

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E
CIÊNCIAS AMBIENTAIS

FABIANA OLIVEIRA DA SILVA

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE RESÍDUOS DE PORCELANATO COMO
SUBSTITUTOS DO AGREGADO GRAÚDO EM CONCRETOS
CONVENCIONAIS

CAXIAS DO SUL

2026

FABIANA OLIVEIRA DA SILVA

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE RESÍDUOS DE PORCELANATO COMO
SUBSTITUTOS DO AGREGADO GRAÚDO EM CONCRETOS
CONVENCIONAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Ambientais – PPGECAM da Universidade de Caxias do Sul -RS, como requisito para a obtenção do título de mestre em Engenharia e Ciências Ambientais.

Orientador: Prof.º Dr. Vinício Cecconello
Coorientador: Prof.º Me. Mauricio Schäfer

CAXIAS DO SUL

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Universidade de Caxias do Sul
Sistema de Bibliotecas UCS - Processamento Técnico

S586a Silva, Fabiana Oliveira da

Avaliação do potencial de resíduos de porcelanato como substitutos do agregado graúdo em concretos convencionais [recurso eletrônico] / Fabiana Oliveira da Silva. – 2026.

Dados eletrônicos.

Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Ambientais, 2026.

Orientação: Vinício Cecconello.

Coorientação: Mauricio Schäfer.

Modo de acesso: World Wide Web

Disponível em: <https://repositorio.ucs.br>

1. Concreto. 2. Resíduos como material de construção. 3. Construção civil. I. Cecconello, Vinício, orient. II. Schäfer, Mauricio, coorient. III. Título.

CDU 2. ed.: 691.32

Catalogação na fonte elaborada pela(o) bibliotecária(o)
Carolina Machado Quadros - CRB 10/2236

FABIANA OLIVEIRA DA SILVA

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE RESÍDUOS DE PORCELANATO COMO
SUBSTITUTOS DO AGREGADO GRAÚDO EM CONCRETOS
CONVENCIONAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Ambientais – PPGECAM da Universidade de Caxias do Sul -RS, como requisito para a obtenção do título de mestre em Engenharia e Ciências Ambientais.

Aprovada em 29 de junho de 2026

Banca Examinadora:

Prof.º Dr. Vinício Cecconello - Orientador
Universidade de Caxias do Sul – UCS/PPGCAM

Prof.º Me. Mauricio Schäfer - Coorientador
Universidade de Caxias do Sul – UCS/PPGCAM

Prof.º Dr. Gustavo Ribeiro da Silva
Universidade de Caxias do Sul – UCS/PPGCAM

Prof.º Dr. Matheus Poletto
Universidade de Caxias do Sul – UCS/PPGPROTEC

Me. Bruno Rommel Catani Sartori
TCA Pré-Moldados

Dedico este trabalho à minha Mãe Louremi
(*in memoriam*) e ao meu Pai Moisés, a
quem agradeço pelas bases que me deram
para tornar-me a pessoa que sou hoje.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e à Nossa Senhora de Caravaggio por me permitir concluir essa pesquisa e por me dar forças para perseverar até alcançar esta conquista.

Ao meu Pai por todo apoio, compreensão e paciência e à minha querida Mãe, que tenho certeza, de onde estiver, sempre estará olhando por mim.

Ao meu orientador, Professor Vinício Cecconello, pela atenção de sempre, pelos conhecimentos compartilhados e principalmente por não desistir de mim... Pois sei que a tarefa não foi fácil!

Ao professor Maurício Schäfer, por aceitar ser meu coorientador, com suas importantes contribuições e também ao longo do curso.

A toda equipe do Laboratório de Engenharia Civil (LENC), Mara, Matheus, Isaac e Thiago, pelo profissionalismo, disponibilidade e carinho em todas as etapas dos ensaios desse estudo.

As queridas colegas de mestrado, Luana, Gabriela e Caroline, pela generosidade e auxílio nos trabalhos, assim como a Priscila, aluna de Engenharia Civil, pela ajuda na produção dos concretos e a toda equipe do PPGCAM, professores e secretaria, em especial à secretária Beatriz.

A minha amiga e sócia Marcia, pelo apoio de sempre, pelo suporte e pela compreensão nas ausências das tarefas do nosso trabalho.

Enfim, agradeço a todos que contribuíram de alguma forma, pois não caberia neste espaço elencar todos os nomes, mas a gratidão estará sempre no meu coração!

RESUMO

O setor da construção civil exerce papel fundamental no desenvolvimento econômico e social, porém está associado ao elevado consumo de recursos naturais e à geração de resíduos. Entre esses materiais, destacam-se as sobras e quebras de porcelanato, provenientes do manuseio, transporte e aplicação desses revestimentos. O objetivo deste estudo foi avaliar o concreto produzido com resíduos de porcelanato em substituição ao agregado graúdo natural. A metodologia consistiu na produção de concretos experimentais com base no método IPT/EPUSP. Inicialmente, foi realizada a caracterização de todos os agregados e de suas respectivas composições, seguida da produção de concretos com substituição do agregado graúdo natural por agregado reciclado de porcelanato, nos teores de 25%, 50% e 75% em volume (ARP 25, ARP 50 e ARP 75), além do traço de referência (REF) com 0% de substituição do agregado graúdo natural. Foram realizados ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, absorção de água por capilaridade e análise digital de imagens nas seções dos corpos de prova, utilizando os *softwares: ImageJ e Ilastik*. Os resultados demonstraram que as misturas apresentaram consistência adequada no estado fresco, com abatimentos mantidos dentro da faixa estabelecida para a classe S160. No estado endurecido, o concreto com 50% de substituição apresentou resistência média à compressão de 17,78 MPa aos 28 dias, valor próximo ao concreto de referência (17,38 MPa), associado ao menor coeficiente de variação (3,7%). Nos ensaios de tração por compressão diametral, o concreto ARP 75 atingiu resistência média de 2,7 MPa aos 28 dias, aproximadamente 19,7% superior ao referência (REF). Na absorção de água por capilaridade, houve aumento gradual, com o incremento do teor de substituição, sem comprometer o desempenho global das misturas. A análise digital de imagens evidenciou distribuição homogênea do agregado reciclado, mostrando-se uma ferramenta complementar para interpretar a influência do resíduo de porcelanato no desempenho físico e mecânico dos concretos. Conclui-se que o resíduo de porcelanato apresenta potencial para utilização como agregado graúdo reciclado na produção de concreto, reduzindo o consumo de agregados naturais. Esses resultados reforçam a contribuição da pesquisa para o desenvolvimento de soluções mais sustentáveis na construção civil, alinhado com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030, especialmente os relacionados à inovação, ao consumo e produção responsáveis.

Palavras-chave: resíduos de porcelanato; agregado graúdo reciclado; concreto com agregado reciclado; análise digital de imagens; ODS.

ABSTRACT

The construction industry plays a key role in economic and social development, but it is associated with high consumption of natural resources and the generation of waste. Among these materials, porcelain tile scraps and offcuts resulting from the handling, transportation, and installation of these floor and wall tiles are particularly noteworthy. The objective of this study was to evaluate concrete produced with porcelain tile waste as a substitute for natural coarse aggregate. The methodology consisted of producing experimental concrete mixtures based on the IPT/EPUSP method. First, all aggregates and their respective compositions were characterized, followed by the production of concrete in which the natural coarse aggregate was replaced with recycled porcelain tile aggregate at replacement rates of 25%, 50%, and 75% by volume (ARP 25, ARP 50, and ARP 75), in addition to the reference mix (REF) with 0% replacement of natural coarse aggregate. Tests were conducted for axial compressive strength, tensile strength under diametral compression, capillary water absorption, and digital image analysis of test specimen cross-sections, using the software ImageJ and Ilastik. The results showed that the mixtures exhibited adequate consistency in the fresh state, with slump values maintained within the range established for Class S160. In the hardened state, the concrete with 50% replacement exhibited an average compressive strength of 17.78 MPa at 28 days, a value close to that of the reference concrete (17.38 MPa), associated with the lowest coefficient of variation (3.7%). In diametral compression-tension tests, the ARP 75 concrete achieved an average strength of 2.7 MPa at 28 days, approximately 19.7% higher than the reference (REF). Capillary water absorption increased gradually as the replacement content increased, without compromising the overall performance of the mixtures. Digital image analysis revealed a homogeneous distribution of the recycled aggregate, proving to be a complementary tool for interpreting the influence of porcelain tile waste on the physical and mechanical performance of the concretes. It can be concluded that porcelain tile waste has the potential to be used as a recycled coarse aggregate in concrete production, thereby reducing the consumption of natural aggregates. These results underscore the research's contribution to the development of more sustainable solutions in the construction industry, in line with the Sustainable Development Goals (SDGs) of the 2030 Agenda, particularly those related to innovation and responsible consumption and production.

Keywords: porcelain tile waste; recycled coarse aggregate; concrete with recycled aggregate; digital image analysis; SDGs.

DE LISTA FIGURAS

Figura 1 - Produção Brasileira de revestimentos cerâmicos entre 2020 e 2024.....	44
Figura 2 - (a) triturador de pedra portátil e (b) agregado de porcelanato.	48
Figura 3 - Agregado gráúdo natural e agregado gráúdo de revestimentos cerâmicos.....	49
Figura 4 - Resíduo de revestimento cerâmico.	49
Figura 5 - Agregado gráúdo de revestimentos cerâmicos e agregado gráúdo natural.....	50
Figura 6 - Materiais utilizados na execução dos corpos de prova de concreto	51
Figura 7 - Imagem resíduos cerâmicos britados e imagens dos corpos de prova.....	52
Figura 8 - Materiais utilizados no experimento.....	53
Figura 9 - Fluxograma do programa experimental da pesquisa.	55
Figura 10 - Curva granulométrica do agregado miúdo natural.	60
Figura 11 - Curva granulométrica do agregado gráúdo natural.....	62
Figura 12 - Curva granulométrica do agregado reciclado de porcelanato (ARP).	64
Figura 13 - Imagens da região analisada:(a) imagem do corpo de prova após ruptura (b) imagem da área selecionada	78
Figura 14 - Imagem segmentada no software Ilastik.....	79
Figura 15 - Imagem binarizada no software ImageJ	80
Figura 16 - Fração de área fornecida pelo software ImageJ.....	80
Figura 17 - Curva granulométrica das composições com ARP.....	84
Figura 18- Resultado do abatimento dos concretos.....	85
Figura 19 - Resultado da resistência à compressão nas idades de 3, 7 e 28 dias.....	89
Figura 20 - Imagem da região de contato entre a pasta de cimento e os agregados após a ruptura do corpo de prova.	91
Figura 21 - Resultados da resistência à tração nas idades de 7 e 28 dias.	93
Figura 22 - Absorção por capilaridade média por traço ao longo do tempo.	96
Figura 23 - Altura capilar por traço ao longo do tempo.	98
Figura 24 - Imagens da região analisadano traço ARP 25:(a) imagem original (b) imagem binarizada.....	100
Figura 25 - Imagens da região analisada no traço ARP 50: (a) imagem original (b) imagem binarizada.....	101
Figura 26 - Imagens da região analisada no traço ARP 75: (a) imagem original (b) imagem binarizada.....	102
Figura 27 - Relação entre o volume de poros e seus diâmetros através do método BJH para a	

amostra da argamassa do concreto.	105
Figura 28 - Relação entre volume de poros e seus diâmetros através do método BJH para a amostra do agregado graúdo natural.....	106
Figura 29 - Relação entre volume de poros e seus diâmetros através do método BJH para a amostra de agregado reciclado de porcelanato(ARP).....	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de destinação adotados para o RCC.	22
Tabela 2 - Caracterização física, química e mecânica do cimento CII-F40.	58
Tabela 3 - Caracterização granulométrica do agregado miúdo natural	60
Tabela 4 - Caracterização granulométrica do agregado graúdo natural.	61
Tabela 5 - Caracterização granulométrica do agregado graúdo reciclado de porcelanato (ARP).	63
Tabela 6 - Limites da composição granulométrica do agregado graúdo (ARP).	65
Tabela 7 - Propriedades do agregado graúdo natural e do ARP.	66
Tabela 8 - Dados técnicos e características do aditivo.	67
Tabela 9 - Teor de substituição do agregado graúdo natural.	68
Tabela 10 - Consumo de materiais utilizados para o traço de concreto produzido.	69
Tabela 11 - Idades e quantidades de corpos de prova por ensaio.	73
Tabela 12 - Tolerância para idade de ensaio.	75
Tabela 13 - Granulometria das composições do agregado reciclado de porcelanato (ARP). ..	84
Tabela 14 - Resultados médios de resistência à compressão nas diferentes idades.	88
Tabela 15 - ANOVA dos resultados de resistência à compressão.	89
Tabela 16 - Evolução da resistência à compressão por período.	91
Tabela 17 - Resultados médios de resistência a tração nas diferentes idades.	92
Tabela 18 - ANOVA dos resultados de resistência à tração.	94
Tabela 19 - Comparativo entre resistência à compressão e tração aos 28 dias.	94
Tabela 20 - Resultados médios do ensaio de absorção de água por capilaridade.	95
Tabela 21- ANOVA dos resultados de absorção de água por capilaridade.	96
Tabela 22 - Resultados médios do ensaio de altura capilar.	97
Tabela 23 - ANOVA dos resultados de altura capilar em 24 horas e 48 horas.	98
Tabela 24 - Comparativo do ensaio BET/BJH para o concreto, agregado natural e agregado reciclado de porcelanato.	108

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Normas técnica relativas à reciclagem de RCD	29
Quadro 2 - Classificação das placas cerâmicas quanto à absorção de água e conformação. ...	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCERAM	Associação Brasileira de Cerâmica
ABCIP	Associação Brasileira das Entidades de Crédito imobiliário e Poupança
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRECON	Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ABREMA	Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente
ANFACER	Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica
ARC	Agregado Reciclado de Concreto
ARP	Agregado Reciclado de Porcelanato
BIM	<i>Building Information Modeling</i>
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CV	Coeficiente de Variação
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São paulo
FIESP	Federação das Indústrias do Estado de São Paulo
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do estado de São Paulo
LENC	Laboratório de Engenharia Civil
NBR	Norma Brasileira
ODS	Objetivo de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização da Nações Unidas
PIB	Produto Interno Bruto
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
RCC	Resíduo de Construção Civil
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
RSU	Resíduo Sólido Urbano
SAMAE	Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto
SISNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
ZTI	Zona da Transição Interfacial

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	18
2.1	OBJETIVO GERAL	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
2.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	19
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1	RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	20
3.1.1	Quantificação e caracterização dos resíduos de construção civil (RCC/RCD).....	24
3.1.2	Legislação e normas técnicas brasileiras aplicadas aos resíduos da construção civil	27
3.2	PROPRIEDADES DO CONCRETO CONVENCIONAL	31
3.2.1	Concreto de cimento Portland.....	31
3.2.2	Propriedades do concreto.....	32
3.2.3	Concreto no estado fresco	33
3.2.4	Concreto no estado endurecido	35
3.2.5	Dosagem de concreto	38
3.3	USO DO RCD EM CONCRETO CONVENCIONAL	39
3.4	CONCRETOS COM RCD	41
3.5	CONCRETOS COM RCD DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS.....	43
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	54
4.1	PROGRAMA EXPERIMENTAL	54
4.1.1	Fluxograma do programa experimental.....	55
4.2	VARIÁVEIS DO ESTUDO	56
4.2.1	Parâmetros fixados	56
4.2.2	Variáveis controláveis	57
4.2.3	Variáveis de resposta.....	57
4.3	MATERIAIS UTILIZADOS	58
4.3.1	Cimento Portland.....	58
4.3.2	Agregados	59

4.3.2.1 Agregado miúdo	59
4.3.2.2 Agregado graúdo natural	61
4.3.2.3 Agregado graúdo reciclado de porcelanato (ARP)	63
4.3.3 Água	66
4.3.4 Aditivo.....	66
4.4 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS.....	67
4.4.1 Traço e consumo de material.....	67
4.4.2 Ordem de mistura dos materiais	69
4.4.3 Cura dos corpos de prova	72
4.5 MÉTODOS DE ENSAIOS	73
4.5.1 Abatimento por tronco de cone – Estado Fresco	73
4.5.2 Resistência à compressão axial – Estado Endurecido	74
4.5.3 Resistência à tração por compressão diametral – Estado Endurecido	75
4.5.4 Absorção de água por capilaridade e altura capilar – Estado Endurecido.....	76
4.5.5 Método de análise 2D para avaliação da distribuição do ARP – Estado Endurecido	77
4.5.6 Adsorção e dessorção de nitrogênio pelo método de BET – Estado Endurecido..	81
4.5.7 Análise dos dados.....	82
5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	83
5.1 AVALIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS COMPOSIÇÕES	83
5.2 RESULTADOS DO ESTADO FRESCO DO CONCRETO	85
5.3 RESULTADOS DO ESTADO ENDURECIDO DO CONCRETO	87
5.3.1 Resistência à compressão	87
5.3.2 Resistência à tração por compressão diametral.....	92
5.3.3 Absorção de água por capilaridade e altura capilar	95
5.3.4 Análise digital de imagens do concreto com agregado reciclado de porcelanato (ARP) 99	
5.3.5 Adsorção e dessorção de nitrogênio pelo método de BET/BJH	104

5.3.6	Correlação entre os resultados de BET/BJH e os ensaios físicos e mecânicos	108
6	CONCLUSÃO	110
6.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	110
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	113
7	PRODUTO TÉCNICO TECNOLÓGICO	115
7.1	IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO	115
7.2	DESCRIÇÃO DO PRODUTO	115
7.3	QUALIFICAÇÃO TÉCNICA / TECNOLÓGICA NA ÁREA DE ENGENHARIAS I 116	
7.3.1	Aderência:	116
7.3.2	Demanda e Impacto:.....	116
7.3.3	Abrangência e Replicabilidade	117
7.3.4	Inovação	117
7.3.5	Aplicabilidade	117
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	118
	APÊNDICES	140

1 INTRODUÇÃO

A gestão de resíduos constitui um dos grandes desafios da sociedade contemporânea, intensificado pelo acelerado processo de urbanização e industrialização observado nas últimas décadas. Nesse contexto, a indústria da construção civil destaca-se pelo elevado consumo de recursos naturais, energético e geração de resíduos no decorrer de suas atividades. O setor enfrenta uma pressão crescente, para adotar práticas sustentáveis e ao mesmo tempo atender à demanda cada vez maior por concreto (Chen *et al.*, 2024). Segundo Bontempi *et al.* (2021), o uso racional desses recursos é essencial para conciliar o desenvolvimento da sociedade com a preservação ambiental, de modo a garantir que as necessidades atuais sejam atendidas sem comprometer as gerações futuras. Sob essa perspectiva, a gestão adequada dos resíduos de construção e demolição (RCD) assume papel estratégico na transição para um modelo de economia circular, baseado na redução, reutilização e reciclagem de materiais (Bao *et al.*, 2019).

Entre as atividades do setor construtivo, a produção de concreto é apontada como o principal responsável pela alta demanda por matérias-primas e pelo potencial de geração de resíduos ao longo de sua cadeia produtiva (Medeiros *et al.*, 2021). A gestão eficiente desses resíduos, é dificultada pela heterogeneidade dos materiais gerados e pela complexidade de segregação na fonte, fatores que limitam seu reaproveitamento e sua adequada destinação (Del Rio *et al.*, 2019).

Uzzal e Thomas (2019) e John (2000) destacam que a disposição inadequada dos resíduos pode provocar impactos ambientais, como contaminação do solo, de águas subterrâneas, proliferação de vetores de doenças e degradação da paisagem urbana. Paralelamente, a extração intensiva de agregados naturais, contribui para o esgotamento de recursos não renováveis, estando associada a processos de erosão em leitos de rios e regiões costeiras, ampliando os danos ao meio ambiente resultante da atividade construtiva (Collivignarelli *et al.*, 2020).

Conforme Fonseca e Maintinguer (2018), a elevada geração de resíduos na construção civil, em sua maioria são decorrentes de erros no processo construtivo, devido à falta de compatibilidade na execução dos projetos e a gestão ineficiente na compra de insumos. As perdas no transporte e estocagem, dentro dos canteiros de obras, também acabam resultando em desperdício de materiais. De forma complementar, Guimarães *et al.* (2019) e Lima *et al.* (2021) relatam que a baixa qualidade técnica e escassez de mão de obra qualificada, na execução das etapas de construção e acabamento, resultam em erros, que levam ao acúmulo de

materiais, que virão a ser descartados posteriormente limitando assim, a adoção de práticas sustentáveis. Para Agopyan e Jonh (2011), essas etapas envolvem recursos ambientais, econômicos e têm impactos sociais que atingem a toda coletividade, não apenas aos seus usuários diretos. Ainda segundo os autores, a construção civil, deve enfrentar esse desafio, estabelecendo metas, propondo medidas e desenvolvendo programas que contribuam, para reduzir o impacto ambiental dessa atividade.

Os produtos cerâmicos fazem parte dos materiais de construção essenciais, usados na maioria das edificações, incluem além dos tijolos e telhas, azulejos de parede, ladrilhos de piso, louças sanitárias, isoladores elétricos, entre outros (Siddique *et al.*, 2015). O uso de resíduos cerâmicos, originários de canteiros de obras e indústrias, como agregados finos e graúdos em concreto, apresenta um esforço eficaz e sustentável para os problemas ambientais, causados pela extração de agregados naturais (Sourav *et al.*, 2021).

Conforme Suchithra e Pavithran (2022), a mudança para a economia, tende a ser fortemente influenciada pelo setor cerâmico, materiais não renováveis, serão convertidos em recursos parcialmente renováveis, com os avanços na reciclagem. De acordo com os autores, o uso de resíduos cerâmicos, como materiais agregados alternativos para a construção, tem despertado muitos estudos com estes produtos, que podem ser utilizados para resolver desafios complexos, como escassez de materiais em canteiros de obras e minimizar o desperdício no meio ambiente. A natureza da indústria da construção, especialmente a indústria do concreto, é tal que os resíduos cerâmicos podem ser usados com segurança, sem a necessidade de mudanças drásticas no processo de produção e aplicação (Torgal e Jalali, 2010).

A reciclagem de resíduos cerâmicos, ganhou atenção como uma solução sustentável, para reduzir seu impacto ambiental (Boschi *et al.*, 2023). Na prática de construção sustentável, Sandanayake *et al.* (2020), Fernandez *et al.* (2023) e Chen *et al.* (2024), enfatizam que os resíduos cerâmicos, podem ser incorporados em misturas de concreto e argamassa, reduzindo a necessidade de matérias primas virgens, como cascalho e areia.

Os resíduos de porcelanato, podem ser moídos em partículas finas, ou utilizados nas misturas como agregado graúdo, vindo a aumentar a resistência e durabilidade do concreto (Meena; Chouhan e Beniwal, 2022).

Embora pesquisas envolvendo resíduos cerâmicos como telhas, azulejos, louças sanitárias e isoladores elétricos, tenham sido investigados, ainda existe uma lacuna quanto a estudos mais aprofundados sobre o uso de resíduos de porcelanato como agregado graúdo reciclado em concretos. Esses materiais representam, uma parcela importante dos resíduos da construção e demolição, porém quando misturados a outros materiais inorgânicos, podem

resultar em agregados reciclados com propriedades técnicas de difícil padronização. Dessa forma, a utilização de resíduos de porcelanato com características controladas, provenientes de rejeitos industriais e sobras de obras sem argamassa ou rejunte aderidos, conforme adotado em estudos anteriores (Hakan, 2016; Keshavarz e Mostofinejad, 2019; Rajat *et al.*, 2022; Gritsada e Sittisak, 2023), contribui para a redução de variáveis que possam interferir nos resultados experimentais.

Meena *et al.* (2022), destacam que a utilização de resíduos cerâmicos, não só ajudará a diminuir o consumo de recursos não renováveis, mas principalmente, evoluir para um ambiente economicamente viável e sustentável.

Diante da necessidade de reduzir os impactos ambientais associados à geração de resíduos e ao consumo de recursos naturais pela construção civil, esta pesquisa tem como objetivo avaliar a viabilidade técnica do uso de resíduos de porcelanato em substituição parcial ao agregado gráudo natural na produção de concreto, por meio da análise das propriedades do material no estado fresco e endurecido, com base em ensaios de trabalhabilidade, resistência mecânica e absorção de água por capilaridade.

Com o propósito de adequar essas práticas, aos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS/ONU) da agenda 2030, a pesquisa visa contribuir com a inovação, sustentabilidade e uso racional de recursos naturais, indo de encontro aos objetivos 9, 11, 12 e 13 e suas metas específicas dentro desses ODS.

ODS 9 - Indústria, Inovação e Infraestrutura: “Construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação”

ODS 11 - Cidades e Comunidades Sustentáveis: “Tornar as cidades e comunidades mais inclusivas, seguras, resilientes e sustentáveis”

ODS 12 - Consumo e Produção Responsáveis: “Garantir padrões de consumo e de produção sustentáveis”

ODS 13 – Ação contra a mudança global do clima: “Tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos”

2 OBJETIVOS

O objetivo desta pesquisa é analisar o potencial de utilização de resíduos de porcelanato, provenientes de canteiros de obras e indústrias, como agregados alternativos na produção de concreto. Ao investigar essa abordagem, busca-se não apenas mitigar o descarte inadequado desses resíduos e a degradação ambiental, mas também demonstrar, como essa prática pode contribuir para a economia circular na construção civil e para a preservação dos recursos naturais.

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a viabilidade técnica do uso de resíduo de porcelanato como agregado graúdo, em substituição parcial ao agregado natural, na produção de concreto.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) Analisar a distribuição granulométrica das composições do agregado graúdo natural com o agregado reciclado de porcelanato (ARP), nos percentuais de substituição de 25%, 50% e 75%;
- b) Analisar o abatimento e a trabalhabilidade no estado fresco das composições produzidas com o agregado reciclado de porcelanato (ARP);
- c) Analisar as propriedades mecânicas dos concretos produzidos com as substituições do agregado graúdo natural por agregado reciclado de porcelanato (ARP);
- d) Avaliar as propriedades físicas de absorção de água e altura capilar dos concretos com substituição de agregado graúdo natural por agregado reciclado de porcelanato (ARP);
- e) Avaliar a distribuição do agregado reciclado de porcelanato (ARP) na matriz cimentícia através da análise de imagens bidimensionais;
- f) Avaliar a área superficial específica e a estrutura porosa do agregado graúdo natural, do agregado reciclado de porcelanato (ARP) e do concreto endurecido por meio dos métodos BET/BJH.

2.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta pesquisa divide-se em sete capítulos, conforme descrito na sequência:

O primeiro capítulo, trata de uma introdução ao assunto abordado no estudo, apresentando a justificativa para a definição do tema.

O segundo capítulo traz o objetivo geral e os objetivos específicos, propostos no estudo e na continuação do capítulo, contém a estrutura da pesquisa.

O terceiro capítulo faz uma revisão, na bibliografia direcionada ao tema proposto, destacando a importância do reaproveitamento de agregados reciclados, na execução de concretos, frente à questão da sustentabilidade. Também são abordadas, as propriedades do concreto, com resíduos de revestimentos cerâmicos e pesquisas realizadas referentes à sua utilização.

O quarto capítulo apresenta a descrição do programa experimental, elencando as variáveis, materiais e métodos, para substituição do agregado natural, pelo agregado reciclado de porcelanato.

O quinto capítulo realiza a análise dos resultados, referentes aos ensaios executados.

O sexto capítulo aborda, a conclusão da pesquisa, considerações finais e sugestão para futuros trabalhos.

O sétimo capítulo apresenta o Produto Técnico-Tecnológico resultante da pesquisa, evidenciando sua aplicação prática e contribuição para a sustentabilidade na construção civil.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presente revisão bibliográfica tem por objetivo apresentar os principais conceitos e estudos relacionados ao tema desta pesquisa. São abordados a geração, a caracterização, quantificação e o reaproveitamento de resíduos da construção civil (RCC) e resíduos de construção e demolição (RCD), bem como sua aplicação como agregados em concreto. Na sequência, são reunidos trabalhos que tratam do concreto produzido com RCD e na utilização de resíduos de revestimentos cerâmicos, especialmente de porcelanato. Por fim, são apresentados os aspectos normativos e legais relacionados à gestão desses resíduos no contexto brasileiro, com destaque para a legislação ambiental e as normas técnicas aplicáveis.

3.1 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Os resíduos de construção civil (RCC), também denominados resíduos de construção e demolição (RCD), são gerados nas atividades de construção, reforma, reparo e demolição de obras, sendo constituídos por uma ampla variedade de materiais, como concreto, argamassa, componentes cerâmicos, madeira, metais, plásticos e gesso, conforme definido pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002).

A indústria da construção civil exerce um papel importante no desenvolvimento econômico e social do país. De acordo com a Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC), esse segmento é responsável por movimentar extensas cadeias produtivas e gerar um grande número de empregos diretos e indiretos. Trata-se de um dos setores que mais contribuem para o Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro, tendo apresentado desempenho destacado em 2024, com crescimento de 4,3%, conforme dados divulgados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Contudo, esse setor é apontado como um dos maiores consumidores de recursos naturais não renováveis e um dos principais geradores de resíduos ao longo de toda sua cadeia produtiva, conforme apontado pelo relatório do Programa da Nações Unidas para o Meio Ambiente (GlobalABC, 2025). Estima-se que os RCD correspondam, em média, cerca de 30% dos resíduos sólidos urbanos gerados globalmente (Soto-Paz *et al.*, 2023).

Segundo Klepa *et al.* (2019), os resíduos de construção e demolição (RCD) caracterizam-se em geral, por serem mais volumosos e pesados do que os resíduos sólidos urbanos domiciliares, podendo, em alguns casos, apresentar componentes potencialmente tóxicos. Yuan e Shen (2011), Li *et al.* (2020), Kabirifar *et al.* (2020) e Liu *et al.* (2024)

destacam que o gerenciamento adequado dos resíduos de construção e demolição (RCD) é fundamental para minimizar os impactos ambientais decorrentes de sua geração e destinação. Os autores ressaltam que a adoção de estratégias sustentáveis, baseadas na redução, reutilização e reciclagem desses materiais, contribui para diminuir o volume de resíduos destinados aos aterros sanitários, conservar os recursos naturais e reduzir os impactos ambientais e urbanos associados ao descarte inadequado.

Com o objetivo de estabelecer diretrizes para a gestão adequada desses resíduos, o CONAMA publicou a Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002, que classifica os resíduos da construção civil em quatro classes: **A, B, C e D**.

Essa classificação é fundamental para o manejo adequado desses resíduos, promovendo a reciclagem, reutilização e disposição correta, visando a redução do impacto ambiental.

CLASSE A - São resíduos produzidos a partir de agregados de construção e demolição, componentes cerâmicos, argamassas, concretos, blocos e tijolos, reparos e reformas de edificações, pavimentação, telhas e pré-moldados;

CLASSE B - são os resíduos recicláveis ou reutilizáveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros;

CLASSE C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso;

CLASSE D - são os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros: Tintas, solventes, óleos e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde;

Com a aprovação da resolução 307, ficaram estabelecidos critérios e procedimentos para a gestão de RCD no Brasil (CONAMA, 2002). Por meio dessa resolução, são atribuídas responsabilidades tanto para o poder público quanto para a iniciativa privada (Pinto *et al.*, 2005). Aliado a este contexto, no ano de 2010, foi aprovada a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), por intermédio da Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010, a qual estabelece as diretrizes para a gestão e a disposição dos resíduos no país.

O Brasil gerou aproximadamente 77,1 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU), no ano de 2022, segundo dados divulgados pelo panorama 2023, da Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA, 2023), comparados ao período anterior, entre os anos de 2021 e 2022, foi observado uma redução de 2%. Porém, segundo o relatório

apresentado pela mesma entidade, referente ao ano de 2024 , houve um acréscimo na geração de resíduos, foram estimados em torno de 81 milhões de toneladas por ano, o equivalente a 221 mil toneladas geradas todos os dias (ABREMA, 2024). A região Sul foi a que apresentou o menor índice de geração per capita e a região Sudeste, sendo o maior gerador , com percentual representando, aproximadamente 50% da geração nacional (ABREMA, 2024).

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS, 2010), o tratamento e disposição final dos resíduos sólidos, deve ser feita de forma ambientalmente adequada, ou seja, priorizando a não geração, redução, reutilização e reciclagem, contribuindo assim, para uma economia mais circular,

Estima-se que aproximadamente 44 milhões de toneladas de RCD/RCC, tenham sido geradas no Brasil em 2023 (ABRECON, 2023), desse total, somente em torno de 10% são reciclados , enquanto a maior parte é descartada em aterros sanitários, sendo muitos deles, locais inadequados ou não legalizados.

Outro levantamento, com dados referentes aos resíduos gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis, são disponibilizados pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2021), em seu inventário nacional de resíduos sólidos, com informações de 590 municípios declarantes. O relatório divulgado em 2021, contabilizou a geração de 58.069.035,86 toneladas de resíduos e desse total, 8.278.775,00 toneladas, seguem para diferentes formas de destinação, conforme apresentado na Tabela 1, podendo ser observado que apenas 10% são destinados à reciclagem.

Tabela 1 - Tipos de destinação adotados para o RCC.

Tipo de destinação	Massa (t)	%
Reciclagem	845.933,70	10,22
Aterro de resíduos da Construção Civil (=inertes)	2.999.139,40	36,23
Aterro sanitário	2.871.573,40	34,69
Aterro controlado	611.169,10	7,38
Lixão	950.959,40	11,49
Totais	8.278.775,00	100

Fonte: SNIS (2021).

O reaproveitamento dos resíduos da construção civil no próprio canteiro de obras constitui uma estratégia importante para reduzir o volume de materiais descartados e otimizar o uso dos recursos disponíveis, o gerenciamento dos resíduos deve ser planejado desde as etapas iniciais da obra, contemplando sua correta segregação, acondicionamento e destinação. Nesse

contexto, Miranda *et al.* (2019) destacam que a capacitação dos trabalhadores favorece a adequada classificação e separação dos resíduos, enquanto Jacinto e Carvalho (2022) argumentam que a educação ambiental contribui para o aprimoramento do gerenciamento, promovendo maior eficiência operacional, redução dos custos de manejo, além de minimizar os impactos ambientais.

Lins *et al.* (2022) ressaltam que práticas de gestão nos canteiros, aliadas ao reaproveitamento de resíduos e o uso de agregados reciclados, diminuem perdas e desperdícios favorecendo construções mais sustentáveis. Complementarmente, Khaertdinova *et al.* (2021) e Al-Raqeb *et al.* (2023) ressaltam que a reciclagem dos RCC reduz os custos de disposição final, amplia as possibilidades de reuso de materiais e reforça princípios da economia circular.

Entretanto, a elevada diversidade de materiais presentes nos RCC ainda representa um desafio para sua segregação e reaproveitamento eficiente. Brasileiro e Matos (2015) apontam que a gama de materiais resultantes do RCC e RCD é muito grande e diversificada, visto a inúmera quantidade e variedade de insumos presente em todas as etapas de uma construção e principalmente na demolição, neste caso, evidenciando o resíduo, mas muitas vezes, dificultando a separação em sua totalidade.

Conforme a Organização das Nações Unidas (ONU, 2025), a construção civil responde por cerca de 34% das emissões globais de dióxido de carbono (CO₂), decorrentes de atividades humanas. Isso inclui as emissões associadas à produção de materiais de construção, à construção e demolição de edifícios e a operação e manutenção dos edifícios ao longo de sua vida útil.

O panorama anual, do progresso do setor de edificações e construção, em escala global, é trazido pelo relatório publicado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA, 2022), onde são analisados dados e também monitorar, se o setor está alinhado com as metas do Acordo de Paris (2015). De acordo com esta publicação, o setor de edificações e construção contribuiu para a mudança climática global, sendo responsável por cerca de 34% da demanda global de energia, relacionadas a energia e processos (PNUMA, 2022).

O ano de 2024, foi marcado por importantes eventos globais, relacionados a sustentabilidade, COP 29 no Azerbaijão e o encontro do G20, ocorrido no Brasil, onde foram tratados, temas como a transição energética, descarbonização e eventos climáticos extremos, como as enchentes no Rio Grande do Sul, além das ações voltadas a cumprir as metas da Agenda 2030 da ONU, através dos 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Em 2024 foi registrado, uma queda no número de emissões de dióxido de carbono, causadas pelo setor da construção (ONU, 2024). Segundo a ONU (2024), essa redução foi em

torno de 10%, enquanto a participação da energia renovável, aumentou cerca de 5%. A Organização aponta, na divulgação do Relatório de Status Global para Edificações e Construção (Buildings-GSR, 2024), que um número crescente de países, está atuando para descarbonizar edifícios, mas o progresso lento, coloca em risco, as metas climáticas globais.

Dentro dessa temática, da sustentabilidade na construção civil, o gerenciamento dos RCC é um aspecto que demanda um importante enfoque. Lima *et al.* (2021), destacam que é crescente o número de empresas, entre outros segmentos do setor, que passaram a incorporar em suas obras, soluções sustentáveis. Os autores apontam ainda, que o monitoramento dos diversos tipos de resíduos gerados, do consumo de recursos e adoção de novas tecnologias, para reciclagem e reutilização, faz parte dessas ações.

3.1.1 Quantificação e caracterização dos resíduos de construção civil (RCC/RCD)

A construção civil abrange diversas áreas de atuação, como construção, manutenção, demolição e reformas, sendo que cada uma delas contribui para a geração de resíduos, em diferentes proporções. Fatores como técnicas de construção utilizadas, a qualidade da mão de obra, o desenvolvimento local da indústria e os tipos de produtos empregados, influenciam diretamente na composição desses resíduos (Campos e Orchulhak, 2025).

A caracterização dos resíduos gerados por esse setor, é uma medida importante para identificar, os tipos de materiais mais recorrentes nos canteiros de obras (Kuhn *et al.*, 2021). Segundo Kourmpianis *et al.* (2008), essa análise, também auxilia para a definição dos métodos e equipamentos mais adequados para sua reciclagem, fornecendo subsídios técnicos para a elaboração dos Planos de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil (PGRCC), exigência legal, prevista pela resolução do CONAMA (2002). Caetano (2016) e Rodrigues *et al.* (2021), destacam que esse procedimento, deve ser realizado ao longo das diferentes fases da obra, permitindo correlacionar os tipos de RCC gerados ao cronograma de execução, norteando a tomada de decisões, para uma gestão mais eficiente dos resíduos.

Além da caracterização, a quantificação da produção desses materiais, constitui um aspecto fundamental para o diagnóstico e o planejamento do gerenciamento dos RCC, sendo comumente expressa por meio da taxa de geração de resíduos (Zezhou Wu *et al.*, 2014). Ainda segundo os autores, essa taxa corresponde à relação entre a quantidade de resíduos gerados e um parâmetro de referência, como o tempo, a população ou a área construída. Quando expressa em unidades de massa por área construída, ou seja, quilograma por metro quadrado (kg/m^2), a taxa de geração de resíduos possibilita comparações e estimativas entre diferentes obras e

contextos, uma vez que independe do número de habitantes e das variações do momento econômico (Costa; Athayde Júnior; Oliveira, 2014).

O levantamento do montante desses resíduos, é uma diretriz para o estabelecimento de sistemas de gestão eficazes, tanto em nível de projeto quanto em escala regional (Yost; Halstead, 1996; Bergsdal *et al.*, 2007; Li; Zhang, 2013). Em seus estudos, Matos *et al.* (2011), descrevem que, para mensurar a quantidade de resíduos que serão gerados, pode-se utilizar dados, em forma de estimativas e percentuais, com base nas áreas construídas, contudo, tais estimativas dependem, das características e técnicas construtivas de cada empreendimento, uma vez que, a construção civil, é um processo artesanal e os valores da geração de resíduos podem apresentar muitas variações. Alguns autores têm considerado, a aplicação do *Building Information Modeling* (BIM), para esta função. Todavia, os resultados obtidos, apontaram que o emprego do BIM, possibilitou estimar com limitações, a quantidade e o custo de retirada dos RCC (Oliveira *et al.*, 2020).

A quantificação em nível de projeto, destacada nas pesquisas de McDonald e Smithers (1998) e Tam (2008), refere-se à estimativa da produção de RCD associada a uma obra específica, podendo auxiliar os gestores na adequação do cronograma de aquisição de materiais, na organização do armazenamento no canteiro de obras e na avaliação do potencial de reciclagem dos resíduos, bem como dos custos relacionados à sua destinação final. Por sua vez, a quantificação em nível regional, conforme apontam Lu e Tam (2013), diz respeito à estimativa da geração total de RCD proveniente do conjunto de obras de uma determinada região, fornecendo subsídios para a formulação de políticas públicas mais realistas, planejamento de novas instalações de tratamento de resíduos e a organização de recursos humanos e logísticos, como transporte e coleta.

Nesse contexto, Pinto (1999) considerou uma massa de 1.200 kg/m² para edificações finalizadas, executadas predominantemente por processos construtivos convencionais. O autor adotou ainda, uma perda média de materiais de 25% em relação à massa total transportada ao canteiro de obras, sendo que aproximadamente 50% dessas perdas correspondem a materiais removidos na forma de RCD. Com base nessas premissas, foi estimada uma taxa de geração de aproximadamente 150 kg/m² de área construída, esse valor corresponde à produção de cerca de 70 a 80 kg de RCD por metro quadrado de obra, sendo assim uma edificação de 100 m², construída por método tradicional, pode gerar cerca de 7,5 toneladas de RCD classe A.

No município de Ribeirão Preto (SP), Silva e Marques Neto (2021), avaliaram a geração de resíduos da construção civil em obras novas a partir da relação entre a área licenciada para construção e o volume de resíduos coletados, determinando uma taxa média de 183,28 kg/m²

de área construída. Os autores destacaram a aplicabilidade desse indicador para a quantificação e o planejamento da gestão de RCC em âmbito municipal.

Vieira *et al.* (2021) realizaram um levantamento em 25 canteiros de obras em Recife (PE), no qual foi identificada uma taxa média de geração de 93,49 kg/m² de resíduos da construção civil. Os autores observaram variações significativas entre as diferentes etapas da obra, destacando a fase de acabamento como a principal responsável pela geração de resíduos, o que também foi relatado, por Caetano, Selbach e Gomes (2016), segundo eles, devido à diversidade de materiais utilizados e à sua representatividade nas caçambas de descarte.

Na visão de Leite *et al.* (2011) e Angulo *et al.* (2013), o RCC possui grande variedade de materiais em sua composição, derivados de inúmeras atividades construtivas, que ocorrem paralelamente na execução de uma obra. Dessa maneira, nota-se que o tipo do resíduo, bem como, os volumes gerados apresentaram relação, com a fase executiva da obra, em que estes foram contabilizados (Marques Neto e Shalch, 2010).

De acordo com Souza *et al.* (2004), o acompanhamento e a avaliação, de cada fase do processo executivo da obra, constituem-se como o primeiro passo, para a implementação de ações, voltadas à redução da geração dos resíduos, em cada etapa do processo construtivo. Além da etapa de execução, os pesquisadores, sugerem que a quantidade de resíduos, também pode ser atribuída, a causas específicas, observadas no canteiro de obras, como problemas decorrentes do manejo dos materiais e insumos, desde a fase de recebimento, passando pela estocagem e processamento final.

Em relação à origem do RCC gerado no Brasil, Pinto e González (2005) e Bernardes *et al.* (2008) apontam que, em média, 59% desses resíduos são provenientes de reformas, ampliações e demolições, enquanto 41% referem-se a obras de novas edificações. Resultados semelhantes são apresentados por Carmo *et al.* (2012), que indicam que cerca de 64,1% do RCC é gerado em atividades de reforma, no entanto, obras novas e demolições contribuem com aproximadamente 18,2% e 7,1%, respectivamente.

Além da origem, a composição dos resíduos gerados, constitui um aspecto importante para o planejamento de ações de gerenciamento e reaproveitamento. Nesse sentido, Marques Neto (2005) destaca que argamassa, concreto e materiais cerâmicos representam, em conjunto, mais de 60% do total de RCC, fato associado às maiores perdas serem identificadas, nas etapas de concretagem, execução de alvenarias e aplicação de revestimentos cerâmicos.

Dentre esses materiais, os cerâmicos se destacam em razão de sua ampla utilização na construção civil. Segundo Rajat *et al.* (2022), esses produtos são empregados na maioria das edificações, incluindo revestimentos de paredes e pisos, sendo produzidos predominantemente

a partir de matérias-primas naturais ricas em minerais de argila. No entanto, os autores também ressaltam, que apesar de suas vantagens técnicas e estéticas, os resíduos cerâmicos estão associados a impactos ambientais relevantes, sobretudo quando não recebem destinação adequada.

Os revestimentos cerâmicos são produzidos a partir de matérias-primas como argila, feldspato, caulim e quartzo, submetidas a processos industriais que resultam em placas com diferentes características e aplicações (Riella, 2010; Oliveira; Hotza, 2015). Dentro dessa categoria de produtos, Soranzo *et al.* (2017) destacam o porcelanato como o material de melhor desempenho técnico, caracterizado por elevada densidade, baixa porosidade e reduzida absorção de água. Essas propriedades conferem ao porcelanato resistência mecânica, química e ao desgaste superficial (Dal Bó *et al.*, 2016).

Entretanto, o elevado desempenho desses materiais está diretamente relacionado a um alto consumo de recursos naturais. Conforme apontam Andreola *et al.* (2016), a indústria cerâmica tradicional demanda grandes volumes de matérias-primas extraídas do meio ambiente, o que, aliado ao aumento da produção, intensifica a geração de resíduos. Correia *et al.* (2009) ressaltam que esse setor, figura entre os maiores consumidores mundiais de matérias-primas naturais, reforçando a relação direta entre produção, consumo de recursos e geração de resíduos. Nesse contexto, Tarhan e Aydin (2016) destacam que a obtenção de matérias-primas e a destinação dos resíduos configuram-se como alguns dos principais desafios ambientais da indústria cerâmica.

Dessa forma, o aprofundamento nos resíduos cerâmicos, em especial no porcelanato, justifica-se não apenas por sua expressiva participação na composição do RCC, mas também pelos impactos ambientais associados à sua cadeia produtiva. Schalch *et al.* (2002) ressaltam que, quando os resíduos são gerenciados e destinados de maneira adequada, é possível promover melhorias em todas as etapas, resultando em impactos ambientais positivos. A gestão ambiental, por sua vez, configura-se como um processo contínuo de análise, planejamento e controle das atividades de desenvolvimento, tendo como principal objetivo a mitigação dos impactos ambientais negativos.

3.1.2 Legislação e normas técnicas brasileiras aplicadas aos resíduos da construção civil

No Brasil, a legislação relacionada aos RCD ainda é considerada incipiente quando comparada à de outros países. Segundo Schneider (2003), até o ano de 2002 não existiam leis e resoluções brasileiras específicas voltadas aos resíduos gerados pelo setor da construção civil.

No âmbito federal, a principal ação normativa foi a publicação da Resolução nº 307/2002 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), de 5 de julho de 2002, essa resolução estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Representou um marco regulatório ao atribuir responsabilidades aos geradores, transportadores e gestores públicos, além de impulsionar o setor de reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil (Karpinski *et al.*, 2009).

Ao longo dos anos, a Resolução CONAMA nº 307 passou por atualizações que alteraram a classificação de determinados materiais. A Resolução nº 348/2004 inseriu o amianto como material perigoso (Classe D), enquanto a Resolução nº 431/2011 modificou a classificação do gesso, que passou da Classe C para a Classe B. Posteriormente, a Resolução nº 469/2015 incluiu as embalagens vazias de tintas imobiliárias na Classe B, estabelecendo ainda sua inserção no sistema de logística reversa.

O Artigo 4º da Resolução CONAMA nº 307 determina que os resíduos da construção civil não devem ser dispostos em aterros de resíduos domiciliares, áreas de “bota-fora”, encostas, corpos d’água, lotes vagos ou áreas protegidas por lei. Para os resíduos classificados como Classe A, a norma estabelece que a disposição final adequada deve ocorrer em aterros de inertes, priorizando-se, sempre que possível, a reciclagem desses materiais.

Em 2010, a temática dos resíduos da construção civil foi incorporada à Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010. A PNRS estabelece princípios e diretrizes voltados à redução da geração de resíduos, ao incentivo à reutilização, à reciclagem e à destinação ambientalmente adequada dos resíduos sólidos, além de reforçar a necessidade de elaboração de planos de gestão por agentes públicos e privados. Mesquita *et al.* (2015) apontam que a efetividade dessas diretrizes, depende da articulação entre políticas públicas e instrumentos técnicos capazes de orientar sua aplicação prática no setor da construção civil.

Além dos instrumentos legais, a gestão dos resíduos sólidos no Brasil é orientada por normas técnicas elaboradas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), entidade responsável pela normalização técnica no país. Segundo Evangelista *et al.* (2010) as normas da ABNT são amplamente adotadas e frequentemente incorporadas ao ordenamento jurídico nacional, desempenhando papel fundamental na viabilização técnica de práticas sustentáveis no uso de resíduos como materiais alternativos na construção civil.

No que se refere à classificação dos resíduos sólidos, destaca-se a ABNT NBR 10004, que por mais de duas décadas, constitui o principal documento normativo sobre o tema no Brasil. A versão ABNT NBR 10004:2004 classificava os resíduos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, enquadrando-os em Classe I – perigosos e Classe

II – não perigosos, sendo estes subdivididos em Classe II A – não inertes e Classe II B – inertes (ABNT NBR 10004, 2004).

Em 2024, a norma passou por um processo de revisão que resultou em sua reorganização em duas partes: a ABNT NBR 10004-1:2024 e a ABNT NBR 10004-2:2024. A Parte 1 estabelece os requisitos, critérios e procedimentos para a classificação dos resíduos quanto à periculosidade, bem como as diretrizes gerais para a emissão do Laudo de Classificação do Resíduo. A Parte 2 reúne o Sistema Geral de Classificação de Resíduos (SGCR-10004), consolidando bases de dados, listas e informações técnicas que subsidiam o processo classificatório.

Entre as principais mudanças introduzidas pela versão atualizada, destaca-se a simplificação da classificação dos resíduos não perigosos, com a eliminação das subcategorias anteriormente atribuídas à Classe II. Dessa forma, os resíduos passam a ser classificados apenas como Classe I – perigosos ou Classe II – não perigosos. A norma também ampliou os critérios associados à toxicidade, passando a considerar explicitamente a presença de Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs).

Além da ABNT NBR 10004, outras normas técnicas brasileiras foram desenvolvidas com o objetivo de complementar as diretrizes legais aplicáveis aos resíduos da construção civil, abordando aspectos específicos relacionados às áreas de transbordo e triagem, aos aterros de resíduos da construção civil e à utilização de agregados reciclados. Essas normas integram o histórico normativo nacional aplicado aos resíduos da construção civil e são apresentadas no Quadro 1, com a indicação de seus respectivos escopos e atualizações.

Quadro 1 - Normas técnica relativas à reciclagem de RCD

(continua)

Norma ABNT	Título	Ano- última versão	Objetivo e Aplicação na Reciclagem de RCD
NBR 15112	Resíduos da construção civil e resíduos volumosos - Áreas de transbordo e triagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação	2004	Esta Norma fixa os requisitos exigíveis para projeto, implantação e operação de áreas de transbordo e triagem de resíduos da construção civil e resíduos volumosos
NBR 15113	Resíduos da construção civil e resíduos inertes – Aterros-Diretrizes para projeto, implantação e operação	2004	Esta Norma fixa os requisitos mínimos exigíveis para projeto, implantação e operação de aterros de resíduos sólidos da construção civil classe A e de resíduos inertes.

(conclusão)

Norma ABNT	Título	Ano- última versão	Objetivo e Aplicação na Reciclagem de RCD
NBR 15114	Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação	2004	Implantação e operação de áreas de reciclagem de resíduos sólidos da construção civil classe A. Produção de agregados com características para a aplicação em obras de infra-estrutura e edificações
NBR 15115	Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos	2004	Estabelece os critérios para execução de camadas de reforço do subleito, sub-base e base de pavimentos, bem como camada de revestimento primário, com agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil, denominado “agregado reciclado”, em obras de pavimentação.
NBR 15116	Essa versão foi cancelada e substituída pela NBR 15116:2021	2004	Concreto com RCD sem função estrutural
NBR 15116	Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil para uso em concreto – Requisitos e métodos de ensaio	2021	Norma revisada que permite o uso de Agregado Reciclado de Concreto (ARCO) em concretos com função estrutural (para classes de agressividade nível I e II), estabelecendo limites e ensaios técnicos específicos.

Fonte: Autora (2025).

De forma geral observa-se que a legislação brasileira, relacionada aos resíduos da construção civil, é composta por instrumentos legais e normas técnicas que se complementam. Enquanto as resoluções do CONAMA e a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) estabelecem as diretrizes legais e os princípios gerais para a gestão dos resíduos, as normas técnicas da ABNT fornecem os critérios e procedimentos necessários para a correta classificação, o gerenciamento e a destinação ambientalmente adequados desses materiais

A aplicação integrada desses instrumentos, é apontada por Souza *et al.* (2022), como fundamental para a consolidação de práticas sustentáveis no setor da construção civil e para a viabilização técnica do reaproveitamento de resíduos, especialmente no que se refere à sua utilização como materiais alternativos na produção de concretos e outros componentes construtivos.

3.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO CONVENCIONAL

Este capítulo apresenta uma abordagem geral sobre as propriedades do concreto convencional, contemplando os conceitos fundamentais do concreto de cimento Portland até os principais aspectos relacionados ao seu desempenho no estado fresco e no estado endurecido, as propriedades que influenciam a trabalhabilidade, a resistência mecânica e a durabilidade do material. Por fim, aborda-se a dosagem do concreto, destacando sua importância na definição das proporções dos materiais constituintes, de modo a assegurar o atendimento às normas técnicas, estabelecidas em projeto.

3.2.1 Concreto de cimento Portland

A história do concreto está diretamente associada à evolução de seu principal componente, o cimento, sendo considerada uma das descobertas mais relevantes no desenvolvimento da construção civil ao longo da história da humanidade (Helene; Andrade, 2010).

De acordo com Battagin (2011), os ligantes utilizados pelas civilizações antigas passaram por um processo contínuo de evolução até o desenvolvimento do cimento Portland como é conhecido atualmente. Registros históricos indicam o uso de materiais cimentícios rudimentares, como o gesso calcinado empregado nas construções egípcias e misturas à base de cal e cinzas vulcânicas utilizadas por gregos e romanos na execução de monumentos, pontes e aquedutos.

Para Mehta e Monteiro (1994), um marco importante na evolução dos materiais cimentícios foi a utilização das cinzas vulcânicas encontradas nas proximidades da cidade de Pozzuoli, na Itália, as quais, quando hidratadas, apresentavam propriedades aglomerantes. Em homenagem à região de origem, esse material passou a ser denominado “pozolana”, sendo amplamente empregado nas construções romanas.

Avanços importantes ocorreram a partir de 1756, com os estudos desenvolvidos por John Smeaton durante a construção do farol de Eddystone, na Inglaterra. O pesquisador identificou as propriedades hidráulicas da cal obtida pela calcinação de misturas de calcário e argila, contribuindo de forma decisiva para o desenvolvimento dos primeiros cimentos hidráulicos (Tartuce; Giovanetti, 1990). Posteriormente, em 1796, James Parker patenteou o denominado cimento romano, cujas propriedades foram aprofundadas e sistematizadas nos estudos realizados pelo engenheiro francês Louis Vicat, a partir de 1818 (Kaefer, 1998).

O cimento Portland, assim denominado por apresentar coloração e características semelhantes às rochas da ilha britânica de Portland, teve sua patente registrada em 1824 pelo construtor inglês Joseph Aspdin, representando um marco decisivo para a consolidação do concreto como material de construção amplamente utilizado (Battagin, 2017).

Atualmente, o concreto é o material construtivo de maior uso em todo o mundo, estando presente em praticamente todos os tipos de obras, como edificações residenciais e comerciais, barragens, pontes, além de obras de infraestrutura e saneamento (Pedroso, 2009). Segundo Helene e Andrade (2010), trata-se do material mais consumido no mundo depois da água, tendo revolucionado a forma de projetar e construir.

3.2.2 Propriedades do concreto

Segundo Petrucci (1998), o concreto é definido como um material resultante da mistura de um aglomerante, agregados e água, que, no estado fresco, apresenta plasticidade adequada para as operações de manuseio, transporte e lançamento, adquirindo coesão e resistência com o passar do tempo. Essa característica confere ao concreto grande versatilidade, tornando-o um dos materiais mais utilizados na construção civil.

De acordo com Neville (2015), o concreto é um material composto constituído por partículas de agregados envolvidas por uma matriz porosa de pasta de cimento, havendo entre essas fases uma zona de transição interfacial com características próprias, a qual exerce influência direta no desempenho do material. Essa interface entre a pasta cimentícia e o agregado é denominada zona de transição (ZT) e, segundo Mehta e Monteiro (2014), representa o elo mais fraco da microestrutura do concreto. Conforme Kaefer (1998), a zona de transição caracteriza-se por apresentar maior porosidade em relação ao restante da pasta de cimento, sendo sua espessura influenciada pelos constituintes da pasta e pelas características do agregado. De acordo com Castro (2008), essa região localiza-se na interface entre a superfície do agregado e a pasta de cimento e constitui um ponto de maior fragilidade da matriz, onde ocorre o denominado efeito parede, influenciando diretamente propriedades como a resistência mecânica e a durabilidade do concreto, sendo frequentemente a região crítica de ruptura quando o material é submetido a tensões.

Os concretos podem ser classificados conforme seu uso, constituição ou de acordo com as propriedades desejadas, estando essas diretamente relacionadas à relação água/cimento adotada no traço (Recena, 2017). Dentre essas classificações, destaca-se o concreto denominado convencional, amplamente empregado na construção civil, que utiliza técnicas e

equipamentos de uso consagrado, sendo dosado de modo a atender às exigências de trabalhabilidade e à resistência especificada em projeto (Neville, 2015).

O concreto convencional é composto, essencialmente, por cimento Portland, agregados gráúdo e miúdo, água e, quando necessário, aditivos destinados ao ajuste de suas propriedades físicas e químicas. Conforme Petrucci (1998), enquadram-se como concretos convencionais tanto aqueles destinados à descarga direta nas formas quanto os utilizados em operações de bombeamento, os quais apresentam maior teor de argamassa e, em geral, utilizam aditivos plastificantes para possibilitar sua aplicação.

As propriedades do concreto são definidas ainda na fase de produção, a partir da mistura dos seus constituintes, devendo apresentar viscosidade e fluidez adequadas para permitir sua correta execução (Sobral, 2000). A fluidez exerce influência direta na trabalhabilidade do concreto no estado fresco, enquanto a relação água/cimento constitui um dos principais fatores determinantes da resistência mecânica no estado endurecido (Helene; Andrade, 2007). Segundo Sobral (2000), o estudo e o controle das propriedades do concreto devem abranger tanto o estado fresco, relacionado às etapas de lançamento, adensamento e acabamento, quanto o estado endurecido, associado ao desempenho estrutural e à vida útil das construções.

Entre os fatores que influenciam as propriedades do concreto, destaca-se o tipo de cimento empregado. De acordo com Neville (2015), diferentes tipos de cimento apresentam comportamentos distintos quanto à hidratação e ao desenvolvimento de resistência ao longo do tempo, podendo resultar em endurecimento mais rápido ou em ganho de resistência de forma mais gradual, o que interfere diretamente no desempenho final do material.

Por fim, a cura do concreto, segundo Mehta e Monteiro (1994), é a última etapa do processo de produção e corresponde ao conjunto de procedimentos adotados, para promover a hidratação adequada do cimento, por meio do controle do tempo, da temperatura e da umidade, imediatamente após o lançamento do concreto nas formas. Nesse sentido, Neville (2015) destaca que práticas como a molhagem contínua da superfície exposta, a utilização de lonas plásticas e a proteção com tecidos úmidos contribuem para prevenir a perda excessiva de água durante esse período e evitar a ocorrência de fenômenos como a retração que é caracterizada pela redução volumétrica do concreto e a formação de fissuras.

3.2.3 Concreto no estado fresco

O concreto no estado fresco, corresponde à fase transitória compreendida entre a mistura de seus materiais constituintes e o início do processo de endurecimento, apesar de temporária,

essa etapa exerce influência decisiva sobre as propriedades do concreto no estado endurecido (Neville, 2015). Segundo o autor, para que o concreto atinja as propriedades esperadas após a cura, a mistura no estado fresco deve apresentar condições adequadas de manuseio, transporte, lançamento e adensamento, sem que ocorram alterações prejudiciais à sua homogeneidade, uma vez que falhas associadas ao concreto fresco, podem comprometer diretamente a resistência mecânica, a durabilidade e o desempenho estrutural do concreto.

O concreto fresco é constituído por agregados envolvidos por uma matriz formada pela pasta de cimento e pelos vazios preenchidos por ar e água. Essa matriz exerce papel fundamental na plasticidade da mistura e na possibilidade de rearranjo das partículas, influenciando tanto a trabalhabilidade quanto a homogeneidade do material (Sobral, 2000). Embora a relação água/cimento seja utilizada para caracterizar o desempenho do concreto endurecido, o autor destaca que no estado fresco, a consistência e a facilidade de execução durante a moldagem são determinadas principalmente, pelo teor de água sobre a mistura seca.

De acordo com Petrucci (2005), a principal propriedade do concreto no estado fresco é a trabalhabilidade, entendida como o conjunto de características que permite que a mistura seja transportada, lançada, adensada e acabada de forma adequada, sem perda de homogeneidade ou ocorrência de efeitos como segregação e exsudação. Mehta e Monteiro (1994) complementam que uma mistura que não possa ser devidamente lançada ou adensada, dificilmente apresentará o desempenho mecânico e a durabilidade esperados no estado endurecido.

A consistência do concreto no estado fresco está relacionada ao grau de fluidez da mistura e depende, principalmente, da quantidade de água e da composição da argamassa. Conforme Dal Molin e Tutikian (2022), a melhor trabalhabilidade ocorre quando a argamassa apresenta volume e consistência suficientes para envolver completamente os agregados, reduzindo o atrito interno e favorecendo o adensamento. Nesse contexto, Kim *et al.* (2013) ressaltam que as características físicas dos agregados, como forma, textura superficial e granulometria, bem como a espessura da camada de pasta de cimento, exercem influência sobre a fluidez e a coesão do concreto. Segundo Mehta e Monteiro (1994) e Guimarães (2005), a coesão garante que a massa do concreto permaneça homogênea durante o transporte e o lançamento, sendo a segregação frequentemente associada ao excesso de agregados graúdos ou à deficiência de partículas finas na mistura.

A exsudação, é outro fenômeno que pode vir a ocorrer no estado fresco e consiste na migração da água para a superfície do concreto após o lançamento, esse processo está relacionado às características dos materiais constituintes, especialmente à capacidade da

mistura em reter a água (Petrucchi,1998). O autor destaca, que quando excessiva, a exsudação pode tornar a superfície do concreto mais porosa e menos resistente, favorecendo processos de desintegração superficial. Neville (2015) complementa que a exsudação, pode comprometer a aderência entre a pasta de cimento e os agregados, bem como entre o concreto e as armaduras, sendo sua intensidade fortemente influenciada pelas propriedades do cimento. Cimentos mais finos tendem a hidratar-se mais rapidamente, reduzindo a sedimentação das partículas e, conseqüentemente, a ocorrência desse fenômeno (Sobral, 2000).

Para contornar tais limitações e garantir a coesão interna do material, Neville e Brooks (2013) ressaltam que o uso de aditivos, contribui para o controle das propriedades do concreto fresco e sua utilização visa modificar características específicas da mistura, como a trabalhabilidade e a retenção de água, podendo compensar limitações dos materiais constituintes. Aditivos plastificantes e redutores de água, bem como os superplastificantes, permitem o aumento da fluidez sem acréscimo significativo de água, garantindo a manutenção da relação água /cimento (Aïtcin, 2000).

A verificação da eficácia das modificações introduzidas na dosagem e da conformidade da mistura é realizada por meio do controle experimental das propriedades do concreto no estado fresco. Nesse contexto, a consistência é usualmente avaliada conforme a norma ABNT NBR 16889 (2020), por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone (Slump Test), aplicável tanto em laboratório quanto em condições de obra. Do mesmo modo, a exsudação pode ser analisada de acordo com os procedimentos estabelecidos na norma ABNT NBR 15558 (2008), que define métodos específicos em função do grau de vibração ao qual a amostra é submetida. O controle criterioso dessas propriedades é fundamental para garantir a qualidade do concreto durante a fase de execução, refletindo diretamente no desempenho mecânico e na durabilidade da estrutura no estado endurecido (Mehta; Monteiro, 1994; Neville, 2015; Sobral, 2000).

3.2.4 Concreto no estado endurecido

Na sequência da análise das propriedades do concreto, aborda-se o comportamento do material após o processo de endurecimento. Conforme estabelecido pela ABNT NBR 12655 (2022), o concreto no estado endurecido é aquele que se encontra em condição sólida e que já desenvolveu resistência mecânica, sendo essa fase determinante para o desempenho estrutural e a durabilidade das estruturas. Nesse contexto, resistência de um material pode ser definida

como a capacidade de resistir à aplicação de tensões sem que ocorra a ruptura (Mehta; Monteiro, 1994).

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), as principais propriedades do concreto endurecido compreendem a resistência à compressão e à tração, as deformações e a durabilidade. Araújo; Rodrigues e Freitas (2010) complementam que, além dessas propriedades, o concreto deve apresentar adequada impermeabilidade e correta aplicação da relação água/cimento, fatores que regem o comportamento mecânico e a vida útil das construções.

Segundo Neville (2015) e Petrucci (2005), a resistência à compressão axial é considerada a propriedade fundamental do concreto, pois fornece uma indicação geral da sua qualidade e permite estimar outras características mecânicas, como as resistências à tração, à flexão e o módulo de deformação. Além da compressão, principal parâmetro na avaliação do estado endurecido, Mehta e Monteiro (1994), apontam a resistência à tração como uma propriedade complementar, necessária para compreender o desempenho estrutural do material em relação à capacidade de resistir aos esforços de alongamento, sendo definida como a tensão necessária, para provocar a ruptura de um corpo de prova por estiramento. Embora o concreto não seja dimensionado para absorver tais solicitações diretamente, Neville (2015) destaca que sua determinação é fundamental para prever o início da fissuração, pois o controle desse fenômeno previne a entrada de agentes agressivos que podem desencadear processos de deteriorização como a corrosão das armaduras. Nesse contexto, a ABNT NBR 7222 (2011) estabelece o método de determinação da resistência à tração por compressão diametral, cujo valor é obtido a partir da Equação 1.

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi dl} \quad (1)$$

Onde:

- $f_{ct, sp}$ é a resistência à tração por compressão diametral, expressa em megapascals (MPa);
- F é a força máxima obtida no ensaio, expressa em newtons (N);
- d é o diâmetro do corpo de prova, expresso em milímetros (mm);
- l é o comprimento do corpo de prova, expresso em milímetros (mm).

Diversos fatores influenciam a resistência mecânica do concreto, como a granulometria dos agregados, o tipo de cimento empregado e a relação água/cimento (Giongo; Jacintho, 2007).

Associada a esses aspectos, a porosidade do concreto, exerce papel relevante, uma vez que elevados teores de vazios tendem a comprometer negativamente a resistência mecânica e a durabilidade do material (Araújo; Rodrigues; Freitas, 2010). O tipo de cimento utilizado também interfere nas propriedades do concreto endurecido, atuando tanto na evolução da resistência ao longo do tempo quanto os valores finais obtidos, em função de suas características físicas e químicas (Neville, 2015).

A resistência à compressão do concreto é determinada por meio de ensaios laboratoriais normatizados, realizados em corpos de prova, geralmente cilíndricos ou prismáticos, o procedimento envolve desde a moldagem até a cura. No caso dos corpos de prova cilíndricos, estes devem apresentar altura igual ao dobro do diâmetro, enquanto os prismáticos devem possuir seção transversal quadrada e faces lisas. As normas que regem esses procedimentos são a ABNT NBR 5738 (2015), que trata da moldagem e cura de corpos de prova de concreto, e a ABNT NBR 5739 (2018), que estabelece o método de ensaio de compressão em corpos de prova cilíndricos.

Estudos desenvolvidos nas últimas décadas indicam que a durabilidade das estruturas de concreto armado está diretamente relacionada à entrada de água e ao transporte de agentes agressivos nela dissolvidos, os quais podem desencadear processos de degradação ao longo do tempo (Fung; Wong; Kwan, 2012). Nesse contexto, o conceito de durabilidade associa-se aos mecanismos de transporte desses agentes em materiais porosos, destacando-se a capilaridade, a difusão, a migração iônica e a permeabilidade (Helene, 2005).

De acordo com Helene e Andrade (2010), a relação água/cimento e o grau de hidratação do cimento constituem os principais parâmetros que regem as propriedades de absorção capilar da água no concreto, influenciando diretamente sua porosidade e, conseqüentemente, sua durabilidade. A avaliação dessa propriedade pode ser realizada por meio do ensaio de absorção de água por ascensão capilar, estabelecido pela ABNT NBR 9779 (2012), que permite determinar a capacidade de absorção do concreto endurecido em função de sua estrutura porosa.

O coeficiente de absorção por capilaridade permite quantificar o transporte de água no concreto e constitui um importante indicador do seu desempenho frente aos processos de degradação, uma vez que menores taxas de absorção estão associadas a estruturas mais resistentes à ação de agentes agressivos (McCarter; Alaswad; Suryanto, 2018).

De modo geral, as propriedades do concreto no estado endurecido resultam da interação entre a composição da mistura, as condições de execução e os processos físico-químicos associados à hidratação do cimento. Conforme destacam Scrivener; Snellings e Lothenbach (2016), o desempenho mecânico e a durabilidade do concreto estão diretamente relacionados à

formação de sua microestrutura, a qual controla a porosidade, os mecanismos de transporte e a resistência do material. Nesse contexto, parâmetros como a relação água/cimento, o grau de adensamento e a qualidade da cura exercem influência decisiva sobre o comportamento do concreto ao longo de sua vida útil.

3.2.5 Dosagem de concreto

A dosagem do concreto constitui uma etapa essencial para a obtenção de um material que atenda simultaneamente às exigências de trabalhabilidade no estado fresco e de desempenho mecânico e durabilidade no estado endurecido. A adequada proporção entre os materiais constituintes: cimento, água, agregados e aditivos, aliada ao controle das variáveis de produção e execução, permite minimizar a variabilidade do concreto e assegurar que suas propriedades estejam em conformidade com os requisitos de projeto (Helene; Terzian, 2001).

Entende-se por estudo de dosagem dos concretos de cimento Portland o conjunto de procedimentos necessários para a determinação da melhor proporção entre os materiais constitutivos do concreto, também denominada traço (Helene; Tutikian, 2011). De acordo com os autores, essa proporção pode ser expressa em massa ou em volume, sendo a dosagem em massa seca considerada mais rigorosa e tecnicamente adequada.

Conforme destacam Mehta e Monteiro (1994), embora o estudo de dosagem esteja fundamentado em princípios científicos e tecnológicos, ele envolve inevitavelmente uma etapa experimental, realizada em laboratório ou em campo. Essa característica leva alguns profissionais a considerarem a dosagem do concreto não apenas como uma ciência, mas também como uma prática empírica baseada na experiência técnica.

Dentre os métodos de dosagem disponíveis, destaca-se o método proposto inicialmente por Eládio Petrucci em 1965 e posteriormente adaptado por pesquisadores do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) e da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). Segundo Helene (2005), esse método apresenta-se como um dos mais versáteis e simples, atendendo simultaneamente às exigências técnicas dos projetistas estruturais e às demandas econômicas, de sustentabilidade e de produtividade na execução de concretos.

O método de dosagem IPT/EPUSP, apresentado por Helene e Terzian (1992), tem como premissa fundamental a consistência do concreto no estado fresco, a qual depende da forma e da composição granulométrica dos agregados graúdos e miúdos, bem como da consistência da argamassa, diretamente relacionada à quantidade de água em relação ao teor de cimento.

O procedimento tem início a partir de um traço base de 1:5 (cimento/agregado seco total, em massa), a partir do qual são obtidas as informações necessárias relativas ao teor de argamassa e de água. Com esses dados, são definidos dois traços complementares: um mais rico em cimento, correspondente ao traço 1:3, e outro mais pobre, correspondente ao traço 1:6,5, cujos resultados são utilizados na construção do diagrama de dosagem (Helene; Terzian, 1992).

Segundo Bucher (1984), os parâmetros de resistência mecânica e de durabilidade adotados na dosagem devem considerar a variabilidade das características dos materiais, bem como o modo de execução, a eficiência dos equipamentos e as condições operacionais durante a produção e o lançamento do concreto. Dessa forma, busca-se garantir que a qualidade final do material seja compatível com as solicitações previstas no cálculo estrutural. Nesse contexto, métodos de dosagem consolidados, como o IPT/EPUSP, oferecem uma abordagem racional e tecnicamente fundamentada, integrando critérios experimentais e práticos para o controle da qualidade do concreto.

3.3 USO DO RCD EM CONCRETO CONVENCIONAL

A versatilidade do uso do concreto, proporcionou o seu emprego em obras de construção civil, entretanto, uma grande quantidade de recursos não renováveis, é utilizada pela indústria da construção, para sua produção. Nunes e Mahler (2020) relatam que além do elevado consumo energético, associado às atividades de extração, o beneficiamento e o transporte de matérias-primas, contribuem para a degradação ambiental. Soma-se a esse cenário a expressiva geração de RCD, um dos principais impactos ambientais associados à atividade construtiva.

Jadovski (2008) aponta que diversos fatores contribuem para a geração de RCD durante a etapa de construção, entre eles a baixa qualidade dos materiais empregados, a utilização de mão de obra não qualificada, a ausência de procedimentos adequados de controle na execução e inspeção das etapas construtivas, bem como a insuficiência de detalhamento nos projetos. O retrabalho, decorrente de alterações projetuais e sequenciamento inadequado das atividades, contribui para a intensificação dos desperdícios na construção civil (Pinho, 2013; Santos e Santos, 2017).

De acordo com relatório da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2022), o Brasil produziu aproximadamente 48 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição em 2021, sendo que cerca de 30% do total de resíduos sólidos gerados no país são oriundos da construção civil. Desses resíduos, apenas cerca de 16% foram reciclados, conforme dados da Associação Brasileira para Reciclagem de

Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABECON, 2020), evidenciando a necessidade de ampliação de práticas de reaproveitamento.

Nesse contexto, Brito Filho (1999) destaca que os materiais descartados pela indústria da construção civil podem ser considerados verdadeiras jazidas de matéria-prima secundária, passíveis de reaproveitamento. Segundo o autor, o RCD apresenta amplo potencial de aplicação em concretos, argamassas, blocos e artefatos de concreto, sistemas de drenagem, pavimentação, bases e sub-bases de vias, muros e elementos pré-moldados, entre outros usos. A incorporação de agregados reciclados na produção de novos concretos surge, assim, como uma alternativa sustentável, capaz de reduzir o consumo de recursos naturais e a demanda energética associada à produção de materiais convencionais (Nagataki *et al.*, 2004).

No Brasil, pesquisas iniciais com RCD foram realizadas por Pinto (1986), Levy (1997), Bodi (1997) e Zordan (1997). Estudos sobre a variabilidade dos agregados, foram desenvolvidos por Angulo (2000), em confecção de pré-moldados Buttler, (2003) e Sousa (2001), em concretos (Angulo, 2005; Cabral, 2007; Ferreira, 2007; Leite, 2001). Esses estudos evidenciam que o RCD apresenta características particulares, as quais variam em função do local de geração, da tecnologia construtiva adotada e da qualidade da mão de obra empregada (Oliveira, 2008).

Segundo Mehta e Monteiro (1994), as principais características dos agregados a serem consideradas na composição do concreto incluem a granulometria, a forma e textura superficial, a porosidade, a absorção de água e a presença de substâncias potencialmente nocivas. Troian (2010) destaca que a elevada porosidade dos agregados reciclados influencia diretamente sua absorção de água, podendo alterar a demanda hídrica da mistura e comprometer, sobretudo, o desempenho do concreto no estado fresco, aspecto fundamental para a durabilidade do material.

Neste contexto, a elevada absorção de água dos agregados reciclados torna os concretos convencionais menos fluidos, interferindo nas propriedades do estado fresco, dessa forma, torna-se necessário compensar essa absorção durante a dosagem ou realizar a pré-molhagem dos agregados (Poon; Chan, 2006). De acordo com Stroher *et al.* (2017) e Angulo e Figueiredo (2011), os resíduos cerâmicos apresentam maior porosidade em comparação a outros constituintes do concreto, promovendo aumento da absorção de água e, conseqüentemente, da relação água/cimento.

A composição do RCD é bastante heterogênea, sendo constituída por resíduos de concreto, tijolos, telhas, revestimentos cerâmicos, argamassas, blocos, pedra britada, vidro e metais, entre outros materiais (Angulo; John, 2003). Buttler *et al.* (2006) ressaltam que os resíduos de concreto gerados em fábricas de pré-moldados apresentam elevado potencial de

reciclagem, em virtude de sua maior homogeneidade quando comparados aos resíduos oriundos de demolições. Estudos conduzidos por Troian (2010), Werle (2010), De Brito (2009) e Kou e Poon (2010) indicam que concretos produzidos com agregados reciclados de concreto tendem a apresentar menor trabalhabilidade, em função da maior absorção de água desses materiais.

Conforme Tam *et al.* (2018), as características do concreto, tanto no estado fresco quanto endurecido, podem ser impactadas pela forma e aparência dos agregados, pois à medida que a superfície do agregado se torna mais angular e rugosa, a conexão entre a argamassa aderida e os agregados se torna mais forte, por outro lado acaba tornando o concreto menos trabalhável. Fonseca (2002) observa que o formato final dos agregados reciclados pode variar de acordo com o tipo de material presente no RCD e com o equipamento de britagem utilizado, resultando em partículas mais irregulares e na necessidade de maior volume de pasta de cimento.

De forma geral, a incorporação de resíduos de construção e demolição como agregados em concreto convencional apresenta potencial para a redução dos impactos ambientais associados à construção civil (Brasileiro; Mattos, 2015). Contudo, as particularidades dos agregados reciclados, como porosidade elevada, maior absorção de água e variabilidade de composição, influenciam o comportamento do concreto e demandam avaliação técnica criteriosa.

3.4 CONCRETOS COM RCD

Pesquisas foram realizadas por Vieira e Dal Molin (2004), com o intuito de avaliar a viabilidade técnica e econômica da utilização de agregados reciclados em concreto. Nos ensaios foram comparados concretos com agregados naturais e reciclados em substituições de 0%, 50% e 100% de agregados graúdos e miúdos, apresentados em cinco composições. Os resultados apurados, indicaram uma melhora na resistência à compressão, na atuação conjunta dos concretos com 50% agregados reciclados graúdos e 100% de substituição de agregado miúdo reciclado, resultando em um aumento de 56% da resistência em relação ao concreto de referência. No entanto, Kou e Poon (2012), relataram perda de resistência à compressão, com substituições similares por agregados reciclados de concreto (0%, 20%, 50%, 100%), essa diminuição foi observada com o aumento do teor de agregado reciclado, sendo a substituição de 20% com resultados mais próximos ao concreto de referência.

A perda de resistência é apontada pelos estudos de Thomas *et al.* (2013), como pouco significativa, quando o teor de substituição seja em menor proporção, porém à medida que os

percentuais de agregado reciclado, forem sendo aumentados, a resistência à compressão tende a diminuir.

O desempenho mecânico, avaliado por meio da resistência à compressão aos 28 dias de misturas de concreto com agregado reciclado nos percentuais de 0%, 25%, 50% e 75%, foi investigado por Alexandridou *et al.* (2017). Os resultados indicaram que houve uma redução de 37% na resistência do material com o teor máximo de substituição.

Adessina *et al.* (2019), estudaram as propriedades da durabilidade do concreto com percentuais de 20%, 40%, 60%, 80% e 100% de substituições de agregado gráúdo natural, por agregado gráúdo reciclado. Os pesquisadores relataram uma diminuição gradual da resistência do concreto à medida que aumentava a taxa de substituição, comparado ao concreto com agregados gráúdo e miúdo naturais. As amostras com menor substituição (20%), não apresentaram variações significativas, quando ensaiadas a resistência à compressão.

Resultados similares foram encontrados por Bidabadi; Akabari e Panahi (2020), com substituições de 15%, 30%, 70% e 100%, de agregado gráúdo natural por agregado gráúdo reciclado.

A utilização de agregados miúdos reciclados na proporção de 10%, 20%, 30%, 50% e 100%, nas pesquisas de Evangelista e Brito (2007), mostraram que até 30% de substituição, não afetaram as propriedades mecânicas do concreto.

A taxa de substituição de agregados naturais por reciclados varia de 0% a 100% para identificar a configuração ideal dos materiais, dependendo diretamente das condições e da finalidade do projeto de engenharia (Abera, 2022). A partir de resíduos obtidos em usinas de reciclagem, Abera (2022) analisou os efeitos dessa variação e constatou que a substituição de até 35% dos agregados convencionais promove uma diminuição mínima inferior a 30% na resistência à compressão do concreto aos 28 dias de cura, quando comparada ao traço de referência.

A combinação de RCD com materiais sintéticos alternativos também tem sido pesquisada, tais como borracha de pneus usados e garrafas PET. Esses materiais podem ser utilizados em substituição a materiais granulares naturais (Brasileiro e Mattos, 2015).

Resíduos poliméricos de equipamentos eletrônicos foram incorporados em concretos por Nwaubani e Parsons, (2021), resíduos de vidro por Wang *et al.* (2010) e Castro (2013), Pakdel *et al.* (2021), realizou estudos utilizando fibra de carbono. Agregados de borracha triturada foram pesquisados na resistência do concreto (Farhad, 2016), Borges *et al.* (2018), desenvolveram estudos, adicionando fibras de PET em concretos. Materiais de origem vegetal, como casca de coco foi pesquisado por Janani *et al.* (2022), como substituição parcial de

agregados em concretos, Cecconello (2013), avaliou o comportamento do concreto em relação a retração, incorporando cinzas de casca de arroz, Akbulut e Gurer (2007), utilizaram agregado proveniente de resíduo de mármore, para a produção de concreto asfáltico.

3.5 CONCRETOS COM RCD DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS

A cerâmica é considerada um dos materiais artificiais mais antigos produzidos pelo ser humano. Derivado do termo grego *kéramos*, que significa “terra queimada” ou “argila queimada”, esse material apresenta elevada durabilidade, sendo frequentemente identificado em escavações arqueológicas (Makowiecky, 2018). A formação das argilas, matéria-prima essencial da cerâmica, resulta de processos físicos e químicos ocorridos ao longo de milhões de anos, envolvendo a ação da água, do vento e de variações climáticas desde a formação do planeta (Press *et al.*, 2006).

A produção cerâmica esteve historicamente associada ao desenvolvimento cultural das civilizações, inicialmente vinculada a rituais religiosos e, posteriormente, à confecção de utensílios destinados ao armazenamento e preparo de alimentos (Penido; Costa, 1999). Segundo Resende (1998), a cerâmica surgiu no período neolítico, por volta de 8.000 a.C., a partir da manipulação da argila. Como material característico de determinados territórios, contribuiu para a formação de centros urbanos e passou a representar elementos culturais locais (Aparo, 2010).

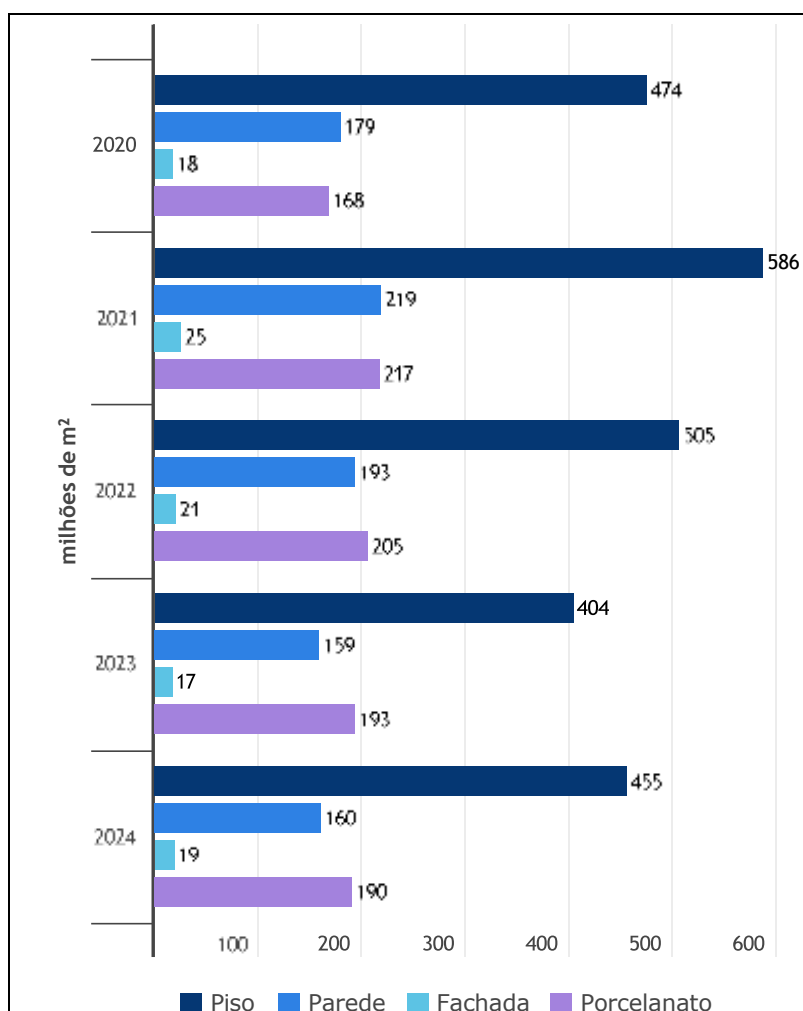
No Brasil, os primeiros registros do uso da cerâmica remontam à Ilha de Marajó, na região amazônica, com evidências arqueológicas datadas de aproximadamente cinco mil anos (Brancati, 1981). No que se refere aos revestimentos cerâmicos, o termo “azulejo” tem origem árabe, derivado de *al zulaycha*, que significa “pedra polida”. A técnica foi difundida na Europa pelos árabes, com forte adoção em Portugal a partir do século XVI, influenciando diretamente o uso desse material no Brasil durante o período colonial (Brancati, 1981).

De acordo com a Associação Brasileira de Cerâmica (ABCERAM, 2017), o uso do azulejo no Brasil tornou-se mais frequente a partir do século XIX, inicialmente com peças importadas de Lisboa, em forma de painéis e aplicadas sobretudo como elementos decorativos. As primeiras indústrias nacionais de revestimentos cerâmicos foram instaladas entre os anos de 1900 e 1940, marcando o início da produção em escala industrial no país.

Atualmente, o Brasil ocupa posição de destaque no cenário mundial da indústria de revestimentos cerâmicos, segundo a Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica (ANFACER), figurando como o terceiro maior produtor e consumidor global, além de ocupar

a sexta posição no ranking de exportações, com presença em mais de 110 países. (ANFACER, 2024) Conforme dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o setor representa aproximadamente 6% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro, com valor estimado em R\$ 359,5 bilhões em 2024 (IBGE, 2024). Nesse mesmo ano, a produção nacional alcançou cerca de 825 milhões de m² de revestimentos cerâmicos, dos quais 727 milhões de m² foram destinados ao mercado interno e 85,9 milhões de m² à exportação (ANFACER, 2024). Os tipos de produtos, bem como as quantidades fabricadas no período de 2020 a 2024, são demonstradas na Figura 1.

Figura 1 - Produção Brasileira de revestimentos cerâmicos entre 2020 e 2024.



Fonte: ANFACER (2024)

As propriedades dos revestimentos cerâmicos estão diretamente associadas à sua composição química e à microestrutura desenvolvida ao longo do processo de queima. Nesse contexto, Hotza e Oliveira (2015) destacam que avanços tecnológicos têm sido aplicados na

formulação e reformulação das massas cerâmicas, com o objetivo de obter propriedades específicas, aumentar a produtividade e melhorar a qualidade final dos produtos. De forma complementar, Ghisellini *et al.* (2018) ressaltam que a indústria de revestimentos cerâmicos vem revisando seus processos produtivos com foco na redução de emissões e da geração de resíduos, em razão das legislações ambientais e pela crescente demanda por uso mais eficiente dos recursos minerais e energéticos.

Os revestimentos cerâmicos são produzidos a partir da queima de matérias-primas como argilas, feldspato, quartzo, calcita, dolomita, caulim e bentonita. Os esmaltes aplicados às placas cerâmicas têm como principal componente as fritas, responsáveis pelo aspecto vítreo após a queima, sendo o quartzo e o zircônio comumente empregados em sua composição (Duran *et al.*, 2002; Özkan *et al.*, 2010). As temperaturas de queima variam conforme o tipo de produto, em torno de 1180 °C para pisos cerâmicos e aproximadamente 1080 °C para revestimentos de parede (Sacmi, 2005).

Segundo a Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica (ANFACER, 2016), as placas cerâmicas são classificadas conforme normas técnicas vigentes em função da absorção de água, parâmetro diretamente relacionado à porosidade e ao grau de densificação do material. De modo geral, quanto menor a absorção de água, menor a porosidade e maior a densificação, características que influenciam diretamente o desempenho do material, quando destinado ao reaproveitamento como resíduo em matrizes cimentícias.

As diretrizes técnicas das placas cerâmicas, bem como seus respectivos limites de absorção de água, encontram-se na norma ABNT NBR ISO 13006:2020 que estabelece os parâmetros para a definição, classificação e caracterização das placas cerâmicas, utilizadas como revestimentos de pisos e paredes. A norma define placa cerâmica como um elemento de revestimento produzido a partir de matérias-primas inorgânicas, conformado geralmente por extrusão (grupo A) ou prensagem (grupo B). Após a conformação, o material é submetido à secagem e posterior queima, promovendo transformações físico-químicas responsáveis pelo desenvolvimento das propriedades requeridas, tais como resistência mecânica, estabilidade dimensional e desempenho estético. A classificação normativa é apresentada no Quadro 2.

Quadro 2 - Classificação das placas cerâmicas quanto à absorção de água e conformação.

Conformação	Grupo I ($E_v \leq 3\%$)	Grupo IIa ($3\% < E_v \leq 6\%$)	Grupo IIb ($6\% < E_v \leq 10\%$)	Grupo III III ($E_v > 10\%$)
A Extrudada	Grupo AI _a $E_v \leq 0,5\%$ (ver Anexo M)	Grupo AII _{a-1} ^a (ver Anexo B)	Grupo AII _{b-1} ^a (ver Anexo D)	Grupo AIII (ver Anexo F)
	Grupo AI _b $0,5 < E_v \leq 3\%$ (ver Anexo A)	Grupo AII _{a-2} ^a (ver Anexo C)	Grupo AII _{b-2} ^a (ver Anexo E)	
B Prensada a seco	Grupo BI _a $E_v \leq 0,5\%$ (ver Anexo G)	Grupo BII _a (ver Anexo J)	Grupo BII _b (ver Anexo K)	Grupo BIII ^b (ver Anexo L)
	Grupo BI _b $0,5 < E_v \leq 3\%$ (ver Anexo H)			

a Grupos AII_a e AII_b são divididos em dois subgrupos (Partes 1 e 2) com diferentes especificações de produto.

b Grupo BIII engloba apenas placas esmaltadas. Existe uma baixa quantidade de placas não esmaltadas prensadas a seco com absorção de água superior a 10%.

Fonte: Adaptado ABNT NBR ISO 13006 (2020).

Existem placas cerâmicas, produzidas com materiais de elevado desempenho técnico, que são chamadas de porcelanato. No contexto dessa classificação, o porcelanato é definido como uma placa cerâmica totalmente vitrificada, caracterizada por um coeficiente de absorção de água igual ou inferior a 0,5% em massa (ABNT NBR ISO 13006, 2020). Essa baixa porosidade o enquadra nos grupos AI_a (extrudado) e BI_a (prensado), conferindo ao material elevada impermeabilidade, resistência a solicitações mecânicas e maior durabilidade frente a agentes químicos e intempéries.

Oliveira e Hotza (2015), apontam o porcelanato como um produto de qualidade superior, comparado a tradicional cerâmica grés, em razão da utilização de matérias primas selecionadas e procedimentos de fabricação apurados, conferindo elevadas propriedades mecânicas, resistência à abrasão, ao congelamento, ao ataque químico e resistência à compressão.

Conforme Torgal e Jalali (2009), os resíduos cerâmicos podem ser separados em duas categorias de acordo com a origem das matérias-primas. A primeira são todos os resíduos queimados gerados pelas fábricas de cerâmica estrutural, para fabricar seus produtos, como tijolos, blocos e telhas. O segundo são todos os resíduos queimados produzidos em indústrias de revestimentos, pisos e louças sanitárias.

Na indústria de revestimentos cerâmicos, parte das perdas na fabricação ocorre devido ao fato, de as peças estarem fora de padrão ou do padrão estabelecido pelas normas técnicas.

(Bektas *et al.*, 2009). Caso já tenham passado pela etapa de queima, não poderão retornar ao processo produtivo como resíduo. No âmbito do setor da construção civil, conforme destacam Barbisan *et al.* (2011), algumas ações podem ser empregadas para a mitigação do impacto gerado pelos resíduos nos canteiros de obras, tais como a correta manipulação e estocagem de materiais, a diminuição de desperdícios e a qualificação da mão de obra.

A Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC, 2022), destaca como um dos grandes desafios da construção civil no Brasil, o de superar o desperdício de materiais, durante a execução de obras civis. O gasto de materiais é um problema, tanto na própria edificação, quanto no entulho produzido por ela, tendo como consequência, não somente os impactos, que geram despesas no orçamento das construções, mas acabam também atingindo diretamente o meio ambiente.

A adoção de um modelo sustentável para a construção civil passa, pela inovação e pela implementação de tecnologias que minimizem os impactos ambientais.

O uso de produtos industriais residuais na fabricação de concreto, especialmente como matérias-primas, é uma das maneiras mais eficientes de utilizar esses resíduos inorgânicos (Ramesh *et al.*, 2020). Conforme Schneider *et al.* (2011); M. Haque *et al.* (2021), o agregado ocupa uma fração significativa no concreto, exercendo grande influência à compressão, bem como em outras propriedades. O agregado cerâmico, é resistente à abrasão, ao calor, resistência ao desgaste e possui baixa expansão térmica (Halicka *et al.*, 2013).

Os resíduos cerâmicos, principalmente os resíduos de porcelanato, surgiram como um recurso promissor para a produção de concreto (Gritsada e Sittisak, 2023). Segundo os autores, os resíduos de porcelanato têm mostrado resultados promissores no aumento das resistências à flexão, tração e compressão do concreto, com incorporação de até 25% de resíduo. Pesquisas anteriores, feitas por Keshavarz e Mostofinejad, (2019), demonstraram um aumento na resistência à compressão de até 41%, através da substituição completa do agregado graúdo tradicional por resíduos de porcelanato.

Gritsada e Sittisak (2023), realizaram o experimento, utilizando agregados graúdos, derivados de resíduos de piso porcelanato, coletados em um único local, para garantir a uniformidade dos resíduos, eliminando quaisquer outros detritos inertes de construção, aderidos aos ladrilhos. Os pisos foram quebrados, usando um britador e posteriormente peneirados para obtenção de fragmentos de agregados graúdos, com tamanhos variando de 5 a 12,5mm, conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2 - (a) triturador de pedra portátil e (b) agregado de porcelanato.



Fonte: Gritsada e Sittisak (2023).

As proporções de substituição do agregado gráúdo natural, por agregado gráúdo de porcelanato foram de 25%,50%,75% e100% em volume.

Os autores, após os ensaios, observaram que a resistência à compressão das misturas, diminuiu gradualmente à medida que a taxa de substituição do agregado de porcelanato aumentou. Os mesmos índices foram observados, com relação a resistência à flexão e o módulo de elasticidade. A absorção de água de todas as misturas, quando o agregado gráúdo natural, foi substituído por agregado reciclado, permaneceu abaixo de 10%. Os agregados reciclados foram pré-molhados em todos os ensaios.

Derrick; Scott e Francis (2016), propuseram um esquema de substituição de agregados gráúdos em concreto, com materiais de ladrilhos cerâmicos, em proporções de substituição de 20%, 35%, 50%, 65%, 80% e 100%, em massa e a relação água/cimento foi constante de 0,55 para todas as misturas. Os resultados apresentaram alterações mínimas nas propriedades mecânicas com a substituição de agregados gráúdos naturais, por agregados de revestimentos cerâmicos.

Os resíduos utilizados nos ensaios, tiveram a mesma característica do estudo feito por Gritsada e Sittisak (2023), foram revestimentos provenientes de resíduos rejeitados pela indústria e de obras que não haviam sido utilizados, sem argamassa ou rejunte aderidos, para reduzir variáveis que possam interferir nos resultados. Os materiais foram britados e resultaram fragmentos de 5 a 20mm, mais angulares que os agregados naturais, porém com dimensões próximas, como mostra a Figura 3.

Figura 3 - Agregado graúdo natural e agregado graúdo de revestimentos cerâmicos.



Fonte: Derrick; Scott; Francis (2016)

Rajat; *et al.* (2022), fizeram experimentos com ladrilhos cerâmicos que foram usados, como agregado graúdo no concreto, em substituição aos agregados naturais, nos percentuais de 0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25% em massa. Os agregados, estavam livres de resíduos de obra aderidos, conforme a Figura 4. A partir dos resultados, foi observado que os resíduos cerâmicos melhoram o desempenho do concreto, até o nível de substituição de 20%.

Figura 4 - Resíduo de revestimento cerâmico.



Fonte: Rajat; *et al.* (2022).

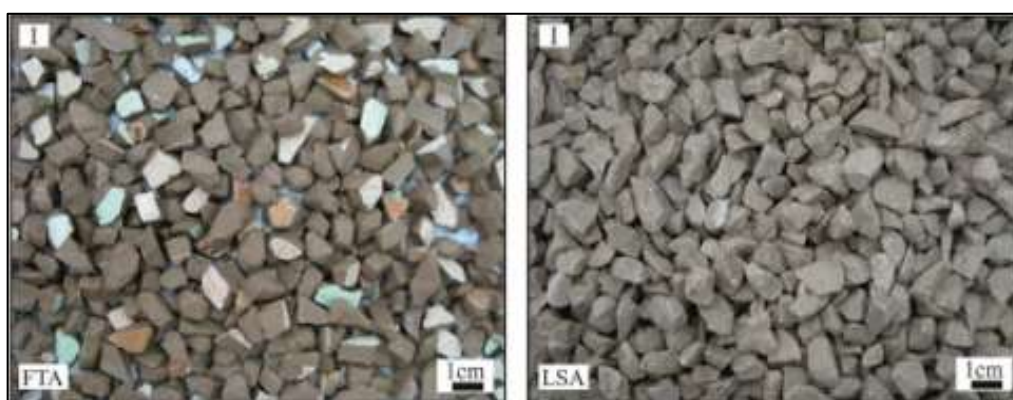
Segundo os autores no ensaio a compressão, houve um aumento de 17% em relação ao concreto referência, no ensaio a tração, foi registrado um aumento de 9%, no ensaio de resistência à flexão, 3% maior. A densidade do concreto com resíduos cerâmicos, foi baixa em

comparação à amostra de referência, devido à menor massa específica e maior presença de vazios, resultando no aumento na absorção de água e também devido a porosidade do agregado cerâmico. O fator água/cimento foi fixo 0,35 e utilizado aditivos superplastificantes, nas misturas.

Seguindo a mesma linha de pesquisa, em relação a utilização de agregado graúdo, de revestimento cerâmico em concretos, sem intervenção de outros resíduos que possam estar aderidos, ou mesmo fazendo composição e que venham a influenciar os resultados, o pesquisador Hakan (2016), realizou um experimento, com substituição de 100% do agregado graúdo natural, por agregado graúdo de piso cerâmico, na confecção de concreto. O fator água cimento fixo de 0,5 e não foram utilizados aditivos nas misturas.

Os resultados obtidos nos ensaios aos 28 dias, foi de um aumento na resistência à compressão, que apresentou resultado de 40,25 MPa, enquanto o concreto de referência, tinha sua resistência registrada de 36,7 MPa, no ensaio à tração os resultados ficaram próximos, com um pequeno percentual de aumento na resistência, para o concreto com agregado reciclado, com resultado de 3,31MPa em comparação a 3,2 MPa de referência. Com relação à resistência a flexão, também houve proximidade nos resultados (2,04 MPa), porém com uma pequena diminuição, comparado ao concreto com agregado natural, que tinha resultad o de 2,77 MPa. Foi relatado um aumento significativo na absorção de água, de 88,7%, já a densidade com agregado reciclado apresentou uma diminuição de 17,7%. A comparação visual entre o agregado de revestimento cerâmico e o agregado natural, utilizado no estudo, é demonstrado na Figura 5.

Figura 5 - Agregado graúdo de revestimentos cerâmicos e agregado graúdo natural.



Fonte: Hakan (2016)

Ngayakamo (2025), realizou estudos com resíduos cerâmicos coletados em canteiros de obras e passaram por uma limpeza completa, para garantir que estivessem livres de

contaminantes, como torrões de argila, matéria orgânica, matéria vegetal e poeira fina, que poderiam interferir na adesão da pasta e enfraquecer a integridade estrutural do concreto. Os resíduos foram britados resultando partículas entre 10 e 16mm e usadas para substituir parcialmente agregados graúdos naturais, em proporções de 0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25% em massa, o fator água cimento foi 0,5 para preparar as amostras de concreto. Os materiais utilizados estão registrados na Figura 6.

Figura 6 - Materiais utilizados na execução dos corpos de prova de concreto



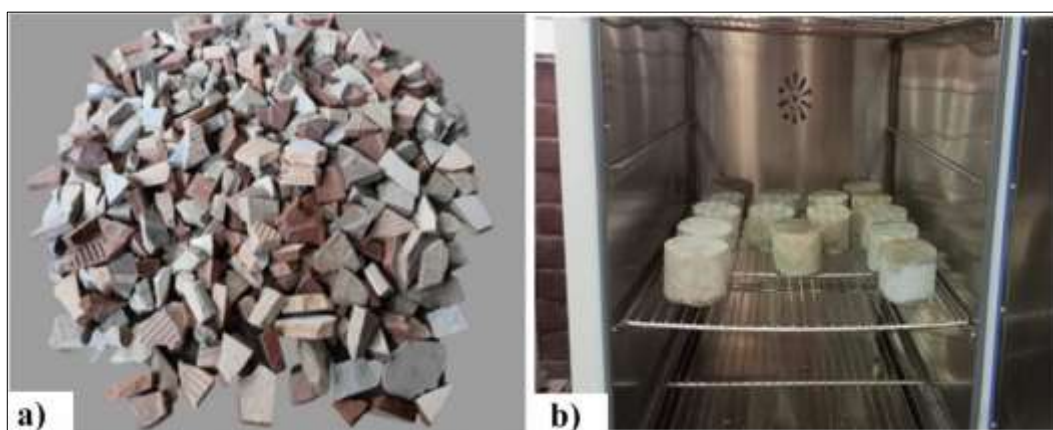
Fonte: Ngayakamo (2025).

O estudo demonstrou que houve uma melhoria das propriedades mecânicas e físicas do concreto com a incorporação de resíduos cerâmicos um nível de substituição de 20%. Até esse limite, a resistência à compressão do concreto aumentou em 22%, após 28 dias de cura. Da mesma forma, a resistência à tração, atingindo um pico de 4,20 MPa em 28 dias com 20% de substituição de resíduos cerâmicos, em comparação com uma linha de base de 3,10 MPa com 0% de resíduos cerâmicos. Porcentagens mais altas de resíduos cerâmicos, (25%), levaram a um declínio nas resistências à compressão e à tração, a absorção de água aumentou com o aumento do teor de resíduos cerâmicos, enquanto a densidade diminuiu.

Paul; *et al.* (2023), realizaram pesquisa com composições de agregados graúdos de revestimentos cerâmicos, para seis diferentes misturas de concreto com substituição de 0%, 10%, 20%, 30%, 50% e 100% em massa de agregado graúdo natural. Os efeitos da utilização de resíduos de ladrilhos cerâmicos, como substituto de agregados graúdos naturais em concreto, foram analisados pelos autores, em relação à trabalhabilidade, resistência à compressão, resistência à tração por compressão, absorção de água e porosidade. O estudo chegou às seguintes conclusões: A trabalhabilidade do concreto se tornou maior, com o acréscimo da porcentagem de resíduos cerâmicos, bem como a absorção de água, tanto a resistência à compressão quanto a resistência à tração por compressão, diminuíram gradualmente, com o

aumento da porcentagem de agregado de ladrilho na mistura, essas reduções foram observadas aos 28 dias, apresentando um percentual de 30% com substituição de 100% de agregado natural, portanto a partir dos resultados, os autores concluíram que o teor ideal de substituição seria de 10% que acarretaria uma redução em torno de 11% nas propriedades do concreto. As imagens dos resíduos cerâmicos e corpos de prova utilizados para os ensaios, estão apresentados na Figura 7.

Figura 7 - Imagem resíduos cerâmicos britados e imagens dos corpos de prova.



Fonte: Paul; *et al.* (2023).

Neste estudo, Keshavarz e Mostofinejad (2019), buscaram utilizar resíduos industriais como substitutos de agregados para o concreto. Dois tipos de resíduos cerâmicos foram utilizados: resíduos cerâmicos de porcelanato, que não podem ser reciclados devido à sua alta resistência física e estabilidade química e resíduos cerâmicos vermelhos, que possuem maior porosidade e menor resistência em comparação com resíduos cerâmicos de porcelanato. Os percentuais de substituição do agregado gráúdo natural, foram de 25%, 50%, 75% e 100%, em massa para ambos os resíduos reciclados.

Como resultado da pesquisa, os autores identificaram que os resíduos de porcelanato, aumentaram a resistência à compressão do concreto em até 41%, enquanto os resíduos de cerâmica vermelha aumentaram essa resistência em apenas 29%, substituindo 100% o agregado natural. Resultados semelhantes foram encontrados nos ensaios de resistência à tração do concreto, quando usados como agregado, os resíduos de porcelanatos, sendo atribuído a isso, sua melhor ligação com a pasta de cimento.

Nenhum dos resíduos reciclados, apresentaram na pesquisa, efeitos positivos relacionados a absorção de água do concreto, os resíduos de porcelanato aumentaram a absorção em até 54%, da mesma forma, os resíduos de cerâmica vermelha aumentaram este percentual

em até 91%, devido à sua alta absorção de água. Conforme os pesquisadores, no aspecto geral, os resíduos de porcelanato superaram os resíduos de cerâmica vermelha. Os materiais são descritos na Figura 8.

Figura 8 - Materiais utilizados no experimento.



Fonte: Keshavarz e Mostofinejad (2019).

A revisão bibliográfica evidenciou que a reutilização de resíduos de construção e demolição na produção de concretos constitui uma alternativa promissora para a redução dos impactos ambientais associados ao setor da construção civil, contribuindo para a preservação dos recursos naturais e para o fortalecimento dos princípios da economia circular. Embora diversos estudos tenham demonstrado a viabilidade da incorporação de resíduos cerâmicos em matrizes cimentícias, ainda são observadas divergências quanto à influência desses materiais sobre o desempenho físico e mecânico do concreto. Além disso, verifica-se um número mais restrito de pesquisas voltadas especificamente à utilização do resíduo de porcelanato como agregado graúdo reciclado, evidenciando a necessidade de estudos que ampliem o conhecimento sobre seu comportamento e potencial de aplicação. Nesse contexto, esta pesquisa insere-se como uma contribuição para o avanço desse tema, ao investigar a utilização do resíduo de porcelanato em concretos de cimento Portland, buscando ampliar o conhecimento sobre seu desempenho, viabilidade técnica e potencial como alternativa sustentável para a construção civil.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais e métodos adotados para o desenvolvimento do programa experimental, sendo estruturado com o propósito de definir e analisar as variáveis relacionadas à caracterização dos materiais e aos procedimentos metodológicos adotados para a substituição parcial do agregado gráúdo natural por agregado reciclado de porcelanato. Os resíduos utilizados no estudo são provenientes de sobras e recortes gerados durante a aplicação de revestimentos cerâmicos, bem como de peças quebradas nas etapas de transporte e manuseio, não tendo sido incorporadas a sistemas construtivos. Trata-se, portanto, de resíduos isentos de argamassa aderida ou de outros contaminantes, condição que permite uma avaliação mais controlada do comportamento do porcelanato reciclado quando empregado como agregado em matrizes cimentícias. Os materiais utilizados na pesquisa foram previamente caracterizados por meio de ensaios laboratoriais, realizados conforme as normas técnicas estabelecidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

4.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

De acordo com os objetivos estabelecidos nesta pesquisa, o programa experimental buscou elencar as variáveis, associadas à análise dos materiais e os procedimentos adotados para a substituição parcial, do agregado gráúdo natural por agregado reciclado de porcelanato, oriundo de resíduos gerados durante o assentamento desses revestimentos. Esses resíduos correspondem a peças descartadas, em razão de sobras de obra ou quebras ocorridas durante o manuseio, sem a presença de materiais aderidos como argamassa ou rejunte.

Foram produzidos concretos com diferentes teores (0, 25, 50 e 75%) em volume de substituição, do agregado gráúdo natural pelo agregado reciclado de porcelanato, com o objetivo de avaliar o comportamento do material e a viabilidade técnica dessa aplicação. As propriedades dos concretos foram analisadas tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Para melhor compreensão das etapas desenvolvidas ao longo da pesquisa, foi elaborado um fluxograma do programa experimental, no qual são apresentadas as principais atividades e a sequência dos procedimentos adotados.

Inicialmente, realizou-se a caracterização dos materiais constituintes do concreto. Para os agregados, foram conduzidos ensaios de granulometria, massa unitária, massa específica e absorção de água. Em seguida, os concretos produzidos foram avaliados no estado fresco quanto à trabalhabilidade, por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone, e no estado

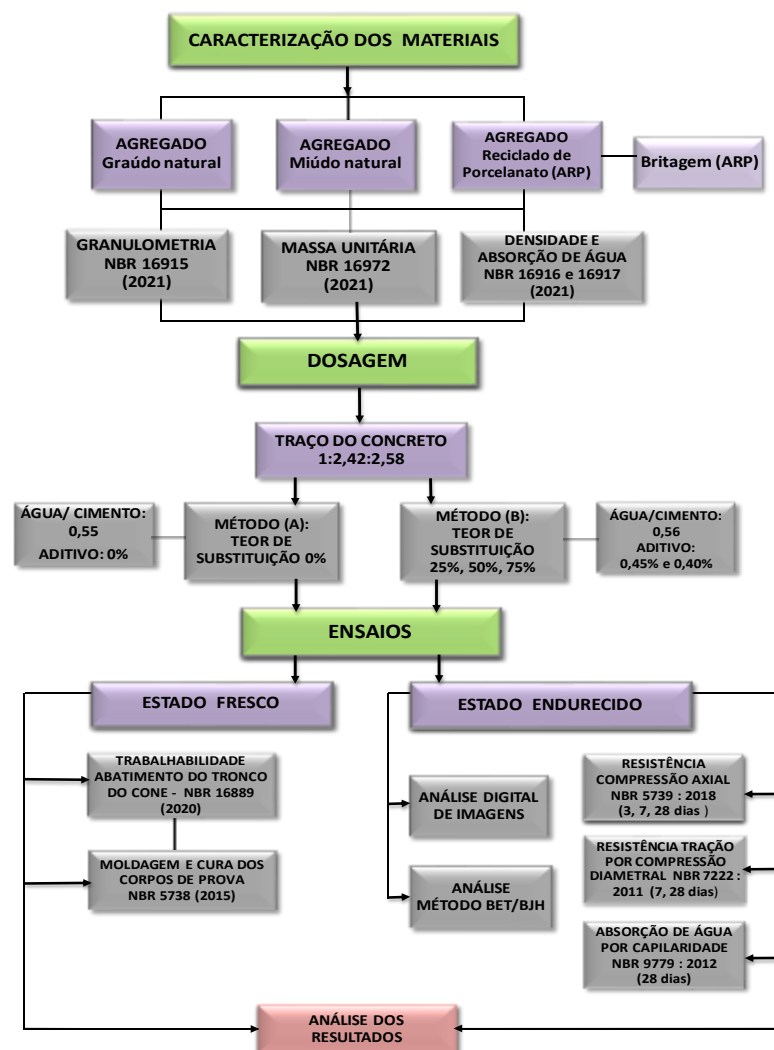
endurecido por meio da determinação da resistência à compressão axial, da resistência à tração por compressão diametral e da absorção de água por capilaridade.

Na etapa de dosagem, foram definidos três percentuais de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado de porcelanato, bem como o valor da relação água/cimento adotado nas misturas. Os corpos de prova foram moldados e submetidos a cura, sendo avaliados nas idades de 3, 7 e 28 dias.

4.1.1 Fluxograma do programa experimental

O fluxograma do programa experimental na Figura 9, apresenta de forma esquemática, a sequência das etapas metodológicas adotadas na pesquisa, contemplando a caracterização dos materiais, a definição das dosagens, a produção dos concretos e a realização dos ensaios nos estados fresco e endurecido, com posterior análise e interpretação dos resultados obtidos.

Figura 9 - Fluxograma do programa experimental da pesquisa.



Fonte: Autora (2025).

4.2 VARIÁVEIS DO ESTUDO

O propósito de um estudo com experimentos é obter modelos, para correlacionar as variáveis, de forma a possibilitar, a avaliação das influências que exercem sobre os fatores de resposta, o que implica na necessidade, de se estabelecer os parâmetros fixados, as variáveis controláveis ou variáveis de controle e as de resposta, sendo os fatores de controle, que irão indicar o comportamento, de cada uma das variáveis de resposta.

4.2.1 Parâmetros fixados

O planejamento de experimentos, estabelecendo alguns parâmetros previamente fixados, possibilita a definição de uma sequência de ensaios mais eficientes e facilita a realização, de uma avaliação estatística dos resultados, o que assegura um maior respaldo científico e maximização das informações obtidas, também podendo vir auxiliar, a corroborar os resultados já existentes.

O método de dosagem adotado, para o concreto convencional, foi o IPT/EPUSP, desenvolvido por Helene e Terzian (1992). O traço utilizado para ser analisado, foi o traço 1:2,42:2,58 (cimento: agregado miúdo: agregado graúdo) em volume, que corresponde a um teor de argamassa de 57% e o cimento empregado nos ensaios foi o CPII – F 40.

Essa definição teve como objetivo manter constante os parâmetros de dosagem entre todas as misturas avaliadas, permitindo que a influência da substituição do agregado graúdo natural por agregado reciclado de porcelanato fosse analisada de forma isolada. Dessa maneira, a comparação entre os concretos concentrou-se na avaliação da influência dos diferentes teores de substituição do resíduo sobre o desempenho do material, tomando como referência o concreto convencional produzido sob as mesmas condições.

Embora a ABNT NBR 15116 (2021) recomende a pré-molhagem de agregados reciclados ou a compensação da água absorvida para garantir a trabalhabilidade, optou-se por não adotar esse procedimento para o agregado reciclado de porcelanato utilizado nesta pesquisa. Essa escolha constituiu um parâmetro metodológico previamente definido, considerando as características do material descritas na literatura, que indicam baixa porosidade e reduzida absorção de água em função do processo de fabricação do porcelanato. Assim, todos os traços foram produzidos sob essa mesma condição experimental, sendo a consistência das misturas ajustada, quando necessário, por meio da dosagem de aditivo superplastificante, considerado na definição das variáveis controláveis do estudo.

4.2.2 Variáveis controláveis

As variáveis controláveis, correspondem aos parâmetros definidos previamente no delineamento experimental, cujos valores são estabelecidos de forma a possibilitar a análise da influência de cada fator no comportamento do concreto.

Os fatores de controle definem o comportamento, de cada uma das variáveis de resposta, que são resultantes das diferentes porcentagens de substituição da fração natural do agregado, pelo agregado reciclado, a relação água/cimento que atua na resistência do concreto e o tempo de cura.

A relação água/cimento inicialmente estabelecida foi ajustada apenas para os concretos com agregado reciclado de porcelanato, em razão da adição de água destinada exclusivamente à diluição do aditivo superplastificante, visando sua adequada dispersão na mistura. Como consequência, os concretos com a substituição passaram a apresentar a relação a/c de 0,56.

Os ensaios possibilitaram a avaliação de diversos fatores, intervenientes no processo e a importância de cada um deles. As variáveis em questão são as seguintes:

- a) Percentual de substituição: 0, 25, 50 e 75% (em volume);
 - 0% = Concreto referência;
 - 25% Agregado reciclado e 75% Agregado natural;
 - 50% Agregado reciclado e 50% Agregado natural;
 - 75% Agregado reciclado e 25% Agregado natural.
- b) Relação água/cimento (a/c):
 - 0,55 para o concreto de referência;
 - 0,56 para os concretos com agregado reciclado de porcelanato.
- c) Dosagem de aditivo superplastificante (em relação à massa de cimento):
 - 0% para o concreto de referência;
 - 0,45% para o traço com 25% de substituição;
 - 0,40% para os traços com 50% e 75% de substituição.
- d) Tempo de cura dos corpos de prova: 3, 7 e 28 dias.

4.2.3 Variáveis de resposta

As variáveis de resposta, são parâmetros utilizados na análise e avaliação dos resultados dos ensaios realizados. Elas representam os dados quantitativos e mensuráveis que são essenciais, para garantir a precisão e a confiabilidade dos experimentos.

As variáveis de resposta, a serem analisadas neste estudo são:

- a) Resistência à compressão axial;
- b) Resistência à tração por compressão diametral;
- c) Absorção de água;
- d) Distribuição dos agregados através de imagens bidimensionais;
- e) Superfície e porosidade pelo método BET.

4.3 MATERIAIS UTILIZADOS

4.3.1 Cimento Portland

O cimento utilizado nos ensaios foi o CP II F 40 (Lote: agosto/25). Cimento composto com filler e com maior grau de finura que proporciona maiores resistências em todas as idades. A caracterização física, química e mecânica do cimento, estão relatadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Caracterização física, química e mecânica do cimento CII-F40.

Parâmetro	Lote: agosto 2025
Composição Química	Valores médios
Al ₂ O ₃ (%)	4,49
SiO ₂ (%)	17,19
Fe ₂ O ₃ (%)	2,77
CaO (%)	60,8
MgO (%)	3,81
SO ₃ (%)	3,04
Perda ao Fogo (%)	5,63
CaO Livre (%)	1,95
Resíduo Insolúvel (%)	1,24
Equivalente Alcalino (%)	0,61
Propriedades Físicas	
Expansão à Quente (mm)	0,30
Início de Pega (h:min)	197
Fim de Pega (h:min)	246
Água Cons. Normal (%)	28,3
Blaine (cm ² /g)	4,498
#200 (%)	0,06
#325 (%)	0,53
Propriedades Mecânicas	
fc 1 dia (MPa)	25,7
fc 3 dias (MPa)	39,0
fc 7 dias (MPa)	44,4
fc 28 dias (MPa)	51,3
Massa específica (g/cm³)	3,06

Fonte: Dados do fabricante – Cimento Itambé (2025).

4.3.2 Agregados

A ABNT NBR 7211 (2022) estabelece os requisitos para a produção e recepção de agregados miúdos e graúdos, de origem natural lítica, encontrados na forma fragmentada ou resultantes da britagem de rochas, destinados à produção de concretos de cimento Portland.

Já o agregado reciclado, é resultante do beneficiamento de resíduos previamente utilizados na construção e demolição de atividades da construção civil, cuja distribuição granulométrica é constituída por agregados graúdos e miúdos (ABNT NBR 15116, 2021).

De acordo com a ABNT NBR 7211 (2022), os agregados são classificados, quanto à sua granulometria, conforme os seguintes critérios:

- a) **Agregado graúdo:** agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm.
- b) **Agregado miúdo:** agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 0,150 mm.

4.3.2.1 Agregado miúdo

O agregado miúdo, empregado na pesquisa, é uma areia média natural, de origem quartzosa, proveniente da Bacia do Rio Jacuí, Rio Grande do Sul. O material foi coletado e reduzido para o ensaio, de acordo com a ABNT NBR 16915 (2021).

A composição granulométrica, é determinada segundo a ABNT NBR 17054 (2022) e deve atender aos limites estabelecidos na Norma. Podem ser utilizados como agregado miúdo para concretos, materiais com distribuição granulométrica diferente das zonas estabelecidas, desde que estudos prévios de dosagem comprovem sua aplicabilidade (ABNT NBR 17054, 2022).

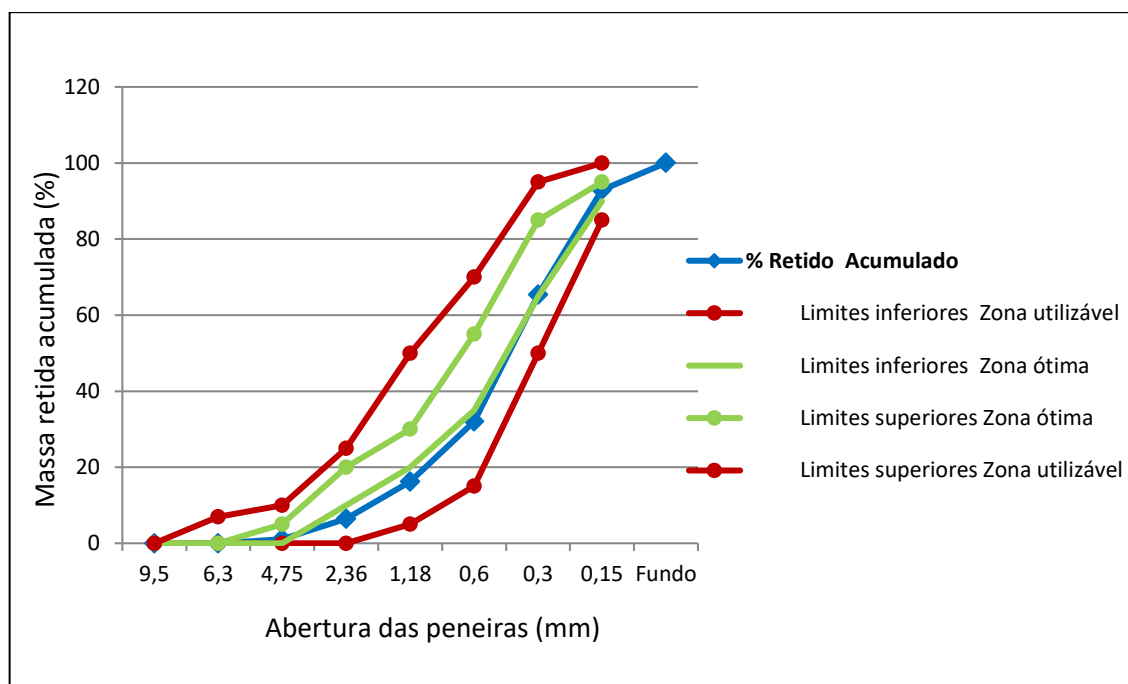
Os valores obtidos para o módulo de finura foi 2,17 e o diâmetro máximo 4,75mm. Os resultados do ensaio de granulometria do agregado miúdo natural, utilizado no estudo são apresentados na Tabela 3, bem como sua curva granulométrica pode ser visualizado na Figura 10.

Tabela 3 - Caracterização granulométrica do agregado miúdo natural .

Abertura das Peneiras (mm)	Massa inicial seca = 300 g	
	Média	
	% Retido Médio	% Retido Acumulado
9,5	0	0
6,3	0	0
4,75	1	1
2,36	6	7
1,18	10	17
0,6	16	33
0,3	33	66
0,15	27	93
Fundo	7	100
Módulo de Finura	2,17	
Diâmetro Máximo (mm)	4,75	

Fonte: Autora (2025).

Figura 10 - Curva granulométrica do agregado miúdo natural.



Fonte: Autora (2025).

A densidade e a absorção de água foram determinadas seguindo os procedimentos na norma ABNT NBR 16916 (2021). O valor médio da densidade do agregado miúdo natural, na condição saturado e superfície seca, foi de 2,48 g/cm³, com desvio-padrão de 0,007g/cm³, enquanto a absorção de água, calculada a partir da média das duas amostras, foi de 0,31%, com

desvio-padrão de 0,014%.

Conforme a norma ABNT NBR 16972 (2021), que estabelece o método de determinação da massa unitária, o valor encontrado para o agregado miúdo foi de 1.445,50 kg/m³ e o desvio-padrão de 5,59 kg/m³.

4.3.2.2 Agregado graúdo natural

O agregado graúdo natural utilizado na pesquisa é proveniente de rocha basáltica fragmentada, oriunda de processo de britagem realizado em usina localizada na região de Caxias do Sul, RS. De acordo com a ABNT NBR 17054 (2022), considera-se agregado graúdo aquele cujos grãos passam pela peneira de abertura nominal de 75 mm e ficam retidos na peneira de 4,75 mm.

O ensaio de granulometria foi conduzido conforme os procedimentos estabelecidos por essa norma, sendo os resultados finais, apresentados na Tabela 4, correspondentes à média dos valores obtidos em duas determinações.

Tabela 4 - Caracterização granulométrica do agregado graúdo natural.

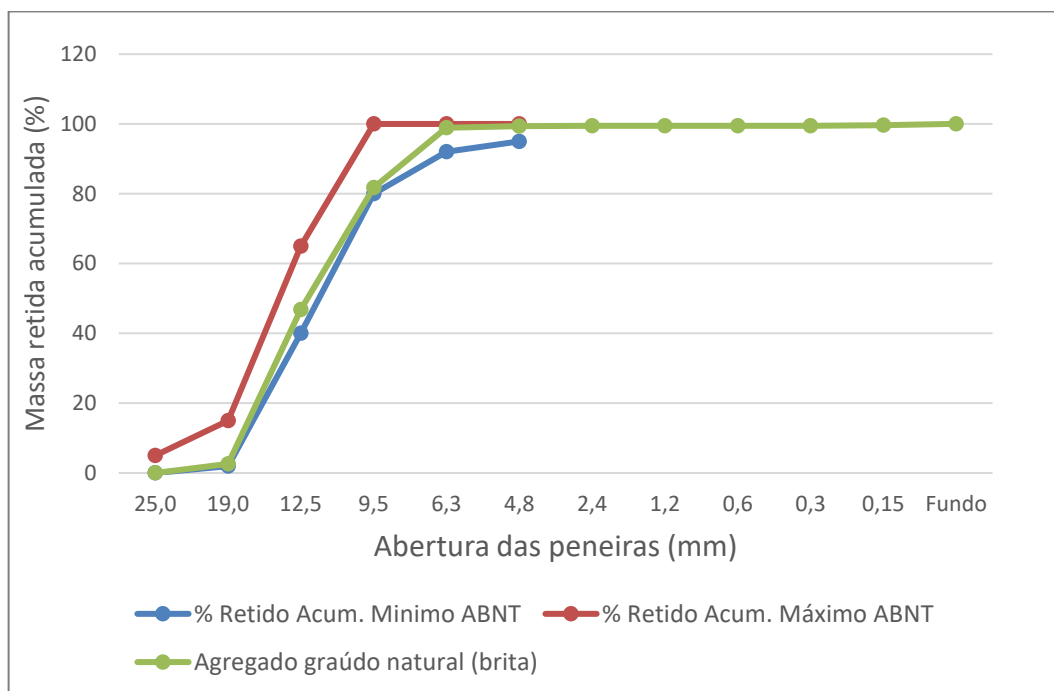
Abertura das Peneiras (mm)	Massa inicial seca = 1000 g	
	Média	
	% Retido Médio	% Retido Acumulado
25,0	0	0
19,0	2	2
12,5	44	46
9,5	35	81
6,3	17	98
4,8	1	99
2,4	0	99
1,2	0	99
0,6	0	99
0,3	0	99
0,15	0	99
Fundo	1	100
Módulo de Finura	6,77	
Diâmetro Máximo (mm)	19,0	

Fonte: Autora (2025).

Os valores obtidos para o módulo de finura foi 6,77 e o diâmetro máximo 19,0 mm. A distribuição granulométrica do agregado graúdo natural, é representada a seguir através da curva

granulométrica, com base nos dados fornecidos pela Tabela 4 e representados na Figura 11.

Figura 11 - Curva granulométrica do agregado graúdo natural.



Fonte: Autora (2025).

Para realização do ensaio, a fim de determinar a massa unitária do agregado, é necessário seguir os procedimentos da norma da ABNT NBR 16972 (2021), onde o valor médio resultante foi de 1575,61 kg/m³, com desvio-padrão de 10,15 kg/m³.

A absorção de água e a densidade do agregado graúdo natural, foram determinadas conforme os métodos descritos na norma ABNT NBR 16917 (2021). Duas amostras de 3,0 kg foram imersas em água por 24 horas para saturação. Após esse período, as amostras foram retiradas da água e sua superfície foi enxugada, até atingir a condição de saturada superfície seca e pesada sua massa, a pesagem também foi realizada, durante o ensaio da balança hidrostática, com o agregado submerso. Posteriormente, as amostras foram secas em estufa a 105°C durante 24h. A massa do material seco foi então registrada, o que permitiu o cálculo da porcentagem de absorção de água, conforme as equações especificadas na norma.

Os valores médios obtidos foram: 2,55 g/cm³ para densidade na condição saturada superfície seca e o desvio-padrão foi de 0,007g/cm³, a densidade da massa seca obtida foi de 2,45 g/cm³, e desvio-padrão 0,00, ou seja, não houve variação entre as duas determinações realizadas. O cálculo da porcentagem de absorção de água, resultou em 3,97%, com desvio-padrão de 0,099%, conforme a metodologia normativa.

4.3.2.3 Agregado graúdo reciclado de porcelanato (ARP)

As peças de porcelanato, foram submetidas a processo de britagem por empresa especializada na coleta, beneficiamento e destinação de resíduos da construção civil, localizada no município de Caxias do Sul, RS. O equipamento utilizado foi um britador de mandíbula, marca Trimak, a regulagem empregada foi a de nº1, resultando em um agregado com partículas angulosas e de superfície irregular.

A caracterização física e granulométrica desse agregado, foi executada para avaliar sua viabilidade, como substituto parcial do agregado graúdo natural, conforme os requisitos da norma NBR 15116 (2021). Foram realizados ensaios para caracterizar o agregado graúdo reciclado de porcelanato (ARP), seguindo os procedimentos técnicos estabelecidos pelas normas brasileiras pertinentes. O objetivo foi determinar as propriedades físicas e granulométricas do material, com foco em sua densidade, absorção de água e massa unitária.

O agregado graúdo reciclado apresentou características granulométricas similares ao agregado natural. O módulo de finura obtido foi 6,88 e o diâmetro máximo 19,0 mm. Os resultados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Caracterização granulométrica do agregado graúdo reciclado de porcelanato (ARP).

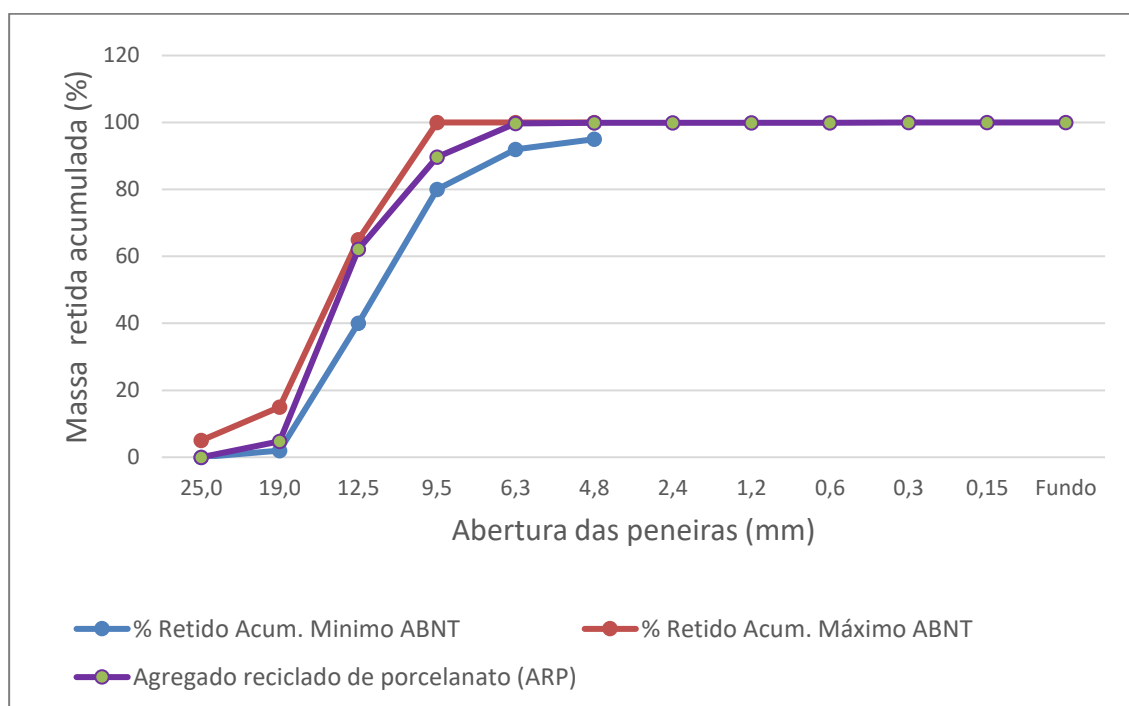
Abertura das Peneiras (mm)	Massa inicial seca = 1000 g	
	Média	
	% Retido Médio	% Retido Acumulado
25,0	0	0
19,0	5	5
12,5	57	62
9,5	27	89
6,3	10	99
4,8	0	99
2,4	0	99
1,2	0	99
0,6	0	99
0,3	0	99
0,15	0	99
Fundo	1	100,00
Módulo de Finura	6,88	
Diâmetro Máximo (mm)	19,0	

Fonte: Autora (2025).

A ABNT NBR 16972 (2021), estabelece os critérios e procedimentos para a realização do ensaio de massa unitária, a norma especifica que o material deve cair de uma altura que não supere 5 cm da borda superior do recipiente, minimizando a compactação, com objetivo de simular o estado solto do material. Após a pesagem foram efetuados os cálculos conforme as equações e o valor médio obtido, para a massa unitária foi de $1392,95 \text{ kg/m}^3$ e o desvio-padrão $4,34 \text{ kg/m}^3$.

A distribuição granulométrica, determinada segundo a ABNT NBR 7211 (2022), deve atender aos limites indicados para o agregado graúdo e os resultados são apresentados através da Figura 12, contendo a curva granulométrica, bem como os dados expressos na Tabela 6, onde os percentuais obtidos nos ensaios, estão em conformidade com os limites determinados pela norma.

Figura 12 - Curva granulométrica do agregado reciclado de porcelanato (ARP).



Fonte: Autora (2025).

Como pode ser observado na Figura 12, a curva granulométrica do agregado reciclado de porcelanato (ARP) encontra-se dentro dos limites estabelecidos em norma, enquadrando-se na faixa utilizável. Em comparação ao agregado graúdo natural, observa-se comportamento semelhante, com distribuição contínua entre os limites inferior e superior relacionados na Tabela 6.

Tabela 6 - Limites da composição granulométrica do agregado graúdo (ARP).

Peneira (mm)	Limites ABNT NBR 7211	Resultado	Conformidade
25	0-5 %	0 %	Conforme
19	2-15 %	5 %	Conforme
12,5	40-65 %	62 %	Conforme
9,5	80-100 %	89 %	Conforme
6,3	92-100 %	99 %	Conforme
4,8	95-100 %	99 %	Conforme

Fonte: Autora (2025).

Os ensaios realizados para determinação da densidade e absorção de água, foram executados segundo a ABNT NBR 16917 (2021). Os valores obtidos para densidade do agregado na condição saturado superfície seca foi $3,29 \text{ g/cm}^3$, com desvio-padrão $0,25 \text{ g/cm}^3$ e a densidade na condição seca foi de $3,27 \text{ g/cm}^3$, com desvio-padrão de $0,25 \text{ g/cm}^3$, correspondendo à média de dois ensaios efetuados. Considerando que as propriedades físicas dos resíduos cerâmicos podem variar em razão da composição da matéria-prima, processo de fabricação e pela origem do material reciclado, os resultados encontrados representam as características do material empregado neste estudo. Com base nesses valores, foram realizados os cálculos das dosagens e a produção dos concretos avaliados na pesquisa.

O percentual de absorção de água, apresentado pelo agregado graúdo reciclado de porcelanato (ARP) foi de 0,78%, com desvio-padrão de 0,018%, valor inferior ao limite determinado pela norma ABNT NBR 15116 (2021), que estabelece uma absorção máxima de 7%.

A baixa absorção de água observada para o ARP, inferior à do agregado natural, pode estar associada às características do resíduo e ao processo de sinterização do porcelanato, que confere ao material uma estrutura mais densa e menos porosa. A massa unitária do ARP foi inferior à do agregado natural, comportamento que pode ser atribuído ao menor empacotamento das partículas, devido à sua forma mais angular e ao maior índice de vazios entre os grãos. A comparação entre as propriedades dos agregados analisados e os desvios-padrão, estão apresentado na Tabela 7

Tabela 7 - Propriedades do agregado graúdo natural e do ARP.

Propriedade	Agregado graúdo natural	DP	Agregado reciclado (ARP)	DP
Massa unitária (kg/m ³)	1575,61	10,15	1392,95	4,34
Densidade Seca (g/cm ³)	2,45	0,00	3,27	0,25
Densidade SSS (g/cm ³)	2,55	0,007	3,29	0,25
Absorção de água (%)	3,97	0,009	0,78	0,018
Módulo de finura	6,77	-	6,88	-
Diâmetro máximo (mm)	19,00	-	19,00	-

Onde: (SSS) = Saturado Superfície Seca; DP = Desvio-padrão.

Fonte: Autora (2025).

4.3.3 Água

A água utilizada na produção dos concretos e na cura dos corpos de prova foi proveniente do Sistema Autônomo Municipal de Água e Esgoto (SAMAEE), responsável pelo abastecimento público da cidade de Caxias do Sul, RS. Trata-se de água potável, destinada ao consumo humano, apresentando características adequadas quanto à ausência de impurezas, óleos, matéria orgânica ou substâncias que possam interferir no desempenho do concreto.

Conforme a ABNT NBR 15900-1 (2009), a água potável proveniente de sistemas públicos de abastecimento é considerada adequada para o amassamento do concreto, dispensando a realização de ensaios adicionais, uma vez que atende aos requisitos químicos e físicos estabelecidos para não comprometer o processo de hidratação do cimento nem as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido.

A qualidade da água influencia diretamente as reações químicas envolvidas na hidratação do cimento, podendo afetar o tempo de pega, a resistência mecânica e o desempenho do concreto no estado endurecido. Assim, a adoção de água tratada e de qualidade controlada contribui para a confiabilidade dos resultados experimentais, reduzindo a interferência de variáveis externas no comportamento dos concretos produzidos.

4.3.4 Aditivo

A incorporação de agregado reciclado ao concreto, tende a aumentar a coesão da mistura, reduzindo sua trabalhabilidade em comparação ao uso de agregado natural e o acréscimo de água, para compensar essa perda, pode vir a comprometer as propriedades mecânicas. Com o objetivo de melhorar a trabalhabilidade e em conformidade com os requisitos

da ABNT NBR 11768-1 (2019), foi empregado o uso de aditivo químico.

O aditivo utilizado foi do tipo superplastificante de pega acelerada, à base de policarboxilato, com dosagem definida conforme recomendações do fabricante, que variam entre 0,3% e 2% em relação à massa de cimento. No presente estudo, foram adotados teores de 0,45% para o ARP 25 (25% de substituição) e 0,40% para os traços ARP 50 e ARP 75 (50 e 75% de substituição). As características técnicas do aditivo estão apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Dados técnicos e características do aditivo.

Característica	Unidade	Valor
Densidade	kg/l	1,09 ± 0,02
pH	adimensional	5,0 ± 1,0
Teor de cloretos	%	0
Dosagem	%	0,3 a 2,0

Fonte: Dados do fabricante – Sika-ViscoCret-100HE (2020).

4.4 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS

Neste capítulo são descritos os procedimentos adotados para a produção dos concretos estudados. Inicialmente, apresenta-se o traço utilizado e o consumo de materiais, empregados nas diferentes composições. Na sequência, descreve-se a ordem de introdução e mistura dos materiais, considerando os métodos adotados para o concreto de referência e para os concretos produzidos com agregado reciclado de porcelanato (ARP). Por fim, são apresentados os procedimentos de moldagem e cura dos corpos de prova, realizados conforme as normas técnicas vigentes.

4.4.1 Traço e consumo de material

A dosagem dos concretos, deu-se a partir do traço de referência 1:2,42:2,58 (cimento, agregado miúdo, agregado graúdo), como base para a definição dos parâmetros iniciais da mistura, com teor de argamassa fixado em 57% e mantido constante ao longo do estudo, de modo a permitir a comparação entre os diferentes níveis de substituição, do agregado graúdo natural por agregado reciclado de porcelanato (ARP). As condições de trabalhabilidade e consistência, quando necessário, foram corrigidas por meio da utilização de aditivo superplastificante.

Em função das diferenças entre as massas específicas do agregado gráúdo natural e do agregado gráúdo reciclado de porcelanato, tornou-se necessário o ajuste das quantidades dos materiais na dosagem das misturas. Esse procedimento teve como objetivo preservar a proporção em volume dos agregados na composição do concreto.

Dessa forma, a massa de agregado reciclado necessária para substituir uma determinada massa de agregado natural foi calculada de modo a garantir a substituição de um volume equivalente de material, conforme a Equação (2). A adoção desse critério permite uma dosagem mais precisa das misturas com resíduos, assegurando a comparabilidade dos concretos produzidos e a adequada avaliação de suas propriedades físicas e mecânicas.

$$Mar = \frac{Man}{\gamma_{an}} \cdot \gamma_{ar} \quad (2)$$

Onde:

Mar é a massa do agregado a ser utilizado (kg);

Man é a massa do agregado natural a ser substituído (kg);

γ_{ar} é a massa específica do agregado reciclado (kg/m³);

γ_{an} é a massa específica do agregado natural (kg/m³).

O estudo propôs 3 substituições do agregado gráúdo natural, por agregado gráúdo de porcelanato, os percentuais de substituição adotados foram de 25, 50 e 75%, com tempo de cura de 3, 7 e 28 dias. As nomenclaturas adotadas para a identificação dos concretos produzidos, em função dos diferentes teores de substituição do agregado gráúdo natural, estão apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Teor de substituição do agregado gráúdo natural.

Nomenclatura	Teor de substituição
REF	0%
ARP 25	25%
ARP 50	50%
ARP 75	75%

Onde: REF= Referência; ARP = Agregado Reciclado de Porcelanato.

Fonte: Autora (2025).

Para efeito dessa pesquisa, foram moldados 72 corpos de prova, dos quais 36 utilizados nos ensaios de resistência à compressão, 24 para os ensaios de resistência a tração e 12 para os ensaios de absorção de água. O consumo de materiais utilizados é apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 - Consumo de materiais utilizados para o traço de concreto produzido.

Traço	Substituição de ARP (%)	Cimento (kg)	Agregado miúdo natural (kg)	Agregado graúdo natural (kg)	Agregado reciclado de porcelanato (ARP) (kg)	Relação água cimento final (a/c)	Água (kg)	Aditivo (%)
REF	0	10	24,2	25,8	0	0,55	5,50	0
ARP 25	25	10	24,2	19,35	8,30	0,56	5,60	0,45
ARP 50	50	10	24,2	12,9	16,60	0,56	5,60	0,40
ARP 75	75	10	24,2	6,45	24,90	0,56	5,60	0,40
Total		40	96,80	64,5	49,80		22,30	1,25

Onde: REF= Referência; ARP = Agregado Reciclado de Porcelanato.

Fonte: Autora (2025).

Nota: As quantidades de ARP correspondem à substituição volumétrica do agregado graúdo natural, conforme a Equação (2).

Nesse contexto, para todas as substituições por agregado reciclado de porcelanato, foi adotado o acréscimo de 1% de água em relação à massa de cimento, elevando a relação água/cimento de 0,55 para 0,56, além da incorporação de 0,4% de aditivo superplastificante diluído na água de amassamento, de modo a garantir consistência adequada para a moldagem. A mistura com 25% de substituição apresentou consistência inferior à especificada durante a etapa de preparo, sendo necessário uma correção pontual por meio da adição de 5ml de aditivo superplastificante “*in natura*”, diretamente na composição final, sem alteração adicional da relação água/cimento, conforme demonstrado na Tabela 10.

A consistência do concreto no estado fresco foi determinada por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone, conforme os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 16889 (2020). Com base nos valores obtidos nesse ensaio, o concreto foi classificado quanto à sua consistência de acordo com a ABNT NBR 8953 (2015), enquadrando-se na classe S160.

4.4.2 Ordem de mistura dos materiais

A ordem de colocação dos materiais na betoneira é um fator importante no processo de produção de concreto, uma vez que influencia diretamente a trabalhabilidade, a homogeneidade da mistura e o desempenho mecânico do material endurecido. Conforme destacado por Neville

(2015) e Mehta e Monteiro (1994), a sequência correta de adição garante melhor dispersão das partículas, reduz a formação de grumos de cimento e evita a segregação dos agregados.

A norma ABNT NBR 12655 (2022), estabelece o procedimento de referência para preparo, controle, recebimento e aceitação do concreto. Os materiais para confecção do concreto devem ser unidos até que formem uma massa homogênea e a betoneira é o equipamento utilizado para a mistura dos componentes, a sua capacidade de carga, tempo de mistura e velocidade devem seguir a normatização do fabricante.

Para a definição da sequência de mistura adotada nesta pesquisa, foram considerados procedimentos experimentais descritos na literatura, que avaliaram diferentes formas de incorporação de agregados reciclados ao concreto e seus efeitos sobre as propriedades das misturas.

Padovan (2013), em seus estudos, introduziu agregados úmidos para evitar a absorção de água de amassamento, segundo o autor a não saturação, poderia vir a reduzir a trabalhabilidade do concreto. Porém os ensaios demonstraram que agregados pré-umedecidos, podem acabar liberando água no interior do concreto, aumentando a relação água/cimento.

Schäfer *et al.* (2014) produziram concretos alterando as etapas de mistura, mais normalmente utilizadas na literatura. O agregado graúdo natural e água (1/3) foram os primeiros colocados na betoneira, seguidos por outro terço de água e cimento, após essa etapa, os agregados miúdos naturais foram introduzidos juntamente com a última quantidade de água e ao final, o agregado reciclado foi adicionado, para que o mesmo, ficasse menos tempo em contato com a água de amassamento. Como resultado, o concreto apresentou melhor trabalhabilidade e aumento da resistência mecânica.

Hentges *et al.* (2020), desenvolveram um estudo comparando dois métodos de incorporação de agregado graúdo reciclado de concreto, na mistura de concreto, no início e no final da etapa de mistura. Foi relatado que a absorção de água, pelo agregado reciclado, diminuiu quando a inserção ocorreu no final da mistura, no entanto absorção por capilaridade e a resistência à compressão, apresentaram melhores resultados quando o agregado foi inserido no início

Para a produção do concreto experimental, foram definidos dois métodos de mistura:

Método A: Utilizado como referência, seguindo a sequência tradicional de mistura para concretos convencionais. Neste procedimento, a sequência de adição de materiais na betoneira é a seguinte: agregado graúdo natural, seguido por parte da água de amassamento, adição do cimento, agregado miúdo natural e por fim, o complemento da água e aditivos quando

necessário. Este método busca garantir homogeneidade e trabalhabilidade adequadas, sendo o padrão de referência.

Método B: Utilizado especificamente para a incorporação do agregado graúdo reciclado de porcelanato (ARP), considerando a sua baixa absorção de água, não foi utilizado a pré-molhagem. A sequência adotada consiste em:

- a) Colocação do agregado graúdo natural na betoneira;
- b) Adição parcial da água (50%);
- c) Inclusão do cimento;
- d) Adição do agregado miúdo natural;
- e) Complemento da água restante e se necessário,
- f) Aditivo superplastificante para ajuste do abatimento.
- g) Inclusão do agregado graúdo reciclado de porcelanato.

Neste método, o agregado reciclado de porcelanato é adicionado ao final do processo de mistura, após a formação da pasta homogênea com agregado graúdo natural, cimento, areia, água e aditivos. A intenção é reduzir o desgaste do ARP e possível geração de finos durante as etapas iniciais de mistura. Para compensar a adição tardia, será acrescentado um tempo de mistura adicional em torno de 2 a 4 minutos, assegurando o cobrimento adequado das partículas recicladas. Na produção dos concretos, foi utilizada uma betoneira de eixo vertical, com capacidade de 70 litros. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil (LENC), localizado na Universidade de Caxias do Sul (UCS).

Para o concreto de referência (Método A), a primeira etapa, foi iniciada com a introdução do agregado graúdo natural, juntamente com uma fração de água, por aproximadamente 30 a 45 segundos, com o intuito de umedecer o agregado e reduzir sua absorção inicial. Na sequência, foi adicionado o cimento, mantendo-se o batimento por aproximadamente 1 a 2 min para garantir sua adequada dispersão, em seguida o agregado miúdo natural foi incorporado, permanecendo em mistura por cerca de 60 segundos, complementando com o restante da água de amassamento. Por fim, a homogeneização permaneceu por mais 1 a 2 minutos, resultando em um tempo total de mistura em torno de 6 minutos.

O Método (B) foi estruturado, de forma a considerar as particularidades do agregado graúdo reciclado de porcelanato, em virtude da sua baixa absorção de água, o que dispensou a pré-molhagem. Nesse procedimento, a mistura teve início com a colocação do agregado graúdo natural, seguido da adição parcial da água de amassamento (cerca de 50%), com tempo de mistura de 30 a 45 segundos, em seguida foi incorporado o cimento, permanecendo em mistura

por cerca de 60 segundos, a inclusão do agregado miúdo natural ocorreu na sequência, com tempo aproximado de 2 minutos. A complementação com o restante da água e o aditivo superplastificante, foram os materiais seguintes, mantendo-se o batimento por 2 minutos. Por último, seguiu a incorporação do agregado graúdo reciclado de porcelanato. A homogeneização final, foi conduzida durante cerca de 3 minutos, resultando em um tempo total de mistura de aproximadamente 9 minutos, assegurando melhor homogeneização da pasta em virtude da incorporação de materiais alternativos como o porcelanato reciclado.

Concluído o tempo de mistura em cada procedimento, sucedeu o ensaio de abatimento do tronco de cone, conforme a ABNT NBR 16889 (2020), com o objetivo de avaliar a consistência do concreto fresco e sua trabalhabilidade. Seguindo então, com a moldagem dos corpos de prova, em moldes cilíndricos com dimensões de 100 por 200 mm, lubrificados com uma fina camada de óleo mineral, sendo os moldes preenchidos em camadas sucessivas e devidamente adensados, de modo a assegurar a eliminação de vazios e a adequada compactação da mistura, conforme determinado pela norma ABNT NBR 5738 (2015), para posterior realização dos ensaios mecânicos e absorção de água.

4.4.3 Cura dos corpos de prova

Após a moldagem, os corpos de prova foram colocados em uma superfície horizontal, rígida, livre de vibrações e de qualquer outra ação que possa perturbar o concreto, durante as primeiras 24 h e armazenados em local protegido de intempéries (ABNT NBR 5738, 2015). A desmoldagem foi realizada, após cumprido o período de cura inicial, que ocorre durante as primeiras 24 h.

Ainda segundo a norma, os corpos de prova foram identificados antes de serem armazenados e cobertos com material não reativo e não absorvente, evitando assim a perda de água do concreto. A armazenagem até o momento dos ensaios, ocorreu no tanque de cura em solução saturada de hidróxido de cálcio a 23 ± 2 °C, localizado no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade de Caxias do Sul (UCS).

Com a finalidade de caracterizar os concretos produzidos e correlacionar os resultados de durabilidade, com as características do concreto de referência, foram realizados ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e absorção de água por capilaridade. As idades e as quantidades de corpos de prova para cada ensaio, estão descritos na Tabela 11.

Tabela 11 - Idades e quantidades de corpos de prova por ensaio.

Concreto Substituições (%)	Agregado natural (%)	Ensaio Compressão 3 dias / 7 dias / 28 dias (CP)	Ensaio Tração 7 dias / 28 dias (CP)	Ensaio Absorção 28 dias (CP)
Concreto referência	100	9 (3+3+3)	6 (3+3)	3
Com 25% (ARP 25)	75	9 (3+3+3)	6 (3+3)	3
Com 50% (ARP 50)	50	9 (3+3+3)	6 (3+3)	3
Com 75% (ARP 75)	25	9 (3+3+3)	6 (3+3)	3
Total corpos de prova		36	24	12

Onde: (ARP) = Agregado Reciclado de Porcelanato; (CP) = Corpo de prova.

Fonte: Autora (2025).

4.5 MÉTODOS DE ENSAIOS

Nos ensaios de concreto, além dos resultados numéricos, registra-se a avaliação visual do material em diferentes etapas. No estado fresco, observa-se a homogeneidade da mistura, com o intuito de perceber possíveis ocorrências de segregação ou exsudação, assim como o aspecto de consistência e a presença de bolhas superficiais. Durante a moldagem, adensamento e o preenchimento dos moldes, é importante identificar e corrigir a presença de vazios aparentes e também a regularidade da superfície após o adensamento.

No estado endurecido, destacam-se aspectos importantes a serem observados, que estão relacionados a cor e a textura do concreto, a presença de porosidade visível, bem como a ocorrência de fissuras e ao final, o padrão de ruptura obtido nos ensaios mecânicos. Tais observações complementam os resultados quantitativos, permitindo melhor interpretação do desempenho e identificação de possíveis falhas no material.

4.5.1 Abatimento por tronco de cone – Estado Fresco

O ensaio de abatimento do tronco de cone, também conhecido como *Slump Test*, foi realizado com o objetivo de avaliar a consistência e a trabalhabilidade dos concretos no estado fresco, de acordo com as diretrizes estabelecidas na norma ABNT NBR 16889 (2020). Após a conclusão da mistura na betoneira, uma amostra do concreto era coletada e imediatamente submetida ao ensaio. O molde tronco-cônico foi preenchido em duas camadas de volumes aproximadamente iguais, sendo cada camada adensada com 25 golpes de uma haste metálica, distribuídos uniformemente sobre a superfície da mistura, após o adensamento da segunda

camada e o nivelamento da superfície superior, o molde era removido verticalmente, sem movimentos laterais, e o abatimento medido em milímetros.

Quando o valor obtido não atendia à consistência desejada, a mistura retornava à betoneira, em seguida o concreto era novamente homogeneizado e um novo ensaio de abatimento era realizado. Esse procedimento foi repetido até que o abatimento se mantivesse dentro da faixa especificada para a classe S160, conforme a ABNT NBR 8953 (2015).

Durante a execução dos ensaios, observou-se que os concretos contendo agregado reciclado de porcelanato (ARP), apresentaram maior dificuldade de mistura e adensamento em relação ao concreto de referência. Esse comportamento pode estar relacionado à angularidade e ao formato irregular das partículas do resíduo, características que tendem a aumentar o atrito interno entre os grãos e reduzindo a mobilidade da mistura.

Os valores finais de abatimento do tronco de cone, foram mantidos dentro do limite estabelecido para a classe de consistência S160 (160 a 220 mm), indicando que a trabalhabilidade foi preservada, independentemente do percentual de substituição do agregado gráúdo natural por agregado reciclado de porcelanato, sendo o uso do aditivo superplastificante, importante para o controle da consistência e para a obtenção de condições adequadas de moldagem e adensamento dos corpos de prova.

4.5.2 Resistência à compressão axial – Estado Endurecido

Para o ensaio de resistência à compressão axial, foram submetidos um total de 36 corpos de prova, 3 repetições por idade (3, 7 e 28 dias), sendo 3 repetições para cada dosagem de substituição (0, 25, 50 e 75%), antes da realização dos ensaios de ruptura, as bases dos corpos de prova passaram por um processo de retificação, feito de acordo com o estabelecido na norma ABNT NBR 5738 (2015), que consiste na remoção por meios mecânicos, de uma fina camada de material, para proporcionar uma superfície lisa e livre de ondulações, de modo a não restar pontos, que possam interferir na resistência potencial do concreto. Esse processo foi aplicado em todos os corpos de provas utilizados nos demais ensaios do estudo. O equipamento empregado, é denominado capeador (ABNT NBR 5738, 2015).

Os valores de resistência a compressão dos concretos, foram determinados de acordo com a norma ABNT NBR 5739 (2018), os corpos de prova foram rompidos na data idade especificada, com as tolerâncias de tempo descritas na Tabela 12.

Tabela 12 - Tolerância para idade de ensaio.

Idade de ensaio	Tolerância permitida (h)
3 dias	2
7 dias	6
28 dias	24

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 5739 (2018).

O equipamento utilizado para o ensaio, é composto de dois pratos de aço, um superior e outro inferior, com a finalidade de auxiliar na centralização e acomodação do corpo de prova, durante todo o transcorrer do ensaio, conforme previsto na referida norma. O carregamento de ensaio será aplicado continuamente e sem choques, com a velocidade de carregamento de $0,45 \pm 15$ MPa/s, durante todo o procedimento e só deve cessar quando houver uma queda de força que indique a ruptura (ABNT NBR 5739, 2018).

Os resultados foram apresentados, segundo os cálculos de resistência à compressão, expressos na fórmula a seguir, a partir da Equação 3.

$$f_c = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (3)$$

Onde:

f_c é a resistência a compressão, em megapascal (MPa);

F é a força máxima alavancada, em Newtons (N);

D é o diâmetro do corpo de prova em milímetros (mm).

4.5.3 Resistência à tração por compressão diametral – Estado Endurecido

Para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral, foram submetidos um total de 24 corpos de prova, 3 repetições por idade (7 e 28 dias), sendo 3 repetições para cada dosagem de substituição (0, 25, 50 e 75%), antes da realização dos ensaios de ruptura, as bases dos corpos de prova passaram por um processo de retificação, feito de acordo com o estabelecido na norma ABNT NBR 5738 (2015).

O ensaio realizou-se, seguindo as diretrizes da norma ABNT NBR 7222 (2011), o qual o corpo de prova foi colocado, de forma que o plano axial, definido por geratrizes diametralmente opostas, que deverão receber o carregamento, coincida com o eixo de aplicação de carga. Duas tiras de chapa dura de madeira, são colocadas entre os pratos da máquina e o

corpo de prova, de maneira a mantê-lo posicionado, para receber a carga que foi aplicada continuamente e sem choques, com crescimento constante da tensão de tração, a uma velocidade de $0,05 \pm 0,02$ MPa/s, até a ruptura do corpo de prova.

Os valores obtidos, foram incluídos na expressão a seguir, para determinar a resistência a tração por compressão diametral, utilizando a Equação 4.

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi d \ell} \quad (4)$$

Onde:

$f_{ct,sp}$ é a resistência à tração por compressão diametral, expressa com três algarismos significativos, em megapascal (MPa);

F é a força máxima obtida no ensaio, expresso em Newtons (N);

d é o diâmetro do corpo de prova, expresso em milímetros (mm);

ℓ é o comprimento do corpo de prova, expresso em milímetros (mm).

4.5.4 Absorção de água por capilaridade e altura capilar – Estado Endurecido

A norma ABNT NBR 9779 (2012), estabelece o método para determinar a absorção de água em concreto endurecido através da ascensão capilar. Para este ensaio foram submetidos um total de 12 corpos de prova, para a idade de 28 dias, sendo 3 repetições para cada dosagem de substituição (0, 25, 50 e 75%), as bases dos corpos de prova já haviam passado pelo processo de retificação, executado de acordo com o estabelecido na norma ABNT NBR 5738 (2015).

Após a verificação que os corpos de prova, estavam isentos de óleo ou qualquer material aderido durante a moldagem, procedeu-se a pesagem das amostras secas ao ar, em seguida foram colocadas na estufa, à temperatura $105 \pm 5^\circ\text{C}$, até a constância da massa, por um período de 2 horas de permanência e retiradas posteriormente, aguardou-se até o seu resfriamento, para determinar a sua massa seca (m_s). A etapa seguinte, consistiu em colocar os corpos de prova em um recipiente, posicionados sobre um suporte, de maneira que a água adicionada, permanecesse a um nível constante de 5 ± 1 mm acima da sua face inferior, evitando a molhagem de outras superfícies, conforme procedimento determinado pela norma ABNT NBR 9779 (2012).

Durante o ensaio, foram realizadas as pesagens determinando a massa saturada (m_{sat}) dos corpos de prova com 3, 6, 24, 48 e 72h, contadas a partir da colocação destes, em contato com a água (ABNT NBR 9779, 2012).

Com os resultados apurados durante o ensaio, a absorção de água por capilaridade foi calculada por meio da seguinte Equação 5:

$$C = \frac{msat - ms}{S} \quad (5)$$

Onde:

C é absorção de água por capilaridade, em gramas por centímetro quadrado (g/cm^2);

$msat$ é a massa do corpo de prova que permanece com uma das faces em contato com a água durante um período de tempo especificado, em gramas (g);

ms é a massa do corpo de prova seco, assim que este atingir a temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, em gramas (g);

S é a área da seção transversal, em centímetro quadrado (cm^2).

A avaliação da altura capilar foi realizada por meio da medição direta da altura atingida pela água na superfície externa dos corpos de prova submetidos ao ensaio de absorção por capilaridade. Para cada corpo de prova, foram efetuadas cinco medições distribuídas ao de todo o contorno, com o objetivo de reduzir a influência de possíveis irregularidades locais e obter um valor representativo da altura atingida pela água. As leituras foram realizadas após 24 e 48 horas de ensaio, sendo posteriormente calculada a média das cinco determinações para cada corpo de prova.

4.5.5 Método de análise 2D para avaliação da distribuição do ARP – Estado Endurecido

A análise da distribuição dos agregados reciclados de porcelanato (ARP) no concreto, foi realizada por meio de um método de análise de imagens bidimensional (2D), aplicado às seções transversais dos corpos de prova. Esse procedimento permitiu avaliar a presença, a distribuição e a proporção relativa dos agregados no interior da matriz cimentícia. A metodologia empregada foi adaptada de procedimentos descritos na literatura, com base nos estudos desenvolvidos por Jianguo *et al.* (2016), Leite e Monteiro (2016), Hoong *et al.* (2020) e Wang *et al.* (2023).

Os corpos de prova utilizados nesta etapa, foram os mesmos submetidos ao ensaio de tração por compressão diametral. Após o ensaio, os corpos de prova foram divididos por ruptura, de modo a preservar a textura da superfície fraturada, cuja rugosidade foi relevante para a investigação da microestrutura do concreto, semelhante ao procedimento adotado por

Jianguo *et al.* (2016), em seus experimentos. Em seguida, as superfícies resultantes foram fotografadas com o auxílio de uma câmera digital, com resolução de 2160×3840 pixels, sob condições de iluminação uniforme, de forma a minimizar variações de contraste nas imagens.

Com o objetivo de melhorar a qualidade da análise, foi realizado um recorte nas imagens originais, selecionando uma região representativa, da seção transversal do corpo de prova, esse procedimento permitiu reduzir interferências associadas às bordas irregulares das superfícies fraturadas, proporcionando maior uniformidade na análise e melhor definição das fases constituintes. O corpo de prova após ruptura e a região selecionada para análise são representadas na Figura 13.

Figura 13 - Imagens da região analisada:(a) imagem do corpo de prova após ruptura (b) imagem da área selecionada



(a) Corpo de prova após ruptura

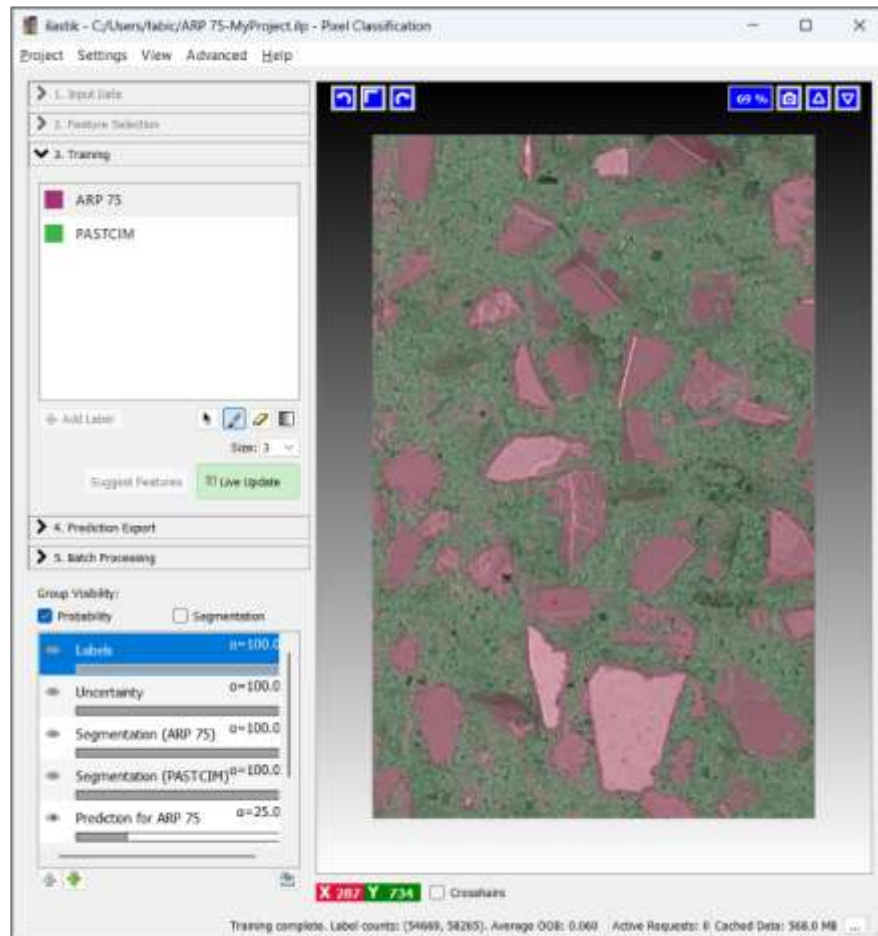


(b) Imagem da área selecionada

Fonte: Autora (2026)

As imagens recortadas foram inicialmente processadas no *software Ilastik*, que utiliza técnicas de aprendizado supervisionado para classificação de pixels. Nesse processo, foi selecionado por cores, os dois materiais, agregado reciclado de porcelanato (ARP) e a matriz cimentícia, permitindo ao software reconhecer padrões de textura e intensidade de cinza. A partir desse treinamento, o *Ilastik* gerou uma segmentação da imagem, distinguindo as regiões de interesse com base nas características previamente definidas. Conforme apresentado na Figura 14.

Figura 14 - Imagem segmentada no *software Ilastik*.



Fonte: Autora (2026).

Posteriormente, as imagens segmentadas foram exportadas e analisadas no *software ImageJ*, no qual foi realizada a conversão para imagem binária. Nessa etapa, as partículas de agregado foram representadas na cor branca, enquanto a pasta de cimento foi representada em preto. A separação entre as fases baseou-se nos valores de intensidade de cinza, uma vez que agregados e matriz cimentícia apresentam diferentes respostas à reflexão da luz, resultando em contrastes que permitem sua distinção. O resultado desse processo está representado na Figura 15.

Figura 15 - Imagem binarizada no *software ImageJ*



Fonte: Autora (2026).

Após a binarização, foram aplicadas ferramentas de processamento para garantir a correta identificação das fases, incluindo ajustes de limiar (*threshold*) e operações binárias. Em seguida, procedeu-se à quantificação da fração de área ocupada pelos agregados, por meio do cálculo da porcentagem de área (*area fraction*), fornecida pelo próprio *software*. Esse parâmetro foi adotado como medida representativa da presença relativa do ARP nas seções analisadas, cujos resultados são apresentados conforme a Figura 16, sendo o item 1, correspondente ao percentual do ARP na área analisada e o item 2, o percentual da pasta de cimento e o agregado gráúdo natural

Figura 16 - Fração de área fornecida pelo *software ImageJ*.

	Area	%Area
1	748200	35.592
2	748200	64.408

Fonte: Autora (2026).

Segundo Abbas *et al.* (2009) e Stroeven *et al.* (2001), a variabilidade de cor e textura dos materiais constituintes do concreto, especialmente no caso do agregado natural, pode apresentar limitações durante o processo de segmentação. A similaridade visual entre algumas regiões da pasta cimentícia e dos agregados pode dificultar a distinção precisa entre as fases, tornando necessária a verificação visual dos resultados obtidos. Dessa forma, a análise combinou o reconhecimento automatizado com avaliação crítica das imagens, visando maior confiabilidade dos dados.

A análise visual permitiu identificar aspectos como diferenças de coloração, contraste entre agregado e pasta cimentícia, forma e dimensão dos grãos expostos, além da homogeneidade da mistura e da interface entre os constituintes. Os registros dessa análise, servem como base complementar para a interpretação dos resultados quantitativos, possibilitando sua correlação com os ensaios de resistência mecânica e absorção de água.

4.5.6 Adsorção e dessorção de nitrogênio pelo método de BET – Estado Endurecido

O método Brunauer–Emmett–Teller (BET), desenvolvido por Brunauer, Emmett e Teller (1938), foi utilizado para a caracterização da área superficial específica e da estrutura porosa dos materiais analisados. A técnica baseia-se na adsorção física de moléculas de nitrogênio (N_2) sobre a superfície do material, sob condições controladas de temperatura e pressão, permitindo a obtenção de informações relacionadas à área superficial específica, volume total de poros e distribuição de tamanho de poros.

A área superficial específica corresponde à razão entre a área total acessível do material e sua massa, sendo expressa em m^2/g . Segundo Cessa *et al.* (2009), essa propriedade engloba tanto as superfícies externas das partículas quanto as superfícies internas acessíveis ao adsorvato, sendo influenciada por fatores como forma das partículas, distribuição granulométrica, rugosidade superficial e porosidade. Em materiais cimentícios e agregados, esses parâmetros estão diretamente relacionados à interação entre os constituintes, à absorção de fluidos e ao desempenho físico e mecânico dos compósitos.

A determinação da área superficial específica é realizada a partir das isotermas de adsorção e dessorção de nitrogênio. De acordo com Perazzini *et al.* (2015), as isotermas representam o equilíbrio entre a fase gasosa e a superfície sólida durante o processo de adsorção. Com base no modelo de adsorção multicamada proposto por Brunauer, Emmett e Teller (BET), é possível determinar a área superficial específica do material, enquanto a análise das isotermas permite avaliar características da estrutura porosa e quantificar o volume de gás adsorvido nos

poros (Almeida e Sichieri, 2006).

De acordo com a classificação da União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC), os poros podem ser classificados em microporos (diâmetro inferior a 2 nm), mesoporos (entre 2 e 50 nm) e macroporos (superiores a 50 nm). A distribuição de tamanho de poros foi determinada pelo método de Barrett, Joyner e Halenda (BJH), desenvolvido em 1951, sendo utilizado para caracterização de mesoporos a partir dos ramos de adsorção e dessorção das isotermas. O método BJH correlaciona o volume de gás adsorvido em função da pressão relativa (P/P_0), permitindo estimar o volume e a distribuição dos poros presentes nos materiais analisados.

Nesta pesquisa, os ensaios foram realizados em analisador de área superficial e porosimetria Quantachrome Instruments, modelo NOVA versão 11.0. Para o ensaio de BET foram utilizadas amostras lamelares indeformadas com diâmetro menor que 7,5mm. As amostras foram submetidas ao processo de desgaseificação sob atmosfera controlada, a 150°C durante 20 horas, com a finalidade de remover umidade e demais espécies adsorvidas na superfície dos materiais. Posteriormente, foram obtidas isotermas de adsorção e dessorção de nitrogênio a 77,3 K. A área superficial específica foi determinada pelo método BET, enquanto a caracterização da estrutura porosa, utilizada na discussão dos resultados desta pesquisa, foi realizada por meio do método BJH, permitindo avaliar o volume e a distribuição de tamanho dos poros presentes nos materiais analisados.

A análise BET foi aplicada ao agregado gráúdo natural, ao agregado reciclado de porcelanato (ARP) e a argamassa do concreto. Os resultados obtidos foram utilizados como ferramenta complementar para a interpretação das propriedades físicas e mecânicas observadas nos concretos produzidos, permitindo correlacionar características microestruturais dos materiais com os resultados dos ensaios de resistência mecânica e absorção de água.

4.5.7 Análise dos dados

Os resultados obtidos nos ensaios físicos e mecânicos, foram avaliados por meio de análise descritiva e estatística, sendo apresentados em tabelas e gráficos contendo valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação. Para avaliação da significância entre os traços analisados, foi empregada análise de variância (ANOVA), com 95% de confiança. A apresentação e discussão desses resultados são abordadas no capítulo seguinte.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados para a avaliação das propriedades dos concretos produzidos, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, considerando as diferentes composições estudadas. Os resultados experimentais são apresentados de forma sistematizada, por meio de tabelas e gráficos, visando facilitar sua visualização e interpretação.

A análise tem como foco a comparação entre o concreto de referência e os concretos produzidos com substituição parcial do agregado gráúdo natural por agregado reciclado de porcelanato, tendo como base os critérios estabelecidos pelas normas técnicas vigentes e os resultados reportados na literatura.

A apresentação e a discussão dos resultados seguem as etapas definidas no programa experimental, permitindo avaliar o efeito da incorporação do agregado reciclado no comportamento do concreto e sua viabilidade técnica de aplicação.

5.1 AVALIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS COMPOSIÇÕES

A análise da distribuição granulométrica das composições teve como objetivo comparar as curvas granulométricas das misturas produzidas com diferentes teores de substituição do agregado gráúdo natural por agregado reciclado de porcelanato (ARP), verificando sua conformidade com os limites estabelecidos pela ABNT NBR 17054 (2022).

Observa-se comportamento semelhante entre as composições, com distribuição granulométrica contínua e curvas próximas entre si ao longo das faixas analisadas. As misturas contendo ARP apresentaram pequena aproximação e pontual ultrapassagem do limite superior, na faixa correspondente à peneira de 9,5 mm. Entretanto, após essa região as curvas voltam a acompanhar os limites estabelecidos em norma, indicando que a incorporação do agregado reciclado, não promoveu alterações relevantes na distribuição granulométrica, demonstrando compatibilidade entre os agregados utilizados.

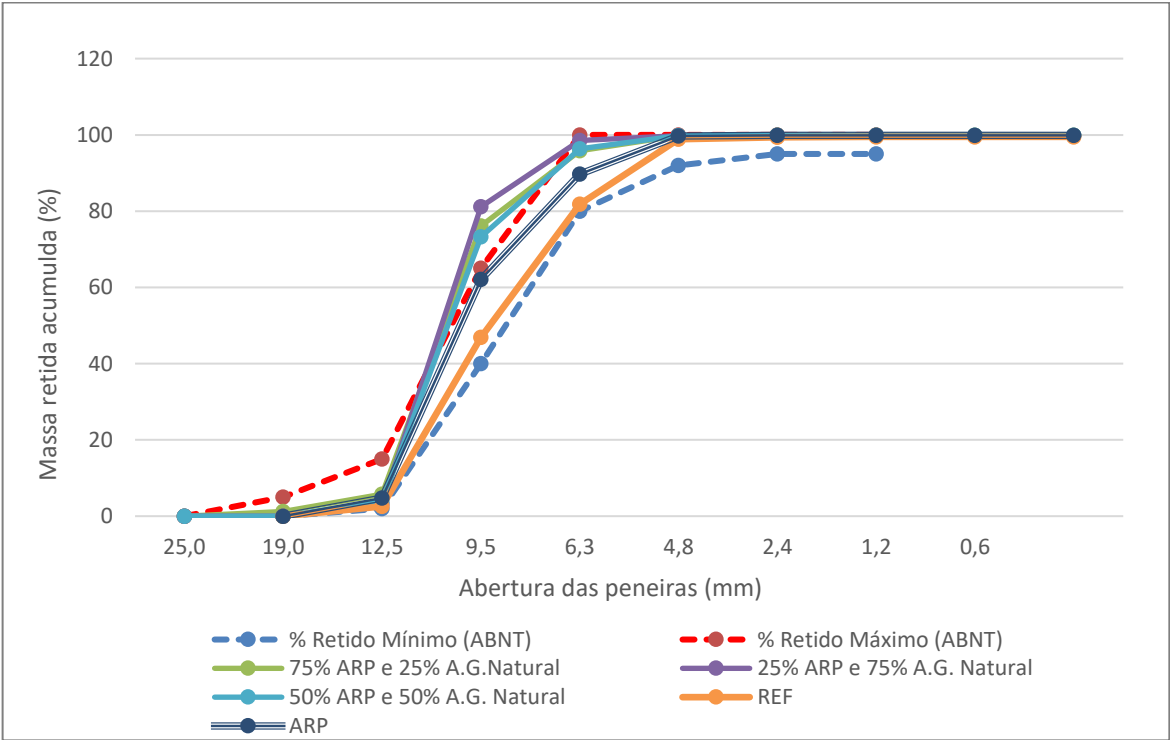
Os resultados do ensaio de granulometria, realizado para as composições com diferentes teores de substituição, do agregado gráúdo natural por agregado reciclado de porcelanato (ARP), estão apresentados na Tabela 13. Com base nesses resultados, foram traçadas as curvas granulométricas das misturas, representadas na Figura 17.

Tabela 13 - Granulometria das composições do agregado reciclado de porcelanato (ARP).

Abertura das Peneiras (mm)	Massa inicial seca =1000 g				
	% Retido médio acumulado				
	REF	ARP 25	ARP 50	ARP 75	ARP
25,0	0	0	0	1	0
19,0	2	3	4	5	5
12,5	46	81	73	75	62
9,5	81	98	96	95	89
6,3	98	99	99	99	99
4,8	99	99	99	99	99
2,4	99	99	99	99	99
1,2	99	99	99	99	99
0,6	99	99	99	99	99
0,3	99	99	99	99	99
0,15	99	99	99	99	99
Fundo	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Módulo de finura	6,77	6,95	6,94	6,94	6,88
Diâmetro máximo (mm)	19	19	19	19	19

Fonte: Autora (2025).

Figura 17 - Curva granulométrica das composições com ARP.



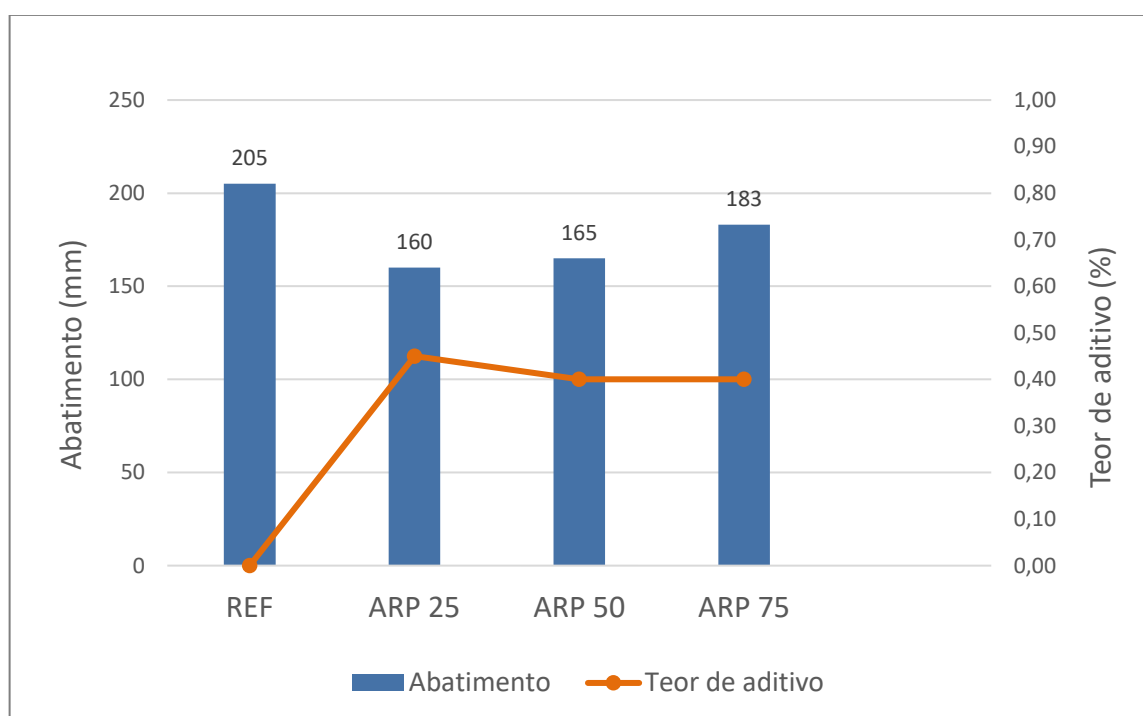
Fonte: Autora (2025).

5.2 RESULTADOS DO ESTADO FRESCO DO CONCRETO

Os dados obtidos no estado fresco do concreto evidenciam o comportamento das misturas produzidas, com diferentes teores de substituição do agregado gráúdo natural por agregado reciclado de porcelanato, com ênfase na manutenção da trabalhabilidade ao longo das séries ensaiadas, buscando minimizar alterações nas propriedades do concreto, especialmente no que se refere à consistência.

Os teores de aditivo apresentados correspondem aos valores finais empregados em cada composição, sendo que para o concreto com 25% de substituição, o valor de 0,45% contempla a correção pontual realizada para obtenção da consistência especificada. Os resultados do abatimento dos concretos estudados bem como os respectivos teores finais de aditivo, estão apresentados na Figura 18, conforme os parâmetros definidos para a classe S160, estabelecidos na ABNT NBR 8953 (2015).

Figura 18- Resultado do abatimento dos concretos



Fonte: Autora (2025).

Os valores de abatimento do tronco de cone foram mantidos próximos ao limite estabelecido para a classe de consistência S160, indicando que a trabalhabilidade se manteve, independentemente do percentual de substituição adotado, sendo o uso do aditivo superplastificante, fator importante para o controle do abatimento observado.

Em concretos produzidos com agregados reciclados, tanto graúdos quanto miúdos, a utilização de aditivos plastificantes ou superplastificantes torna-se necessária, para compensar os efeitos da textura superficial mais rugosa desses materiais (Leite, 2001).

Segundo Gritsada e Sittisak (2023), o resíduo de porcelanato apresenta superfície vítrea e é constituído por materiais argilosos com maior capacidade de absorção de água, fatores que influenciaram diretamente o comportamento da mistura no estado fresco, o autor destaca que o aumento do atrito entre as partículas cerâmicas, quando comparadas aos agregados graúdos naturais, resulta em maior número de pontos de contato, contribuindo para a redução da fluidez do concreto.

Observações similares foram relatadas em pesquisas anteriores, como as de Rashid *et al.* (2017), Meena *et al.* (2022) e Suchithra *et al.* (2022), nas quais a presença de resíduos cerâmicos impactou negativamente a trabalhabilidade, sendo esse efeito associado, principalmente, à porosidade, à angularidade e à textura superficial dos agregados.

Em seus estudos, Hakan (2016), realizou a substituição de 100% do agregado graúdo natural, por agregado graúdo de porcelanato e aponta que as superfícies vitrificadas dos agregados cerâmicos britados, podem enfraquecer a ligação entre a matriz cimentícia e os agregados, afetando não apenas a trabalhabilidade, mas também o desempenho global do concreto.

De forma semelhante, Rajat *et al.* (2022) atribuíram a redução da trabalhabilidade, ao aumento da rugosidade superficial e da angularidade das partículas cerâmicas, ressaltando a necessidade do uso de aditivos químicos para atingir a consistência desejada. Kou e Poon (2012), também observaram que a incorporação excessiva de resíduos cerâmicos pode comprometer a coesão entre a pasta de cimento e os agregados, reduzindo a trabalhabilidade e favorecendo a formação de vazios durante a compactação do concreto.

Em contrapartida, autores constataram, que a incorporação de resíduos cerâmicos, não prejudicou a trabalhabilidade do concreto, havendo inclusive registros de acréscimo, nos valores de abatimento. Paul *et al.* (2023) observaram que o abatimento do concreto aumentou, à medida que o teor de resíduos de revestimento cerâmico foi elevado nas misturas, atribuindo esse comportamento à superfície mais lisa do porcelanato em comparação aos agregados naturais.

Resultados semelhantes foram obtidos por Alshahwany (2024) e Ngayakamo (2025), que verificaram aumento progressivo dos valores de abatimento com o acréscimo de resíduos cerâmicos como agregado graúdo. Segundo os autores, o formato das partículas e a textura superficial dos resíduos favoreceram um melhor arranjo e compactação da mistura,

proporcionando maior facilidade de fluxo sem ocorrência de segregação. Além disso, as superfícies mais lisas e a menor capacidade de absorção de água das partículas cerâmicas contribuíram para a redução do atrito interno e para o aumento da quantidade de água livre na mistura, resultando em melhor trabalhabilidade do concreto.

A análise conjunta da literatura, evidencia que os efeitos da incorporação de resíduos cerâmicos, na trabalhabilidade do concreto não são unívocos. Enquanto alguns estudos relatam redução da trabalhabilidade em função da maior angularidade e rugosidade das partículas, outros apontam manutenção ou melhora desse comportamento, associado às características físicas do resíduo utilizado. Essas divergências indicam que o desempenho do concreto no estado fresco depende não apenas da presença do resíduo, mas também de sua origem, processamento e interação com a pasta cimentícia, bem como do uso de aditivos químicos

Nesse contexto, os resultados obtidos neste estudo mostraram comportamento compatível com a literatura, uma vez que a trabalhabilidade foi mantida mesmo com elevados teores de substituição do agregado gráúdo natural por resíduo de porcelanato, mediante o uso controlado de aditivo superplastificante

5.3 RESULTADOS DO ESTADO ENDURECIDO DO CONCRETO

Neste item são apresentados os resultados dos ensaios realizados para avaliação das propriedades dos concretos no estado endurecido, incluindo resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e absorção de água.

5.3.1 Resistência à compressão

Os ensaios foram realizados conforme as diretrizes estabelecidas pela ABNT NBR 5739 (2018), e os resultados obtidos para as idades de 3, 7 e 28 dias estão apresentados por meio dos valores médios de resistência, desvios-padrão e coeficiente de variação (CV), consolidados na Tabela 14.

Tabela 14 - Resultados médios de resistência à compressão nas diferentes idades.

Traço	Idade (dias)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)
REF	3	9,27	0,56	6,0
	7	11,59	0,26	2,3
	28	17,38	2,36	13,6
ARP 25	3	8,85	0,65	7,4
	7	10,95	0,62	5,6
	28	15,35	0,69	4,5
ARP 50	3	11,04	0,42	3,8
	7	11,97	1,34	11,2
	28	17,78	0,66	3,7
ARP 75	3	8,28	0,83	10,0
	7	11,72	0,78	6,6
	28	16,01	0,99	6,2

Onde: REF=Referência; (ARP) = Agregado Reciclado de Porcelanato;
CV=Coefficiente deVariação.

Fonte: Autora (2025).

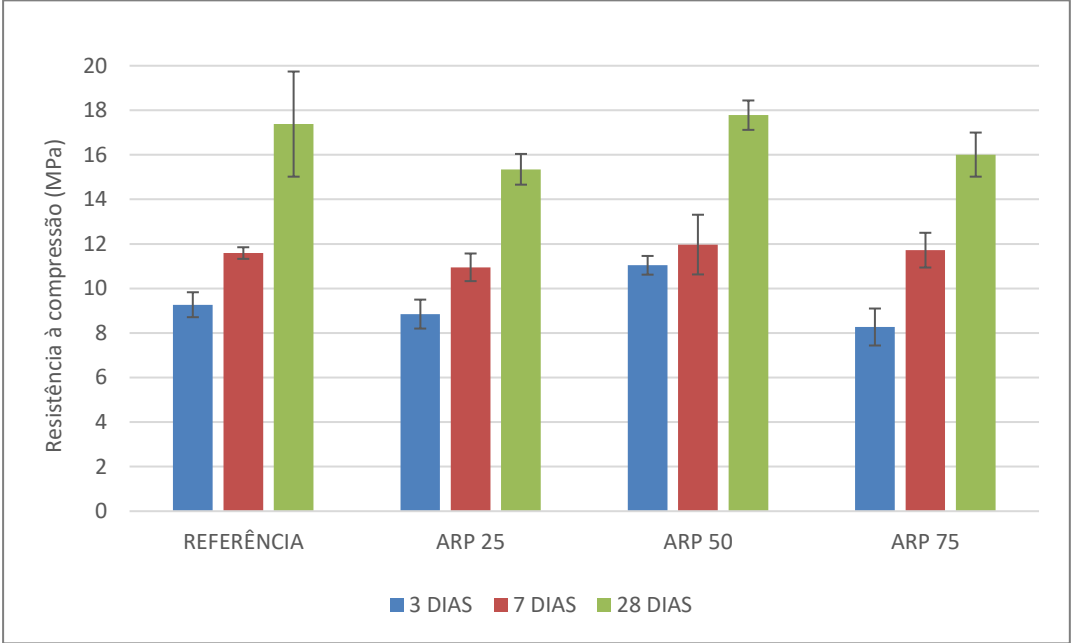
Os resultados dos ensaios, apresentaram baixos índices de coeficiente de variação (CV), a maioria dos traços manteve valores de CV inferiores a 10%, validando a uniformidade dos procedimentos adotados, segundo os critérios de aceitabilidade estabelecidos pela NBR 12655 (ABNT, 2022). O concreto com 50% de substituição por agregado reciclado de porcelanato (ARP 50), destacou-se por apresentar elevada estabilidade, com coeficiente de variação de apenas 3,7% aos 28 dias. Observou-se, contudo, uma oscilação pontual aos 7 dias, com CV de 11,2%, possivelmente associada à heterogeneidade característica do agregado reciclado em idades iniciais.

O traço com 25% de substituição (ARP 25), apresentou variabilidade controlada e valores de CV compatíveis com os limites recomendados para ensaios laboratoriais, indicando que a introdução inicial do resíduo não comprometeu a reprodutibilidade dos resultados. Da mesma forma, o traço com maior teor de substituição (ARP 75) manteve a precisão estatística, apresentando coeficientes de variação estáveis que indicam a viabilidade de produção, mesmo com elevadas concentrações de resíduo de porcelanato. Já o concreto de referência apresentou CV de 13,6% aos 28 dias, embora mais elevado, ainda dentro do limite máximo de aceitabilidade de 15% para esse tipo de ensaio.

A evolução da resistência ao longo do tempo, bem como a comparação entre os diferentes traços e os resultados médios, estão representados na Figura 19. Esta análise aponta

que todos os concretos, apresentaram ganho progressivo de resistência, demonstrando a compatibilidade entre a matriz cimentícia e o resíduo de porcelanato, utilizado como agregado graúdo reciclado.

Figura 19 - Resultado da resistência à compressão nas idades de 3, 7 e 28 dias.



Fonte: Autora (2025).

Os resultados de resistência à compressão foram submetidos à análise de variância (ANOVA) para cada idade de cura, sendo os principais parâmetros estatísticos apresentados na Tabela 15. As tabelas completas da ANOVA encontram-se no Apêndice A deste trabalho.

Tabela 15 - ANOVA dos resultados de resistência à compressão.

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	Valor-P	Resultado
3 Dias	12,8259	3	4,2753	10,42756	0,0038722	Significativo
7 Dias	1,6918	3	0,563933	0,795084	0,53021	Não significativo
28 Dias	11,77207	3	3,924022	2,085951	0,180492	Não significativo

Onde: SQ = soma quadrada; GL = grau de liberdade; MQ = média quadrada

Fonte: Autora (2025).

A análise de variância (ANOVA) indicou que, aos 3 dias, houve diferença significativa entre os traços ($p < 0,05$). Contudo, aos 7 e 28 dias, os valores de p foram superiores a 0,05, indicando que as diferenças observadas entre as médias não são estatisticamente significativas ao nível de confiança de 95%. Esses resultados sugerem que, embora o teor de substituição

influencie o ganho inicial de resistência, o comportamento mecânico aos 28 dias tende à equivalência estatística entre os traços avaliados.

O concreto ARP 50 destacou-se por apresentar o maior ganho de resistência inicial, atingindo aproximadamente 62,1% de sua resistência final já aos 3 dias, superando o concreto de referência, que alcançou 53,3% no mesmo período. Esse comportamento sugere que a substituição de 50% do agregado gráudo natural por agregado reciclado de porcelanato, não comprometeu o desenvolvimento da resistência nas primeiras idades, evidenciando desempenho inicial superior ao concreto de referência.

Aos 28 dias, o concreto com 50% de substituição apresentou resistência média à compressão de 17,78 MPa, valor ligeiramente superior ao obtido pelo concreto de referência (17,38 MPa). Entretanto, conforme demonstrado pela análise de variância (ANOVA), essa diferença não foi estatisticamente significativa ($p > 0,05$). Essa tendência pode estar relacionada ao efeito de preenchimento, descrito por grigoli e helene (2001) em seus estudos, no qual a morfologia e a distribuição granulométrica das partículas de porcelanato favorecem uma melhor ocupação dos vazios da matriz cimentícia, contribuindo para uma estrutura mais compacta e com maior capacidade de carga. Resultados semelhantes foram reportados por Derrick; Scott e Francis (2016), os quais observaram variações mínimas na resistência à compressão para substituições de até 50%.

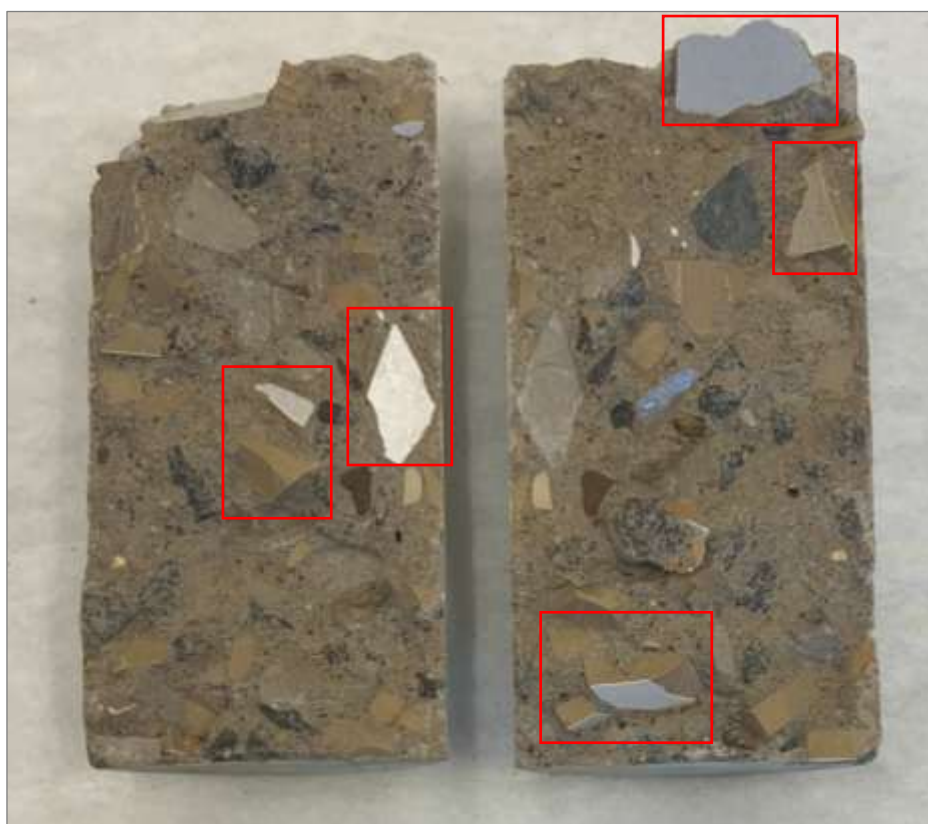
No traço ARP 25, observou-se um comportamento intermediário em relação aos demais concretos avaliados, atingindo resistência à compressão de 15,35 MPa aos 28 dias. Embora tenha apresentado um ganho de resistência inicial superior ao concreto de referência, alcançando 57,6% da resistência final aos 3 dias, o seu desempenho aos 28 dias foi inferior aos concretos com 0% e 50% de substituição do agregado gráudo natural.

Comparativamente, o acréscimo no desempenho, observado entre os traços ARP 25 e ARP 50 indica a existência de um ponto de equilíbrio no empacotamento das partículas. Enquanto no ARP 25 o resíduo demonstra, atuar predominantemente como um substituto do agregado natural, no ARP 50 ele passa a contribuir de forma mais efetiva para a otimização da matriz cimentícia, promovendo melhor preenchimento dos vazios e justificando o incremento de resistência mecânica, mesmo com uma dosagem de aditivo mais equilibrada.

Mesmo com elevados teores de substituição, como no traço ARP 75, o concreto apresentou resistência média de 16,01 MPa, evidenciando um desempenho satisfatório. A discreta redução em relação ao traço ARP 50 pode estar relacionada a aspectos microestruturais, em especial à Zona de Transição Interfacial (ZTI). Observações visuais realizadas após a ruptura dos corpos de prova, indicaram que a adesão entre a pasta de cimento e a superfície

vitrificada do porcelanato tende a ser inferior àquela observada com o agregado graúdo natural. Segundo Zhong e Wille (2018), essa característica pode facilitar a propagação de microfissuras quando o volume de resíduo incorporado é elevado. A Figura 20 apresenta o registro da superfície de ruptura de um corpo de prova contendo agregado reciclado de porcelanato (em destaque), do traço ARP 50. O ganho de resistência por período de cura é apresentado na Tabela 16.

Figura 20 - Imagem da região de contato entre a pasta de cimento e os agregados após a ruptura do corpo de prova.



Fonte: Autora (2026).

Tabela 16 - Evolução da resistência à compressão por período.

Traço	% da Resistência Final (3dias)	% da Resistência final (7 dias)	Ganho 3 dias-7 dias (%)	Ganho 7 dias-28 dias (%)
REF	53,3	66,7	25,1	49,9
ARP 25	57,6	71,3	23,8	40,2
ARP 50	62,1	67,3	8,4	48,5
ARP 75	51,7	73,2	41,7	36,6

Fonte: Autora (2025).

Nota: A resistência final refere-se aos resultados obtidos aos 28 dias de cura.

Os resultados apresentados na Tabela 16, demonstram diferenças no comportamento de endurecimento das misturas. O traço ARP 50 apresentou aumento da resistência inicial, partindo de um patamar elevado aos 3 dias (62,1% de sua resistência final). Embora seu incremento entre 3 e 7 dias tenha sido mais discreto (+ 8,4%), o traço demonstrou uma ótima manutenção da hidratação tardia, com um ganho de 48,5% no período subsequente, aproximando-se do desempenho da Referência (+ 49,9%).

No entanto, o traço ARP 75 exibiu um início mais lento, apresentou o maior salto de resistência entre 3 e 7 dias (+ 41,7%). Esse fenômeno sugere que a elevada concentração de resíduo pode causar um efeito de retardo inicial na pega, que é compensado rapidamente após a primeira semana. Contudo, o ganho tardio (7 a 28 dias) de 36,6% foi o menor entre todos os grupos, reforçando a hipótese de que a saturação de agregados reciclados, de face vitrificada acaba por limitar o desenvolvimento da resistência em idades avançadas.

5.3.2 Resistência à tração por compressão diametral

Os ensaios foram realizados nas idades de 7 e 28 dias, permitindo avaliar a influência do tempo de cura sobre o desempenho mecânico dos concretos, especialmente com teores maiores de substituição por Agregado Reciclado de Porcelanato (ARP). Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral evidenciam um comportamento crescente da resistência com o avanço da idade de cura para a maioria dos traços analisados. A Tabela 17 apresenta a síntese dos valores médios, desvios padrão e coeficientes de variação (CV) obtidos.

Tabela 17 - Resultados médios de resistência a tração nas diferentes idades.

Traço	Idade (dias)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)
REF	7	1,72	0,174	10,13
	28	2,23	0,589	26,42
ARP 25	7	1,53	0,216	14,15
	28	1,53	0,089	5,82
ARP 50	7	1,69	0,161	9,51
	28	1,98	0,372	18,80
ARP 75	7	1,76	0,519	29,56
	28	2,67	0,634	23,73

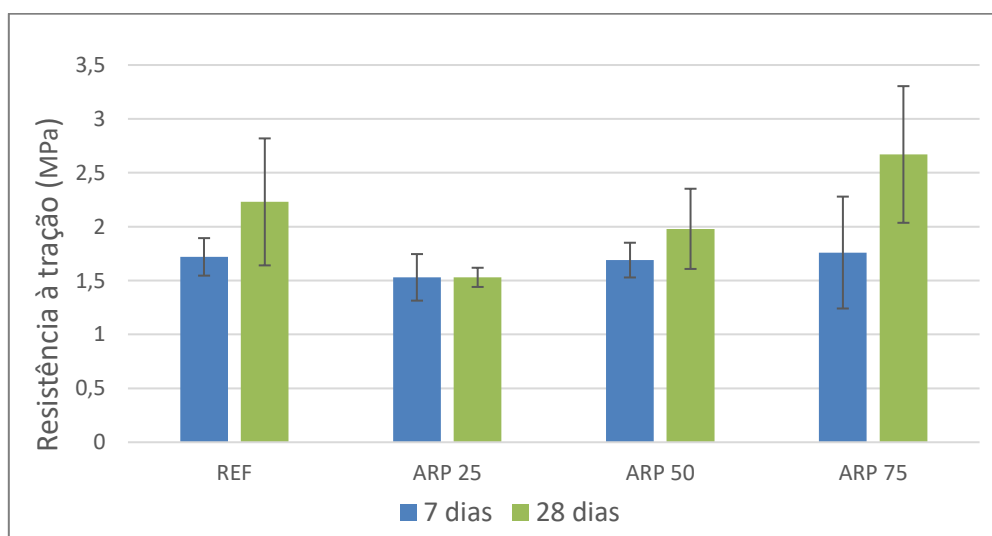
Onde: REF=Referência; (ARP) = Agregado Reciclado de Porcelanato;
CV=Coefficiente de Variação.

Fonte: Autora (2025).

Observa-se que, aos 7 dias, os traços REF (1,72 MPa) e ARP 75 (1,76 MPa) apresentaram desempenhos equivalentes, enquanto os teores de 25% e 50% registraram valores ligeiramente inferiores. Este equilíbrio inicial sugere que, mesmo em idades precoces, a presença do agregado de porcelanato não compromete a integridade da matriz frente aos esforços de tração.

Aos 28 dias, os dados apontam o potencial do resíduo: o traço ARP 75 atingiu a maior resistência média da pesquisa (2,67 MPa), superando o concreto de referência em aproximadamente 19,7%. Este resultado é particularmente relevante, pois contraria a tendência de perda de desempenho mecânico em altos teores de substituição com agregados reciclados. Em contrapartida, o traço ARP 25 apresentou estabilidade absoluta entre as idades de 7 e 28 dias, mantendo a média de 1,53 MPa, o que resultou no menor coeficiente de variação da série experimental (5,82%), indicando uma elevada homogeneidade interna do material. A Figura 21 apresenta os valores médios de resistência a tração por compressão diametral, bem como a evolução dos traços estudados nas idades de 7 e 28 dias.

Figura 21 - Resultados da resistência à tração nas idades de 7 e 28 dias.



Fonte: Autora (2025).

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral, foram submetidos à análise de variância (ANOVA) a um fator, considerando nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$), correspondente a 95% de confiabilidade. Os principais parâmetros estatísticos obtidos para as idades de 7 e 28 dias são apresentados na Tabela 18. As tabelas completas da ANOVA encontram-se no Apêndice B deste trabalho.

Tabela 18 - ANOVA dos resultados de resistência à tração.

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	Valor-P	Resultado
7 Dias	0,096167	3	0,032056	0,353067	0,78381	Não significativo
28 Dias	2,043225	3	0,681075	3,046293	0,092311	Não significativo

Onde: SQ = soma quadrada; GL = grau de liberdade; MQ = média quadrada

Fonte: Autora (2025).

Para ambas as idades analisadas, os valores de “p” obtidos foram superiores a 0,05, indicando ausência de diferença estatisticamente significativa entre os traços avaliados. Aos 7 dias, observou-se comportamento bastante homogêneo entre as misturas, enquanto aos 28 dias verificou-se uma discreta tendência de variação entre as médias, especialmente nos maiores teores de substituição. Entretanto, tais diferenças não foram suficientes para indicar influência significativa da incorporação do agregado reciclado de porcelanato, na resistência à tração dos concretos, no nível de confiança adotado.

Ao analisar a relação entre as resistências à compressão e à tração (Tabela 17), observa-se que o traço ARP 75 apresentou o maior índice de eficiência à tração, atingindo 16,67% da sua resistência à compressão, valor superior ao traço de REF (12,83%). Este fenômeno indica que, apesar das limitações de aderência citadas por autores como Paul *et al.* (2023) e Kpomwosa e Ehikhuenen (2017), o elevado teor de porcelanato, conferiu ao compósito uma maior capacidade de suportar esforços de tração diametral em relação à sua matriz de compressão. Além disso, destaca-se que o traço ARP 50 não apenas igualou o desempenho mecânico do REF, como apresentou uma homogeneidade superior, reduzindo o coeficiente de variação de 13,6% (REF) para 3,7%, por sua vez o traço ARP 25 demonstrou uma maior estabilidade, com um CV de 5,82%, valor bem inferior aos 26,42% observados no traço de referência. Os dados comparativos entre as resistências e sua variabilidade aos 28 dias, estão dispostos na Tabela 19.

Tabela 19 - Comparativo entre resistência à compressão e tração aos 28 dias.

Traço	Compressão (MPa)	CV Compressão (%)	Tração (MPa)	CV Tração (%)	Eficiência Tração/Compressão (%)
REF	17,38	13,60	2,23	26,42	12,83
ARP 25	15,35	4,5	1,53	5,82	9,96
ARP 50	17,78	3,7	1,98	18,80	11,13
ARP 75	16,01	6,2	2,67	23,73	16,67

Onde: CV= Coeficiente de Variação.

Fonte: Autora (2025).

Dessa forma, os dados consolidados, indicam que o comportamento mecânico à tração dos traços com resíduo de porcelanato, apresentou-se compatível com o concreto de referência. A variabilidade observada em alguns traços, embora presente, manteve-se dentro de parâmetros esperados para ensaios de tração diametral em concretos com agregados reciclados.

Na sequência, a análise da absorção por capilaridade permitirá avaliar o comportamento do compósito sob a perspectiva da durabilidade, complementando a interpretação dos resultados mecânicos obtidos.

5.3.3 Absorção de água por capilaridade e altura capilar

A absorção de água por capilaridade foi avaliada em corpos de prova com 28 dias de idade, por meio de pesagens realizadas nos intervalos de 3, 6, 24, 48 e 72 horas de contato com a água, permitindo acompanhar a evolução da absorção ao longo do tempo. A Tabela 20 apresenta os valores médios obtidos, bem como os respectivos desvios-padrão e coeficientes de variação (CV) dos concretos analisados.

Tabela 20 - Resultados médios do ensaio de absorção de água por capilaridade.

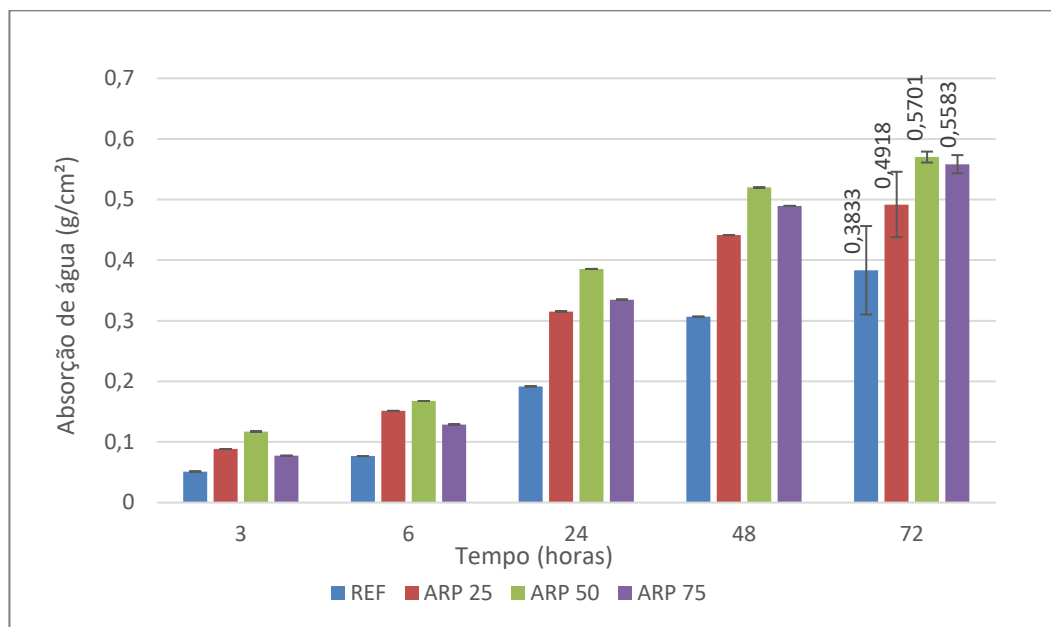
Traço	Absorção de água (g/cm ²)						
	Tempo (horas)					Desvio-padrão (72 h)	CV (%)
	3	6	24	48	72		
REF	0,0512	0,0767	0,1917	0,3067	0,3833	0,073	19,1
ARP 25	0,0883	0,1513	0,3153	0,4413	0,4918	0,054	11,0
ARP 50	0,1173	0,1676	0,3855	0,5198	0,5701	0,009	1,5
ARP 75	0,0773	0,1288	0,3349	0,4895	0,5583	0,015	2,6

Onde: CV= Coeficiente de Variação.

Fonte: Autora (2025).

A análise dos dados da Tabela 20, é complementada através da representação gráfica na Figura 22. demonstrando que a introdução do resíduo de porcelanato, ocasionou um aumento na absorção em relação ao concreto de referência. Entre os traços com substituição, o ARP 50 apresentou os maiores valores ao longo do ensaio, enquanto o traço ARP 75 demonstrou comportamento semelhante, porém com tendência de estabilização nas horas finais de análise.

Figura 22 - Absorção por capilaridade média por traço ao longo do tempo.



Fonte: Autora (2025).

Os resultados de absorção de água por capilaridade obtidos após 72 horas de ensaio foram submetidos à análise de variância (ANOVA) a um fator, adotando-se nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$), correspondente a 95% de confiabilidade, com o objetivo de verificar a existência de diferenças estatisticamente significativas entre os traços avaliados. Os principais parâmetros estatísticos obtidos são apresentados na Tabela 21, seus dados completos no Apêndice C.

Tabela 21- ANOVA dos resultados de absorção de água por capilaridade.

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	Valor-P	Resultado
72 horas	0,050525526	3	0,016842	11,27959	0,007037	Significativo

Onde: SQ = soma quadrada; GL = grau de liberdade; MQ = média quadrada

Fonte: Autora (2025).

A análise estatística indicou diferença significativa entre os traços avaliados para a absorção de água por capilaridade, uma vez que o valor de “p” obtido foi inferior ao nível de significância adotado ($p < 0,05$), considerando 95% de confiança. Esse resultado demonstra que a incorporação do agregado reciclado de porcelanato influenciou significativamente o comportamento de absorção dos concretos analisados.

A elevação da absorção capilar pode estar relacionada às características da zona de transição interfacial (ZTI) entre a pasta de cimento e o agregado de porcelanato. Paul *et al.* (

2023) observaram que a superfície lisa dos agregados cerâmicos, tende a reduzir a aderência entre a matriz cimentícia e o agregado, influenciando o comportamento da interface. Neste contexto, Mazzuco *et al.* (2021) destacam que as características da ZTI são influenciadas, entre outros fatores, pela superfície de contato entre agregados e matriz, podendo afetar o transporte de água no concreto.

Entretanto, a estabilização observada no traço ARP 75 sugere que, em teores mais elevados de substituição, a baixa absorção individual do porcelanato e o possível efeito de empacotamento das partículas passam a contribuir para um comportamento mais controlado da permeabilidade capilar. Interpretações semelhantes foram relatadas por Gonzalez e Etcheberria (2014), Natajara *et al.* (2022) e Gritsada e Sittisak (2023), onde observaram a estabilidade dos resultados obtidos, nos teores mais elevados de substituição.

Embora a ABNT NBR 9781 (2026), estabeleça que a absorção total por imersão deve ser, em média, inferior a 6%, não há limite específico associado ao ensaio de capilaridade. Os resultados obtidos ao final das 72h, nos traços com maiores teores de substituição, ARP 50 (0,5701 g/cm²) e ARP 75 (0,5583 g/cm²), exibiram valores reduzidos e tendência à estabilização da absorção, também apresentaram baixos coeficientes de variação, de 1,5% e 2,6%, respectivamente, indicando boa estabilidade experimental e comportamento relativamente homogêneo, mesmo em maiores teores de substituição do agregado natural por resíduo de porcelanato.

Diferentemente da avaliação da absorção por capilaridade em função da massa, na qual os corpos de prova foram pesados em intervalos predefinidos até 72 horas, a análise da altura capilar baseou-se na medição da distância percorrida pela água no interior do material, permitindo uma avaliação visual e quantitativa do avanço da umidade. Os resultados médios, do ensaio de altura capilar, bem como o desvio padrão e o coeficiente de variação (CV), estão descritos na Tabela 22, seguido da representação gráfica na Figura 23 com altura capilar média por traço ao longo do tempo.

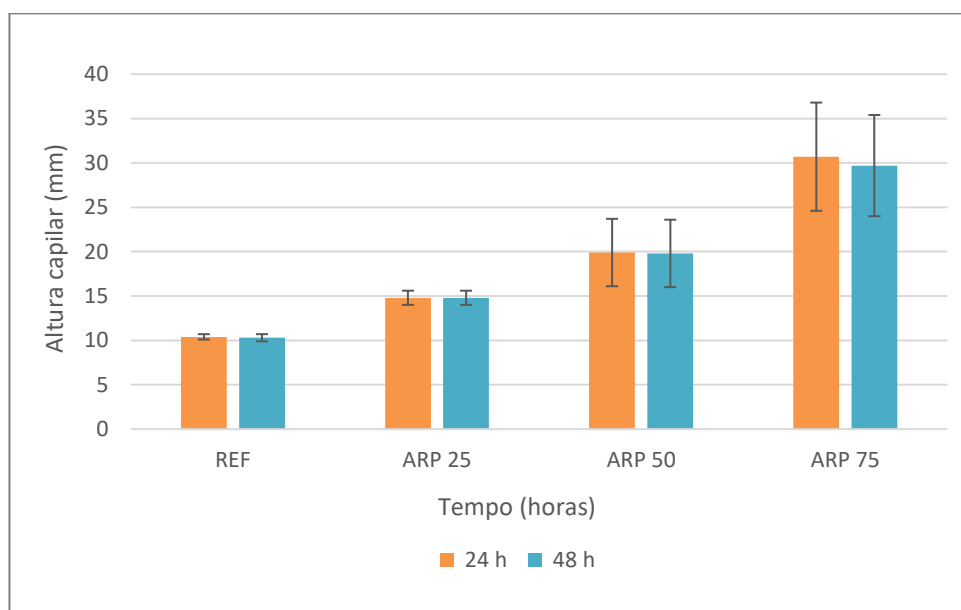
Tabela 22 - Resultados médios do ensaio de altura capilar.

Traço	24 horas	48 horas	Desvio Padrão	CV	Desvio Padrão	CV
	(mm)	(mm)	24 horas (mm)	24 horas (%)	48 horas (mm)	48 horas (%)
REF	10,4	10,3	0,3	2,72	0,4	4,12
ARP 25	14,8	14,8	0,8	5,73	0,8	5,73
ARP 50	19,9	19,8	3,8	18,83	3,8	19,19
ARP 75	30,7	29,7	6,1	19,92	5,7	19,04

Onde: CV= Coeficiente de Variação.

Fonte: Autora (2025).

Figura 23 - Altura capilar por traço ao longo do tempo.



Fonte: Autora (2025).

Os resultados apresentados na Tabela 22 e na Figura 23, evidenciam aumento da altura de ascensão capilar com o incremento do teor de substituição do agregado graúdo natural por agregado reciclado de porcelanato. Em ambos os tempos de avaliação, os menores valores foram observados no concreto de referência, enquanto o traço com 75% de substituição apresentou as maiores alturas capilares, atingindo 30,7 mm após 24 horas e 29,7 mm após 48 horas. Os concretos com 25% e 50% de substituição apresentaram comportamento intermediário, indicando tendência progressiva de elevação da ascensão capilar à medida que aumentou a incorporação do resíduo cerâmico. Observa-se, ainda, que as diferenças entre os valores obtidos em 24 e 48 horas foram pouco expressivas para todos os traços, sugerindo que a maior parte da ascensão capilar ocorreu nas primeiras 24 horas de ensaio. Com o objetivo de verificar a significância estatística das diferenças observadas entre os traços, os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), a um fator apresentada na Tabela 23 e os dados completos no Apêndice D.

Tabela 23 - ANOVA dos resultados de altura capilar em 24horas e 48 horas.

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	Valor-P	Resultado
24 horas	579,2627	3	193,0876	11,17692	0,007199	Significativo
48 horas	526,4493	3	175,4831	11,21457	0,007139	Significativo

Onde: SQ = soma quadrada; GL = grau de liberdade; MQ = média quadrada

Fonte: Autora (2025).

Os resultados da análise de variância (ANOVA), para os períodos de 24 e 48 horas indicaram que o teor de substituição do agregado gráúdo natural por agregado reciclado de porcelanato, exerceu influência estatisticamente significativa sobre a altura capilar dos concretos avaliados, considerando 95% de confiança e nível de significância adotado ($p < 0,05$).

As análises foram realizadas separadamente para os tempos de 24 e 48 horas, em ambos os casos, os valores de “p” foram inferiores ao nível de significância adotado.

5.3.4 Análise digital de imagens do concreto com agregado reciclado de porcelanato (ARP)

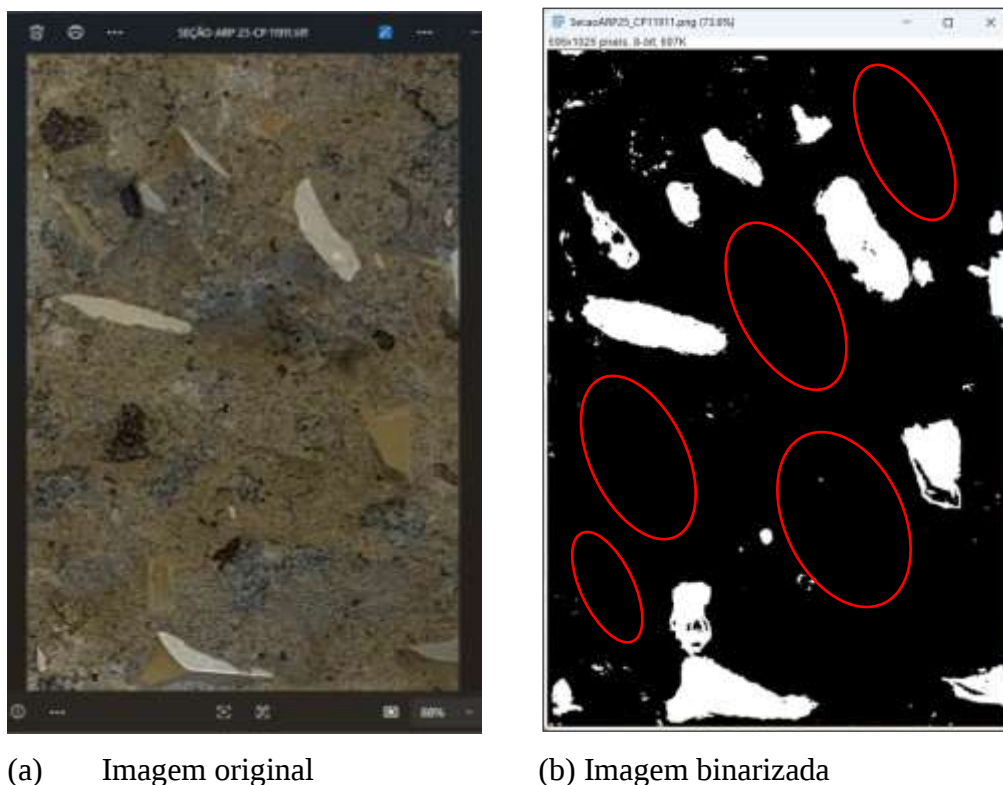
A análise das imagens fornecidas pelos *softwares* utilizados, *Ilastik* e *ImageJ*, possibilitou avaliar a distribuição e a fração de área ocupada pelo agregado reciclado de porcelanato (ARP), nas seções transversais dos corpos de prova. De modo geral, observou-se que o resíduo se apresenta distribuído de forma relativamente homogênea, ao longo da superfície analisada, sem a identificação de concentrações localizadas ou segregação do material. Eventuais aproximações entre partículas foram observadas, em razão da variabilidade granulométrica do resíduo, decorrente da presença simultânea de partículas de diferentes tamanhos, favorecendo a proximidade entre fragmentos maiores e menores, essa configuração sugere ainda, a ausência de falhas no processo de adensamento, durante a moldagem dos corpos de prova.

Os valores obtidos, foram interpretados como uma medida bidimensional, associada à região específica selecionada para análise, correspondendo à proporção relativa entre o agregado reciclado, o agregado gráúdo natural e a pasta de cimento na superfície analisada, não representando diretamente a composição volumétrica total do corpo de prova.

A análise visual e quantitativa é apresentada na sequência, por meio da comparação entre a imagem original da região selecionada, e sua respectiva versão binarizada para cada traço estudado, com substituição do agregado gráúdo natural por agregado reciclado de porcelanato. Esse parâmetro foi adotado como medida representativa da presença relativa do agregado reciclado de porcelanato nas seções analisadas.

As elipses inseridas nas imagens destacam as áreas com predominância da matriz cimentícia. As Figuras 24, 25 e 26 apresentam, respectivamente, as imagens originais e binarizadas dos traços ARP 25, ARP 50 e ARP 75.

Figura 24 - Imagens da região analisada no traço ARP 25: (a) imagem original (b) imagem binarizada.



(a) Imagem original

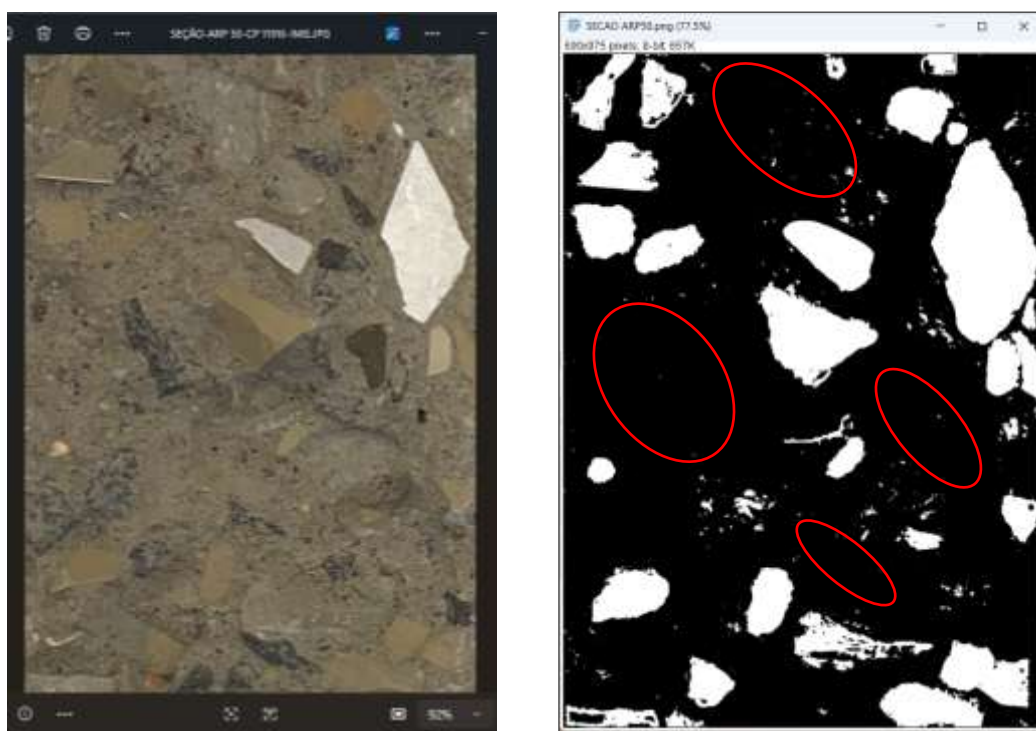
(b) Imagem binarizada

Fonte: Autora (2026).

Na Figura 24 observa-se que as partículas de ARP, representadas em branco, encontram-se distribuídas ao longo da seção analisada, sem evidências de segregação ou concentração localizada. Entretanto, em razão do menor teor de substituição, verifica-se a predominância de extensas regiões contínuas em preto, correspondentes à pasta de cimento. As áreas destacadas pelas elipses evidenciam essas regiões, nas quais não foram identificadas partículas de ARP.

A fração de área de 10,5% obtida para o agregado reciclado confirma quantitativamente a baixa participação do ARP na seção analisada, enquanto a fração de 89,5% associada à pasta de cimento e ao agregado gráúdo natural, explica a maior extensão das áreas escuras observadas na imagem binarizada. Esse resultado é compatível com o teor de substituição adotado para o traço ARP 25 (25% de substituição do agregado gráúdo natural) e estabelece um referencial para comparação com os demais traços, nos quais foi observada redução progressiva das regiões ocupadas predominantemente pela matriz cimentícia.

Figura 25 - Imagens da região analisada no traço ARP 50: (a) imagem original (b) imagem binarizada.



(a) Imagem original

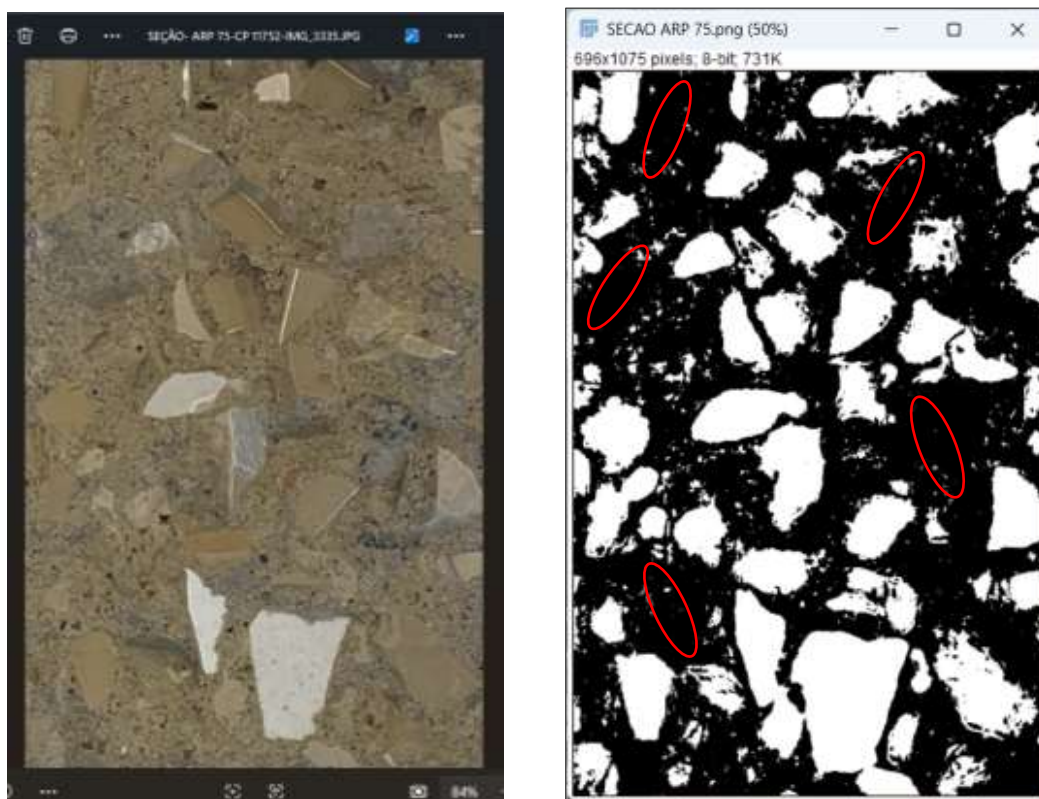
(b) Imagem binarizada

Fonte: Autora (2026).

Na Figura 25 observa-se que as partículas de agregado reciclado de porcelanato (ARP), representadas em branco, encontram-se distribuídas de forma relativamente homogênea ao longo da seção analisada, sem evidências de segregação ou concentração localizada. As áreas destacadas pelas elipses evidenciam regiões com predominância da pasta de cimento, correspondentes às porções da seção em que não foram identificadas partículas de ARP.

A quantificação gerada por meio do parâmetro *area fraction* indica aumento da participação do agregado reciclado na área analisada, acompanhado da redução proporcional do percentual correspondente à pasta de cimento. A fração de área obtida foi de 20,6% para o ARP e 79,4% para a pasta de cimento e agregado graúdo natural. Esse comportamento evidencia a maior presença do ARP na microestrutura do concreto, mantendo, entretanto, distribuição uniforme dos agregados ao longo da seção observada.

Figura 26 - Imagens da região analisada no traço ARP 75: (a) imagem original (b) imagem binarizada.



(a) Imagem original

(b) Imagem binarizada

Fonte: Autora (2026).

Na Figura 26 observa-se que as partículas de agregado reciclado de porcelanato (ARP 75), representadas em branco, apresentam elevada participação na área analisada e distribuição relativamente homogênea ao longo da seção transversal do corpo de prova. A maior concentração de partículas resulta na redução das regiões contínuas em preto, correspondentes à pasta de cimento, que passam a se apresentar em porções menores entre os agregados.

As áreas destacadas pelas elipses evidenciam essas regiões remanescentes da matriz cimentícia, cuja menor extensão visual confirma a maior ocupação da área pelo agregado reciclado. Apesar do aumento do teor de substituição, não se observam indícios de segregação ou concentração localizada de partículas, indicando adequada dispersão do ARP 75 na matriz cimentícia. A quantificação obtida por meio do parâmetro *area fraction* indica que o ARP ocupou 35,6% da área analisada, enquanto a pasta de cimento com agregados graúdos naturais correspondeu a 64,4%.

A avaliação conjunta dos dados obtidos por meio dos ensaios experimentais e da análise comparativa das imagens binarizadas dos traços ARP 25, ARP 50 E ARP 75, permitiu uma

interpretação mais abrangente do comportamento dos concretos com incorporação do resíduo. As regiões destacadas pelas elipses mostraram que, à medida que o teor de substituição aumentou, as áreas com predominância da pasta de cimento tornaram-se progressivamente menores e mais dispersas, indicando maior ocupação pelo agregado reciclado na proporcionalidade da incorporação empregada.

A análise digital de imagens bidimensionais (2D), adaptada de metodologia proposta por Jianguo *et al.* (2016) e complementada por abordagens descritas por Leite e Monteiro (2015), Hoong *et al.* (2020) e Wang *et al.* (2023), foi empregada como ferramenta complementar para a caracterização da distribuição do (ARP) nas seções transversais dos corpos de prova. De acordo com os autores, essa abordagem permite avaliar características do agregado gráudo, como forma e distribuição espacial das partículas, bem como a homogeneidade da sua dispersão e a relação entre as áreas ocupadas pelo agregado e pela matriz cimentícia.

Jianguo *et al.* (2016) concluíram em seus estudos que o método de análise de imagens 2D, pode ser usado para avaliar a qualidade do concreto e otimizar a proporção da mistura e o procedimento de moldagem, com base nas informações obtidas da análise de imagem. Leite e Monteiro (2015) observaram que a segmentação das imagens entre vazios e sólidos, são úteis para discutir a distribuição e conectividade entre os poros ou fissuras e também possibilita a visualização da microestrutura do concreto e da superfície irregular do agregado reciclado.

De forma semelhante, Wang *et al.* (2023) demonstraram que a análise digital de imagens, permite identificar e quantificar características dos agregados gráudos, como distribuição espacial, granulometria e forma das partículas, constituindo um mecanismo auxiliar para a avaliação do desempenho do concreto.

No presente estudo, foi observado, uma distribuição relativamente homogênea das partículas, sem concentração localizada ou indícios de segregação. Essa uniformidade contribui para a interpretação dos resultados dos ensaios mecânicos de compressão e tração, nos quais, apesar de variações nos valores médios, não foram identificadas diferenças estatisticamente significativas entre os concretos avaliados. Esses resultados indicam que a incorporação do ARP não compromete a continuidade da matriz cimentícia nem favorece a formação de zonas preferenciais de ruptura.

Por outro lado, os resultados de absorção de água evidenciaram aumento desse parâmetro com a incorporação do resíduo de porcelanato, conforme indicado pela análise de variância (ANOVA). Embora a distribuição do ARP tenha se mostrado homogênea, o aumento do teor de substituição implica em maior número de interfaces entre o agregado reciclado e a

pasta cimentícia, regiões mais suscetíveis à formação de microvazios e descontinuidades, favorecendo a penetração e retenção de água.

Ainda que o método adotado não permita a quantificação volumétrica absoluta dos constituintes, os resultados obtidos mostraram-se coerentes com os ensaios físicos e mecânicos, auxiliando na interpretação da influência do resíduo de porcelanato na microestrutura e no desempenho do concreto desenvolvido neste estudo.

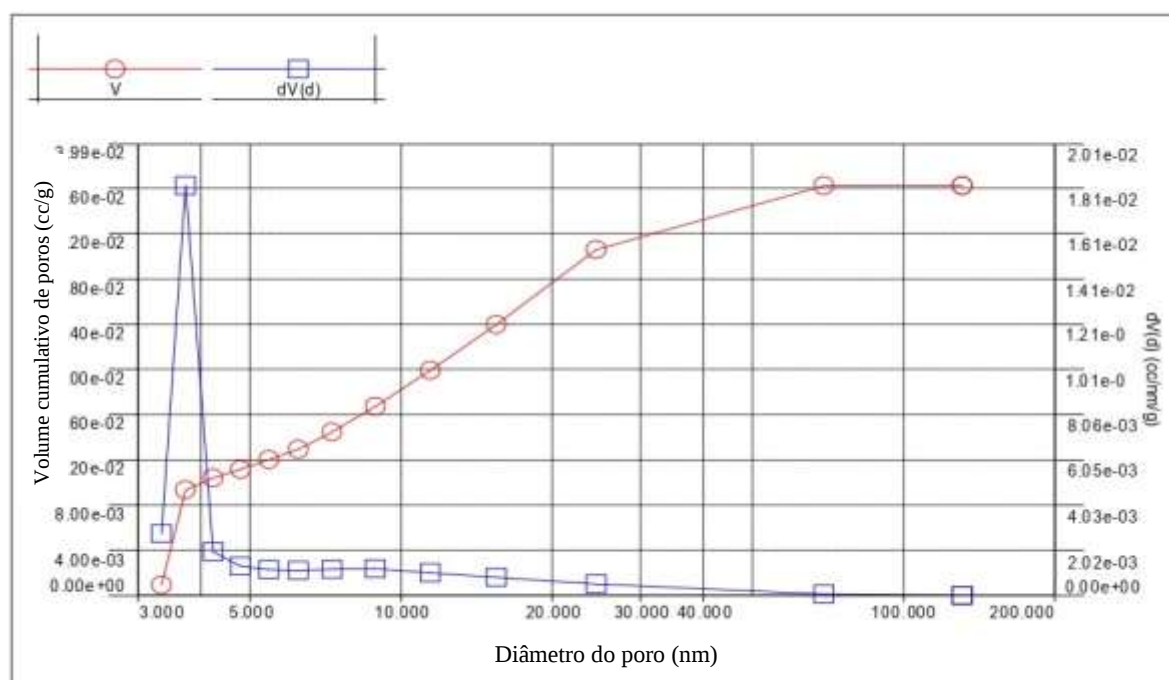
5.3.5 Adsorção e dessorção de nitrogênio pelo método de BET/BJH

Os parâmetros relacionados à área superficial específica e à estrutura porosa dos materiais foram determinados por meio de ensaios de adsorção e dessorção de nitrogênio, empregando os métodos BET (Brunauer–Emmett–Teller) e BJH (Barrett, Joyner e Halenda). As análises foram realizadas para o agregado graúdo natural, agregado reciclado de porcelanato (ARP) e para a argamassa do concreto, extraída dos corpos de prova, com o objetivo de caracterizar parâmetros relacionados à área superficial específica e à estrutura porosa dos materiais.

A discussão dos resultados concentra-se nos parâmetros obtidos pelo método BJH, referente ao volume e a distribuição de tamanho dos poros, indicadores das características microestruturais dos materiais analisados. Complementarmente, estas informações são correlacionadas ao desempenho observado nos ensaios físicos e mecânicos, buscando verificar a influência da estrutura porosa sobre a resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e absorção de água por capilaridade dos concretos produzidos.

Na sequência, são apresentados os resultados obtidos para a argamassa do concreto, agregado graúdo natural e o agregado reciclado de porcelanato, por meio de curvas de dessorção para o método BJH, conforme as Figuras 27, 28 e 29, respectivamente, seguidos de suas interpretações e da análise comparativa com os demais ensaios dessa pesquisa. As tabelas completas do ensaio BET/BJH, encontram-se nos Apêndices O, P e Q deste trabalho.

Figura 27 - Relação entre o volume de poros e seus diâmetros através do método BJH para a amostra da argamassa do concreto.

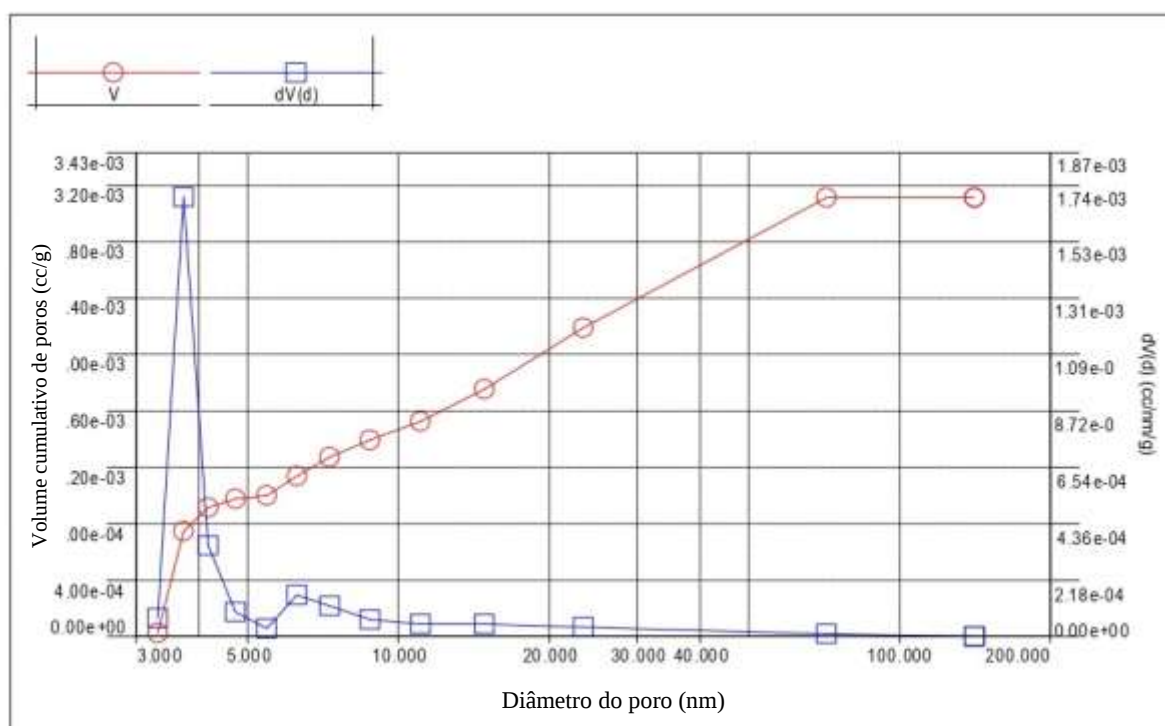


Onde: V= volume de poros; $dV(d)$ = derivada do volume de poros.

Fonte: Autora (2026).

A distribuição de tamanho de poros da argamassa do concreto, obtida pelo método BJH (dessorção), apresentou predominância de poros na faixa dos mesoporos, com pico principal em aproximadamente 3,74 nm de diâmetro. Observa-se uma concentração de poros nessa região, seguida por redução gradual da distribuição para diâmetros maiores. O volume acumulado de poros atingiu cerca de 0,036 cm³/g, enquanto a área superficial específica foi de 18,40 m²/g, valores superiores aos observados na sequência, para o agregado graúdo natural. Esses resultados evidenciam a natureza porosa da argamassa do concreto, que segundo Korpa e Trettin (2006), é caracterizada por uma rede de poros finos, associados aos produtos de hidratação do cimento. A predominância de mesoporos e a elevada área superficial indicam maior capacidade de interação com fluidos, característica diretamente relacionada aos mecanismos de absorção e transporte de água no concreto. Thomas *et al.* (1999) apontam o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), como uma das razões para a complexidade dos materiais a base de cimento, sendo esse o principal produto da reação, com uma grande fração volumétrica de poros internos, nessa faixa de dimensão.

Figura 28 - Relação entre volume de poros e seus diâmetros através do método BJH para a amostra do agregado gráúdo natural.

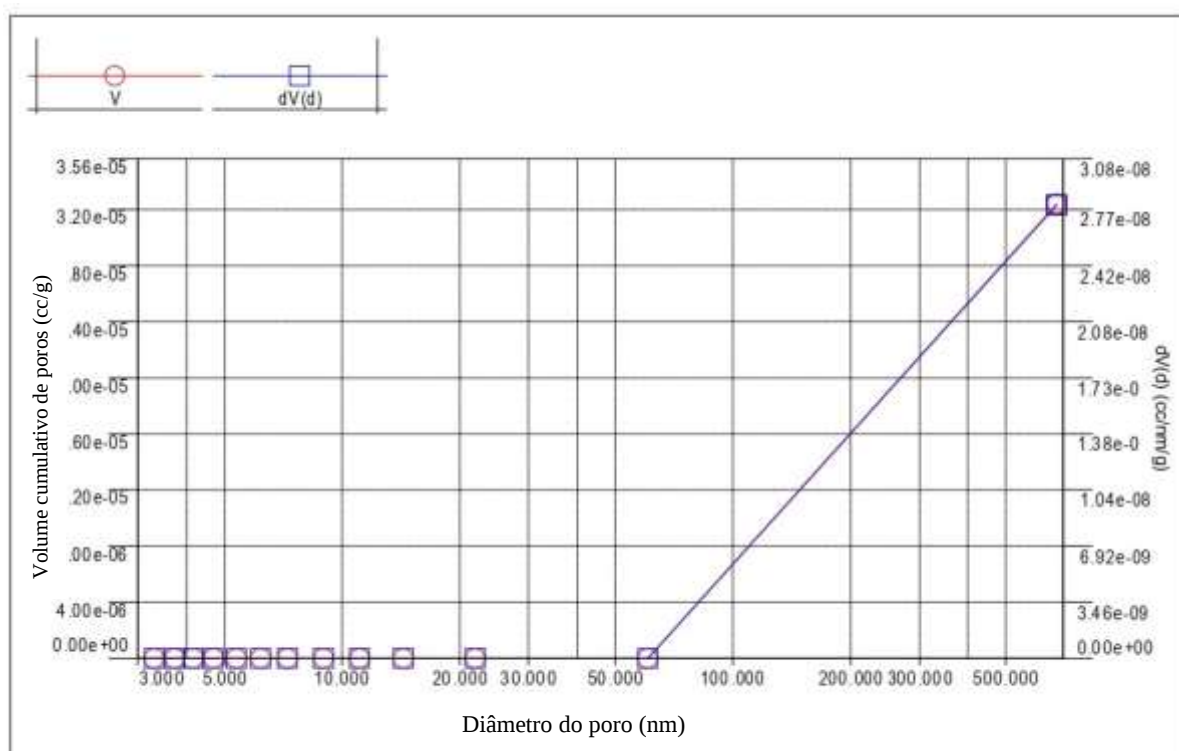


Onde: V= volume de poros; $dV(d)$ = derivada do volume de poros.

Fonte: Autora (2026).

A distribuição de tamanho de poros do agregado gráúdo natural, obtida pelo método BJH (dessorção), apresentou comportamento predominantemente plano, com baixos valores de volume de poros ao longo de toda a faixa analisada. Estudos de adsorção de gases em rochas, executados por Zhang *et al.* (2019) e Wang *et al.* (2024) apontam a elevada densidade e compacidade desses materiais, os quais tendem a apresentar curvas com baixos volumes adsorvidos. A ausência de picos expressivos na curva indica reduzida porosidade acessível, evidenciando a natureza compacta do material. O principal pico observado ocorreu em aproximadamente 3,7 nm de diâmetro, correspondendo à faixa dos mesoporos, segundo a classificação da IUPAC, porém associado a um volume de poros pouco expressivo. O volume acumulado total atingiu cerca de 0,00311 cm³/g, confirmando a baixa presença de vazios internos. Esses resultados são compatíveis com as características dos agregados naturais britados, segundo Sanchez-Medieta *et al.* (2024), apresentam estrutura relativamente densa, baixa absorção de água e reduzida porosidade aberta.

Figura 29 - Relação entre volume de poros e seus diâmetros através do método BJH para a amostra de agregado reciclado de porcelanato(ARP).



Onde: V= volume de poros; $dV(d)$ = derivada do volume de poros.

Fonte: Autora (2026).

A distribuição de tamanho de poros do agregado reciclado de porcelanato, obtida pelo método BJH (dessorção), apresentou comportamento linear ao longo de toda a faixa analisada, sem a ocorrência de picos significativos de distribuição de poros. Os valores de volume acumulado e área superficial específica foram próximos de zero, indicando ausência de porosidade acessível detectável pelo método empregado. Embora o relatório apresente diâmetro médio de poros de 672,58 nm, esse valor está associado a um volume de poros reduzido, não representando uma distribuição relevante de poros na estrutura do material. Esses resultados evidenciam a elevada densificação e o baixo grau de porosidade do porcelanato, características compatíveis com o processo industrial de fabricação, que envolve etapas de prensagem e sinterização responsáveis pela formação de uma estrutura compacta e com reduzida absorção de água. Conforme Arantes *et al.* (2001), durante o tratamento térmico, ocorre a formação de fase vítrea, em virtude do emprego de um elevado teor de fundentes na formulação da massa. Esta fase, de elevada viscosidade, por força de capilaridade, estabelece um fluxo laminar que promove a redução gradativa do volume dos poros, eliminando os pontos de interconexão existentes, promovendo a densificação do corpo cerâmico.

A Tabela 24 compara os dados extraídos do ensaio BET/BJH, para as amostras de concreto, agregado graúdo natural e agregado reciclado de porcelanato.

Tabela 24 - Comparativo do ensaio BET/BJH para o concreto, agregado natural e agregado reciclado de porcelanato.

	Concreto	Agregado graúdo natural	Agregado reciclado de porcelanato (ARP)
Área superficial (m²/g)	18,402	1,487	0,000
Volume de poros (cm³/g)	0,036	0,003	0,00003
Diâmetro de poros (nm)	3,738	3,726	672,580

Fonte: Autora (2026).

A análise comparativa dos resultados obtidos pelo método BJH evidenciou diferenças na estrutura porosa dos materiais avaliados. De modo geral, a pasta cimentícia apresentou maior desenvolvimento da rede de poros, seguida pelo agregado graúdo natural, enquanto o agregado reciclado de porcelanato apresentou estrutura mais compacta e porosidade praticamente inexistente, embora tenha sido identificado um registro pontual de poros na faixa dos macroporos, o volume associado foi reduzido, não sendo representativo da estrutura do material. Essas características microestruturais constituem um importante subsídio para a interpretação do desempenho dos concretos produzidos. Segundo Mehta e Monteiro (2008) e Quarcioni *et al.* (2001), parâmetros como volume e distribuição de poros influenciam diretamente os mecanismos de absorção de água e o comportamento mecânico do material. Dessa forma, na sequência, os resultados obtidos pelo método BJH são correlacionados com os ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e absorção de água por capilaridade.

5.3.6 Correlação entre os resultados de BET/BJH e os ensaios físicos e mecânicos

Os resultados obtidos por meio da análise BET/BJH forneceram informações complementares para a interpretação do comportamento observado nos ensaios físicos e mecânicos realizados nos concretos com incorporação de agregado reciclado de porcelanato. A caracterização microestrutural permitiu avaliar diferenças relacionadas à área superficial específica e à estrutura porosa dos materiais constituintes, auxiliando na compreensão dos mecanismos envolvidos no desempenho dos concretos produzidos.

Em relação à resistência à tração por compressão diametral, a ruptura do concreto ocorre preferencialmente na Zona de Transição Interfacial (ZTI) entre a pasta cimentícia e o agregado, região cuja resistência está associada à aderência física e mecânica entre os constituintes (Mehta e Monteiro, 2014). Os resultados do método BJH indicaram que o agregado natural apresentou pequena porosidade na faixa dos mesoporos, enquanto o agregado reciclado de porcelanato apresentou porosidade praticamente inexistente. Essa característica sugere menor possibilidade de intertravamento mecânico entre a pasta cimentícia e a superfície do porcelanato quando comparada ao agregado natural. Tal comportamento foi identificado, nas observações realizadas após a ruptura dos corpos de prova, nas quais foi possível verificar, principalmente nos teores mais elevados de substituição (ARP 50 e ARP 75), o destacamento de partículas de porcelanato com reduzida aderência aparente à matriz cimentícia. A porosidade da pasta de cimento influencia suas propriedades, incluindo resistência, retração, fluência, permeabilidade e difusão (Thomas *et al.*, 1999).

Sob a ótica da resistência à compressão axial, os resultados indicam que a baixa porosidade do agregado reciclado de porcelanato contribui para que o material apresente elevada compacidade e reduzida absorção intrínseca de água. Essas características podem ter favorecido a estabilidade dos resultados experimentais obtidos, refletida nos baixos coeficientes de variação observados entre os corpos de prova. Entretanto, embora o resíduo apresente elevada rigidez e características físicas compatíveis com a aplicação em concreto, os resultados sugerem que o desempenho mecânico global do material não depende exclusivamente da resistência individual do agregado, mas também da qualidade da interação desenvolvida na interface entre o agregado e a pasta cimentícia.

Com relação à absorção de água por capilaridade e altura capilar, os resultados microestruturais indicaram que o agregado reciclado de porcelanato possui volume de poros praticamente nulo, evidenciando reduzida capacidade de absorção de água em sua estrutura interna. Dessa forma, os valores de absorção observados nos concretos produzidos tendem a estar mais relacionados à porosidade da matriz cimentícia e às características da Zona de Transição Interfacial (ZTI) do que à absorção intrínseca do agregado reciclado. Esse comportamento diferencia o porcelanato de outros agregados reciclados oriundos da construção civil, que normalmente apresentam elevada porosidade e significativa capacidade de absorção de água.

6 CONCLUSÃO

Neste capítulo são apresentadas as considerações finais da pesquisa, com base na análise dos resultados obtidos no programa experimental, buscando o atendimento aos objetivos propostos. A partir dos ensaios realizados e das análises desenvolvidas, foi possível avaliar a viabilidade técnica da utilização do resíduo de porcelanato como substituição parcial do agregado gráúdo natural na produção de concreto.

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos nos ensaios de granulometria para o agregado reciclado de porcelanato, indicaram comportamento compatível com os limites estabelecidos em norma, apresentando módulo de finura e dimensão máxima, semelhantes aos do agregado gráúdo natural. As análises granulométricas individuais demonstraram que ambos os agregados atenderam aos limites inferior e superior especificados, evidenciando compatibilidade entre os materiais utilizados.

Nas composições granulométricas das misturas, (ARP25, ARP50 e ARP75) observou-se distribuição contínua das partículas e curvas semelhantes entre os traços analisados, entretanto, verificou-se pequena aproximação e pontual ultrapassagem do limite superior na peneira de 9,5 mm. Esse comportamento pode estar relacionado à diferença morfológica entre os agregados, uma vez que o agregado natural apresentava formato mais arredondado, enquanto o resíduo de porcelanato possuía partículas mais lamelares e angulares. Durante o peneiramento conjunto, essa diferença pode ter favorecido o aumento do atrito entre os grãos, dificultando momentaneamente a passagem simultânea das partículas pela peneira. Ainda que tenha sido observada essa variação localizada, os resultados indicaram compatibilidade granulométrica, entre os agregados utilizados nas composições

Com base nos resultados obtidos no estado fresco, conclui-se que a incorporação do agregado reciclado de porcelanato não comprometeu a trabalhabilidade dos concretos produzidos, uma vez que os valores de abatimento permaneceram dentro da faixa estabelecida para a classe de consistência S160. Observou-se, entretanto, maior dificuldade de mistura e adensamento nos traços com resíduo, atribuída à angularidade, ao formato irregular e ao aumento do atrito entre as partículas cerâmicas. Nesse contexto, o uso controlado de aditivo superplastificante mostrou-se fundamental para manter a consistência adequada das misturas, possibilitando a moldagem e o adensamento dos corpos de prova mesmo em elevados teores de substituição do agregado gráúdo natural por agregado reciclado de porcelanato.

Os resultados de resistência à compressão axial demonstraram que a substituição parcial do agregado graúdo natural por resíduo de porcelanato, não comprometeu o desempenho mecânico dos concretos avaliados. Todos os traços apresentaram evolução progressiva da resistência ao longo do período de cura em todas as idades avaliadas (3, 7 e 28 dias).

O teor intermediário de 50% de substituição (ARP 50) destacou-se com o melhor desempenho global. Aos 28 dias, alcançou uma resistência média, ligeiramente superior ao concreto de referência, além disso, exibiu o maior desenvolvimento inicial, atingindo 62,1% da sua resistência final logo aos 3 dias. Esse resultado sugere que, em teores intermediários, o resíduo de porcelanato favoreceu o empacotamento das partículas e o preenchimento de vazios, contribuindo para uma matriz mais compacta e eficiente do ponto de vista mecânico.

Os traços com 25 e 75% de substituição também apresentaram comportamento satisfatório, contudo, o teor mais elevado (ARP 75) mostrou um incremento menor de resistência, nas idades mais avançadas, indicando uma limitação parcial do ganho a longo prazo, decorrente da menor aderência entre a pasta e a superfície vitrificada do porcelanato.

A análise de variância (ANOVA) revelou diferença estatisticamente significativa entre os traços apenas aos 3 dias, demonstrando equivalência estatística entre os concretos ao final do período de cura (7 e 28 dias).

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral indicaram que a substituição parcial por resíduo de porcelanato, mostrou-se tecnicamente viável para esforços de tração indireta, não comprometendo o desempenho mecânico do concreto em nenhuma das idades avaliadas. O traço ARP 75 apresentou o melhor desempenho mecânico absoluto nesta propriedade aos 28 dias, superando o concreto de referência. Este traço obteve ainda a maior relação entre resistência à tração e à compressão (16,67% contra 12,83% do REF), indicando eficiência frente a esse tipo de esforço.

A análise estatística confirmou que não houve diferenças estatisticamente significativas entre as médias de nenhum dos traços. Isso demonstra que, estatisticamente, a incorporação do agregado de porcelanato não alterou negativamente a propriedade de tração do concreto.

Sob o aspecto da resistência à tração, o teor de 75% se mostrou o mais eficiente, contudo ao cruzar os dados, o teor de 50% apresenta-se como uma solução equilibrada e promissora, por conciliar um comportamento satisfatório à tração e à compressão.

Os resultados de absorção de água por capilaridade, indicaram que a incorporação do resíduo de porcelanato promoveu aumento da absorção de água por capilaridade em relação ao concreto de referência, que registrou o menor valor após 72 horas. Entre os traços com agregado reciclado, o ARP 25 apresentou a menor absorção, porém os teores mais elevados, ARP 50 e

ARP 75, registraram os maiores índices de absorção. Apesar do incremento nos valores, os concretos com maiores teores (ARP 50 e ARP 75) mostraram uma tendência de estabilização da absorção ao final do ensaio.

A análise estatística indicou diferença significativa entre os traços avaliados aos 28 dias, evidenciando que a substituição do agregado gráúdo natural por resíduo de porcelanato influenciou o comportamento de absorção capilar dos concretos. Esse aumento pode estar relacionado às características da zona de transição interfacial entre a pasta de cimento e a superfície vitrificada do porcelanato, que pode favorecer a formação de caminhos preferenciais para a ascensão da água.

Os resultados do ensaio de altura capilar, evidenciaram que o aumento do teor de substituição do agregado gráúdo natural por resíduo de porcelanato promoveu elevação da ascensão de água no interior dos concretos. As diferenças entre os resultados obtidos em 24 e 48 horas foram pouco expressivas para todos os traços, indicando que a maior parte da ascensão capilar ocorreu nas primeiras 24 horas de ensaio.

Apesar do aumento da altura capilar nos concretos com resíduo de porcelanato, os resultados mantiveram comportamento coerente com os dados obtidos no ensaio de absorção por capilaridade, evidenciando que a incorporação do resíduo influenciou na microestrutura e na conectividade dos poros, porém, sem comprometer a estabilidade experimental dos resultados.

A análise digital de imagens, evidenciou que o agregado reciclado de porcelanato apresentou distribuição homogênea nas seções analisadas, sem indícios de segregação ou concentração localizada de partículas. Essa uniformidade contribuiu para explicar o desempenho mecânico satisfatório dos concretos com resíduo. Por outro lado, o aumento da absorção de água e da altura capilar nos traços com maiores teores de substituição indica, que embora o resíduo tenha sido adequadamente disperso na matriz cimentícia, o aumento do número de interfaces entre o porcelanato e a pasta de cimento favoreceu a penetração de água.

De forma geral, a análise de imagens confirmou a homogeneidade dos concretos produzidos e mostrou-se uma ferramenta complementar eficaz para interpretar a influência do resíduo de porcelanato no desempenho físico e mecânico do material.

A análise da estrutura porosa por meio do método BET/BJH permitiu identificar diferenças entre os materiais avaliados. O agregado gráúdo natural apresentou reduzida porosidade, caracterizada por mesoporos e baixa área superficial específica, a pasta cimentícia exibiu os maiores valores de área superficial e volume de poros. O agregado reciclado de porcelanato apresentou área superficial e volume de poros próximos de zero, evidenciando sua

elevada densificação e baixa capacidade de adsorção. A elevada compacidade do porcelanato contribuiu para a estabilidade e uniformidade dos concretos produzidos, enquanto a ausência de porosidade aberta e de rugosidade superficial favoreceu a ocorrência de uma zona de transição interfacial menos eficiente, influenciando os mecanismos de aderência entre agregado e pasta cimentícia. Dessa forma, os resultados obtidos demonstram que a análise BET/BJH constituiu uma importante ferramenta complementar para a compreensão do comportamento dos concretos com incorporação de resíduo de porcelanato, permitindo correlacionar aspectos microestruturais com as propriedades observadas em escala macroscópica.

Os resultados obtidos nesta pesquisa indicam que o resíduo de porcelanato apresenta viabilidade técnica para utilização como agregado graúdo em concretos de cimento Portland. Embora tenha sido observado aumento da absorção de água, sua incorporação não comprometeu as propriedades mecânicas dos concretos produzidos.

Entre os traços avaliados, a substituição de 50% do agregado graúdo natural por agregado reciclado de porcelanato (ARP 50) apresentou o melhor equilíbrio entre as propriedades analisadas, evidenciando-se como a condição mais favorável dentre as estudadas.

Dessa forma, considera-se que o resíduo de porcelanato pode ser empregado como um subproduto de valor agregado na produção de concreto, contribuindo para a redução da destinação de resíduos para aterros e para a diminuição do consumo de agregados naturais. Os resultados obtidos nesta pesquisa demonstram que o material possui potencial para aplicação tecnológica, reforçando sua inserção nos princípios da economia circular e da construção sustentável.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos nesta pesquisa e nas limitações inerentes ao escopo experimental adotado, recomenda-se o desenvolvimento de estudos complementares que aprofundem o conhecimento sobre o uso do resíduo de porcelanato como agregado graúdo reciclado na produção de concreto. Nesse sentido, elencam-se as seguintes sugestões:

- a) Avaliar o desempenho de concretos com resíduo de porcelanato submetidos a idades de cura superiores a 28 dias, como 56 e 90 dias, a fim de verificar o comportamento mecânico e a evolução da durabilidade em longo prazo.

- b) Investigar o comportamento microestrutural da zona de transição interfacial entre a pasta cimentícia e o agregado reciclado de porcelanato por meio de técnicas como microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de raios X (DRX).
- c) Estudar o efeito da substituição simultânea dos agregados graúdo e miúdo por resíduos de porcelanato.
- d) Investigar aplicações práticas em elementos pré-moldados, blocos de pavimentação, artefatos de concreto e componentes não estruturais.
- e) Estudar um traço para a aplicação em elementos estruturais.

7 PRODUTO TÉCNICO TECNOLÓGICO

Além das contribuições teóricas e metodológicas, esta dissertação resultou no desenvolvimento de um Produto Técnico-Tecnológico (PTT). Em consonância com as diretrizes da CAPES para a área de Engenharias I, este produto reflete a aplicação prática do conhecimento científico para a resolução de problemas reais da sociedade e da indústria, destacando-se pelo seu potencial de impacto institucional, aplicabilidade prática e replicabilidade.

Assim, a metodologia proposta vai além do campo teórico, configurando-se como uma ferramenta técnica e operacional para o planejamento territorial e a gestão ambiental. A caracterização detalhada do Produto Técnico-Tecnológico resultante deste trabalho é apresentada a seguir.

7.1 IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO

O estudo buscou identificar os efeitos da substituição de agregado graúdo por Resíduo de Porcelanato (ARP) sem pré-molhagem. A sua metodologia, portanto, dá origem a uma diretriz técnica de dosagem e controle de concretos com a utilização de agregados reciclados e baixa absorção de água, como o ARP e seus resultados vão ao encontro da sua viabilidade técnica e aplicabilidade.

Quanto à sua classificação, o produto enquadra-se como:

- a) Tipo: manual/protocolo técnico e processo tecnológico aplicado;
- b) Aplicação: indústria de artefatos de concreto, usinas de concreto, construtoras, órgãos de planejamento urbano/ambiental e laboratórios de desenvolvimento de produtos à base cimentícia, indústria de revestimentos;

7.2 DESCRIÇÃO DO PRODUTO

Este produto tecnológico atua como um guia normativo e operacional para a cadeia da construção civil, estruturado a partir das seguintes variáveis de processo validadas:

Critério de Seleção do Insumo Sustentável: Instruções para a triagem do resíduo de porcelanato (peças descartadas, sobras ou quebras), exigindo a ausência de materiais aderidos (argamassa/rejunte) para garantir a integridade da mistura.

Inovação Metodológica (Dispensabilidade de Pré-Saturação): Ao contrário do preconizado pela ABNT NBR 15116 (2021) para agregados reciclados convencionais, este PTT

estabelece o aproveitamento da baixa porosidade e alta compacidade do porcelanato. O controle reológico é transferido para a dosagem exata de aditivos superplastificantes, simplificando o manejo industrial e reduzindo o consumo de água na usinagem.

Matriz de Dosagem Operacional: Fixação do traço padrão 1:2,42:2,58 (em volume) com orientações para substituições graduais de 25%, 50% e 75% do agregado graúdo natural.

Protocolo de Validação de Resposta: Métodos de controle de qualidade baseados em ensaios normalizados de estado fresco (abatimento) e estado endurecido (compressão, tração e capilaridade às idades de 3, 7 e 28 dias), acrescido da inovação analítica por meio de imagens bidimensionais para avaliação da distribuição dos agregados e da análise da porosidade pelo método de BET/BJH.

7.3 QUALIFICAÇÃO TÉCNICA / TECNOLÓGICA NA ÁREA DE ENGENHARIAS I

7.3.1 Aderência:

O Produto apresenta aderência à linha de pesquisa de Tecnologia e Inovação Ambiental do Programa: Desenvolver e aplicar soluções inovadoras em engenharia e ciências ambientais para a gestão sustentável de resíduos, priorizando a proteção ambiental, a obtenção de energia e a incorporação e a otimização de materiais sustentáveis na construção civil. Por meio de pesquisas interdisciplinares e da aplicação de tecnologias avançadas, buscamos reduzir a geração de resíduos, otimizar processos e transformar resíduos em recursos.

E está vinculado ao Projeto de Pesquisa: AVALIAÇÃO DO USO DE RESÍDUO DE CERÂMICA DE REVESTIMENTO NA PRODUÇÃO DE CONCRETO

7.3.2 Demanda e Impacto:

O produto foi motivado espontaneamente pela necessidade de destinação nobre ao Resíduo de Porcelanato (ARP) gerado no setor de acabamentos, reduzindo o descarte em aterros. Além disso, responde à demanda por metodologias de dosagem que simplifiquem o uso de agregados reciclados na indústria, superando o gargalo logístico e técnico da etapa tradicional de pré-molhagem.

Foco de aplicação: Usinas de concreto, indústrias de artefatos de cimento e construtoras interessadas em concreto sustentável de matriz otimizada.

7.3.3 Abrangência e Replicabilidade

A abrangência direta é local e regional por meio dos resultados obtidos, podendo ser elevada a um nível nacional.

Sua reprodutibilidade é ampliável para todo o setor da construção civil que utiliza agregados de baixa porosidade. O protocolo descreve de forma analítica e sequencial todas as variáveis, permitindo que o método seja reproduzido de maneira exata ou adaptado para diferentes resistências-alvo de concreto.

7.3.4 Inovação

O PTT utiliza um método de dosagem de matriz consolidada (IPT/EPUSP) e ensaios normatizados pela ABNT (conhecimentos pré-estabelecidos). Contudo, promove uma inovação incremental ao propor e validar a dispensabilidade da pré-molhagem (contrariando a recomendação genérica da NBR 15116:2021) com base nas propriedades físicas intrínsecas de baixa porosidade do porcelanato, controlando a reologia exclusivamente via aditivos químicos de forma quantificada.

7.3.5 Aplicabilidade

O produto combina a teoria física de empacotamento de partículas, conceitos estáveis de reologia do concreto e a prática de laboratórios acadêmicos. Ele possui alta maturidade para ser transferido e operado por diferentes atores do mercado (como engenheiros de dosagem em usinas e técnicos de laboratórios de controle tecnológico de concreto) com a infraestrutura padrão já existente no setor de construção civil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCERAM. Associação Brasileira de Cerâmica. **Cerâmica no brasil – publicações editadas no brasil**. Disponível em <https://abceram.org.br/publicacoes-editadas-no-brasil/>. Acesso em: 12 abr. 2024.

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. **Básico sobre cimento**. Disponível em: <https://abcp.org.br/cimento/>. Acesso em 16 ago 2024.

ABERA, Y. S. A. Performance of concrete materials containing recycled aggregate from construction and demolition waste. **Results in Materials**, v. 14, 100278, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2022.100278>.

ABRECON - Associação Brasileira para a Reciclagem de Resíduos da Construção civil e demolição. Pesquisa Setorial 2020. São Paulo: Abrecon, 2020.

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2021**. 2021. Disponível em: <https://abrelpe.org/panorama-2021>.

ABREMA. Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2023**. 2023. Disponível em: <https://www.abrema.org.br>. Acesso em: 12 abr. 2024.

ABBAS, A; FATHIFAZL, G; FOURNIER; ISGOR, O.B.; ZAVADIL, R; RAZAQPUR, A.G.; FOO, S., Quantification of the residual mortar content in recycled concrete aggregates by image analysis, **Materials Characterization**, Volume 60, Issue 7, 2009, Pages 716-728, ISSN 1044-5803, <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2009.01.010>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1044580309000254>)

ABYANEH, S. D.; WONG, H. S.; BUENFELD; N. R. Computational investigation of capillary absorption in concrete using a three-dimensional mesoscale approach. **Computational Materials Science**, v. 87, p. 54-64, maio 2014. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927025614000767>. Acesso em: 22 dez. 2024.

ACORDO DE PARIS SOBRE O CLIMA. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/acordodeparis/>. Acesso em: 2 jan. 2017.

ADESSINA, A; FRAJ, A.B.; BARTH, J. F.; CHATEAU.C.; GARNIER, D. Experimental and Micromechanical investigation on the mechanical and durability properties of recycled aggregates concrete. **Cement and Concrete Research**, 126 (2019), Article 105900 aggregates. *Journal of Cleaner Production*, v. 41, p. 7 – 14, 2013.

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **O desafio da sustentabilidade na construção civil**. v. 5. São Paulo: Edgard Blucher, 2011.

AITCIN, P. C. **Concreto de Alto Desempenho**. Tradução de Geraldo Serra. São Paulo: PINI, 2000. 667 p.

AKBULUT H.; GURER C. Use of aggregates produced from marble quarry waste in asphalt pavements. **Building and Environment**, 42 (5), p. 1921-1930. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.03.012>. Acesso em: 05 mar. 2025.

ALDERETE, N. M.; VILLAGRÁN ZACCARDI, Y. A.; DE BELIE, N. Mechanism of long-term capillary water uptake in cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 106, p. 103448, fev. 2020

ALEXANDRIDOU, C.; ANGELOPOULOS, G. N.; COUTELIERIS, F. A. Mechanical and durability performance of concrete produced with recycled aggregates from Greek construction and demolition waste plants. *Journal of Cleaner Production*, v. 176, p. 745-757, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.081>.

AL-RAQEB, H.; GHAFAR, S. H.; ALL-KHEETAN, M.; CHOUGAN, M. Understanding the challenges of construction demolition waste management towards circular construction: kuwait stakeholder?s perspective. **Cleaner Waste Systems**, [S.L.], v. 4, p. 100075, 04 abr. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clwas.2023.100075>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772912523000015>

ALSHAHWANY, R. B.; ABDULKAREEM, O. M.; SHLLA, R. D. Influence of ceramic wastes as a recycled coarse aggregate with different maximum sizes on the concrete. **The Open Civil Engineering Journal**, v. 18, n. 1, 2024.

ANDREOLA, F.; BARBIERI, L.; LANCELLOTTI, I.; LEONELLI, C.; MANFREDINI, T. Recycling of industrial wastes in ceramic manufacturing: state of art and glass case studies. **Ceramics International**, v. 42, n. 12, p. 13333–13338, 2016.

ANFACER - Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimento, Louças Sanitárias e Congêneres. **Produção Brasileira de revestimentos cerâmicos**. Disponível em: <https://www.anfacer.org.br/sobre/numeros-do-setor>. Acesso em: 12 abr. 2024.

ANGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento mecânico dos concretos**. São Paulo, 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005

ANGULO, S. C. **Variabilidade de Agregados Graúdos de Resíduos da Construção e Demolição Reciclados** São Paulo, 2000.155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

ANGULO, S. C.; FIGUEIREDO, A. D. Concreto com agregados reciclados, in: Concreto Ciênc. E Tecnol., **Arte Interativa**, São Paulo, 2011: pp. 1731–1767. 90

ANGULO, S. C.; JOHN V.M. Metodologia para desenvolvimento de reciclagem de resíduos. **Coletânea Habitar**, vol. 4 - Utilização de Resíduos na Construção Habitacional, p. 8-71, 2003.

ANGULO, S. C.; JOHN, V. M.; ULSEN, C.; KAHN, H.; MUELLER, A. Separação óptica do material cerâmico dos agregados mistos de resíduos de construção e demolição. **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 2, p. 61–73, abr./jun. 2013.

APARO, Ermanno. **A cultura cerâmica no design da joalheria portuguesa**. Doutorado em Design (Tese). Aveiro: Universidade de Aveiro, 2010. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10773/3688>. Acesso em: 29 jan. 2024.

ARANTES, F.J.S., GALESI, D.F., QUINTEIRO, E., BOSCHI, A.O. (2001). O manchamento e a porosidade fechada de grês porcelanato. **Cerâmica Industrial**, V.6, Nº 03, P. 18- 15

ARAÚJO, L.; RODRIGUES, R.; FREITAS, F. **Concreto de Cimento Portland**. São Paulo, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABREMA). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2024**. São Paulo: ABREMA, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:2015**. Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:2018**. Concreto – Ensaio de compressão em corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211:2022**. Agregados para concreto – Requisitos. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222:2011**. Concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953:2015**. Concreto para fins estruturais –Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779:2012**. Argamassa e concreto endurecido –Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9781-1:2026**. Componentes de concreto para pavimentação intertravada –Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2026.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004:2004**. Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768-1:2019**. Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655:2022**. Concreto – Preparo, controle, recebimento e aceitação- procedimento. Rio de Janeiro, 2022.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15112:2004**. Resíduos da Construção civil e resíduos volumosos – Área de transbordo e triagem. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15113:2004**. Resíduos da Construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15114:2004**. Resíduos da Construção civil– Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

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, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116:2021**. Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15558:2008**. Concreto – Determinação da exsudação. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900-1:2009**. Água para amassamento do concreto – Parte 1: Requisitos . Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889:2020**. Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916:2021**. Agregados miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16917:2021**. Agregado graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054:2022**. Agregados– Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.

BAO, Z.; LU, W.; CHI, B.; YUAN, H.; HAO, J. Procurement innovation for a circular economy of construction and demolition waste: Lessons learnt from Suzhou, China. **Waste Management**. 2019 Nov; 99:12-21. doi: 10.1016/j.wasman.2019.08.031. Epub 2019 Aug 24. PMID: 31454595.

BARBISAN, A. Ol.; SPADOTTO, A.; DALLA NORA, D.; LOPES TURELLA, E. C.; DE WERGENES, T., N.. Impactos ambientais causados pela construção civil. **Unesc & Ciência - ACSA**, [S. l.], v. 2, n. 2, p. 173–180, 2012. Disponível em: <https://periodicos.unoesc.edu.br/acsa/article/view/745>. Acesso em: 12 jul. 2026.

BARRETT, E. P.; JOYNER, L. G.; HALENDA, P. P. The determination of pore volume and area distributions in porous substances from nitrogen adsorption isotherms. **Journal of the American Chemical Society**, v. 73, n. 1, p. 373–380, 1951.

BATTAGIN, A. F. Cimento Portland. In: **Concreto: ciência e tecnologia**. Ed. G. C. ISAIA. São Paulo: IBRACON. 2011. vol 1.

BATTAGIN, A.F. Cimento Portland. In: Isaia, G. C. (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais**. 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2017. p. 761-792.

BEKTAS, F.; WANG, K.; CEYLAN, H. Effects of crushed clay brick aggregate on mortar durability. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 5, p. 1909–1914, maio 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.09.006>. Acesso em: 20 set. 2025.

BERG, S. et al. **ilastik: interactive machine learning for (bio)image analysis**. Nature Methods, v. 16, p. 1226-1232, 2019. <https://www.ilastik.org/>

BERGSDAL, Håvard; BOHNE, Rolf André; BRATTEBO, Helge. Projection of construction and demolition waste in Norway. **Journal of Industrial Ecology**, v. 11, n. 3, p. 27-39, 2007.

BERNARDES, A.; THOMÉ, A.; PRIETTO, P. D. M.; ABREU, A. G. Quantificação e classificação dos resíduos da construção e demolição coletados no município de Passo Fundo, RS. **Ambiente Construído**, v. 8, n. 3, p. 65–76, 2008.

BIDABADI, M. S.; AKBARI, M.; PANAHI, Omid. Optimum mix design of recycled concrete based on the fresh and hardened properties of concrete. **Journal of building Engineering**, v. 32, p. 101483, 2020.

BODI, J. Experiência brasileira com entulho reciclado na pavimentação. In: RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, ALTERNATIVA ECONÔMICA PARA PROTEÇÃO AMBIENTAL, São Paulo, 1997. **Anais [...]** São Paulo: PCC/USP, 1997.

BORGES, J., K.; PACHECO, F.; TUTIKIAN, B.; OLIVEIR, M., F. (2018). An experimental study on the use of waste aggregate for acoustic attenuation: EVA and rice husk composites for impact noise reduction. **Construction and Building Materials**. v. 161, págs. 501 - 508.

BOSCHI, G.; BONVICINI, G.; MASI, G.; BIGNOZZI, M. C. Visão da reciclagem na indústria de fabricação de revestimentos cerâmicos. **Open Ceramics**, v. 16, p. 1–8, 2023. DOI: 10.1016/j.oceram.2023.100471. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1016/j.oceram.2023.100471>. Acesso em: 20 set. 2025.

BRANCATI, E. F. **O brasil e a cerâmica antiga**. São Paulo, SP. 1981. 741p. Disponível em: <http://hdl.handle.net/123456789/2392>

BRASIL. CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 307, de 05 jul. 2002. **Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil**. Diário Oficial da União, Brasília, 17 jul. 2002.

BRASIL. **Decreto nº 9.073, de 5 jun. 2017.** Promulga o Acordo de Paris sob a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, celebrado em Paris, em 12 dez. 2015, e firmado em Nova Iorque, em 22 abr. 2016. Brasília. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/decreto/D9073.htm.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução Conama nº 307, de 5 jul. 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. **Diário Oficial da União**, Brasília, 17 jul. 2002.

BRASIL. PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Lei nº 12.305, de 2 ago. 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 fev. 1998; e dá outras providências. Brasília: Diário Oficial da União, 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**, v. 61, n. 358, p. 178–189, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/0366-69132015613581860>.

BRITO FILHO, J. A. Cidades versus entulho. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 1999, São Paulo. **Anais[...]** São Paulo: Comitê Técnico do IBRACON; CT 206 – Meio Ambiente, 1999. p. 56–67.

BRUNAUER, S.; EMMETT, P. H.; TELLER, E. Adsorption of gases in multimolecular layers. **Journal of the American Chemical Society**, v. 60, n. 2, p. 309–319, 1938.

BUCHER. **Método de Dosagem de Concreto para Pavimentos.** ET-73 – ABCP. São Paulo: ABCP, 1984.

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

BUTTLER, A. M.; CORRÊA, M. R. S.; PRADO, D. M.; RAMALHO, M.A. Avaliação das propriedades de agregados reciclados de concreto gerados em uma fábrica de pré-moldados. **Revista de ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil**, 2006.

BONTEMPI, E.; SORRENTINO, GP; ZANOLETTI, A.; ALESSANDRI, I.; DEPERO, LE; CANESCHI, A. Materiais sustentáveis e sua contribuição para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS): uma revisão crítica baseada em um exemplo italiano. **Molecules** 2021, 26, 1407. <https://doi.org/10.3390/molecules26051407>

CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD.** 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CAETANO, M. O.; SELBACH, J. B. O.; GOMES, L. P. Composição gravimétrica dos RCD para a etapa de acabamento em obras residenciais horizontais. **Ambiente Construído**, 16, 51-67, 2016

CAMPOS, R. F. F.; ORCHULHAK, E. E. Análise qualitativa e quantitativa de Resíduos da Construção Civil (RCC) gerados na fase de acabamento de um edifício residencial do município de Caçador, Santa Catarina, Brasil. **Meio Ambiente** (Brasil), [S. l.], v. 7, n. 3, 2025. DOI: 10.66205/mabra. V 7i3.512.

<https://meioambientebrasil.com.br/index.php/MABRA/article/view/512>.

CARMO, D. S.; MAIA, N. S.; CÉSAR, C. G. Avaliação da tipologia dos resíduos de construção civil entregues nas usinas de beneficiamento de Belo Horizonte. **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 17, n. 2, p. 187–192, 2012.

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. 188–227.

CASTRO, S. BRITO, J. Evaluation of the durability of concrete made with crushed glass aggregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 41, p. 7 – 14, 2013.

CASTRO, W. A. M. **Incorporação de resíduos de caulim em argamassas para uso na construção civil**. - Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Campina Grande, PB: Universidade Federal de Campina Grande, 2008.

CBIC- Câmara Brasileira- Indústria da Construção. **Lean Construction: redução dos desperdícios e perdas em obras de incorporação imobiliária**. Disponível em:

<https://cbic.org.br/artigo-lean-construction-reducao-dos-desperdicios-e-perdas-em-obras-de-incorporacao-imobiliaria/>. Acesso em: 20 maio 2024.

CECCONELLO, V. **Avaliação de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto e cinza de casca de arroz, com ênfase na retração**. 2013.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós- graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos- UNISINOS, São Leopoldo, RS, 2013

CHEN, L.; Mingyu Y.; Zhonghao C.; Zhuolin X.; Lepeng H.; Ahmed I. Osman; Mohamed F.; Sandanayake M.; Engui L.; Yong H. A; Ala'a H. Al-Muhtaseb, David W. R.; Pow-Seng Y. Conversion of waste into sustainable construction materials: A review of recent developments and prospects. **Materials Today Sustainability**, p. 100930, jul. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2024.100930>. Acesso em: 20 set. 2025.

CESSA, R.M.A.; CELI, L.; VITORINO, A.C.T.; NOVELINO, J.O.; BARBEIS, E. Área superficial específica, porosidade da fração argila e adsorção de fósforo em dois latossolos vermelhos. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, 33(5):1153-1162, 2009.

COLLIVIGNARELLI, M. C. et al. The production of sustainable concrete with the use of alternative aggregates: a review. **Sustainability**, v. 12, n. 19, p. 7903, 24 set. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su12197903>. Acesso em: 20 set. 2025.

CORREIA, S. L.; DIENSTMANN, G.; FOLGUERAS, M. V.; SEGADÃES, A. M. Effect of quartz sand replacement by agate rejects in triaxial porcelain. **Journal of Hazardous Materials**, v. 163, p. 315–322, 2009.

COSTA, R. V. G. DA; ATHAYDE JÚNIOR, G. B.; OLIVEIRA, M. M. DE. Taxa de geração de resíduos da construção civil em edificações na cidade de João Pessoa. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 127-137, jan./mar. 2014. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

DAL BÓ, M. et al. Chemical tempering of porcelain tiles. **Ceramics International**, v. 42, n. 14, p. 15199–15202, 1 nov. 2016.

DAL BÓ, M.; DOMINGUINI, L.; ZIMMER, A.; GRANDO, S. R.; KASPARI, P.; DACHAMIR, H., Chemical tempering of porcelain tiles, **Ceramics International**, Volume 42, Issue 14, 2016, Pages 15199-15202, ISSN 0272-8842, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.06.138>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884216309816>)

DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais. In: TUTIKIAN, B. *et al* (ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2022. v. I.

DEL RIO, M.; VILLORIA, P.; LONGOBARDI, L.; SANTA CRUZ, J.; PORRAS, C. Redesenhando gesso leve com misturas de resíduos de poliestireno de construção e demolição. **J. Clean. Prod.** 2019, 220, 144–151, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.132>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619305219>)

DERRICK J.A.; SCOTT T. S.; FRANCIS T.K. Au, Mechanical properties of concrete utilising waste ceramic as coarse aggregate, **Construction and Building Materials**, Volume 117, 2016, Pages 20-28, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.153>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816307085>)

DURAN, A.; HEVIA, R.; CENTRITTO, N.; OLIVEIRA, A. P. N.; BERNARDIN, A. M. **Introducción a los esmaltes cerâmicos**. Madrid: Faenza Editrice Ibérica, 2002. 224 p.

EVANGELISTA, L.; BRITO, J. Mechanical Behaviour of Concrete Made with Fine Recycled Aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 29, n. 5, p. 397-401, 2007

EVANGELISTA, L.; BRITO, J. Durability Performace of Concrete Made with Fine Recycled Concrete Aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 1, p. 9-14, jan. <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.09.005> <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946509001474> 2010

EVANGELISTA, P. P. A.; COSTA, D. B.; ZANTA, V. M. Alternativa sustentável para destinação de resíduos de construção classe A: sistemática para reciclagem em canteiros de obras. **Ambiente Construído**, Porto Alegre-RS, v. 10, n. 3, p. 23-40, jul./set. 2010. ISSN 1678-8621.

FARHAD, A. Mechanical Properties of Waste Tire Rubber Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 28. 2016. p. 040151521-0401515214.

FERNANDEZ-JIMENEZ, R.; MARTIRENA, F.; SCRIVENER, K. L. The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite. **Cement and Concrete Research**, v. 41, p. 113–122, 2011.

FERREIRA, L. M. M. **Betões Estruturais Com Incorporação de Agregados Grossos Reciclados de Betão**: influência da pré-saturação. Lisboa, 2007. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2007

FONSECA, F. B. **Desempenho estrutural de paredes de alvenaria de blocos de concreto de agregados reciclados de rejeitos de construção e demolição**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

FONSECA, M. J. M.; MAINTINGUER, S. I. Aplicação da logística reversa na construção civil como mecanismo ambiental sustentável em políticas públicas. **Brazilian Journal of Development**, 2018.

FRAGA, M. F. **Panorama da geração de resíduos da construção civil em Belo Horizonte: medidas de minimização com base em projeto e planejamento de obras**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

FUNG, W. W. S; NG, P.L.; WONG, H.; KWAN, A. (2012). Reducing Concrete Shrinkage by Aggregate Treatment with Polymer Latex and Water Repellent. **American Concrete Institute Publication SP**, 2012, 467-480. 10.14359/51684248.
<http://dx.doi.org/10.14359%2F51684248>

GHISELLINI, P.; JI, X.; LIU, G.; ULGIATI, S. Evaluating the transition towards cleaner production in the construction and demolition sector of China: A review. **Journal of Cleaner Production**, 195, 418–434. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.084>

GIONGO, J. S.; JACINTHO, A. E. P. G. D. **Concreto armado: introdução e propriedades dos materiais**. São Carlos: [s.n.], 2007

GRIGOLI, A. S.; HELENE, P. **Comportamento das Adições Minerais Inertes em Poros e Zona de Transição em Concretos**. II Encontro Tecnológico de Engenharia Civil e Arquitetura de Maringá - Paraná, 2001.

GRITSADA SUA-IAM, A; SITTISAK J. Influence of calcium carbonate on green self-compacting concrete incorporating porcelain tile waste as coarse aggregate replacement. Case Studies in **Construction Materials**, Volume 19, 2023, e02366, ISSN 2214-5095,
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02366>.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509523005466>

GONZALEZ-COROMINAS, A.; ETXEBERRIA, M. Properties of high-performance concrete made with recycled fine ceramic and coarse mixed aggregates, **Construction and Building Materials**, Volume 68, 2014, Pages 618-626, ISSN 0950-0618,
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.016>.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814007314>

GROUP OF TWENTY (G20). G20 Leaders' **Declaration** – Rio de Janeiro 2024. Rio de Janeiro: G20, 2024.

GÜNTHER, W. M. R. **Resíduos sólidos no contexto da saúde ambiental**. 2008. Tese (Livre Docência em Resíduos Sólidos) - Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. doi:10.11606/T.6.2010.tde-19072010-144112. Acesso em: 2026-05-22.

GUIMARÃES, A. T. C. **Propriedades do concreto fresco**. In: IBRACON. Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: Ed. G. C. Isaia, 2005. p. 473- 494

GUIMARÃES FILHO, L. P.; GIANEZINI, M.; BRISTOT, V. M.; EMERIM, Y. B.; GUIMARÃES, M. L. F. Avaliação da geração de resíduos de construção civil (RCC) no processo de assentamento cerâmico. **Holos**, [S. l.], v. 3, p. 1–12, 2019. DOI: <https://doi.org/10.15628/holos.2019.6694>. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/6694>. Acesso em: 11 mai. 2024.

HALICKA, A; OGRODNIK, P; ZEGARDLO, B. Using ceramic sanitary ware waste as concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 295-305, 2013.

HAKAN, E. Utilisation of crushed floor and wall tile wastes as aggregate in concrete production, **Journal of Cleaner Production**, V 112, Part 1,2016, Pages 742-752, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.003>.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615008823>

HELENE P. **Dosagem dos Concretos de Cimento Portland**. In: Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. 2v. p. 439-472.

HELENE, P.; ANDRADE, T. Concreto de Cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 1. ed. São Paulo: Ibracon, 2010. v. 2. p. 905-944.

HELENE, P.; ANDRADE, T. **Concreto de cimento Portland**. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, v. 2, p. 905-944, 2007.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini,1992 (reimpressão 2001).

HENTGES, T. I.; KAUTZMANN, V. O.; KULAKOWSKI, M. P.; NOGUEIRA, J. R. S.; KAZMIERCZAK, C. DE S.; MANCIO, M. (2020). Effect of mixing sequence on fresh and hardened state properties of concrete with recycled aggregate. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, 26(5), 1807–1819.
<https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1734490>

HOONG, J. D.L.H.; JÉRÔME L.; PIERRE-YVES M.; PHILIPPE T., ABDELKARIM; AÏT-MOKHTAR, Determination of the composition of recycled aggregates using a deep learning-based image analysis, **Automation in Construction**, Volume 116, 2020, 103204, ISSN 0926-5805, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103204>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580519315456>)

HOTZA, D.; OLIVEIRA, A. P. N. **Tecnologia de fabricação de revestimentos cerâmicos**. 2. ed. Florianópolis: Editora UFSC, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/187929>. Acesso em: 17 maio 2024.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Agência de notícias**. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias>

JACINTO, M. E. L.; CARVALHO, E. M. R.. Educação ambiental na construção civil: práticas de gestão de resíduos no canteiro de obras. In: SALES, Reinaldo Eduardo da Silva *et al.* (org.). **A Construção Civil: em uma perspectiva econômica, ambiental e social**. São Paulo: Editora Científica Digital, 2022. v. 2, p. 103-118.
DOI: <https://doi.org/10.37885/220508951>.

JADOVSKI, I. **Diretrizes Técnicas e Econômicas para Usinas de Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição**. Porto Alegre, 2008. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Curso de Mestrado Profissionalizante em Engenharia. >Acesso em: 9 junho 2024.

JANANI, S.; KULANTHAIVEL, P.; SOWNDARYA, G.; SRIVISHNU, H.; SHANJAYVEL, P. G. Study of coconut shell as coarse aggregate in light weight concrete- a review, **Materials Today: Proceedings**, Volume 65, Part 2, 2022, Pages 2003-2006, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.329>.

JIANGUO, H.; WANG, K.; XUHAO, W.; MONTEIRO, P.J., 2D image analysis method for evaluating coarse aggregate characteristic and distribution in concrete, **Construction and Building Materials**, Volume 127, 2016, Pages 30-42, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.120>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816315707>)

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

KABIRIFAR, K., MOJTAHEDI, M., WANG, C.; TAM, V. W. (2020). Construction and demolition waste management contributing factors coupled with reduce, reuse, and recycle strategies for effective waste management: A review. **Journal of cleaner production**, 263, 121265.

KAEFER, L. F. **A evolução do concreto armado**. PEF 5707 – Conceção, Projeto e Realização das estruturas: aspectos históricos. São Paulo- SP, 1998

KARPINSKI, L. A.; PANDOLFO, A; REINEHER, R.; GUIMARÃES, J.C.B; PANDOLFO, L.M.; KUREK, J. **Gestão diferenciada de resíduos da construção civil: uma abordagem ambiental**. Porto Alegre: PUCRS, 2009. 164 p.

KESHAVARZ, Z.; MOSTOFINEJAD, D., Porcelain and red ceramic wastes used as replacements for coarse aggregate in concrete, **Construction and Building Materials**, Volume 195, 2019, Pages 218-230, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.033>.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818326989>

KHAERTDINOVA, A.; MALIASHOVA, A.; GADELSHINA, S. Economic development of the construction industry as a basis for sustainable development of the country. **E3S Web Of Conferences**, [S.L.], v. 274, p. 01-11, 01 abr. 2021. EDP Sciences.
<http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/202127410021>. Disponível em:
<https://www.researchgate.net/publication/352514914>

KIM, H. K.; NAM, I. W.; LEE, H. K. Enhanced effect of carbon nanotube on mechanical and electrical properties of cement composites by incorporation of sílica fume. **Composite Structures**, v. 107, p. 60–69, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.07.042>.

KLEPA, R.B.; MEDEIROS, M.F.; FRANCO, M.A.C.; TAMBERG, E.T.; FARIAS, T.M.B.; FILHO, J.A.P.; BERSSANETI, F.T.; SANTANA, J.C.C. Reuse of construction waste to produce thermoluminescent sensor for use in highway traffic control. **Journal of Cleaner Production**, v.209, p. 250-258, 2019.

KOU, S. C.; POON, C. S. Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash. **Cement and Concrete Composites**, v. 37, n. 1, p. 12–19, 2012.

KOU, S.; POON, C.S. Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, 32 (8), pp. 649-654, 2010
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.05.003>

KOURMPANIS, B.; PAPADOPOULOS, A.; MOUSTAKAS, K.; KOURMOUSSIS, F.; STYLIANOU, M.; LOIZIDOU, M. (2008). An integrated approach for the management of demolition waste in Cyprus. **Waste Management & Research**, 26(6), 573-581.

KORPA, A.; TRETTIN, R. The influence of different drying methods on cement paste microstructures as reflected by gas adsorption: Comparison between freeze-drying (Fdrying), D-drying, P-drying and oven-drying methods. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 4, p. 634–649, abr. 2006

KUHN, D. C.; CAMPOS, R. F. F.; SANTIAGO, M. R.; OLIVEIRA, T. M.; BRANDÃO, D. L. (2021). Análise quantitativa da geração de resíduos sólidos da construção civil: estudo de caso no município de itapiranga–sc. **IGNIS Periódico Científico de Arquitetura e Urbanismo Engenharias e Tecnologia de Informação**, 10(1), 21-34.

KPOMWOSA, E.E; EHIKHUENEN, S.O. (2017). O efeito de resíduos cerâmicos como agregado grosso nas propriedades de resistência do concreto. **Nigerian Journal of Technology**, 36, 691-696.

LEITE, M. B.; MONTEIRO, P.J., Microstructural analysis of recycled concrete using X-ray microtomography, **Cement and Concrete Research**, Volume 81, 2016, Pages 38-48, ISSN 0008-8846, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.11.010>.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884615002938>)

LEITE, F. C.; MOTTA, R. S.; VASCONCELOS, K. L.; BERNUCCI, L. Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 6, p. 2972–2979, jun. 2011. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.105>. Acesso em: 21 set. 2025.

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

LEVY, S. M. **Reciclagem do entulho de construção civil para utilização como agregado de argamassas e concretos**. São Paulo, 1997. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

LI, J., DING, Z., MI, X., WANG, J. A model for estimating construction waste generation index for building project in China. **Resources, Conservation and Recycling**, Volume 74, 2013, Pages 20-26, ISSN 0921-3449, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.02.015>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344913000529>)

LI, J., YAO, Y., ZUO, J.; LI, J. (2020). Key policies to the development of construction and demolition waste recycling industry in China. **Waste Management**, 108, 137-143.

LIMA, S. F. S.; LIMA, L. L. S.; PAIVA, P. S. B. Sustainable construction management practices in a Brazilian medium-sized city. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 4, p. 329–342, out./dez. 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212021000400572>. Acesso em: 21 set. 2025.

LIMBACHIYA, M.C.; T. LEELAWAT, E R.K.; DHIR, R.C.A. concrete: a study of properties in the fresh state, strength development and durability, in **Proceedings of the International Symposium on Sustainable construction** R. Dhir, N. Henderson, and M. Limbachiya. 1998, Thomas Telford: Londres, Reino Unido. p. 227-237

LINS, E. A. M.; SILVA, G. D.; SOUSA, W. S.; MELO, D. C. P.; PAZ, D. H. F.. Análise da gestão de resíduos da construção civil utilizando indicadores ambientais: estudo de caso. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.13, n.7, p.153-163, 2022. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2022.007.0012>

LIU, J., TAN, X., ZHENG, J., & WANG, Z. (2024). Quantification of carbon potential of construction waste treatment: a case study of Guangzhou, China. **Journal of Green Building**, 19(3), 221-244.

LU, W.; TAM, V., WY. Construction waste management policies and their effectiveness in Hong Kong: A longitudinal review. **Renewable and sustainable energy reviews**, Volume 23, 2013, Pages 214-223, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.007>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113001664>)

MAKOWIECKY, S. A história da arte, a Obra de Arte e a fascinante realidade da ambiguidade visual. **Anais do XXXIX Colóquio do Comitê Brasileiro de História da Arte**. Uberlândia: Comitê Brasileiro de História da Arte, 2019. v. 1. p. 286-300

MARQUES NETO, J. C. **Gestão dos resíduos de construção e demolição no Brasil**. São Carlos: Editora RiMa, 2005. 162 p.

MARQUES NETO, J. C.; SCHALCH, V. Gestão dos resíduos de construção e demolição: Estudo da situação no município de São Carlos, SP. **Engenharia Civil**, Minho, Portugal, v. 36, p. 41–50, 2010.

MATOS, F. O.; MOURA, G. L.; CONDE, G. B.; MORALES, G. P.; BRAZIL, É. C. Impactos ambientais decorrentes do aterro sanitário da região metropolitana de Belém-PA: aplicação de ferramentas de melhoria ambiental. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 12, n. 39, p. 297–305, set. 2011. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/16593>. Acesso em: 07 jul. 2023.

MCCARTER, W.J; ALASWAD, G.A; SURYANTO, B. 2018, 'Transient moisture profiles in cover-zone concrete during water absorption', **Cement and Concrete Research**, vol. 108, pp. 167–171, jun 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.04.001>

MCDONALD, B.; SMITHERS, M. Implementing a waste management plan during the construction phase of a project: a case study. **Construction Management and Economics Information**, v. 16, n. 4, p. 71-8, 1998. <https://doi.org/10.1080/014461998372600>

MAZZUCCO, G., SALOMONI, V.A., MAJORANA, C., "A cohesive contact algorithm to evaluate the mechanical behaviour of concrete ITZ at different roughness conditions", **Construction and Building Materials**, v. 294, pp. 123479, ago. 2021. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123479>.
» <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123479>

MEDEIROS, A. G.; GURGEL, M.T.; SILVA, W. G.; OLIVEIRA, M. P.; FERREIRA, R.L.S.; LIMA, F. J. N. Evaluation of the mechanical and durability properties of eco-efficient concretes produced with porcelain polishing and scheelite wastes. **Construction and Building Materials**, Volume 296, 2021, 123719, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123719>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821014793>)

MEENA, R.V.; JAIN, J. K.; CHOUHAN, H. S.; BENIWAL, A. S. Use of waste ceramics to produce sustainable concrete: A review. **Cleaner Materials**, v. 4, p. 100085, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100085>.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

METHA, P.; MONTEIRO, P. **Concreto – Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 4ª edição, Ed Ibracon. 2014

MESQUITA, L. C.; AZEVEDO, I. C.; CÂNDIDO, E. S.; CATHOUD, G. A. Análise da viabilidade técnica de utilização de resíduos de construção e demolição na fabricação de blocos de vedação (doi:10.5216/reec. V10i3.32651). **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, Goiânia, v. 10, n. 3, 2015. DOI: 10.5216/reec. v10i3.32651. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/reec/article/view/32651>. Acesso em: 19 jun. 2024.

MIRANDA, N., M., A., L. LIMA, V. F.; ROCHA, J., M.R., CARMONA, R. M. S.; LACERDA, S. C., SOUZA, H., M., NASCIMENTO, J. C. SILVA, J. C. M.; Importância da implantação do plano de gerenciamento de resíduos da construção civil e de demolição no Município de João Pessoa. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v.6, n.13, p.567- 576, 2019.

NAGATAKI, S.; GOKCE, A.; SAEKI, T.; HISADA, M. Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Research**, Volume 34, Issue 6, 2004, Pages 965-971, ISSN 0008-8846, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.11.008>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884603004046>)

NATARAJA, M.C; BHAT, G.; MANOJ, M. Investigação sobre concreto com ladrilhos vitrificados triturados como agregados graúdos. **J Build Rehabil** 7 , 103 (2022).
<https://doi.org/10.1007/s41024-022-00245-3>

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. 5 ed. São Paulo. PINI, 2015.

NEVILLE, A.M.; BROOKS, J.J. (2013). **Tecnologia do concreto**. Tradução: Ruy Alberto Cremonini. 2.ed. Porto Alegre: Bookman.

NGAYAKAMO, B.H. Sustainable concrete production: the role of ceramic waste as a partial coarse aggregate substitute. **Discover Civil Engineering** 2, 32 (2025).
<https://doi.org/10.1007/s44290-025-00198-9>

NUNES, K.; MAHLER, C. Comparação da gestão de resíduos de construção e demolição entre o Brasil, a União Europeia e os EUA. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**. 2020;38(4):415-422. doi: 10.1177/0734242X20902814

NWAUBANI, S. O.; PARSONS, L. A. Properties, durability and microstructure of concrete incorporating waste electrical and electronic plastics as partial replacement for aggregates in concrete. **Case Studies in Construction Materials**. Ed. Elsevier. Universidade de Witwatersrand, Johannesburg, África do Sul. p: 1-22. 2021 ISSN 2214-5095,
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00731>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509521002461>)

OLIVEIRA, A. P. N.; HOTZA, D. **Tecnologia de fabricação de revestimentos cerâmicos**. Florianópolis: Editora UFSC, 2015.

OLIVEIRA, D. M. **Desenvolvimento de Ferramenta Para Apoio à Gestão de Resíduos de Construção e Demolição Com Uso de Geoprocessamento: caso Bauru, SP**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) _ Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2008.

OLIVEIRA, F. A.; MAUÉS, L. M. F.; ROSA, C. C. N.; SANTOS, D. G.; SEIXAS, R. M. Previsão da geração de resíduos na construção civil por meio da modelagem BIM. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 157–176, out./dez. 2020.

ONU BRASIL. Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil. Nações Unidas Brasil, 2022. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 07 jun. 2024.

ÖZKAN, I.; MÜMTAZ Ç., RASIH E., O., Characterization of waste clay from the Sardes (Salihli) placer gold mine and its utilization in floor-tile manufacture, **Applied Clay Science**, Volume 49, Issue 4, 2010, Pages 420-425, ISSN 0169-1317, <https://doi.org/10.1016/j.clay.2009.08.021>.<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169131709002063>)

PADOVAN, R. G. **Influência da Pré-Molhagem nas Propriedades de Concretos Produzidos Com Agregado Reciclado de Concreto**. São Leopoldo, 2013. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos- UNISINOS. São Leopoldo, 2013.

PAKDEL, E; KASHI, S.; VARLEY, R.; WANG, Y. X. Recent progress in recycling carbon fibre reinforced composites and dry carbon fibre wastes, **Resour Conserv Recycl**, vol. 166, no. 105340, pp. 1-20, 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.105340.

PAUL, S.C.; FARUKY, S.A.U; BABAFEMI, A.J; MIAH, M.J. Eco-friendly concrete with waste ceramic tile as coarse aggregate: mechanical strength, durability, and microstructural properties. **Asian Journal of Civil Engineering**. 24, 3363–3373 (2023). <https://doi.org/10.1007/s42107-023-00718-x>

PINHO, S. A. C. (2013). **Desenvolvimento de programa de indicadores de desempenho para tecnologias construtivas à base de cimento: perdas, consumo e produtividade** (Dissertação de mestrado). Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife.

PEDROSO, F. L. **Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem**. São Paulo: Concreto e construções, v. 53, p.14-19, 2009.

PENIDO, E.; COSTA, S.S. **Cerâmica**. 2ª ed. São Paulo: Senac, 1999.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland**. 13. ed. São Paulo: Globo, 1998. 307 p.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de Cimento Portland**. 14ª ed., revisado por Vladimir A. Paulon, São Paulo: Editora Globo, 2005, 307 p.

PINTO, T. P. **Metodologia para gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999. 203 p.

PINTO, T. P. **Utilização de resíduos de construção: estudo do uso em argamassas**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Planejamento) – Universidade de São Carlos, São Carlos, 1986. 140 p.

PINTO, T. P.; GONZÁLEZ, J. L. R. Manejo e gestão de resíduos da construção civil. **Volume 1 – Manual de orientação**: como implementar um sistema de manejo e gestão nos municípios. Brasília: Caixa, 2005.

PNUMA; GLOBAL ABC. **Relatório de status global para edificações e construção (Buildings-GSR)**. Publicado em 2024. Disponível em: <https://www.unep.org/pt-br/resources/relatorios/relatorio-de-status-global-para-edificacoes-e-construcao>. Acesso em: 06 mai. 2024.

POON, C. S.; CHAN, D. Paving Blocks Made with Recycled Concrete Aggregate and Crushed Clay Bricks. **Construction and Building Materials**, v. 20, n. 5, p. 569-577, jun. 2006.

POON, C. S.; SHUI, Z.; LAM, L.; FOK, H.; KOU, S. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete **Cement and Concret Research.**, 34 (2004), pp. 31-36

PRESS, F.; SIEVER, R.; GROTZINGER, J.; JORDAN, T. (2006). **Para entender a Terra**; tradução Rualdo Menegat et al. – 4.ed. – Porto Alegre: Bookman. p. 656.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE (PNUMA). **Relatório sobre as lacunas de emissões 2022**. Disponível em: <https://www.unep.org/pt-br/resources/relatorio-sobre-lacuna-de-emissoes-2022>. Acesso em: 2 jan. 2017.

QUARCIONI, V. A. Caracterização da Porosidade de Argamassa Mista Endurecida de Cimento e Cal com Vistas à Durabilidade. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 4., 2001, Brasília, DF. Anais... Brasília, DF: PECC; ANTAC, 2001. p. 471-484.

RAJAT, K. G.; VINAY, A; RAJESH, G.; KUSUM, R.; PRAKASH, S., Optimum utilization of ceramic tile waste for enhancing concrete properties, **Materials Today: Proceedings**, Volume 49, Part 5, 2022, Pages 1769-1775, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.011>.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321054249>

RASHID, K.; RAZZAQ, A.; AHMAD, M.; RASHIID, T.; TARIQ, Experimental and analytical selection of sustainable recycled concrete with ceramic waste aggregate, **Construction and Building Materials**, Volume 154, 2017, Pages 829-840, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.219>.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817315702>

RAMESH, B.; SANTHANAM, N.; POHSNEM, F. K. Concrete blend with E-waste plastic for sustainable future. **Materials Today: Proceedings**, Volume 22, Part 3, 2020, Pages 959-965, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.204>.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785319338908>

RECENA, F. A. P. **Dosagem e controle da qualidade de concretos convencionais de cimento Portland** - 4. Ed. – Porto Alegre: EDIPUCRS, 2017.

RESENDE, M. A. P de. **A indústria cerâmica: estudo de caso no Município de Tambaú-SP**. Dissertação (Mestrado em Geociências), Unicamp, Instituto de Geociências, Campinas, 1998

RIELLA, H. G. **Cerâmica: dos minerais à porcelana**. São Paulo: TecArt, 2010.

RODRIGUES, B. T.; BAPTISTA, I. F.; LENZI, A. R.; NAGALLI, A.; CAMPOS, R. F. F. (2021). Fatores limitantes do processo de gerenciamento de resíduos da construção civil no Brasil. *Ignis Periódico Científico de Arquitetura e Urbanismo Engenharias e Tecnologia de Informação*, 10(3), 54-74. SACMI -IMOLA. Defeitos de revestimentos cerâmicos como uma consequência de regulação errada do forno. **Cerâmica Industrial**, v. 2, n. 1-2, jan./abr. 2005

ROIG-FLORES, M.; REIG, L.; ALBERO, V.; HERNÁNDEZ-FIGUEIRIDO, D.; MELCHOR-EIXEA, A.; PITARCH, Á. M.; PIQUER, A. (2023). Aproveitamento de Resíduos de Revestimentos de Grés Cerâmico como Agregado Reciclado em Concreto. **Edifícios**, 13 (8), 1968. <https://doi.org/10.3390/buildings13081968>

SACMI-IMOLA. Defeitos de revestimentos cerâmicos como uma consequência de regulagem errada do forno. **Cerâmica Industrial**, v. 2, n. 1-2, jan./abr. 2005

SÁNCHEZ-MENDIETA, JUAN J. GALÁN-DÍAZ, ISABEL MARTINEZ-LAGE, Relationships between density, porosity, compressive strength and permeability in porous concretes: Optimization of properties through control of the water-cement ratio and aggregate type, **Journal of Building Engineering**, Volume 97, 2024, 110858, ISSN 2352-7102, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110858>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710224024264>)

SANDANAYAKE, M.; BOURAS, Y.; HAIGH, R.; VRCELJ, Z. Current sustainable trends of using waste materials in concrete—A decade review. **Sustainability**, v. 12, n. 22, p. 9622, RePEc:gam:jsusta:v:12:y:2020:i:22:p:9622-d:447157 <https://doi.org/10.3390/su12229622> <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/22/9622>

SANTOS, PR, SANTOS, D. DE G. (2017). Investigação de perdas devido ao trabalho inacabado e seu impacto no tempo de ciclo dos processos construtivos. **Ambiente construído**, 17(2), 39-52. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000200145>

SCHÄFER, M.; ERHARDT, RUA.; SOUZA, R.; JORDANI, B.; MANCIO, M.; KULAKOWSKI, M. Influência da utilização de cinza volante e cinza de casca de arroz na resistência à compressão e na taxa de absorção de água de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto. Natal, 2014. In.: 56 CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Anais[...]** Ibracon: São Paulo, 2014

SCHALCH, V.; LEITE, W.D.A; FERNANDES JÚNIOR, J.L.; CASTRO, M.C.A. **Gestão e gerenciamento de resíduos sólidos**. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 2002.

SCHNEIDER, C. A.; RASBAND, W. S.; ELICEIRI, K. W. **NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis**. Nature Methods, v. 9, n. 7, p. 671-675, 2012. <https://imagej.net/>

SCHNEIDER, D. M. **Deposições irregulares de resíduos da construção civil na cidade de São Paulo**. Dissertação (Mestrado) – Curso de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. 131 f.

SCHNEIDER, M.; ROMER, M.; TSCHUDIN, M.; BOLIO, H. Sustainable cement production—present and future, **Cement and Concrete Research**, Volume 41, Issue 7, 2011, Pages 642-650, ISSN 0008-8846, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.019>.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884611000950>

SCRIVENER, K. L.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. **Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials**. Boca Raton: CRC Press, 2016. DOI: 10.1201/b19074

SIDDIQUE, R.; SINGH, G.; BELARBI, R.; AIT-MOKHTAR, K.; KUNAL, Comparative investigation on the influence of spent foundry sand as partial replacement of fine aggregates on the properties of two grades of concrete. **Construction and Building Materials**, Volume 83, 2015, Pages 216-222, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.011>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815002585>)

SILVA, L. P; MARQUES NETO, J. DA C. Analysis and characterization of the Composition of construction waste in the city of Ribeirão Preto- SP. **Gestão & Produção**, v. 28, n. 4, p. e5237, 2021. <https://doi.org/10.1590/1806-9649-2020v28e5237>

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE O SANEAMENTO – SNIS. **Inventário nacional de resíduos de construção civil 2021**. Disponível em: <https://sinir.gov.br/relatorios/inventario-nacional/>.

SOBRAL, Hernani Sávio. **Propriedades do concreto fresco**. São Paulo: ABCP, 2000.

SORANZO, M.; RAMBALDI, E.; PRETE, F.; BONVICINI, G.; BIGNOZZI, M. C. Limpabilidade de porcelanato polido. **Cerâmica Industrial**, v. 22, 2017. Disponível em: <https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/10.4322/cerind.2017.032/pdf/ci-22-5-6-7.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2020.

SOTO-PAZ, J., ARROYO, O., TORRES-GUEVARA, L. E., PARRA-OROBIO, B. A., & CASALLAS-OJEDA, M. (2023). The circular economy in the construction and demolition waste management: A comparative analysis in emerging and developed countries. **Journal of Building Engineering**, 78, 107724.

SOURAV, R.; MOHAJMINUL, H.; MD. NAZMUS, S.; AYESHA, F. M.; M.D. MASNUN, R.; BIBHAS, B. T., Use of ceramic wastes as aggregates in concrete production: A review, **Journal of Building Engineering**, Volume 43, 2021, 102567, ISSN 2352-7102, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102567>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710221004253>)

SOUSA, J. G. G. **Contribuição ao estudo da relação entre propriedades e proporcionamento de blocos de concreto**: aplicação ao uso de entulho como agregado reciclado. Brasília, 2001. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Escola de Engenharia, Universidade de Brasília, Brasília, 2001.

SOUZA, U.E.L.; PALIARI, J.C.; AGOPYAN, V.; ANDRADE, C.A. Diagnóstico e combate à geração de resíduos na produção de obras de construção de edifícios: uma abordagem progressiva. **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 4, n. 4, p. 33–46, 2004.

SOUZA, F.S.; MENDES, J.C.; MORAIS, L.J.B.; SILVA, J.S.; PEIXOTO, R. A. F. Mapping and recycling proposal for the construction and demolition waste generated in the Brazilian Amazon, Resources, **Conservation and Recycling**, Volume 176, 2022, 105896, ISSN 0921-3449, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105896>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092134492100505X>)

STROHER, A.P.; KATO, D.S.; YAMAGUCHI, N.U.; JUNIOR, O.M.C. **Utilização da Cerâmica de Entulho na Substituição de Agregado Graúdo do Concreto**. *Cerâmica Industrial* 22, (2017), 34-36

SUCHITHRA, S.; SOWMIYA, M.; PAVITHRAN, T. Effect of ceramic tile waste on strength parameters of concrete: A review. **Materials Today: Proceedings**, v. 65, part 2, p. 975–982, abr. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.610>. Acesso em: 20 set. 2025.

TAM, VIVIAN, W.Y, Economic comparison of concrete recycling: A case study approach, **Resources, Conservation and Recycling**, Volume 52, Issue 5, 2008, Pages 821-828, ISSN 0921-3449, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.12.001>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344907002248>)

TAM, VIVIAN W.Y.; SOOMRO, MAHFOOZ; EVANGELISTA, ANA CATARINA JORGE. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 172, p. 272-292, maio 2018.

TARHAN, M.; TARHAN, B.; AYDIN, T. The effects of fine fire clay sanitaryware wastes on ceramic wall tiles. **Ceramics International**, v. 42, n. 15, p. 17110–17115, 15 nov. 2016. ISSN 0272-8842, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.07.222>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884216312986>)

TARTUCE, R.; GIOVANNETTI, E. **Princípios Básicos Sobre Concreto de Cimento Portland**. Editora Pini, São Paulo (SP), Brasil, 1990.

THOMAS, C.; SETIÉN, J.A.; POLANCO, P.; ALEJOS, M.; SÁNCHEZ, J. Durability of recycled aggregate concrete, **Construction and Building Materials**, Volume 40, 2013, Pages 1054-1065, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.106>.

THOMAS, J. J.; JENNINGS, H. M.; ALLEN, A. J. The Surface Area of Hardened Cement Paste as Measured by Various Techniques. **Concrete Science and Engineering**, v. 1, p. 45–64, 1999.

TOPÇU, I. B.; GUNÇAN, N.F. Using waste concrete as aggregate. **Cement and Concrete Research**, Volume 25, Issue 7, 1995, Pages 1385-1390, ISSN 0008-8846, [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00131-U](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00131-U). (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/000888469500131U>)

TORGAL, F. P.; JALALI, S. Toxicidade de materiais de construção: uma questão incontornável na construção sustentável. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 3, p. 41–53, set. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212010000300003>. Acesso em: 20 set. 2025.

TORGAL, P.F.; JALALI, S., Reusing ceramic wastes in concrete, **Construction and Building Materials**, Volume 24, Issue 5, 2010, Pages 832-838, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.023>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061809003602>)

TROIAN, A. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados de concreto frente à penetração de íons cloreto**. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo. 2010

TUTIKIAN, B.; HELENE, P. **Dosagem dos Concretos de Cimento Portland**. In: Geraldo C. Isaia. (Org.). *Concreto: Ciência e Tecnologia*. 1 ed. São Paulo: Ibracon, 2011, v. 1, p. 415-451.

UNIÃO INTERNACIONAL DE QUÍMICA PURA E APLICADA, DIVISÃO DE FÍSICO-QUÍMICA, Comissão de Química de Coloides e Superfícies, incluindo Catálise
RELATÓRIO DE DADOS DE FISSORÇÃO PARA SISTEMAS GÁS/SÓLIDO com
Referência Especial à Determinação da Área Superficial e Porosidade Relato de Dados de Fissorção para Sistemas Gás/Sólido - com Referência Especial à Determinação da Área Superficial e Porosidade, 57 (4) (1985), pp. 603 - 619

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE
(UNFCCC). 29th Conference of the Parties to the UNFCCC – **COP 29**. Baku, 2024.

UZZAL, H.; THOMAS, N.G., Influence of waste materials on buildings' life cycle environmental impacts: Adopting resource recovery principle, **Resources, Conservation and Recycling**, Volume 142, 2019, Pages 10-23, ISSN 0921-3449,
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.11.010>.(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344918304282>)

VIEIRA, G. L.; DAL MOLIN, D. C. C.; LIMA, F. B. Resistência e Durabilidade de Concretos Produzidos Com Agregados Reciclados Provenientes de Resíduos de Construção e Demolição. **Revista Engenharia Civil da Universidade do Minho**, v. 19, p. 5-18, 2004.

VIEIRA, C. R.; ROCHA, J. H. A.; LAFAYETTE, K. P. V.; SILVA, D. M. Análise da Geração dos Resíduos da Construção e Demolição nos Canteiros de Obra da Cidade do Recife-PE. **RPER**, [S. l.], n. 59, p. 153–169, 2021. DOI: 10.59072/rper.vi59.99. Disponível em: <https://www.review-rper.com/index.php/rper/article/view/99>. Acesso em: 22 mai. 2026.

YOST, P. A.; HALSTEAD, J. M. A methodology for quantifying the volume of construction waste. **Waste Management & Research**, v. 14, n. 5, p. 453-461, 1996.
<https://doi.org/10.1006/wmre.1996.0044>

YUAN, HONGPING; SHEN, LIYIN. Trend of the research on construction and demolition waste management. **Waste Management**, v. 31, n. 4, p. 670-679, 2011.

ZEZHOU WU; ANN T.W. YU; LIYIN SHEN; GUIWEN LIU; Quantifying construction and demolition waste: An analytical review, **Waste Management**, Volume 34, Issue 9, 2014, Pages 1683-692, ISSN 0956-053X, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.05.010>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X14002104>)

ZHANG, N , ZHAO, FANGFANG , GUO, PINGYE , LI, JIABIN , GONG, WEILI , GUO, ZHIBIAO , SOL, XIAOMING , Caracterização da estrutura porosa em nanoescala e permeabilidade de folhelhos argilosos e arenitos de granulação fina em reservatórios de carvão por microscopia eletrônica de varredura, porosimetria de intrusão de mercúrio e ressonância magnética nuclear de baixo campo, **Geofluids** , 2018, 2905141, 20 páginas, 2018.
<https://doi.org/10.1155/2018/2905141>

WAINWRIGHT, P. J.; TREVORROW, A.; YU, Y.; WANG, Y. Modifying the performance of coarse and fine recycled concrete aggregates. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM, 3., 1993, Odense, Denmark. **Proceedings ...** Great Britain: E & FN Spon, 1993. p.319 – 330.

WANG, H.Y.; HUANG, W.L. Durability of self-consolidating concrete using waste LCD glass. **Construction and Building Materials**. Volume 24, Issue 6, 2010, Pages 1008-1013, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.11.018>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061809004036>)

WANG, L.; JIN, Z.; LIU, R.; HUANG, X.; SU, Y.; LI, C.; ZHANG, Q. Hydrogen Sorption Capacity of Diatomaceous Earth for Geological Hydrogen Storage. **Int. J. Hydrogen Energy** 2024, 62, 883–891.

WANG, C.; ZENGQIANG, H.; YITENG, W.; CHUANYING, W.; SHUANGYUAN, C. A novel method for measuring and analyzing the characteristics of coarse aggregates in concrete, **Journal of Building Engineering**, Volume 78, 2023, 107730, ISSN 2352-7102, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107730>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710223019101>)

WERLE, A. P. **Determinação de Propriedades de Concretos Com Agregados Reciclados de Concreto, Com Ênfase na Carbonatação**. 159 f. 2010 São Leopoldo. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2010.

ZHONG, R.; WILLE, K. Influence of matrix and pore system characteristics on the durability of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 162, p. 132- 1 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.17541>, 2018. Disponível em: [10.1016/j.conbuildmat.2017.11.175](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.175). Acesso em: dez. 2025.

ZORDAN, S. E. **Utilização do entulho como agregado na confecção do concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997. 140 f.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Tabelas para análise de variância (ANOVA) dos resultados do ensaio de resistência à compressão

ANOVA (3 dias)

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	12,8259	3	4,2753	10,42756	0,0038722	4,0661806
Dentro dos grupos	3,28	8	0,41			
Total	16,1059	11				

Onde: SQ = soma quadrada; GL = grau de liberdade; MQ = média quadrada

ANOVA (7 dias)

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1,6918	3	0,563933	0,795084	0,53021	4,066181
Dentro dos grupos	5,6742	8	0,709275			
Total	7,366	11				

Onde: SQ = soma quadrada; GL = grau de liberdade; MQ = média quadrada

ANOVA (28 dias)

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>GL</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	11,77207	3	3,924022	2,085951	0,180492	4,066181
Dentro dos grupos	15,04933	8	1,881167			
Total	26,8214	11				

Onde: SQ = soma quadrada; GL = grau de liberdade; MQ = média quadrada

APÊNDICE B – Tabelas para análise de variância (ANOVA) dos resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral

ANOVA (7 dias)

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,096167	3	0,032056	0,353067	0,788381	4,066181
Dentro dos grupos	0,726333	8	0,090792			
Total	0,8225	11				

Onde: SQ = soma quadrada; GL = grau de liberdade; MQ = média quadrada

ANOVA (28 dias)

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	2,043225	3	0,681075	3,046293	0,092311	4,066181
Dentro dos grupos	1,7886	8	0,223575			
Total	3,831825	11				

Onde: SQ = soma quadrada; GL = grau de liberdade; MQ = média quadrada

APÊNDICE C – Tabelas para análise de variância (ANOVA) dos resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade

ANOVA (72 horas)						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,050525526	3	0,016842	11,27959	0,007037	4,757063
Dentro dos grupos	0,00895875	6	0,001493			
Total	0,059484276	9				

Onde: SQ = soma quadrada; GL = grau de liberdade; MQ = média quadrada

APÊNDICE D – Tabelas para análise de variância (ANOVA) dos resultados do ensaio de altura capilar

ANOVA (24 horas)

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	579,262667	3	193,0876	11,17692	0,007199	4,757063
Dentro dos grupos	103,653333	6	17,27556			
Total	682,916	9				

Onde: SQ = soma quadrada; GL = grau de liberdade; MQ = média quadrada

ANOVA (48 horas)

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	526,4493	3	175,4831	11,21457	0,007139	4,757063
Dentro dos grupos	93,88667	6	15,64778			
Total	620,336	9				

APÊNDICE E – Tabela com resultado de cada corpo de prova para o ensaio de resistência à compressão

Traço	Idade	CP 1	CP 2	CP 3	Média
REF (0%)	3d	9,65	9,52	8,63	9,27
	7d	11,72	11,29	11,77	11,59
	28d	18,27	14,69	19,18	17,38
ARP 25	3d	9,27	8,09	9,19	8,85
	7d	10,97	11,56	10,33	10,95
	28d	15,03	16,14	14,87	15,35
ARP 50	3d	11,51	10,88	10,72	11,04
	7d	11,93	13,33	10,65	11,97
	28d	17,42	17,38	18,55	17,78
ARP 75	3d	8,26	9,12	7,47	8,28
	7d	12,59	11,12	11,46	11,72
	28d	16,98	16,04	15,01	16,01

Fonte: Autora (2025).

APÊNDICE F – Tabela com resultado de cada corpo de prova para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Traço	Idade	CP 1	CP 2	CP 3	Média
REF (0%)	7d	1,81	1,52	1,83	1,72
	28d	2,54	1,55	2,6	2,23
ARP 25	7d	1,76	1,33	1,49	1,53
	28d	1,57	1,59	1,43	1,53
ARP 50	7d	1,81	1,51	1,75	1,69
	28d	1,98	1,61	2,35	1,98
ARP 75	7d	1,42	2,35	1,52	1,76
	28d	1,96	2,87	3,18	2,67

Fonte: Autora (2025).

APÊNDICE G – Tabela com resultado de cada corpo de prova para o ensaio de absorção de água por capilaridade

	Massa 28 dias Cura	Massa Seca 24 horas Estufa	Massa Saturada 3 horas	Massa Saturada 6 horas	Massa Saturada 24 horas	Massa Saturada 48 horas	Massa Saturada 72 horas
Horário		11h 40min	14h 40min	17h 40min	11h 40min	11h 40min	11h 40min
	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)
REF							
CP 1	3,345	3,120	3,126	3,128	3,138	3,148	3,154
CP 2	3,275	3,044	3,046	3,048	3,056	3,064	3,07
ARP 25							
CP 1	3,200	2,966	2,972	2,976	2,988	2,998	3,002
CP 2	3,210	2,980	2,988	2,994	3,008	3,018	3,022
ARP 50							
CP 1	3,355	3,138	3,148	3,152	3,170	3,180	3,184
CP 2	3,355	3,150	3,160	3,164	3,182	3,192	3,196
CP 3	3,385	3,16	3,168	3,172	3,188	3,200	3,204
ARP 75							
CP1	3,195	2,98	2,986	2,990	3,006	3,018	3,024
CP 2	3,220	3,006	3,012	3,014	3,030	3,042	3,048
CP 3	3,235	3,020	3,026	3,032	3,048	3,060	3,064

Fonte: Autora (2025).

APÊNDICE H – Tabela com resultado de cada corpo de prova para o ensaio de altura capilar

	MEDIDA	MEDIDA	MEDIDA	MEDIDA	MEDIDA	MEDIDA	MEDIDA	MEDIDA	MEDIDA
	1	1	2	2	3	3	4	4	5
	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
Horário	24 horas	48 horas	24 horas	48 horas	24 horas	48 horas	24 horas	48 horas	24 horas
REF									
CP 1	1,0	1,0	0,8	0,8	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0
CP 2	1,5	1,4	0,8	0,8	1,0	1,0	1,0	1,0	0,8
ARP 25									
CP 1	1,5	1,5	1,0	1,0	1,8	1,8	0,8	0,8	2,0
CP 2	2,5	2,5	1,8	1,8	1,0	1,0	1,4	1,4	1,0
ARP 50									
CP 1	2,0	2,0	1,5	1,5	2,0	2,0	1,8	1,8	1,0
CP 2	2,5	2,5	2,0	2,0	2,5	2,5	3,0	3,0	2,0
CP 3	3,0	3,0	1,5	1,5	1,8	1,8	1,0	0,8	2,3
ARP 75									
CP 1	4,0	4,0	2,5	2,5	3,5	3,4	3,5	2,5	4,5
CP 2	4,0	4,0	3,0	3,4	2,5	2,7	3,5	3,5	3,0
CP 3	2,0	1,8	3,0	2,8	3,5	3,5	2,0	2,0	1,5

Fonte: Autora (2025).

APÊNDICE I – Caracterização granulométrica do agregado miúdo

Abertura das Peneiras (mm)	M1 (g) = 300,01g		M2 (g) = 300,01g		Médias	
	Amostra 1		Amostra 2		%Retido	% Retido
	Massa retida	% retida	Massa retida	% retida	Médio	Acumulado
9,5	0	0	0	0	0	0
6,3	0	0	0	0	0	0
4,75	3,32	1,1	3,09	1,03	1,07	1,07
2,36	18,40	6,15	13,64	4,56	5,36	6,43
1,18	36,63	12,24	21,96	7,35	9,80	16,23
0,6	50,83	16,99	43,73	14,63	15,81	32,04
0,3	99,29	33,18	99,95	33,45	33,32	65,36
0,15	73,90	24,70	91,02	30,46	27,58	92,94
Fundo	16,97	5,64	25,42	8,51	7,08	100,02
Total	299,24	100,00	298,81	100,00	100,00	
Diâmetro	Máximo(mm)	4,75	Módulo de Finura		2,14	

Fonte: Autora (2025).

Nota: Os resultados estão apresentados sem arredondamento de valores.

APÊNDICE J – Caracterização granulométrica do agregado graúdo natural

Abertura das Peneiras (mm)	M1 (g) = 3007,71g		M2 (g) = 3000,00g		Médias	
	Amostra 1		Amostra 2		%Retido	% Retido
	Massa retida	% retida	Massa retida	% retida	Médio	Acumulado
25,0	0	0	0	0	0	0
19,0	61,49	2,05	94,48	3,15	2,60	2,60
12,5	1273,35	42,36	1384,91	46,16	44,26	46,86
9,5	1073,47	35,71	1025,21	34,17	34,94	81,80
6,3	554,42	18,45	471,82	15,73	17,09	98,89
4,8	20,61	0,69	9,35	0,31	0,50	99,39
2,4	4,55	0,15	1,25	0,04	0,10	99,49
1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	99,49
0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	99,49
0,3	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	99,49
0,15	1,21	0,04	7,08	0,23	0,14	99,63
Fundo	16,40	0,55	8,70	0,29	0,42	100,04
Total	300,73	100,00	2998,80	100,00	100,00	
Diâmetro	Máximo(mm)	19,00	Módulo	de Finura	6,81	

Fonte: Autora (2025).

Nota: Os resultados estão apresentados sem arredondamento de valores.

APÊNDICE K – Caracterização granulométrica do agregado graúdo reciclado de porcelanato (ARP)

Abertura das Peneiras (mm)	M1 (g) = 1000,49g		M2 (g) = 1000,24g		Médias	
	Amostra 1		Amostra 2		%Retido	% Retido
	Massa retida	% retida	Massa retida	% retida	Médio	Acumulado
25,0	0	0	0	0	0	0
19,0	49,17	4,91	45,45	4,55	4,73	4,73
12,5	619,05	61,89	528,14	52,88	57,36	62,09
9,5	254,46	25,74	297,75	29,78	27,64	89,70
6,3	74,42	7,44	126,08	12,61	10,03	99,73
4,8	0,74	0,07	1,91	0,19	0,13	99,86
2,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99,86
1,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99,86
0,6	0,26	0,03	0,00	0,00	0,01	99,87
0,3	1,83	0,18	0,17	0,02	0,10	99,97
0,15	0,38	0,04	0,00	0,00	0,02	99,99
Fundo	0,00	0,00	0,22	0,02	0,01	100,00
Total	1000,31	100,00	999,72	100,00	100,00	
Diâmetro Máximo(mm) 19,0 mm Módulo de Finura 6,94						

Fonte: Autora (2025).

Nota: Os resultados estão apresentados sem arredondamento de valores.

APÊNDICE L – Caracterização granulométrica do agregado gráúdo reciclado de porcelanato
ARP 25 (25% Agregado gráúdo de porcelanato e 75% agregado gráúdo natural)

	M1 (g) = g 1000,00		M2 (g) = g 1000,10		Médias	
	ARP = 250,01 g		ARP = 250,19 g			
	Brita = 749,98 g		Brita = 749,91 g			
Abertura das						
Peneiras	Amostra 1		Amostra 2		%Retido	% Retido
(mm)	Massa retida	% retida	Massa retida	% retida	Médio	Acumulado
25,0	0	0	0	0	0	0
19,0	55,54	5,6	8,2	0,82	3,19	3,19
12,5	781,36	78,16	776,67	77,72	77,94	81,13
9,5	144,74	14,47	203,16	20,33	17,40	98,53
6,3	16,04	1,60	9,21	0,92	1,26	99,79
4,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99,79
2,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99,79
1,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99,79
0,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99,79
0,3	0,11	0,01	0,62	0,06	0,04	99,83
0,15	1,28	0,13	0,68	0,07	0,10	99,93
Fundo	0,67	0,07	0,84	0,08	0,08	100,00
Total	999,74	100,00	999,38	100,00	100,00	
Diâmetro Máximo(mm) 19,0 mm						

Fonte: Autora (2025).

Nota: Os resultados estão apresentados sem arredondamento de valores.

APÊNDICE M – Caracterização granulométrica do agregado gráúdo reciclado de porcelanato
ARP 50 (50% Agregado gráúdo de porcelanato e 50% agregado gráúdo natural)

	M1 (g) = 1000,18 g ARP = 500,51 g		M2 (g) = 1000,08g ARP = 500,10 g		Médias	
Abertura das	Brita = 499,67 g		Brita = 499,98 g			
Peneiras	Amostra 1		Amostra 2		%Retido	% Retido
(mm)	Massa retida	% retida	Massa retida	% retida	Médio	Acumulado
25,0	0	0	0	0	0	0
19,0	64,08	6,41	14,67	1,47	3,94	3,94
12,5	695,06	69,5	691,08	69,11	69,31	73,25
9,5	221,24	22,12	240,43	24,04	23,08	96,33
6,3	17,85	1,78	51,86	5,19	3,49	99,82
4,8	0,40	0,04	0,21	0,02	0,03	99,85
2,4	0,24	0,02	0,00	0,00	0,01	99,86
1,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99,86
0,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99,86
0,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99,86
0,15	0,85	0,08	1,18	0,12	0,01	99,96
Fundo	0,43	0,04	0,58	0,06	0,05	100,00
Total	1000,15	100,00	1000,01	100,00		
Diâmetro Máximo (mm) 19,0 mm Módulo de Finura 7,00						

Fonte: Autora (2025).

Nota: Os resultados estão apresentados sem arredondamento de valores.

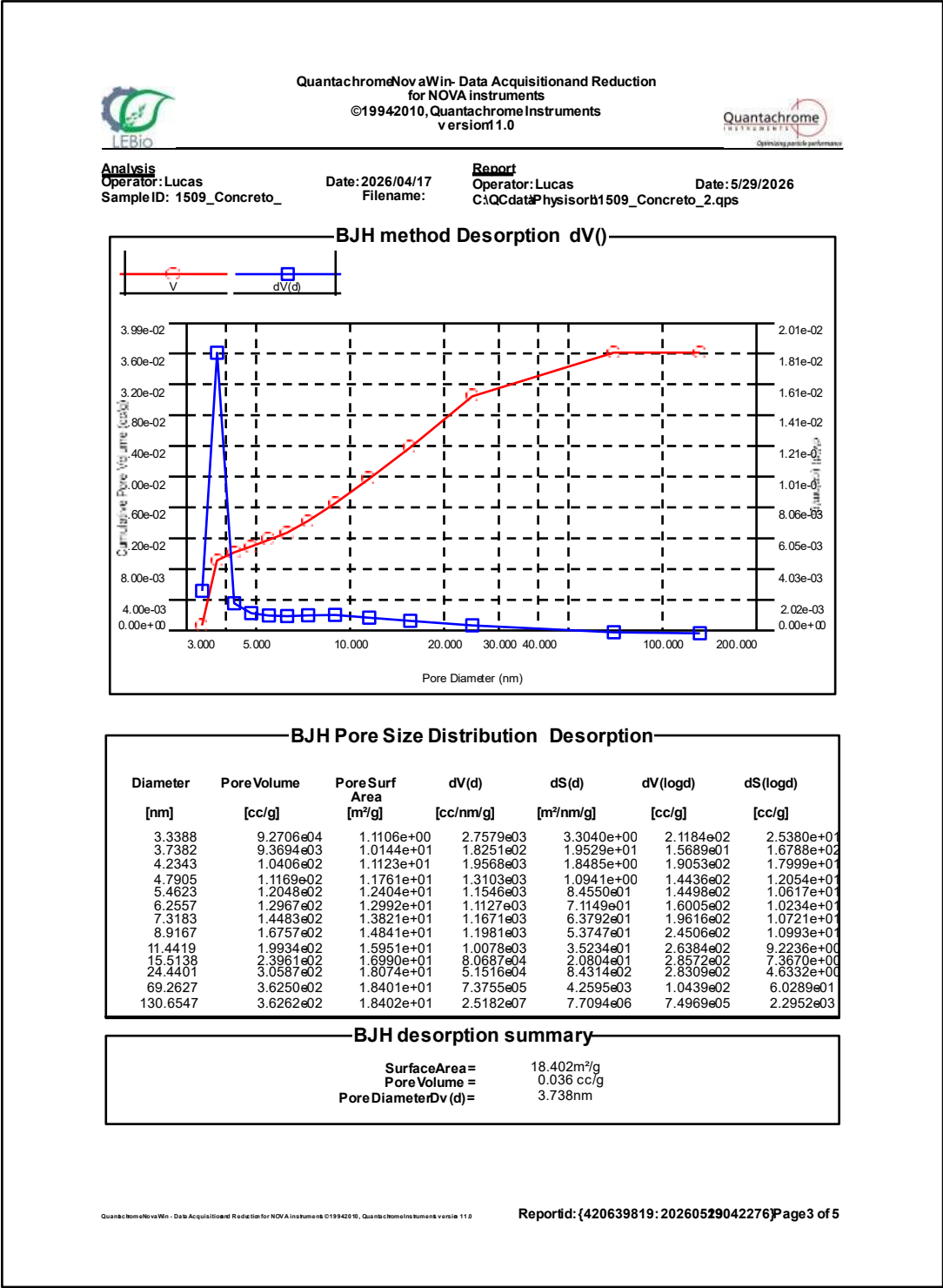
APÊNDICE N – Caracterização granulométrica do agregado gráúdo reciclado de porcelanato
ARP 75 (75% Agregado gráúdo de porcelanato e 25% agregado gráúdo natural)

	M1 (g) = 1000,86 ARP = 750,04 g		M2 (g) = 1000,63 ARP = 750,22 g		Médias	
Abertura das	Brita = 250,82 g		Brita = 250,41 g			
Peneiras	Amostra 1		Amostra 2		%Retido	% Retido
(mm)	Massa retida	% retida	Massa retida	% retida	Médio	Acumulado
25,0	14,7	1,47	9,29	0,93	1,2	1,2
19,0	56,03	5,6	35,29	3,53	4,56	5,76
12,5	709,64	70,91	697,53	69,73	70,32	76,08
9,5	191,68	19,15	203,29	20,32	19,74	95,82
6,3	27,64	2,70	53,23	5,32	4,01	99,83
4,8	0,00	0,00	1,24	0,12	0,06	99,89
2,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99,89
1,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99,89
0,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99,89
0,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99,89
0,15	0,27	0,03	0,20	0,02	0,03	99,92
Fundo	0,74	0,07	0,28	0,03	0,05	99,97
Total	1000,70	99,93	1000,35	100,00	99,97	
Diâmetro	Máximo (mm)	19,0 mm	Módulo	de Finura	7,1	

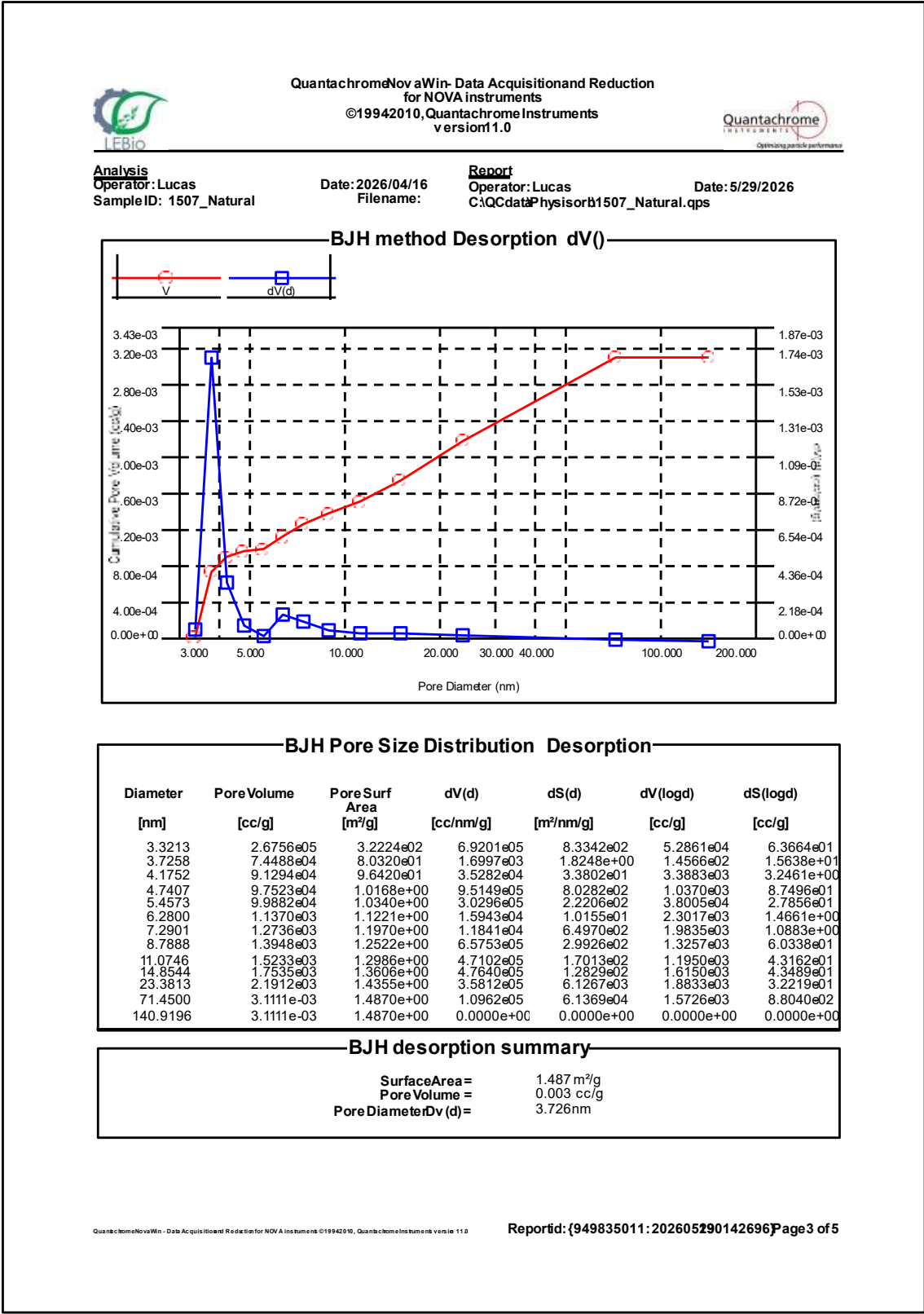
Fonte: Autora (2025).

Nota: Os resultados estão apresentados sem arredondamento de valores.

APÊNDICE O – Ensaio BET/BJH – Amostra do concreto no estado endurecido



APÊNDICE P – Ensaio BET/BJH – Amostra do agregado gráudo natural



APÊNDICE Q – Ensaio BET/BJH – Amostra do agregado reciclado de porcelanato (ARP)

