg CO2-Eq
98.20%	market for cement, sulphate resistant cement, sulphate resistant APOS, S - BR	0.66683	kg CO2-Eq
01.06%	market for packing, cement packing, cement APOS, S - GLO	0.00721	kg CO2-Eq
00.73%	electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage APOS, S - BR-Northern grid	0.00499	kg CO2-Eq
00.01%	market for conveyor belt conveyor belt APOS, S - GLO	3.48905E-5	kg CO2-Eq
00.00%	market for industrial machine, heavy, unspecified industrial machine, heavy, unspecified APOS, S - RoW	1.33346E-5	kg CO2-Eq

Pasta 80 - Pó reciclado 20 - D20

☐ Flow Fw COD, Chemical Oxygen Demand - Emission to
☒ Impact category climate change - GWP 100a

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	Pasta 80 - Pó reciclado 20 - D210 - BR-North-eastern grid	0.60499	kg CO2-Eq
97.98%	market for cement, sulphate resistant cement, sulphate resistant APOS, S - BR	0.59274	kg CO2-Eq
01.19%	market for packing, cement packing, cement APOS, S - GLO	0.00721	kg CO2-Eq
00.82%	electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage APOS, S - BR-Northern grid	0.00499	kg CO2-Eq
00.01%	market for conveyor belt conveyor belt APOS, S - GLO	3.48905E-5	kg CO2-Eq
00.00%	market for industrial machine, heavy, unspecified industrial machine, heavy, unspecified APOS, S - RoW	1.33346E-5	kg CO2-Eq

Pasta 70 - Pó reciclado 30 - D20

☐ Flow FeCOD, Chemical Oxygen Demand - Emission to
☒ Impact category climate change - GWP 100a

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	Pasta 70 - Pó reciclado 30 - D20 - BR-North-eastern grid	0.53089	kg CO2-Eq
97.69%	market for cement, sulphate resistant cement, sulphate resistant APOS, S - BR	0.51865	kg CO2-Eq
01.36%	market for packing, cement packing, cement APOS, S - GLO	0.00721	kg CO2-Eq
00.94%	electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage APOS, S - BR-Northern grid	0.00499	kg CO2-Eq
00.01%	market for conveyor belt conveyor belt APOS, S - GLO	3.48905E-5	kg CO2-Eq
00.00%	market for industrial machine, heavy, unspecified industrial machine, heavy, unspecified APOS, S - RoW	1.33346E-5	kg CO2-Eq

Pasta 90 - Pó reciclado 10 - D14

☐ Flow FeCOD, Chemical Oxygen Demand - Emission to
☒ Impact category climate change - GWP 100a

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	Pasta 90 - Pó reciclado 10 - D14 - BR-North-eastern grid	0.67922	kg CO2-Eq
98.18%	market for cement, sulphate resistant cement, sulphate resistant APOS, S - BR	0.66683	kg CO2-Eq
01.06%	market for packing, cement packing, cement APOS, S - GLO	0.00721	kg CO2-Eq
00.76%	electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage APOS, S - BR-Northern grid	0.00513	kg CO2-Eq
00.01%	market for conveyor belt conveyor belt APOS, S - GLO	3.48905E-5	kg CO2-Eq
00.00%	market for industrial machine, heavy, unspecified industrial machine, heavy, unspecified APOS, S - RoW	1.33346E-5	kg CO2-Eq

Pasta 80 - Pó reciclado 20 - D14

☐ Flow FeCOD, Chemical Oxygen Demand - Emission to
☒ Impact category climate change - GWP 100a

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	Pasta 80 - Pó reciclado 20 - D14 - BR-North-eastern grid	0.60513	kg CO2-Eq
97.95%	market for cement, sulphate resistant cement, sulphate resistant APOS, S - BR	0.59274	kg CO2-Eq
01.19%	market for packing, cement packing, cement APOS, S - GLO	0.00721	kg CO2-Eq
00.85%	electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage APOS, S - BR-Northern grid	0.00513	kg CO2-Eq
00.01%	market for conveyor belt conveyor belt APOS, S - GLO	3.48905E-5	kg CO2-Eq
00.00%	market for industrial machine, heavy, unspecified industrial machine, heavy, unspecified APOS, S - RoW	1.33346E-5	kg CO2-Eq

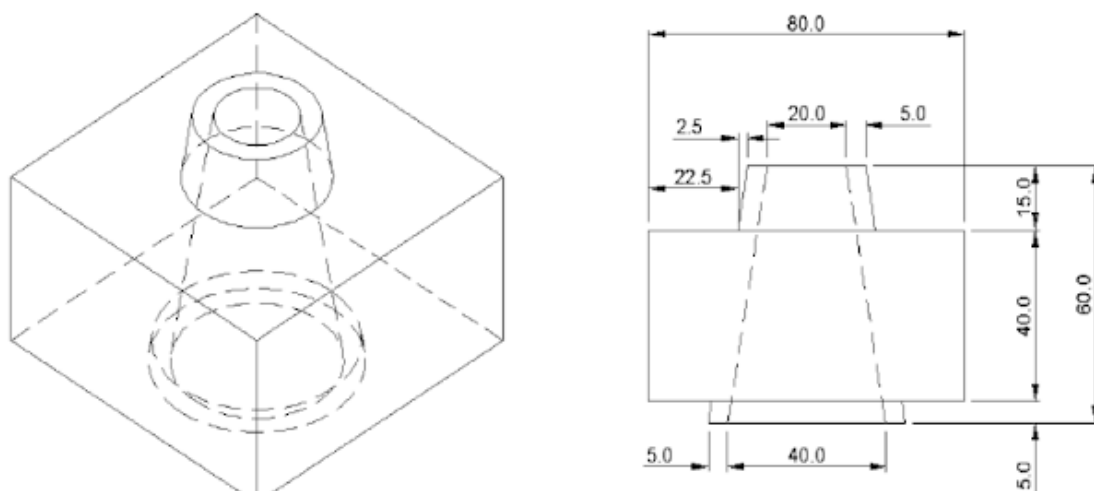
Pasta 70 - Pó reciclado 30 - D14

☐ Flow FeCOD, Chemical Oxygen Demand - Emission to
☒ Impact category climate change - GWP 100a

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	Pasta 70 - Pó reciclado 30 - D14 - BR-North-eastern grid	0.53103	kg CO2-Eq
97.67%	market for cement, sulphate resistant cement, sulphate resistant APOS, S - BR	0.51865	kg CO2-Eq
01.36%	market for packing, cement packing, cement APOS, S - GLO	0.00721	kg CO2-Eq
00.97%	electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage APOS, S - BR-Northern grid	0.00513	kg CO2-Eq
00.01%	market for conveyor belt conveyor belt APOS, S - GLO	3.48905E-5	kg CO2-Eq
00.00%	market for industrial machine, heavy, unspecified industrial machine, heavy, unspecified APOS, S - RoW	1.33346E-5	kg CO2-Eq

Fonte: O Autor (2023).

APÊNDICE F – Dimensões do mini cone usado no ensaio de espalhamento



minicone utilizado para o ensaio de miniabatimento
(MONTE, 2003, p. 95)

Fonte: Página do clube do concreto¹.

¹ Disponível em: <http://www.clubedoconcreto.com.br/2015/09/mini-abatimento-kantro.html>. Acesso em: 28 agosto de 2023