



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

CAMPUS RUSSAS

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

CLÉSCIA NAIARA FREITAS GOMES

**ANÁLISE DE BLOCOS DE CONCRETO INTERTRAVADO PARA
PAVIMENTAÇÃO COM A UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE CERÂMICA
VERMELHA**

RUSSAS

2022

CLÉSCIA NAIARA FREITAS GOMES

ANÁLISE DE BLOCOS DE CONCRETO INTERTRAVADO PARA PAVIMENTAÇÃO
COM A UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará – Campus Russas, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Msc. Camila Lima Maia.

RUSSAS

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

G613a Gomes, Clécia Naiara Freitas.

Análise de blocos de concreto intertravado para pavimentação com a utilização de resíduo de cerâmica vermelha / Clécia Naiara Freitas Gomes. – 2022.
87 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Civil, Russas, 2022.
Orientação: Profa. Ma. Camila Lima Maia.

1. Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV). 2. Concreto. 3. Pavimentação. 4. Resistência à compressão. 5. Absorção de água. I. Título.

CDD 620

CLÉSCIA NAIARA FREITAS GOMES

ANÁLISE DE BLOCOS DE CONCRETO INTERTRAVADO PARA PAVIMENTAÇÃO
COM A UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará – Campus Russas, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Msc. Camila Lima Maia (Orientadora)

Universidade Federal do Ceará

Profa. Msc. Maria Gisela Parente Nascimento de Lima

Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Jerfson Moura Lima

Universidade Federal do Ceará

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, por me permitir viver a realização desse sonho que é a graduação como engenheira civil, que almejo ser desde criança.

Agradeço a toda a minha família, pelo apoio incondicional e por todo o esforço dedicado para que eu pudesse chegar aonde estou. Em especial à minha mãe Neuzení, que com muita dedicação fez parte de tudo desde o começo e esteve presente, inclusive, nos ensaios da minha pesquisa. A minha tia Marciana, que me deu moradia e me ajudou durante grande parte do tempo em que estive cursando a faculdade.

Agradeço também ao meu namorado Matheus, que por vezes me acalmou em momentos de estresse e ansiedade e sempre me deu a certeza de que eu conseguiria chegar até aqui, e aqui estou.

Agradeço a todas as minhas amigas, que mesmo não fazendo parte da faculdade, não deixaram de fazer parte da minha vida e me ajudaram a aproveitar a jornada também fora do curso.

Agradeço a todos os meus colegas de faculdade, em especial àqueles com quem desenvolvi laços de amizade, o famoso “Magote”, com quem compartilhei a maioria dos momentos bons durante todo o curso. Também aos outros amigos que conquistei ao longo desses anos dentro da universidade, e que foram importantes para que eu chegasse até aqui.

Agradeço às minhas queridas amigas Mayrla Kauane e Auciane Dyrllen, que se fizeram presentes durante a minha pesquisa e colocaram, literalmente, a “mão na massa”, e eu sei que fizeram isso com todo o amor possível.

Agradeço aos técnicos do laboratório, em especial à Myckelle, que não mediu esforços para me ajudar em todos os ensaios e fez isso sempre com alegria e dedicação.

Agradeço à minha orientadora Camila Lima, que buscou sempre as melhores soluções e me ajudou nas tomadas de decisões. Além disso, contribuiu com todo o seu conhecimento técnico para todas as etapas de estudo deste trabalho, fundamental para que tudo ocorresse da melhor forma possível.

A todos, minha mais sincera gratidão.

“Não fui eu que ordenei a você? Seja forte e corajoso! Não se apavore nem desanime, pois o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar”.

Josué 1:9

RESUMO

A industrialização e ocupação urbana contribuem para o crescimento da construção civil. No Brasil, estima-se que 60% dos resíduos gerados vêm da construção e demolição. Quanto aos resíduos dentro da indústria de cerâmica vermelha, estima-se que cerca de 12,2 mil toneladas de resíduos são geradas mensalmente apenas no município de Russas. O Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV) é Classe A pelo CONAMA, podendo utilizado como agregado para concreto. Diante disso, esta pesquisa tem como objetivo a incorporação de RCV como substituição parcial de 5%, 15% e 25% ao agregado miúdo convencional utilizado na produção de blocos intertravados de concreto. Para tanto, usou-se de pesquisa e revisão bibliográfica, coleta e preparação do RCV, caracterização física dos agregados naturais e reciclados empregados, e análise da influência da incorporação do RCV no concreto em seus estados fresco e endurecido. No estado fresco, a incorporação do RCV ocasionou perdas de trabalhabilidade e consequentes dificuldades de moldagem dos corpos de prova. No estado endurecido, analisou-se a absorção de água das peças e a resistência à compressão aos 7 e 28 dias de idade. Quanto à absorção de água, não se detectou grandes influências do resíduo, ficando todos os valores de absorção próximos aos de referência e abaixo dos limites estabelecidos em norma. Sobre a resistência à compressão, observou-se queda quando incorporado o RCV à mistura se comparadas ao traço de referência. Analisando as peças com RCV ao final dos 28 dias, constatou-se que a substituição com maior resistência média atingida foi a de 15%, porém muito próximo da de 25%, com uma diferença em torno de 0,25 MPa entre as duas. Tal fato que pode estar atrelado à atividade pozolânica e efeito filler desempenhados pelo resíduo. Diante dos resultados, o resíduo mostrou-se tecnicamente viável para aplicação em concreto para pavimentação, todavia devem ser estudadas maneiras mais eficazes de moldagem, de modo a estabelecer um padrão.

Palavras-chave: Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV); Concreto; Pavimentação; Resistência à compressão; Absorção de água.

ABSTRACT

Industrialization and urban occupation contribute to the growth of civil construction. In Brazil, it is estimated that 60% of the waste generated comes from construction and demolition. As for waste within the red ceramic industry, it is estimated that about 12.2 thousand tons of waste are generated monthly in the municipality of Russas alone. Red Ceramic Residue (RCV) is classified as Class A by CONAMA, and can be used as an aggregate for concrete. Therefore, this research aims to incorporate RCV as a partial replacement of 5%, 15% and 25% to the conventional fine aggregate used in the production of interlocking concrete blocks. For this, research and literature review, collection and preparation of RCV, physical characterization of natural and recycled aggregates used, and analysis of the influence of incorporation of RCV in concrete in its fresh and hardened states were used. In the fresh state, the incorporation of RCV caused workability losses and consequent difficulties in molding the specimens. In the hardened state, the water absorption of the pieces and the compressive strength at 7 and 28 days of age were analyzed. As for water absorption, no major influences of the residue were detected, with all absorption values close to the reference and below the limits established by the norm. In the hardened state, the water absorption of the pieces and the compressive strength at 7 and 28 days of age were analyzed. As for water absorption, no major influences of the residue were detected, with all absorption values close to the reference and below the limits established by the norm. Regarding the compressive strength, a drop was observed when the RCV was incorporated into the mixture when compared to the reference trace. Analyzing the parts with RCV at the end of 28 days, it was found that the substitution with the highest mean resistance reached was 15%, but very close to 25%, with a difference around 0,25 MPa between the two. Such a fact may be tied to the pozzolanic activity and phylor effect performed by the residue. In view of the results, the residue proved to be technically viable for application in concrete for paving, however, more effective ways of molding should be studied, in order to establish a pattern.

Keywords: Red Ceramic Residue (RCV); Concrete; Pavement; Compressive Resistance; Water Absorption.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Peça tipo I.	28
Figura 2 — Peça tipo II.	28
Figura 3 — Peça tipo III.	28
Figura 4 — Peça tipo IV.	29
Figura 5 — Formatos das peças.	29
Figura 6 — <i>Paver</i> prensado.	30
Figura 7 — <i>Paver</i> dormido.	31
Figura 8 — <i>Paver</i> virado.	31
Figura 9 — Diagrama Ternário.	32
Figura 10 — Fluxograma de atividades da pesquisa.	33
Figura 11 — Resíduo coletado no tamanho inicial.	36
Figura 12 — Resíduo após primeira etapa de quebra.	36
Figura 13 — Resíduo triturado.	36
Figura 14 — RCV _{2,36}	36
Figura 15 — RCV _{4,75}	36
Figura 16 — Ensaio de granulometria com a brita 0.	39
Figura 17 — Ensaio de granulometria com a areia natural.	39
Figura 18 — Ensaio de granulometria com o resíduo de cerâmica vermelha.	40
Figura 19 — Ensaio do Frasco de Chapman para a areia natural.	42
Figura 20 — Ensaio do Frasco de Chapman para o resíduo de cerâmica vermelha.	42
Figura 21 — Aplicação de vácuo no conjunto.	43
Figura 22 — Aferição da temperatura do conjunto.	43
Figura 23 — Obtenção da massa da brita em água.	44
Figura 24 — RCV saturado com superfície seca.	45
Figura 25 — Obtenção da massa do RCV em água.	45
Figura 26 — Determinação da massa unitária da brita 0.	47
Figura 27 — Determinação da massa unitária da areia natural.	47
Figura 28 — Determinação da massa unitária do resíduo de cerâmica vermelha.	47
Figura 29 — Fixação do fator <i>a/c</i>	48
Figura 30 — Consumo aproximado de água.	49
Figura 31 — Consumo de agregado graúdo.	49
Figura 32 — Pré-molhagem do RCV.	51

Figura 33 — Inserção do RCV na mistura.	51
Figura 34 — Medida do abatimento.	52
Figura 35 — Umidificação do molde e da placa de base.	53
Figura 36 — Golpeamento das camadas com a haste.	53
Figura 37 — Retirada do molde.	53
Figura 38 — Medida do abatimento com a trena.	53
Figura 39 — Aplicação de desmoldante.	54
Figura 40 — Adensamento manual do concreto.	54
Figura 41 — Corpos de prova moldados.	55
Figura 42 — Processo de cura úmida.	55
Figura 43 — Secagem superficial dos corpos de prova.	56
Figura 44 — Ensaio de Compressão axial.	56
Figura 45 — Corpo de prova saturado com superfície seca.	58
Figura 46 — Corpo de prova após secagem em estufa.	58
Figura 47 — Pedras do agregado natural.	61
Figura 48 — Fixação do fator a/c para a pesquisa.	69
Figura 49 — Formação de bolas de cimento durante a mistura.	70
Figura 50 — Moldagem de corpo de prova 16 faces com 25% RCV.	71
Figura 51 — Corpos de prova de referência.	72
Figura 52 — Corpos de prova 5% RCV com aditivo.	73
Figura 53 — Corpos de prova 15% RCV com aditivo.	73
Figura 54 — Corpos de prova 25% RCV com aditivo.	73
Figura 55 — Vista lateral de corpos de prova com RCV4,75.	73
Figura 56 — Vista superior de corpos de prova com RCV4,75.	73
Figura 57 — Corpos de prova 5% RCV pré-molhado.	74
Figura 58 — Corpos de prova 15% RCV pré-molhado.	74
Figura 59 — Corpos de prova 25% RCV pré-molhado.	74

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 — Curva granulométrica da Brita 0.	59
Gráfico 2 — Zona granulométrica do agregado graúdo.	60
Gráfico 3 — Curvas granulométricas dos agregados miúdos.	61
Gráfico 4 — Zona granulométrica ótima dos agregados miúdos.	63
Gráfico 5 — Zona granulométrica utilizável dos agregados miúdos.	63
Gráfico 6 — Curvas granulométricas da composição areia + RCV2,36.	64
Gráfico 7 — Curvas granulométricas da composição areia + RCV4,75.	65
Gráfico 8 — Resistência média à compressão do concreto aos 7 dias.	78
Gráfico 9 — Resistência média à compressão do concreto aos 28 dias.	78
Gráfico 10 — Desenvolvimento da resistência à compressão do concreto.	79
Gráfico 11 — Resistência à compressão máxima individual do concreto aos 28 dias.	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Peneiras - Série normal e série intermediária.	38
Tabela 2 — Características granulométricas da Brita 0.	60
Tabela 3 — Composição dos grãos do agregado miúdo.	62
Tabela 4 — Características granulométricas do agregado miúdo.	64
Tabela 5 — Características granulométricas das composições para o agregado miúdo.	65
Tabela 6 — Massa específica real, aparente e absorção de água da Brita 0.	66
Tabela 7 — Massa específica dos agregados miúdos.	67
Tabela 8 — Massa unitária dos agregados.	68
Tabela 9 — Traços.	69
Tabela 10 — Abatimento do tronco de cone.	71
Tabela 11 — Absorção de água do concreto.	75
Tabela 12 — Dados de resistência à compressão do concreto.	76
Tabela 13 — Resistência à compressão do concreto.	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

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 das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais.
BIPs	Blocos Intertravados para Pisos.
BNB	Banco do Nordeste do Brasil.
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente.
DMC	Dimensão Máxima Característica.
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral.
MF	Módulo de Finura.
MME	Ministério de Minas e Energia.
NBR	Norma Brasileira.
NM	Norma Mercosul.
RCD	Resíduos de Construção e Demolição.
RCV	Resíduo de Cerâmica Vermelha.
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas.
SGM	Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral.

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 — Cálculo do módulo de finura do agregado.	40
Equação 2 — Cálculo da massa específica do agregado miúdo.	41
Equação 3 — Cálculo da massa específica do material através do Picnômetro.	43
Equação 4 — Cálculo da massa específica do agregado seco.	45
Equação 5 — Cálculo da massa específica aparente do agregado seco.	45
Equação 6 — Cálculo da absorção de água do material.	46
Equação 7 — Cálculo da massa unitária do material.	47
Equação 8 — Cálculo do consumo de cimento no concreto.	49
Equação 9 — Cálculo do volume de agregado miúdo no concreto.	50
Equação 10 — Cálculo da água para pré-molhagem do agregado reciclado.	51
Equação 11 — Cálculo da resistência à compressão do concreto.	57
Equação 12 — Cálculo da absorção de água do concreto.	57

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Contextualização	16
1.2	Problema da pesquisa	18
1.3	Justificativa	18
1.3	Enquadramento da pesquisa	19
1.5	Objetivos da pesquisa	21
1.5.1	<i>Objetivo geral</i>	21
1.5.2	<i>Objetivos específicos</i>	21
1.5	Organização do trabalho	22
2	REFERENCIAL TEÓRICO	23
2.1	Resíduos Sólidos da Construção Civil	23
2.2	Agregados para concreto	24
2.3	Resíduo de Cerâmica Vermelha	26
2.4	Pavimento intertravado	27
3	MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1	Programa experimental	33
3.2	Materiais utilizados	34
3.3	Coleta e trituração do RCV	35
3.4	Caracterização dos materiais	37
3.4.1	<i>Granulometria</i>	37
3.4.2	<i>Massa específica e massa específica aparente</i>	40
3.4.2.1	<i>Agregados miúdos - massa específica</i>	41
3.4.2.2	<i>Agregados graúdos - massa específica e massa específica aparente</i>	44
3.4.3	<i>Absorção de água</i>	46
3.4.4	<i>Massa unitária</i>	46
3.5	Concreto	47
3.5.1	<i>Dosagem do concreto</i>	48
3.5.2	<i>Preparação do concreto</i>	50
3.5.3	<i>Trabalhabilidade - Slump Test</i>	52
3.5.4	<i>Moldagem dos corpos de prova</i>	53
3.5.5	<i>Ensaio de compressão axial</i>	55
3.5.6	<i>Absorção de água</i>	57

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
4.1	Propriedades dos agregados	59
4.1.1	<i>Granulometria do agregado graúdo</i>	59
4.1.2	<i>Granulometria do agregado miúdo</i>	60
4.1.3	<i>Massa específica e absorção de água do agregado graúdo</i>	65
4.1.4	<i>Massa específica do agregado miúdo e absorção de água do RCV</i>	66
4.1.5	<i>Massa unitária dos agregados</i>	67
4.2	Propriedades do concreto	68
4.2.1	<i>Dosagem do concreto</i>	68
4.2.2	<i>Preparação do concreto, trabalhabilidade e moldagem</i>	70
4.2.3	<i>Absorção de água do concreto</i>	74
4.2.4	<i>Resistência à compressão</i>	76
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	81
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	83
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84

1 INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

A crescente industrialização e ocupação urbana vem contribuindo de maneira significativa para que o setor da construção civil se desenvolva cada vez mais, colaborando assim para que se aumentem as demandas por recursos naturais e sua consequente geração de resíduos. Além do que é devidamente empregado na construção, as perdas e resíduos advindos do processo construtivo exigem uma extração de recursos naturais ainda maior, sendo provável, por exemplo, que o consumo anual estimado de agregados para concretos e argamassas ultrapasse a marca de 210 milhões de toneladas (SIPRES, 2019).

O setor da construção civil é o que mais gera resíduos na sociedade, consequência do alto consumo de recursos naturais em suas atividades. Conforme evidenciam levantamentos realizados em várias cidades do Brasil, os resíduos de construção atingem uma porcentagem em torno de 60% do montante total gerado, o que supera o resíduo domiciliar (PREGARDIER, 2020 apud GAEDE, 2008).

O Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil entre os anos de 2018 e 2019 da Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2019) mostra que, em 2018, houve coleta do equivalente a 122.012 toneladas por dia de Resíduos de Construção e Demolição (RCD). Atrelado a essa produção de resíduos tem-se muitas vezes o descarte inadequado, além da exploração natural, esta que modifica, muitas vezes de maneira permanente, o local de origem desses materiais (A. E. B. CABRAL *et al*, 2009).

Embora de baixa periculosidade, a geração desses resíduos e seus impactos têm sido grande motivo de preocupação, e por isso vem mobilizando pesquisas motivadas a obter soluções que tornem as atividades do setor sustentáveis (FONSECA, 2006). Uma vez que a exploração desenfreada pode levar à escassez dos recursos, vem se desenvolvendo meios que possibilitem a reinserção de resíduos no ciclo produtivo.

Na indústria da construção civil tem-se o aglomerado de diversos setores produtivos diferentes, que trabalham os materiais necessários às variadas etapas que ocorrem dentro do processo construtivo. Dentre eles se pode citar a indústria de cerâmica vermelha, que segundo Boletim de Inteligência do SEBRAE (2015), em dezembro de 2015 representava 4,8% da indústria da construção civil, com cerca de 9000 empresas. O setor é responsável pela produção de elementos que integram grande parte das construções, quer seja como blocos estruturais e de vedação vertical, quer seja como telhas componentes do sistema de vedação horizontal.

Todavia, a deficiência no controle de produção e na modernização da indústria de cerâmica vermelha corrobora para que ocorram grandes perdas ainda durante o seu processo produtivo, com conseqüente geração de resíduos, resultado de elementos quebrados ou defeituosos, ou que foram armazenados de maneira inadequada. Assim, muitos produtos passam por todo o ciclo produtivo, mas ao final são descartados por serem detectados problemas que impedem o seu uso dentro dos padrões exigidos em norma e no mercado, como trincas, baixa resistência mecânica, deformações, empenamentos, entre outras. (ALCANTARA, 2015)

O resíduo de cerâmica vermelha (RCV) enquadra-se na Classe A da Resolução nº 307 de 2002 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), sendo classificado como resíduo reutilizável ou reciclável como agregado, podendo assim ser incorporado ao processo produtivo de concretos, como por exemplo na fabricação de blocos intertravados para pavimentação. Segundo Alcantara (2015), os resíduos integrados à compósitos de origem cimentícia podem melhorar suas propriedades, tanto por conta de sua atividade pozolânica, possibilitada pelo aquecimento das argilas a temperaturas altas e por seu processo de moagem, como também pelo efeito filer, onde o resíduo atua no preenchimento e empacotamento dos vazios da matriz cimentícia.

A indústria de pisos intertravados cresceu muito desde o final dos anos 90, sendo impulsionada devido ao grande volume de investimentos em construções, edificações e estruturas no período, e também por sua versatilidade no uso, indo desde a aplicação em condomínios populares do programa Minha Casa Minha Vida do Governo Federal, a se fazerem parte das especificações em projetos de áreas externas nos estádios da Copa do Mundo FIFA, ocorrida no Brasil em 2014 (ALCANTARA, 2015). Atualmente, os blocos são aplicados na pavimentação urbana, tendo sua produção crescente a cada ano, influenciada principalmente por sua execução facilitada, manutenção e resistência das peças (Souza *et al*, 2019).

Os blocos intertravados para pisos (BIPs), mais conhecidos como *pavers*, possuem inúmeras vantagens advindas do seu uso na pavimentação, donde Alcantara (2015) cita o conforto térmico do pavimento; a capacidade reflexiva que corrobora para a economia em gastos com iluminação pública; o assentamento, manutenção e versatilidade dos blocos, que podem ser removidos e realocados em outros locais de maneira fácil; a permeabilidade de alguns desses pisos, auxiliando na drenagem de águas pluviais, e; a estética adquirida pela possibilidade de utilização de pigmentos que tornam os blocos coloridos.

Diante do exposto, essa pesquisa objetiva estudar a viabilidade técnica do uso do Resíduos de Cerâmica Vermelha (RCV) para produção de blocos de concreto intertravado para

uso em pavimentação, buscando alternativas que tornem o setor mais sustentável, além de trazer economia nos processos de produção.

1.2. Problema da pesquisa

O setor industrial de produção de elementos de cerâmica vermelha é responsável por grande geração de resíduos, estes que na maioria das vezes não possuem uma destinação específica, sendo caracterizados como lixo e amontoados em locais sem nenhum controle, muitos deles em lixões. Embora não tóxicos, o acúmulo desses entulhos é responsável pela ocupação de grandes áreas, podendo tanto ser vetor para a proliferação de doenças, bem como contribuir para problemas de enchentes, pelo entupimento dos canais de drenagem quando abandonados em logradouros públicos. Assim, além da questão ambiental da má disposição desses resíduos, tem-se toda a questão sanitária envolvida, que pode vir a prejudicar a vida da população que reside nas imediações desses locais de disposição.

Por outro lado, o setor da pavimentação é consumidor de grande volume de material, principalmente os inertes, como os agregados naturais do tipo cascalho ou areia, que compõem grande parte das misturas usadas em pavimentos. Assim, esse setor é responsável por considerável exploração de recursos naturais, e que tende a crescer à medida que os processos de urbanização se intensificam. Ademais, a exploração, se feita de maneira exagerada, contribui para a escassez dos recursos e, conseqüentemente, remetem a certeza de que as jazidas naturais não podem ser consideradas como fonte única de matéria-prima para produção, visto que sua oferta não é ilimitada.

Aliar o problema da grande quantidade de resíduos de cerâmica vermelha gerados à necessidade do setor da pavimentação torna-se algo que merece destaque, visto que o emprego do RCV na pavimentação pode contribuir para a redução tanto do montante de material que atualmente segue sem utilização, quanto da exploração dos recursos naturais, uma vez que esses resíduos passarão a se configurar como uma alternativa de matéria-prima para a produção de pavimentos.

1.3. Justificativa

O estado do Ceará encontra-se na lista dos maiores produtores cerâmicos do Nordeste, com indústrias espalhadas em diversos municípios. Todavia, sua maior concentração localiza-se nas regiões do Baixo Jaguaribe, Centro-Sul e Litoral Leste, sendo Russas responsável pelo

maior número de indústrias do estado, com foco na produção de telhas extrusadas e blocos de vedação. Tal concentração de empresas pode ser explicada pela abundância de argila presente no município, que é a principal matéria prima na produção dos elementos cerâmicos. Além disso, o baixo custo de implantação e a gestão simplificada são fontes ainda maiores de atração para investimentos no setor (SILVEIRA, 2007).

A atividade cerâmica de Russas é estimada em 30 anos, sendo entendida como a base do desenvolvimento sustentável e econômico da região. Entretanto, o baixo controle do processo produtivo do município provoca o acúmulo de grande volume de resíduos cerâmicos, que além de encarecer o processo, não tem uma destinação adequada. (SILVEIRA, 2007)

O montante de resíduos gerados em Russas traz para o município uma visão de preocupação voltada para a questão do desperdício de recursos naturais, uma vez que os resíduos são descartados sem finalidade e de forma inadequada. No entanto, é possível olhar o município numa perspectiva quanto a uma destinação diferente desses resíduos, cujo fator determinante é o seu alto potencial de reutilização já visto em diversos estudos, focando no emprego desses resíduos como matéria prima importante em outras cadeias produtivas.

A inserção desses resíduos como agregados reciclados no processo produtivo de concreto para fabricação de blocos intertravados mostra-se viável, tanto por proporcionar uma destinação adequada, bem como por reduzir a exploração de jazidas naturais, tendo em vista que os resíduos irão substituir parte do que seria explorado, contribuindo para a preservação ambiental e o desenvolvimento sustentável do setor. Ademais, o uso de materiais alternativos pode ser responsável pela redução dos custos de fabricação dos elementos de concreto, pois os resíduos possivelmente demandam um menor investimento financeiro quando comparado aos agregados naturais, além de também poder colaborar de maneira positiva nas propriedades dessas peças.

1.4. Enquadramento da pesquisa

A questão do grande volume de resíduos de cerâmica vermelha produzidos mensalmente pelas indústrias tem gerado a busca por aplicações adequadas com o intuito de reduzir o montante acumulado e seus problemas associados. Assim, vem surgindo estudos que possam viabilizar essa reinserção dos resíduos no ciclo produtivo, auxiliando assim também no barateamento dos produtos advindo dessa reutilização.

Alcântara (2015) objetivou em seu estudo o desenvolvimento de blocos de concreto intertravados coloridos, utilizando a cerâmica vermelha como forma de melhorar as

propriedades do sistema e como matriz colorimétrica para a redução do teor de pigmentos utilizado usualmente. A autora observou que a adição de RCV de maneira isolada e conjunta com o pigmento proporcionou melhorias nas propriedades de resistência à compressão, absorção de água e resistência à abrasão quando comparados ao *paver* padrão com 4% de pigmento, sendo uma técnica promissora, sustentável e economicamente viável para a produção de *pavers* de cor avermelhada.

Kohler (2013) verificou a produção de *pavers* com resíduo de construção e demolição (RCD) predominantemente vermelho, ou seja, composto por fragmentos de tijolos e telhas cerâmicas em substituição parcial ao agregado miúdo natural que é convencionalmente utilizado na mistura. O RCD possui granulometria extremamente inferior à do agregado natural, aumentando o consumo de água na mistura. Segundo o autor, o traço de 25% de substituição da areia por RCD apresentou pequena queda de resistência em relação ao traço padrão. Já os demais traços com substituição de 50%, 75% e 100% resultaram em grande queda, não sendo tecnicamente viáveis.

Soares *et al* (2020) faz uma revisão de literatura acerca da utilização de resíduos de construção e demolição (RCD) em pavimentação intertravada. O autor conclui que, de maneira geral, a inserção de resíduos aumenta o consumo de água da mistura e, conseqüentemente, reduz a sua resistência. Entretanto, mais estudos precisam ser realizados na busca de porcentagens de substituição viáveis, e também a melhor possibilidade de substituição, se no agregado miúdo ou graúdo.

Sipres (2019) em “Análise técnica do uso de resíduos de construção e demolição (RCD) na produção de concreto seco para piso intertravado” analisou a viabilidade da incorporação de resíduos do tipo cinza e do tipo vermelho em substituição ao pó de pedra utilizado na fabricação de concreto seco. Quanto à caracterização dos agregados, notou-se que a granulometria dos agregados naturais e reciclados estavam dentro da faixa estabelecida em norma. No estudo, apenas a mistura contendo resíduo vermelho apresentou resistência à compressão e absorção dentro dos limites exigidos pela NBR 9781 (ABNT, 2013).

Souza *et al* (2019) realizou um estudo sobre a substituição parcial da areia natural pelo resíduo de cerâmica vermelha em 0%, 10%, 20% e 30%. Com relação à absorção de água, apenas o bloco com 30% de substituição obteve valor inferior a 6%, exigido em norma. Já quanto a resistência à compressão, esta foi aumentando com o aumento da substituição, porém, não atenderam os requisitos de norma, fato este que pode estar atrelado ao fato de a compactação manual não ter a mesma eficiência da realizada com equipamento industrial. Assim, o resíduo de cerâmica vermelha possui viabilidade técnica de utilização.

De maneira geral, os estudos mostrados evidenciam a potencialidade de utilização dos resíduos de cerâmica vermelha na fabricação de blocos intertravados para pavimentação, no entanto precisa-se aprofundar nas porcentagens e nas possibilidades de utilização desse material, de maneira a proporcionar viabilidade técnica, com os requisitos estabelecidos em norma atendidos pelas peças, viabilidade econômica, pela redução dos custos de fabricação das peças pelo uso de materiais alternativos, e viabilidade ambiental, tanto pelo fato de reduzir o montante acumulado no meio ambiente, como por possibilitar que os recursos naturais sejam explorados de maneira mais consciente.

Nesta pesquisa serão analisadas porcentagens de substituição relativamente pequenas quando comparadas à algumas substituições vistas, inferiores a 30%, uma vez que a análise de outros autores aponta para influências negativas quanto à altos valores de substituição. A análise de pequenas quantidades de resíduo permite avaliar o quão significativo pode ser a influência da sua utilização e até onde essa influência nas propriedades do concreto é viável tecnicamente.

1.5. Objetivos da pesquisa

1.5.1 Objetivo geral

A presente pesquisa tem como objetivo a incorporação de Resíduos de Cerâmica Vermelha (RCV) em substituição parcial ao agregado miúdo convencional utilizado na produção de blocos intertravados de concreto, verificando sua potencialidade para o uso em pavimentação.

1.5.2 Objetivos específicos

A pesquisa será guiada por objetivos específicos cuja finalidade são a análise das propriedades mínimas exigidas em norma, sendo eles:

- Desenvolvimento de traços de concreto seco para a produção dos blocos com substituição parcial do agregado convencional por RCV;
- Análise das porcentagens de substituição do agregado miúdo convencional por RCV em virtude da resistência mecânica mínima estabelecida em norma;
- Análise das porcentagens de substituição do agregado miúdo convencional por RCV com ênfase na absorção de água;

- Análise da melhor porcentagem de substituição de RCV no agregado miúdo para a utilização em blocos para pavimentos intertravados.

1.6. Organização do trabalho

O presente trabalho está organizado em capítulos, de maneira a facilitar a compreensão do estudo, sendo cada um deles fundamental para o completo entendimento das etapas desenvolvidas na pesquisa, onde:

O Capítulo 1 refere-se à introdução, na qual é realizada uma contextualização acerca do tema estudado, além de expor o problema e a justificativa que guiam este estudo. Além disso, o capítulo trazer uma sequência de estudos elaborados por outros autores e que influenciaram diretamente no desenvolvimento desta pesquisa. Ao final, são definidos os objetivos geral e específicos buscados ao longo do desenvolvimento da pesquisa.

O Capítulo 2 trata do referencial teórico, cujos assuntos abordados e discutidos dentro deste capítulo são de fundamental importância para a compreensão do estudo, uma vez que traz uma revisão bibliográfica acerca de definições e fatos que circundam a problemática envolvida ao tema da pesquisa.

O Capítulo 3 expõe os materiais e métodos utilizados durante o desenvolvimento da pesquisa. Este capítulo compreende a classificação dos materiais e a explanação de todas as atividades realizadas durante cada uma das etapas do trabalho, desde pesquisa bibliográfica a ensaios em laboratório, necessários à avaliação e cumprimento dos objetivos estabelecidos no início do trabalho.

O Capítulo 4 é o capítulo responsável pela exposição e interpretação dos resultados obtidos a partir das atividades realizadas no Capítulo 3. Esses resultados são discutidos e avaliados com o intuito de entender quais os principais fatores influenciadores e como se deu essa influência no material estudado.

O Capítulo 5 trata das considerações finais da pesquisa, onde se avalia se os objetivos estabelecidos no Capítulo 1 foram alcançados, e se a proposta da pesquisa é, de fato, viável. Além disso, nesse capítulo são destacadas propostas para trabalhos futuros, que permitirão obter outras conclusões e aprofundamento da problemática já abordada.

Ao final, são apresentadas as referências bibliográficas de todos os materiais utilizados durante o desenvolvimento do estudo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são abordados e discutidos temas de fundamental importância para o entendimento e compreensão da pesquisa, através de revisão bibliográfica sobre definições e exposição de dados que estão direta ou indiretamente ligados ao contexto envolvido na problemática estudada. Os temas abordam a produção de resíduos sólidos dentro da indústria da construção civil como um todo, definições para os agregados utilizados no concreto, e o resíduo de cerâmica vermelha e o pavimento intertravado, focos do estudo desenvolvido.

2.1. Resíduos Sólidos da Construção Civil

A Resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002) define os resíduos de construção civil como sendo aqueles provenientes de:

(...) construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos, calça ou metralha.

A Resolução enquadra ainda os resíduos de construção civil em quatro categorias, separados de acordo com suas possibilidades de uso e sua periculosidade, as quais são denominadas classes A, B, C e D. Os resíduos Classe A são aqueles que têm possibilidade de reutilização ou reciclagem na forma de agregados e provenientes de construção, demolição, reformas e reparos em edificações, pavimentação e outras obras de infraestrutura, e do processo de fabricação e demolição de pré-moldados de concreto. A Classe B engloba os resíduos recicláveis com outras destinações, como produção de plástico, papel, vidro, entre outros. Na Classe C tem-se os resíduos que não possuem tecnologias economicamente viáveis para a sua reutilização ou reciclagem, e na Classe D tem-se os resíduos considerados perigosos, entre os quais se pode citar as tintas e os solventes.

O Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019 da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2019) aponta para o montante de aproximadamente 122.000 toneladas por dia de resíduos de construção civil coletados em 2018. Ademais, entre as cinco regiões brasileiras, o Nordeste encontra-se em segundo lugar, com 24.000 toneladas por dia no quesito quantidade coletada, estando atrás apenas da região Sudeste, que possui os maiores centros urbanos do país. Todavia, como nessa área a

responsabilidade sobre os resíduos cabe ao gestor da obra, esses dados do relatório referem-se apenas ao coletado pelas empresas e, muito possivelmente, ao que fora abandonado em logradouros públicos. Assim, estima-se que a quantidade de resíduos gerados seja ainda maior.

A Resolução nº 307 (CONAMA, 2002), responsabiliza os geradores de resíduos com o objetivo primordial de não gerar resíduos, e em segundo lugar o de reduzir, reutilizar, reciclar e destinar corretamente os resíduos com impossibilidade de não serem gerados. Isso significa que o gerador deve ter responsabilidade sobre a destinação do montante gerado, de maneira a reduzir os seus impactos negativos na sociedade e no meio ambiente. Entretanto, mesmo instituído em lei, essa é uma realidade ainda distante.

A geração de RCD é bastante preocupante do ponto de vista que o seu destino muitas vezes se dá de maneira inadequada, além de contribuir no aumento do consumo de recursos naturais. Segundo a Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON, 2016), a geração de resíduos está ligada a um desperdício alto de materiais, que possui influência no crescimento dos custos e muitas vezes está atrelado ao descarte clandestino com conseqüente contaminação ambiental, cujos efeitos ainda não calculados são considerados destruidores.

Ainda de acordo com ABRECON (2016), o setor tende a atribuir a responsabilidade pelo destino do RCD no transportador, mas como estabelecido pela Resolução CONAMA nº 307 (2002), ela é do gerador, ou seja, da empresa construtora. O desperdício dentro da construção chega a um valor de 30%, fato injustificável, principalmente em tempos de escassez de recursos naturais.

Ademais, o acúmulo de entulho, como popularmente é chamado o resíduo, pode auxiliar na proliferação de doenças, uma vez que ele serve de moradia para animais vetores. Assim, o RCD é um problema ambiental, por impactar diretamente no meio ambiente e corroborar para a escassez de recursos, é um problema social, uma vez que o acúmulo em logradouros públicos pode ser vetor para a proliferação de doenças, e também um problema legal, por ter especificações em lei que não são rigorosamente cumpridas.

2.2. Agregados para concreto

A Norma Brasileira NBR 7211 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2009) define que os agregados devem possuir em sua composição “grãos de minerais duros, compactos, estáveis, duráveis e limpos”. Além disso, a norma estabelece que substâncias capazes de afetar os processos de hidratação e endurecimento do cimento, a proteção

anticorrosiva da armadura, a durabilidade e o aspecto visual do concreto não devem estar presentes nos agregados. De maneira geral, os agregados devem atender a critérios granulométricos e apresentar teores de substâncias nocivas abaixo dos limites recomendados.

A NBR 7211 (ABNT, 2009) classifica os agregados em função do tamanho de seus grãos em agregado miúdo, cujos grãos passam na peneira de 4,75 mm, e agregado graúdo, com grãos passantes na peneira de 75 mm e retidos na peneira de 4,75 mm. A separação dos grãos é realizada por meio do ensaio de granulometria, que se baseia no peneiramento dos agregados em conjunto de peneiras com aberturas padronizadas.

No que tange à sua natureza, de maneira geral, os agregados podem ser classificados em naturais, artificiais e reciclados. Segundo a NBR 9935 (ABNT, 2005), que trata da terminologia dos agregados, tem-se as seguintes definições:

- Agregado natural é o material pétreo granular que pode ser utilizado da maneira na qual ele é encontrado na natureza, podendo ser lavado, classificado ou britado;
- Agregado artificial é o material granular que resulta de processos industriais que alteram sua estrutura mineralógica, química ou físico-química original, e;
- Agregado reciclado é o material granular obtido a partir da reciclagem de rejeitos ou subprodutos industriais, de mineração ou da construção ou demolição de estruturas, ou ainda o recuperado do concreto fresco por lavagem.

Os agregados reciclados podem ser divididos em categorias menores, conforme especifica a NBR 15116 (ABNT, 2021), as quais são:

- Agregado Reciclado Cimentício (ARCI), cuja composição é majoritariamente à base de materiais cimentícios diversos, como concretos, argamassas, pré-moldados;
- Agregado Reciclado de Concreto (ARCO), composto predominantemente por resíduos de peças de concreto;
- Agregado Reciclado de Misto (ARM), cuja composição envolve uma mistura de materiais cimentícios e cerâmicos, e;
- Agregado total reciclado, resultado do beneficiamento de resíduos de construção e demolição com distribuição granulométrica composta por agregados graúdos e miúdos.

Assim como os demais agregados, os reciclados devem atender a critérios mínimos que irão condicionar sua utilização, que pode variar desde a sua participação como insumos em concretos de cimento Portland, sejam eles com ou sem função estrutural, à confecção de peças

pré-fabricadas e argamassas em geral. De maneira geral, os resíduos da construção civil passíveis de reciclagem ou reutilização devem pertencer a classe A, onde estão incluídos os resíduos advindos das indústrias cerâmicas, tais como blocos, tijolos e telhas. (ABNT NBR 15116, 2021).

2.3. Resíduo de Cerâmica Vermelha

A indústria de cerâmica vermelha é responsável pela produção de peças que compõem grande parte das construções, representando cerca de 4,8% da indústria da construção civil. A cerâmica vermelha está presente no setor de revestimentos, como na produção de ladrilhos, azulejos e outros materiais utilizados em acabamentos, e no setor de materiais de construção, com sua presença evidenciada principalmente quando se fala no sistema de vedação vertical e vedação horizontal, constituído por telhas e blocos cerâmicos. (Boletim de Inteligência do SEBRAE, 2015)

Assim, as indústrias do setor de produção de peças cerâmicas trabalham continuamente com o intuito de atender a demanda do setor da construção. Entretanto, mesmo em tempos de desenvolvimento de novas tecnologias e melhoria da eficiência de processos, ainda há um alto percentual de perdas, e em consequência disso uma grande produção de resíduos, que segundo Silveira (2007), resulta, em grande parte, do baixo controle de qualidade de produção.

De fato, a indústria de cerâmica vermelha é essencialmente necessária para o crescimento econômico de uma região, pois segundo o Informe Setorial Cerâmica Vermelha do Banco do Nordeste do Brasil (BNB, 2010), o setor ceramista disponibiliza aproximadamente 403 mil trabalhos no país, absorvendo principalmente pessoas com baixa qualificação profissional. Destes empregos gerados pelo setor, aproximadamente 77 mil concentram-se no Nordeste. Todavia, a produção de cerâmica vermelha também está associada a problemas ambientais, uma vez que explora recursos naturais como a argila e a lenha, e gera resíduos de difícil destinação.

Segundo Boletim de Inteligência do SEBRAE (SEBRAE, 2015), considerando apenas blocos, mensalmente são produzidas no país cerca de 4 bilhões de peças. Ademais, quanto à produção de telhas, o número ultrapassa 1,3 bilhão de unidades produzidas por mês. O montante total anual no país é de aproximadamente 60 bilhões de peças, sendo 21,25% concentradas no Nordeste, o que corresponde a cerca de 13,5 bilhões.

De acordo com os dados do Relatório Técnico do Ministério de Minas e Energia (MME, 2009), o percentual de perdas dentro da indústria de cerâmica vermelha no estado pós-queima

varia de 5%, para as cerâmicas mais estruturadas e com melhores tecnologias, a 20% nas cerâmicas menos estruturadas. Segundo Souza *et al* (2018), no Ceará o percentual de perdas pode ser considerado de 20%, o que corresponde a cerca de 400 quilogramas de fragmentos por milheiro produzido.

O município de Russas, no interior do Ceará, é uma das maiores potências em termos de número de indústrias cerâmicas, sendo considerada a maior do estado. Porém, o controle de qualidade do setor produtivo ainda é muito deficiente, o que além de encarecer o processo, gera grandes volumes de resíduos (SILVEIRA, 2007).

Conforme o Relatório de Projeto do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2013), com um total de 61 empresas, o município de Russas é responsável pela produção de cerca de 30.557 milheiros de peças cerâmicas mensalmente, detendo cerca de 43% da produção estadual.

Assim, considerando que 400 kg de resíduos são gerados para cada milheiro de peças produzido, tem-se cerca de 12,2 mil toneladas de resíduos gerados mensalmente no município. Conjuntamente ao acúmulo desses resíduos tem-se a exploração da argila, que é a principal matéria prima utilizada, e segundo a Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral (SGM, 2011), são necessários 2 kg de argila para a produção de uma peça cerâmica, o que resulta na exploração de aproximadamente 61,1 mil toneladas de argila.

Portanto, a destinação adequada dos resíduos gerados tem como principal objetivo o aproveitamento de materiais que até então não teriam utilidade, e que representam o uso de grande parcela de recursos naturais, contribuindo para a problemática ambiental envolvida no setor.

2.4. Pavimento intertravado

A NBR 9781 (ABNT, 2013) define como pavimento intertravado o pavimento flexível composto por uma camada de base, ou de base e sub-base, com posterior camada de revestimento com peças justapostas de concreto, cujas juntas são preenchidas com rejunte e as peças são intertravadas por uma contenção. As peças de concreto que constituem a camada de revestimento são os chamados blocos intertravados para pisos (BIPs), ou como mais comumente são conhecidos, os *pavers*.

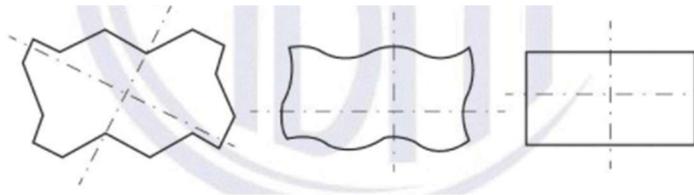
Segundo Fernandes (2013), o pavimento intertravado se caracteriza principalmente pelo fato do *paver* ser simplesmente assentado e confinado sobre uma camada de areia que regulariza a base e auxilia na distribuição dos esforços atuantes, pois o intertravamento possibilita a

passagem de esforços entre peças vizinhas através do atrito entre elas. Além disso, o sistema intertravado auxilia na drenagem e possui menor absorção de calor quando comparado ao asfalto. Ainda, o seu processo construtivo permite a fácil retirada das peças em caso, por exemplo, de necessidade de se refazer o revestimento.

As peças de concreto podem ter sua produção em vários formatos. Segundo a NBR 9781 (ABNT, 2013), tem-se os seguintes tipos:

- Tipo I (Figura 1): seu formato é próximo ao retangular, sendo a razão entre comprimento e largura igual a dois, e seu arranjo no momento da execução proporcionado nos quatro lados das peças;

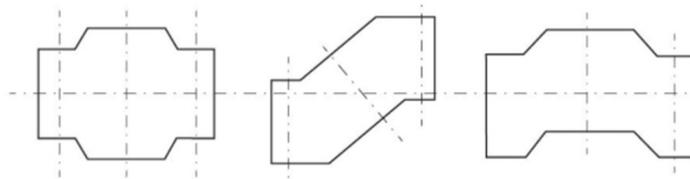
Figura 1 — Peça tipo I.



Fonte: ABNT 9781, 2013.

- Tipo II (Figura 2): diferentes do retangular, possuem formato único e só tem possibilidade de assentamento em fileiras;

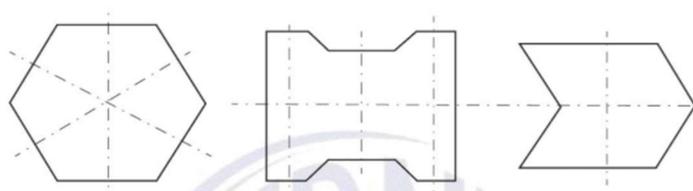
Figura 2 — Peça tipo II.



Fonte: ABNT 9781, 2013.

- Tipo III (Figura 3): possuem formatos geométricos característicos, podendo ter formas de trapézios, triedros etc.;

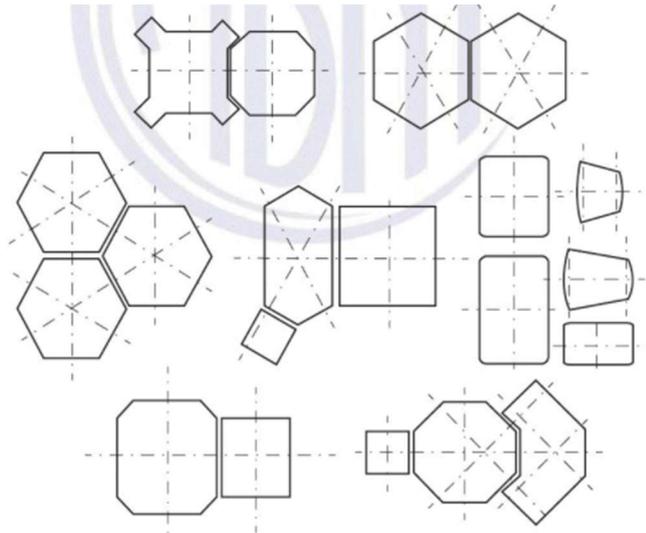
Figura 3 — Peça tipo III.



Fonte: ABNT 9781, 2013.

- Tipo IV (Figura 4): peças em diferentes tamanhos ou uma peça única com juntas falsas, atendendo a vários padrões de assentamento.

Figura 4 — Peça tipo IV.



Fonte: ABNT 9781, 2013.

Todavia, através do Manual de Pavimento Intertravado: Passeio Público (2010), a Associação Brasileira de Cimento Portland faz uma definição mais resumida a respeito dos formatos das peças, as enquadrando em três tipos básicos, como se pode ver na figura 5.

Figura 5 — Formatos das peças.



Fonte: ABCP, 2010.

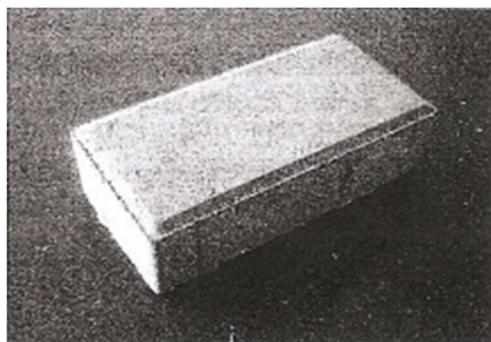
A NBR 9781 (ABNT, 2013) estabelece critérios quanto às dimensões e tolerâncias que devem ser atendidas pelas peças, os quais são:

- o comprimento nominal máximo de 250 mm;
- largura real mínima de 97 mm na área de aplicação de carga de compressão;
- espessura mínima de 60 mm e expressa em múltiplos de 20 mm, e;
- índice de forma, dado pela relação comprimento/espessura, menor ou igual a 4 para peças em vias de tráfego de veículos ou áreas de armazenamento.

Com relação aos ensaios para a análise das peças, tanto determinação da resistência à compressão quanto da absorção de água são obrigatórias por norma, ficando facultativa a realização do ensaio de resistência à abrasão. Para atender aos critérios mínimos especificados, a resistência característica à compressão (f_{pk}) aos 28 dias deve ser maior ou igual a 35 MPa para solicitações de tráfego de pedestres, veículos leves e comerciais de linhas, e maior ou igual a 50 MPa para o caso de veículos especiais e condições de abrasão acentuada. No que diz respeito à absorção de água, as peças devem apresentar um valor médio que seja menor ou igual a 6%, não podendo na amostragem conter nenhuma peça com valor que supere os 7% de absorção (ABNT NBR 9781, 2013).

De acordo com Bittencourt (2012), os processos de fabricação dos *pavers* podem ser de três tipos: peças vibro-prensadas, peças dormidas e peças viradas. Segundo Fernandes (2013), o mais usado no mundo é o vibro-prensado, que proporciona a obtenção de peças com dimensões mais precisas e melhor estética, além de uma alta produtividade devido ao processo ser mecanizado. Entretanto, por trabalhar com o concreto semi-seco, requer maiores investimentos em equipamentos que consigam eliminar o máximo possível dos vazios das peças durante a fase de adensamento. A figura 6 apresenta um exemplo de *paver* prensado.

Figura 6 — *Paver* prensado.



Fonte: Fernandes, 2013.

O *paver* dormido é o processo no qual o concreto permanece no molde até o dia seguinte. Como os moldes utilizados são de plástico, aço ou fibra, a superfície das peças fica

extremamente lisa, sendo preferível a aplicação doméstica. Nesse tipo de processo tem-se menor consumo de cimento, em virtude da possibilidade de se realizar duas camadas: uma mais fina com o consumo de cimento um pouco mais alto, e uma camada grossa composta em grande parte por agregados graúdos (FERNANDES, 2013). Na figura 7 tem-se uma exemplificação do *paver* dormido.

Figura 7 — *Paver* dormido.



Fonte: Fernandes, 2013.

O *paver* do tipo virado ou batido, também produzidos manualmente como o dormido, são peças moldadas em fôrmas conjuntas ou individuais, adensadas com o auxílio de mesa vibratória e desmoldadas imediatamente após sua moldagem, em base que seja plana e impermeável, e untada com óleo ou com uma camada fina de areia para evitar a aderência da peça a base, o que resulta em um acabamento superficial liso. O nome virado se dá pelo fato do desmolde ser feito a partir da viragem do molde de boca para baixo sobre a superfície (BITTENCOURT, 2012 e FERNANDES, 2013). Um exemplo desta peça pode ser visualizado na figura 8.

Figura 8 — *Paver* virado.



Fonte: Fernandes, 2013.

Assim como o *paver* dormido, o *paver* virado possibilita um menor consumo de cimento quando comparado ao vibro-prensado, podendo ser realizado também em duas camadas. Além

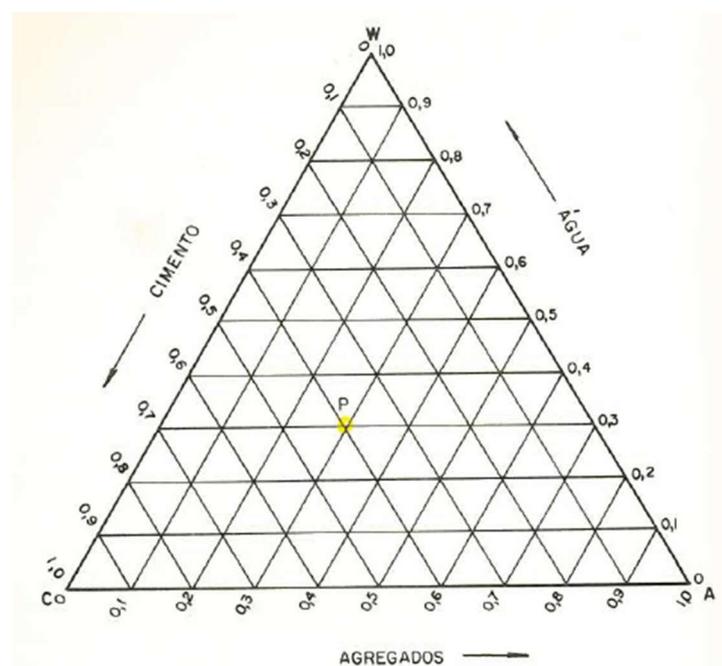
disso, é necessário trabalhar dentro da umidade ótima, tendo em vista que o concreto seco irá esfarelar e o concreto mole irá deformar quando retirado do molde. Normalmente se emprega o *paver* sextavado neste método, que por possuir maior área reduz a concentração de carga no solo e a deformação do pavimento (FERNANDES, 2013).

A dosagem do concreto utilizado na fabricação dos *pavers* vai depender da técnica de fabricação adotada. Segundo Fernandes (2013), para o caso do concreto tipo seco ou farofa, não existem métodos seguros de dosagem, uma vez que há grande variação de massa específica em função da diversidade de equipamentos utilizados, não havendo assim uma rotina certa para a dosagem desse tipo de concreto.

Para as outras duas técnicas de fabricação, as quais são o dormido e o virado, a dosagem dos blocos de concreto segue os padrões estabelecidos pela Associação Brasileira de Cimento Portland, o chamado Método ABCP, que foi criado na década de 80 com base em experimentos. Segundo Assunção (2002), o método considera tabelas e gráficos elaborados com base em dados experimentais, permitindo a utilização de agregados com enquadramento dentro dos limites propostos pela NBR 7211 (ABNT, 1983) - “Agregados para concreto”. O método constitui-se de adaptação do método proposto por *American Concrete Institute* ao Brasil.

O método consiste na fixação do fator água/cimento e posterior obtenção dos consumos de água, cimento e agregados, sendo o traço dado pela proporção entre esses materiais. O Diagrama Ternário, mostrado na figura 9, apresenta todas as proporções possíveis entre esses materiais (ABCP, 1984).

Figura 9 — Diagrama Ternário.



Fonte: ABCP (1984).

Todavia, não são todas as proporções apresentadas no diagrama que são de interesse prático. Assim, o objetivo é encontrar a proporcionalidade adequada entre os três constituintes, de tal forma que a mistura atenda aos requisitos de trabalhabilidade no estado fresco e propriedades compatíveis com as solicitações no estado endurecido, tudo isso através do menor custo possível (ABCP, 1984). Basicamente, os requisitos buscados pelos métodos de dosagem do concreto são a resistência mecânica, a trabalhabilidade, a durabilidade, a deformabilidade e a sustentabilidade (CLEMENTINO *et al*, 2013).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão descritas as etapas metodológicas desenvolvidas durante a pesquisa, bem como a descrição dos materiais utilizados. De maneira geral, ele traz todas as atividades realizadas, desde a fase de estudo e revisão bibliográfica à fase de ensaios e obtenção dos resultados.

3.1. Programa experimental

O Programa Experimental adotado na pesquisa está mostrado na figura 10.

Figura 10 — Fluxograma de atividades da pesquisa.



Fonte: Autora (2021).

De maneira geral, o Programa Experimental tem como objetivo descrever as etapas adotadas no desenvolvimento do trabalho. Essas etapas envolvem a caracterização dos materiais e dos métodos utilizados na pesquisa, de modo a tornar claros os procedimentos adotados, estes que abrangem desde a coleta e seleção dos materiais e suas características, ao estudo das propriedades do concreto em seus estados fresco e endurecido.

Inicialmente determinou-se as porcentagens de substituição para as quais ocorreriam os testes, sendo definidos que seriam estudados três traços com aplicação do Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV). Através dos estudos analisados durante pesquisa bibliográfica, notou-se que substituições muito elevadas podem não ser tão boas para o comportamento da peça, assim adotou-se as substituições de 5%, 15% e 25% do agregado miúdo pelo RCV, e então seguiu-se para a coleta do material. O resíduo foi coletado em fragmentos de tamanho relativamente grandes quando comparados ao agregado miúdo, o qual iria substituir. Assim, realizou-se a quebra e posterior trituração desse material, até que atingisse dimensões compatíveis com a de uma areia.

Posterior a coleta, iniciou-se os estudos sobre as propriedades físicas dos agregados, tanto dos naturais como dos provenientes dos resíduos, através dos ensaios de granulometria, massa específica, massa unitária e absorção de água.

De posse dos materiais a serem empregados, realizou-se a confecção dos traços que comporiam os blocos de concreto intertravados para pavimentação, ou *pavers*, sendo um traço para o bloco com concreto convencional, e mais três com a aplicação da substituição parcial do agregado miúdo pelo RCV. O *paver* confeccionado em concreto convencional foi utilizado como parâmetro de comparação para a análise das substituições estudadas.

Para o concreto, verificou-se as propriedades em seu estado fresco, com a análise da trabalhabilidade através do *Slump Test*, e em seu estado endurecido, com a análise de sua resistência à compressão axial e de sua absorção de água.

3.2. Materiais utilizados

Nesta pesquisa utilizou-se os seguintes materiais:

- Cimento Portland CP II-E, que por ser composto com escória granulada de alto forno possui um baixo calor de hidratação, sendo indicado para estruturas que necessitam de uma perda de calor moderadamente lenta. A escória pode compor de 6 a 34% do CP II-E (ABNT NBR 16697, 2018). A utilização desse tipo de cimento traz vantagens do ponto de vista ambiental, pois segundo Keles (2011), além de se tratar de um resíduo, a

sua aplicação no concreto pode provocar a redução de até 5% da emissão de CO₂ gerados na produção de cimento. Ainda, tem um custo baixo e apresenta uma resistência mecânica elevada e uma boa durabilidade em ambientes agressivos.

- Areia grossa natural, cujos grãos possuem diâmetros compreendidos entre as malhas de 0,20 mm e 4,7 mm (ABNT NBR 6502, 1995). Esse material é um dos mais utilizados dentro das obras de construção civil, sendo bastante empregado na composição de misturas de concreto.
- Brita 0, que corresponde a brita com menor diâmetro, com valores comerciais que variam entre as faixas mínima de 4,8 mm e máxima de 9,5 mm. Esse material é aplicado usualmente em lajes pré-moldadas, blocos, e usinas de asfalto e de concreto.
- Resíduo de Cerâmica Vermelha, proveniente da quebra de elementos cerâmicos, tais como blocos de assentamento e telhas de vedação horizontal. Esse resíduo tem uma ocorrência bastante expressiva, dado o baixo controle tecnológico de produção das indústrias. Assim, a sua reinserção no ciclo produtivo da construção civil destaca-se como uma alternativa viável do ponto de vista econômico e ambiental.

3.3. Coleta e trituração do RCV

O Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV) utilizado no estudo é proveniente de elementos coletados em indústrias locais do município de Russas - CE. Esses resíduos correspondem majoritariamente ao descarte de telhas defeituosas ou que foram quebradas em alguma das etapas do processo de produção, e que assim perderam a sua funcionalidade usual dentro das construções.

Destarte, o resíduo coletado não se apresentava em tamanho adequado para a sua utilização como agregado miúdo no concreto, sendo necessário promover a redução do tamanho das suas partículas. Essa atividade foi realizada através de uma quebra inicial, que tornou as partículas do tamanho aproximado de uma brita. Posteriormente, os elementos foram sujeitos à trituração, reduzindo-os ao tamanho visual de uma areia. Esse procedimento foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, em Fortaleza.

As figuras 11, 12 e 13 mostram o resíduo no tamanho em que foi coletado, após a etapa de quebra inicial e após a trituração realizada com o uso de equipamento mecânico, respectivamente.

Figura 11 — Resíduo coletado no tamanho inicial.



Fonte: Autora (2021).

Figura 12 — Resíduo após primeira etapa de quebra.



Fonte: Autora (2021).

Figura 13 — Resíduo triturado.



Fonte: Autora (2021).

Posterior à quebra e trituração do resíduo, realizou-se o peneiramento para a seleção das partículas com dimensões compatíveis com a areia disponível no laboratório, que seria a usada para a produção do concreto convencional, eliminando a fração graúda do resíduo e reduzindo a quantidade de pó presente. Para tanto, selecionou-se inicialmente duas faixas granulométricas do RCV, mostradas nas figuras 14 e 15, onde em uma delas se considerava o material passante na peneira de abertura de 4,75 mm e retido na peneira de abertura de 0,3 mm, o qual foi denominado RCV4,75, e na outra considerava-se o material passante na peneira de 2,36 mm e retido na peneira de 0,3 mm, denominado de RCV2,36. O processo de seleção foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas.

Figura 14 — RCV2,36.



Fonte: Autora (2021).

Figura 15 — RCV4,75.



Fonte: Autora (2021).

A seleção de duas faixas granulométricas diferentes do RCV visa a análise e aplicação da que melhor se adequa a areia natural. Dados fornecidos de ensaios passados apontavam para uma areia com DMC de 4,75 mm, sendo separada a primeira faixa de 4,75 mm em função disso. Todavia, o aspecto visual dessa faixa granulométrica mostrava-se bastante grosseiro e divergente do aspecto visual da areia, tendo sido, então, separada uma outra faixa com menor presença de partículas grossas, que foi a passante na peneira de 2,36 mm.

3.4. Caracterização dos materiais

A caracterização física dos materiais empregados no concreto é de suma importância para o bom funcionamento da peça. Segundo Fabro *et al* (2011), algumas características como porosidade, massa específica, granulometria, forma e textura dos grãos são determinantes nas propriedades do concreto em seu estado fresco, influenciando assim no consumo de pasta da mistura. Quanto à resistência do concreto, o autor afirma que partículas angulosas implicam num melhor entrosamento, entretanto exigem um maior consumo de água devido a sua maior área superficial.

De maneira geral, as propriedades físicas dos materiais empregados na composição de concretos merecem importância de estudo, uma vez que eles influenciam em suas propriedades tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

Assim, neste tópico serão abordados os procedimentos necessários para a caracterização dos materiais, naturais e artificiais, que irão compor as misturas de concreto para a produção de blocos utilizados na pavimentação. Os procedimentos de caracterização foram todos realizados no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas.

3.4.1. Granulometria

A composição granulométrica determina a proporção entre os grãos de diferentes tamanhos que compõem um material, sendo expressa em porcentagem. O ensaio para a obtenção dos dados referentes à granulometria de um agregado é realizado seguindo o procedimento indicado na NBR NM 248 (ABNT, 2003) - “Agregados - Determinação da composição granulométrica”, utilizada para agregados graúdos e miúdos.

O ensaio trata do peneiramento a seco dos agregados em conjunto de peneiras compostas por malhas de abertura padrão, onde tem-se uma série normal e intermediária de aberturas, que podem ser visualizadas na Tabela 1.

Tabela 1 — Peneiras - Série normal e série intermediária.

PENEIRAS (mm)	
Série Normal	Série intermediária
75	-
-	63
-	50
37,5	-
-	31,5
-	25
19	-
-	12,5
9,5	-
-	6,3
4,75	-
2,36	-
1,18	-
0,6	-
0,3	-
0,15	-
-	0,075

Fonte: Adaptado (ABNT NBR NM 248, 2003).

Realizado manualmente, o ensaio consiste na agitação do conjunto de peneiras, com aberturas na ordem crescente da base para o topo, permitindo que ocorra a separação entre os grãos de diferentes diâmetros. Para o processo de peneiramento, as amostras foram previamente secas em estufa, com temperatura entre 100°C e 110°C.

Posterior a separação entre os grãos, através da pesagem do material retido em cada peneira e com base na massa total da amostra, realiza-se o cálculo da porcentagem de massa retida e retida acumulada, esta última dada pela soma das porcentagens retidas, sendo crescente do topo para a base. Os valores encontrados permitem traçar a curva granulométrica do material, onde no eixo das abscissas em escala logarítmica são marcados os “diâmetros” das partículas menores do que aqueles considerados.

Para a análise granulométrica do agregado graúdo, o qual corresponde, neste trabalho, à Brita 0, utilizou-se uma amostra de 2 kg e as peneiras com aberturas de 31,5 mm, 25 mm, 19 mm, 9,5 mm, 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 0,6 mm, 0,3 mm e 0,15 mm, respectivamente. O

ensaio foi repetido para duas amostras, como indicado em norma. A figura 16 mostra o agregado separado após o peneiramento.

Figura 16 — Ensaio de granulometria com a brita 0.



Fonte: Autora (2021).

Quanto ao agregado miúdo, na análise granulométrica utilizou-se amostras de 1000 g para a areia natural e de 300 g para o resíduo de cerâmica vermelha, sendo o processo repetido em duas amostras para a comparação e segurança nos resultados, assim como foi realizado para o agregado graúdo.

Para a areia natural utilizou-se as peneiras de abertura 9,5 mm, 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 0,6 mm, 0,3 mm e 0,15 mm, respectivamente, disponíveis no laboratório. A figura 17 mostra o agregado peneirado.

Figura 17 — Ensaio de granulometria com a areia natural.



Fonte: Autora (2021).

Para as duas frações de resíduo de cerâmica vermelha utilizou-se as peneiras com aberturas de 4,75 mm até 0,15 mm. O ensaio pode ser visualizado na figura 18.

Figura 18 — Ensaio de granulometria com o resíduo de cerâmica vermelha.



Fonte: Autora (2021).

Além de possibilitar traçar a curva granulométrica do material, o ensaio permite a obtenção da Dimensão Máxima Característica (DMC), que corresponde à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira na qual a porcentagem retida acumulada seja de 5%, ou um valor imediatamente inferior a este. Ademais, também é possível determinar o Módulo de Finura (MF), dado pela soma das porcentagens retidas acumuladas em massa do agregado em todas as peneiras da série normal dividida por 100, como mostrado na Equação 1.

$$Mf = \frac{\sum (P*n)}{100} \text{ (Eq. 1)}$$

Onde:

Mf → Módulo de finura;

P → Porcentagem retida acumulada na peneira, e;

n → Número de peneiras.

3.4.2. Massa específica e massa específica aparente

Conforme a NBR NM 52 (ABNT, 2009), a massa específica é dada pela relação entre a massa do agregado seco e o volume do sólido, excluídos os seus poros permeáveis. Já quanto a massa específica aparente, em seu cálculo considera-se também os poros permeáveis do agregado.

O procedimento de determinação das massas é diferente para os agregados graúdos e miúdos, seguindo normas específicas para cada um deles. Para os agregados graúdo e miúdo usuais, que são a areia e a brita, utilizou-se os métodos padrões indicados em norma, onde para a areia calculou-se a massa específica pelo Frasco de Chapman, e para a brita determinou-se, além da massa específica, a massa específica aparente do material.

Todavia, para o resíduo de cerâmica vermelha houve a necessidade de realização de mais de um ensaio, com o intuito de confirmar os resultados obtidos. Para isso, foram realizados

os procedimentos descritos para a areia e para a brita, além do método do Picnômetro, utilizando as frações graúda e miúda do resíduo.

3.4.2.1. Agregados miúdos - massa específica

O procedimento para a determinação da massa específica do agregado miúdo segue as indicações da NBR 9776 (ABNT, 1988) - “Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman”. Para a realização do ensaio, utiliza-se um frasco de vidro composto por dois bulbos e um gargalo graduado. No estrangulamento entre os bulbos deve haver a marca de 200 cm³, e acima as marcas de 375 cm³ e 450 cm³, respectivamente. A amostragem segue os padrões estabelecidos pela NBR 7216 (ABNT, 1987), tendo a amostra que ser seca em estufa na faixa entre 105°C e 110°C.

O procedimento de ensaio consiste em inserir água no frasco até a marca de 200 cm³, deixando em repouso para permitir que toda a água escoe para o fundo do frasco. Posteriormente, deve-se inserir cuidadosamente uma amostra de 500 g do material seco, devidamente agitado para permitir a saída de bolhas de ar. A leitura no frasco corresponde ao volume de água mais agregado miúdo, sendo a massa específica do agregado miúdo obtida através da Equação 2.

$$\gamma = \frac{500}{L - 200} \text{ (Eq. 2)}$$

Onde:

γ → Massa específica do agregado miúdo em g/cm³, e;

L → Volume ocupado pelo conjunto água mais agregado miúdo (leitura do frasco).

O ensaio foi realizado tanto para a areia quanto para o resíduo de cerâmica vermelha, como se pode ver nas figuras 19 e 20. No entanto, para o caso do resíduo de cerâmica vermelha não se obtiveram resultados satisfatórios, uma vez que a quantidade de água definida para o ensaio não foi suficiente para a submersão e aferição da leitura no frasco de Chapman, fato que pode estar atrelado às diferentes condições de absorção do material em relação ao agregado miúdo usual, a areia natural. Assim, foi possível determinar-se através deste ensaio apenas a massa específica da areia.

Figura 19 — Ensaio do Frasco de Chapman para a areia natural.



Fonte: Autora (2021).

Figura 20 — Ensaio do Frasco de Chapman para o resíduo de cerâmica vermelha.



Fonte: Autora (2021).

O resíduo de cerâmica vermelha é originado a partir do cozimento da argila, sendo, portanto, um material argiloso e com quantidade expressiva de finos. Diante disso, optou-se pela realização do ensaio pelo método do Picnômetro, descrito na NBR 6508 (ABNT, 1984) - “Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação de massa específica”.

A etapa inicial do ensaio consiste na obtenção de uma curva de calibração, através da variação da massa do Picnômetro cheio de água, até a marca de referência, em função da temperatura. Todavia, a ausência de equipamento que permitisse o controle de temperatura durante a calibração impediu a confecção da curva. Assim, foram feitas simplificações no procedimento de ensaio que tornaram possível a sua realização.

Para o ensaio, utilizou-se amostras de 50 g de material (M_1), indicado para o caso de solos argilosos, e determinou-se a umidade inicial do resíduo. As amostras foram submergidas em água, permanecendo em repouso por um período mínimo de 12 horas. Após esse período, as amostras foram transferidas para um béquer, onde realizou-se a agitação manual por aproximadamente 15 minutos. Com um funil de vidro, o material é transferido para o picnômetro, que é completado por água até o meio e submetido à vácuo durante 15 minutos, sendo depois disso completamente cheio e aplicado vácuo novamente por mais 15 minutos.

Aferido o menisco, realiza-se a medição da massa do conjunto picnômetro + água + resíduo (M_2) e de sua temperatura. O procedimento descrito foi realizado também para uma amostra de água à temperatura ambiente, obtendo a massa do conjunto picnômetro + água (M_3).

A obtenção da massa específica do material é dada pela Equação 3 abaixo.

$$\delta = \frac{M_1 * 100 / (100 + h)}{[M_1 * 100 / (100 + h)] + M_3 - M_2} * \delta_T \text{ (Eq. 3)}$$

Onde:

δ → Massa específica do material, em g/cm³;

M_1 → Massa da amostra de material úmida, em gramas;

M_2 → Massa do picnômetro + água + resíduo à temperatura T ensaio, em gramas;

M_3 → Massa do picnômetro + água à temperatura T de ensaio, em gramas;

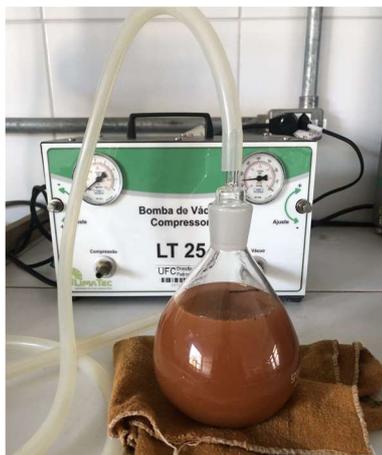
h → Umidade inicial da amostra, e;

δ_T → Massa específica da água à temperatura T de ensaio, obtida em tabela da norma.

Para o cálculo, utilizou-se a massa específica da água à temperatura da amostra de material dentro do picnômetro, sendo então diferente para cada uma das amostras ensaiadas. Os resultados são satisfatórios apenas se a diferença entre massas específicas consecutivas não for superior à 0,02 g/cm³.

A figura 21 mostra a amostra sendo submetida à aplicação de vácuo e a figura 22 mostra a amostra após a pesagem com a medição da temperatura.

Figura 21 — Aplicação de vácuo no conjunto.



Fonte: Autora (2021).

Figura 22 — Aferição da temperatura do conjunto.



Fonte: Autora (2021).

3.4.2.2. Agregados graúdos - massa específica e massa específica aparente

Para os agregados graúdos, o procedimento segue a NBR NM 53 (ABNT, 2009) - “Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água”. O recipiente utilizado no ensaio para conter a amostra deve ser constituído de cesto de arame, com uma malha de abertura menor ou igual a 3,35 mm, e capacidade para 4 dm³ a 7 dm³ para agregados com dimensão máxima característica de 37,5 mm. Ainda, o recipiente deve impedir a perda de material ou retenção de ar quando submerso. Ademais, deve-se providenciar recipiente estanque para conter a água do ensaio. A massa de amostra mínima utilizada depende da dimensão máxima característica do agregado, sendo para o agregado graúdo em questão uma amostra de 2 kg.

No procedimento de ensaio, inicialmente a amostra é submergida em água a temperatura ambiente por um período entre 20 e 28 horas. Após esse período, a amostra é retirada e enxugada superficialmente, evitando que ocorra evaporação da água contida nos poros das partículas, sendo imediatamente pesada para a obtenção da massa do agregado saturado com superfície seca (m_s). A amostra é novamente submergida em água e pesada, obtendo a massa do agregado em água (m_a), como pode ser visto na figura 23. Após, a amostra é seca em estufa a uma temperatura de (105 ± 5) °C e resfriada até a temperatura de aproximadamente 50 °C, onde se obtém a massa do agregado seco (m).

Figura 23 — Obtenção da massa da brita em água.



Fonte: Autora (2021).

A massa específica do agregado seco, excluindo os seus poros permeáveis, é obtida através da Equação 4.

$$d = \frac{m}{m - m_a} \text{ (Eq. 4)}$$

Onde:

d → Massa específica do agregado seco, em g/cm³;

m → Massa da amostra seca, em gramas, e;

m_a → Massa em água da amostra, em gramas.

Para o cálculo da massa específica aparente do agregado seco, onde tem-se considerados também os seus poros permeáveis, utiliza-se a Equação 5, onde no denominador se tem a massa do agregado saturado com superfície seca em substituição a massa da amostra seca, em relação à equação anterior.

$$d_a = \frac{m}{m_s - m_a} \text{ (Eq. 5)}$$

Onde:

d → Massa específica aparente do agregado seco, em g/cm³;

m → Massa da amostra seca, em gramas;

m_s → Massa da amostra saturada com superfície seca, em gramas, e;

m_a → Massa em água da amostra, em gramas.

Em virtude das simplificações adotadas no método do Picnômetro, realizou-se também o cálculo da massa específica do resíduo através deste ensaio, utilizando neste caso a fração graúda do material. As figuras 24 e 25 mostram a realização do procedimento para o RCV.

Figura 24 — RCV saturado com superfície seca.



Fonte: Autora (2021).

Figura 25 — Obtenção da massa do RCV em água.



Fonte: Autora (2021).

3.4.3. Absorção de água

A determinação da absorção de água é realizada para os agregados graúdos que irão compor a mistura do concreto. O ensaio é executado conforme indicações da NBR NM 53 (ABNT, 2009) - "Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água".

O procedimento de ensaio para a determinação da absorção de água é o mesmo realizado na determinação das massas específica e específica aparente, abordados anteriormente no tópico 3.4.2.2. - "Agregados graúdos - massa específica e massa específica aparente". Assim, de posse dos valores de massa encontrados para o agregado graúdo seco (m) e para o agregado graúdo saturado com superfície seca (m_s), aplica-se a Equação 6 para a obtenção do valor de absorção de água do material.

$$A = \frac{m_s - m}{m} * 100 \text{ (Eq. 6)}$$

Onde:

A → Absorção de água, em porcentagem;

m_s → Massa da amostra saturada com superfície seca, em gramas, e;

m → Massa da amostra seca, em gramas.

3.4.4. Massa unitária

A massa unitária é a relação entre a massa de um agregado lançado em um recipiente e o volume desse recipiente, sendo obtida seguindo o procedimento estabelecido na NBR NM 45 (ABNT, 2006) - "Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios".

A norma especifica três métodos para a determinação da massa unitária, sendo o método C o indicado para essa determinação da massa unitária em material no estado solto. O recipiente para o ensaio deve possuir forma cilíndrica e ser de material que não sofra ataques por umidade, além de ser suficientemente rígido e provido de alças.

Para o ensaio, inicialmente deve-se registrar a massa do recipiente seco (m_r), e em seguida, enchê-lo até que ele transborde o material. A camada superficial do agregado no recipiente é nivelada manualmente ou com o auxílio de uma espátula, de forma a rasar o material com o nível da borda do recipiente. Feito isso, é realizada a medição da massa do conjunto (m_{ar}). A massa unitária é obtida segundo a Equação 7.

$$\rho_{ap} = \frac{(m_{ar} - m_r)}{V} \text{ (Eq. 7)}$$

Onde:

ρ_{ap} → Massa unitária do agregado, em kg/m³;

m_{ar} → Massa do recipiente mais os agregados, em kg;

m_r → Massa do recipiente, em kg, e;

V → Volume do recipiente, em m³.

O procedimento de determinação da massa unitária foi realizado para os três tipos de agregados, tanto gráudo quanto miúdo, como se pode ver nas figuras 26, 27 e 28.

Figura 26 — Determinação da massa unitária da brita 0.



Fonte: Autora (2021).

Figura 27 — Determinação da massa unitária da areia natural.



Fonte: Autora (2021).

Figura 28 — Determinação da massa unitária do resíduo de cerâmica vermelha.



Fonte: Autora (2021).

3.5. Concreto

O controle tecnológico do concreto envolve a execução de etapas que vão desde a configuração do melhor traço através de métodos de dosagem, à análise das propriedades da mistura em seu estado fresco, e em seu estado endurecido através da realização de ensaios descritos em norma.

Inicialmente, tem-se a determinação dos traços que irão constituir o concreto analisado, seguido da avaliação da trabalhabilidade através do *Slump Test* e da moldagem dos elementos para a avaliação das propriedades do concreto no estado endurecido. Após o período de cura, são avaliadas a resistência à compressão simples e a absorção de água das peças.

3.5.1. Dosagem do concreto

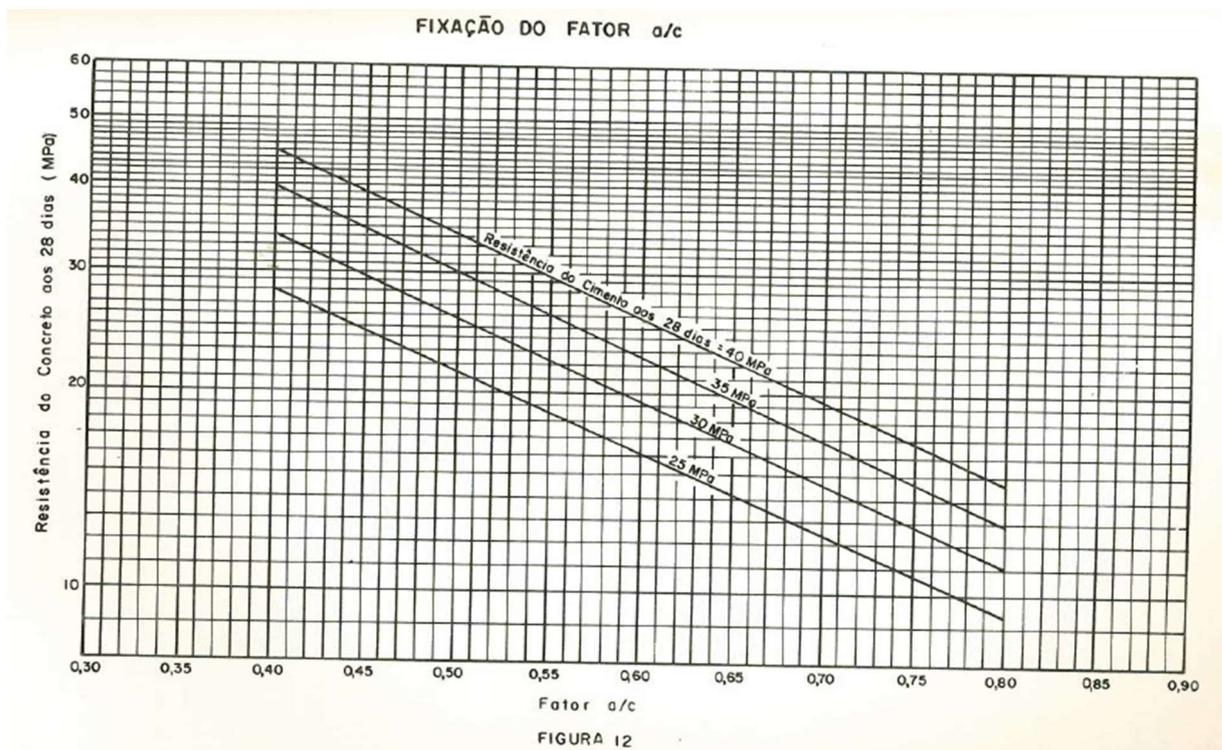
A dosagem do concreto leva em consideração os dados obtidos na caracterização dos materiais, que irão influenciar na composição dos diferentes traços. O método adotado segue os padrões estabelecidos pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) publicada em 1984, que trata de uma adaptação do método proposto pelo *American Concret Institute*, ou método ACI.

O procedimento de dosagem ABCP/ACI (ABCP, 1983) tem como base de cálculo as propriedades do cimento utilizado, tais como massa específica e resistência aos 28 dias, e propriedades dos agregados determinadas na fase de caracterização, como massa específica, absorção de água, massa unitária e análise granulométrica. Posteriormente são fixados parâmetros desejados para o concreto quanto à trabalhabilidade no estado fresco e a resistência à compressão no estado endurecido.

A terceira e última etapa envolve a dosagem em si, onde calcula-se o consumo dos materiais para a confecção de 1 m³ de concreto. Ela é subdividida em cinco partes, as quais são:

1. Fixação do fator água/cimento através da figura 29, que leva em consideração a agressividade do meio e a resistência do concreto e do cimento aos 28 dias.

Figura 29 — Fixação do fator a/c.



Fonte: ABCP (1984).

2. Consumo estimado de água (C_a), em l/m^3 , determinado com base nos dados de dimensão máxima característica do agregado graúdo e na consistência do concreto, vide figura 30.

Figura 30 — Consumo aproximado de água.

ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE (mm)	DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA DO AGREGADO GRAÚDO (mm)			
	9,5	19,0	25,0	32,0
40 a 60	215	185	180	175
60 a 80	220	190	185	180
80 a 100	225	195	190	185

Fonte: ABCP (1984).

3. Consumo de cimento (C_c), em kg, obtido através dos dados de a/c e do consumo de água estimado, através da relação mostrada na Equação 8;

$$C_c = \frac{C_a}{a/c} \text{ (Eq. 8)}$$

Onde:

C_c → Consumo de cimento, em kg/m^3 ;

C_a → Consumo de água, em l/m^3 , e;

a/c → Relação água/cimento, em kg/kg .

4. Consumo de agregado graúdo (C_g), em kg/m^3 , função da dimensão máxima característica do agregado graúdo e do módulo de finura do agregado miúdo, onde o consumo é dado pela multiplicação do fator encontrado na figura 31 multiplicado pela massa unitária do agregado seco.

Figura 31 — Consumo de agregado graúdo.

MF \ D_{max} (mm)	9,5	19,0	25,0	32,0
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660

Fonte: ABCP (1984).

5. Consumo de agregado miúdo, obtido pela soma dos volumes absolutos dos elementos já calculados em relação a 1 m³ de concreto, onde inicialmente encontra-se o volume (V_m), e posteriormente encontra-se o consumo em massa através da multiplicação pela massa específica (Equação 9).

$$V_{am} = 1 - \left(\frac{C_c}{\rho_c} + \frac{C_{ag}}{\rho_{ag}} + \frac{C_a}{\rho_a} \right) \text{ (Eq. 9)}$$

Onde:

V_m → Volume de agregado miúdo, para 1 m³ de concreto;

C_c → Consumo de cimento, em massa, para 1 m³ de concreto;

ρ_c → Massa específica do cimento, em kg/m³;

C_g → Consumo de agregado graúdo, em massa, para 1 m³ de concreto;

ρ_g → Massa específica do agregado graúdo, em kg/m³;

C_a → Consumo de água, em litros, para 1 m³ de concreto, e;

ρ_a → Massa específica da água, em kg/m³;

Para facilitar o entendimento, o traço é obtido através da proporção dos elementos em relação ao consumo de cimento, sendo dado por:

$$1 : \frac{C_m}{C_c} : \frac{C_g}{C_c} : a/c$$

onde tem-se cimento : agregado miúdo : agregado graúdo : relação água/cimento.

3.5.2. Preparação do concreto

A preparação do concreto para a fabricação dos corpos de prova foi realizada com o auxílio da betoneira, onde seguiu-se a sequência de inserção dos materiais de agregado graúdo, cimento e agregado miúdo, sendo a água adicionada aos poucos durante todo o processo de mistura. Os materiais convencionais foram utilizados em sua umidade natural, com exceção do resíduo de cerâmica vermelha, que foi utilizado tanto em seu estado de umidade natural como em estado de pré-saturação. Conforme recomenda a NBR 15116 (ABNT, 2021), em uma das tentativas realizou-se uma pré-molhagem do material, por conta da sua alta absorção de água

que poderia interferir nas propriedades reológicas do concreto, como trabalhabilidade, consistência, perda de abatimento, entre outras.

Para a pré-molhagem do RCV, a NBR 15116 (ABNT, 2021) destaca que, na prática, valores em torno de 80% do teor de absorção de água do agregado reciclado são adequados. Segundo a norma, o tempo de pré-saturação é de aproximadamente 10 minutos.

Para o cálculo da quantidade de água necessária à pré-molhagem, usou-se a Equação 10 mostrada abaixo.

$$C_{ar} = C_r * A * K_I \text{ (Eq. 10)}$$

Onde:

C_{ar} → Quantidade de água necessária à pré-molhagem do agregado reciclado, em quilogramas por metro cúbico de concreto, kg/m³;

C_r → Quantidade de agregado reciclado, em quilogramas por metro cúbico de concreto, kg/m³;

A → Absorção de água do agregado reciclado, em porcentagem, e;

K_I → Fração percentual de água absorvida nas primeiras horas pelo agregado, em relação à sua absorção de água em 24 horas, cujo valor adotado é de 0,8.

O procedimento de pré-molhagem foi realizado com o auxílio de borrifador e espátula para mistura, de maneira a garantir uma molhagem homogênea do resíduo. Após a molhagem, o resíduo ficou em repouso por 10 minutos antes do contato com a mistura na betoneira. As figuras 32 e 33 mostram a pré-molhagem e de inserção do RCV na betoneira, respectivamente.

Figura 32 — Pré-molhagem do RCV.



Fonte: Autora (2021).

Figura 33 — Inserção do RCV na mistura.



Fonte: Autora (2021).

3.5.3. Trabalhabilidade - *Slump Test*

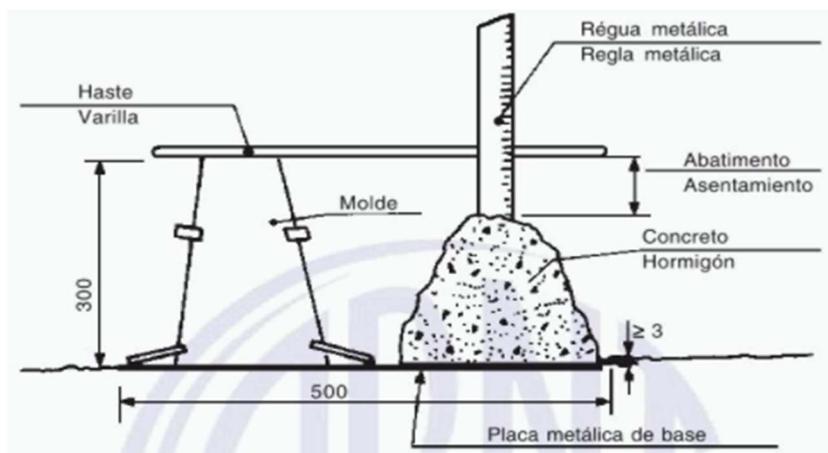
O *Slump Test* ou ensaio de abatimento do tronco de cone é de grande importância no controle tecnológico de concretos, uma vez que avalia a trabalhabilidade e consistência da mistura em seu estado fresco. Um concreto com uma consistência mais plástica, ou mais fluida, permite uma maior trabalhabilidade, o que facilita na moldagem e redução dos vazios das peças, fator de grande importância para o correto funcionamento e durabilidade da estrutura.

Para a execução do ensaio, segue-se o prescrito na NBR NM 67 (ABNT, 1998) - “Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone”. O molde para a execução do ensaio deve ser de metal não atacável pela pasta de cimento, com uma espessura mínima de 1,5 mm, podendo ser executado com ou sem costura, e garantia de uma superfície interna lisa e livre de protuberâncias. O diâmetro inferior deve variar de 198 mm a 202 mm e o superior de 98 mm a 102 mm, com uma altura entre 298 e 302 mm. Além disso, é necessária uma placa de apoio ao molde, com lados mínimos de 500 mm e espessura mínima de 3 mm.

Para o ensaio, inicialmente deve-se umedecer o molde e a placa de base, seguido do preenchimento do molde, que deve ser mantido estabilizado no local através do posicionamento dos pés do operador sobre as aletas. O preenchimento do molde deve contemplar três camadas, cada uma compactada com a aplicação de 25 golpes da haste.

Após o preenchimento é executada a retirada do molde, em um período de 5 s a 10 s, em movimento completamente vertical. Imediatamente após a retirada, calcula-se o abatimento do tronco de cone, dado pela diferença entre a altura do molde e a altura média do corpo de prova desmoldado, com aproximação aos 5 mm mais próximos. Os detalhes podem ser observados na figura 34.

Figura 34 — Medida do abatimento.



Fonte: ABNT, 1998.

O ensaio do *Slump Test* foi realizado para cada um dos traços confeccionados, estando o procedimento de ensaio mostrado nas figuras 35, 36, 37 e 38.

Figura 35 — Umidificação do molde e da placa de base.



Fonte: Autora (2021).

Figura 36 — Golpeamento das camadas com a haste.



Fonte: Autora (2021).

Figura 37 — Retirada do molde.



Fonte: Autora (2021).

Figura 38 — Medida do abatimento com a trena.



Fonte: Autora (2021).

3.5.4. Moldagem dos corpos de prova

A moldagem dos corpos de prova para ensaios no estado endurecido segue o estabelecido na NBR 5738 (ABNT, 2015) - “Concreto - Procedimento para moldagem e cura

dos corpos de prova”. A norma estabelece as dimensões mínimas para os corpos de prova, onde aqueles com formato cilíndrico apresentam a altura igual ao dobro de seu diâmetro, e aqueles com formato prismático devem apresentar seção transversal quadrada.

A moldagem envolve a preparação dos moldes, com aplicação de fina camada de óleo ou lubrificante em sua superfície interna, o preenchimento das peças e o adensamento, cujo método adotado e número de camadas e golpes dependem do tipo e dimensões da peça e da classe de consistência do concreto.

Nesta pesquisa se trabalhou com um concreto com aspecto mais seco devido a necessidade de se atingir maior resistência à compressão. Normalmente na fabricação dos *pavers* se utiliza vibroprensa, capaz de promover um bom adensamento mesmo que o concreto apresente uma baixa trabalhabilidade.

A moldagem dos corpos de prova de referência foi totalmente manual, sendo necessário um número de golpes excedente ao prescrito na norma para concretos convencionais, para que se possibilitasse atingir um bom adensamento.

No entanto, para os concretos com substituição parcial do agregado miúdo, devido às diferentes características do RCV, utilizou-se mais de um método de moldagem, sendo estes manual, com o auxílio de aditivo plastificante e com vibrador mecânico, na busca por uma metodologia que facilitasse o preenchimento completo dos moldes e reduzisse a possibilidade de vazios dentro do concreto. Algumas etapas do procedimento de moldagem podem ser visualizadas nas figuras 39 e 40.

Figura 39 — Aplicação de desmoldante.



Fonte: Autora (2021).

Figura 40 — Adensamento manual do concreto.



Fonte: Autora (2021).

Foram moldados corpos de prova cilíndricos para cada traço estudado, sendo utilizados para o ensaio de resistência à compressão aos 7 e 28 dias de idade, e também corpos de prova de 16 faces para a realização do ensaio de absorção de água, sendo todos submetidos à cura úmida ou saturada, conforme prescrito na NBR 5738. Para cada traço foram selecionados 9 corpos de prova, sendo 6 cilíndricos para o ensaio de resistência à compressão simples e 3 de 16 faces para o ensaio de absorção de água, o que confere um total de 36 peças selecionadas. As figuras 41 e 42 mostram exemplos de corpos de prova moldados e o processo de cura adotado, respectivamente.

Figura 41 — Corpos de prova moldados.



Fonte: Autora (2021).

Figura 42 — Processo de cura úmida.



Fonte: Autora (2021).

3.5.5. Ensaio de compressão axial

A resistência à compressão do concreto foi obtida através do ensaio de compressão axial descrito no Anexo A - “Determinação da resistência característica à compressão”, que compõe a NBR 9781 (ABNT, 2013) - “Peças de concreto para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio”. O ensaio foi realizado no Laboratório de Mecânica da Universidade Federal do Ceará - Campus Russas.

Os corpos de prova utilizados para a análise da resistência são do tipo cilíndricos e obedecem a relação altura/diâmetro com limite máximo de 2,06 especificado na NBR 5739 (ABNT, 2018) - “Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos”, norma que padroniza o ensaio de resistência à compressão para concretos em geral. O ensaio foi realizado

em corpos de prova cilíndricos por conta da disponibilidade de equipamento para esse tipo de geometria, e também por conta da dificuldade em se obter precisão na área da seção transversal das peças com formatos irregulares, como é o caso do *paver* de 16 faces. Todavia, as demais recomendações seguiram a NBR 9781 (ABNT, 2013).

As aplicações de carga nos corpos de prova se deram aos 7 e 28 dias de idade, contados a partir do momento da moldagem. Para cada traço confeccionado foram ensaiadas 03 peças por idade, totalizando 06 ensaios para cada traço e 24 ensaios realizados no total.

Para a realização do ensaio, a NBR 9781 (ABNT, 2013) especifica que o corpo de prova deve estar saturado em água por no mínimo 24 horas antes do ensaio, e ser posicionado de forma que o eixo vertical que passa pelo seu centro coincida com o eixo central das placas do equipamento de ensaio. Como os corpos de prova são do tipo cilíndrico, basta centralizá-los no equipamento de ensaio. O carregamento deve ser aplicado continuamente, com velocidade (550 ± 200) kPa/s, prosseguindo até a ruptura total da peça ensaiada.

Os corpos de prova foram retirados da cura úmida e secos superficialmente com um pano, e logo depois seguiram para o rompimento. As figuras 43 e 44 mostram o procedimento de ensaio descrito.

Figura 43 — Secagem superficial dos corpos de prova.



Fonte: Autora (2021).

Figura 44 — Ensaio de Compressão axial.



Fonte: Autora (2021).

A resistência à compressão é calculada através da Equação 11 mostrada a seguir, onde divide-se a carga de ruptura pela área do carregamento.

$$f_c = \frac{4 * F}{\pi * D^2} \text{ (Eq. 11)}$$

Onde:

f_c → Resistência à compressão, em megapascals (MPa);

F → Força máxima alcançada, em newtons (N), e;

D → Diâmetro do corpo de prova, em milímetros (mm).

3.5.6. Absorção de água

Além da resistência à compressão, para o concreto endurecido determinou-se também a absorção de água, exigida pela NBR 9781 (ABNT, 2013) para a análise das peças utilizadas na pavimentação. O ensaio segue o estabelecido no Anexo B - “Determinação da absorção de água” da referida norma, NBR 9781 (ABNT, 2013), que tem como princípio a determinação da absorção de água, em porcentagem, que representa o incremento de massa pela penetração de água nos poros permeáveis de um corpo sólido poroso em relação à sua massa em seu estado seco. Para a realização do ensaio, os corpos de prova devem estar totalmente isentos de pó ou partículas soltas, que são retiradas a partir de uma escovação do material.

O ensaio se dá através da imersão dos corpos de prova em água à temperatura de (23 ± 5) °C durante um período de 24 horas. Após o período de imersão, determina-se a massa da amostra na condição saturada com superfície seca, obtida através da drenagem do corpo de prova sobre uma tela metálica durante 1 minuto e removendo a sua água superficial com um pano úmido. O procedimento é repetido a cada 2 horas, até que a diferença de massa seja menor ou igual a 0,5% em relação à medição anterior, registrando-se então o valor m_2 .

Posteriormente, o corpo de prova é submetido à secagem em estufa com temperatura de (105 ± 5) °C por um período de 24 horas, seguido da determinação de sua massa seca. O procedimento é repetido a cada 2 horas, até se obter um valor de massa com diferença não superior a 0,5% do valor anterior, quando ser registra a massa seca m_1 .

A absorção de água do corpo de prova é calculada através da Equação 12.

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} * 100 \quad \text{(Eq. 12)}$$

Onde:

A → Absorção de água do corpo de prova, em porcentagem (%);

m_1 → Massa do corpo de prova seco, em gramas (g), e;

m_2 → Massa do corpo de prova saturado, em gramas (g).

O ensaio de absorção foi realizado em 3 corpos de prova para cada traço confeccionado. As figuras 45 e 46 mostram os corpos de prova sendo pesados no estado saturado com superfície seca e seco em estufa.

Figura 45 — Corpo de prova saturado com superfície seca.



Fonte: Autora (2021).

Figura 46 — Corpo de prova após secagem em estufa.



Fonte: Autora (2021).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico serão abordados os resultados para a análise das propriedades físicas dos agregados utilizados na pesquisa, sendo para o agregado gráúdo analisadas a granulometria, massas específicas real e aparente, absorção de água e massa unitária, e para o agregado miúdo natural e o RCV, analisadas as propriedades de granulometria, massa específica e massa unitária. São expostos também os resultados da dosagem do concreto e análise da trabalhabilidade no estado fresco, e absorção de água e resistência à compressão no estado endurecido, tanto para o traço de referência quanto para aqueles confeccionados com substituições de 5%, 15% e 25% de agregado miúdo natural pelo resíduo de cerâmica vermelha.

A análise e discussão dos resultados objetiva analisar a influência das substituições de areia natural por agregado reciclado de cerâmica vermelha nas propriedades do concreto em seu estado fresco e endurecido, quando comparados ao traço de referência, denominado traço padrão.

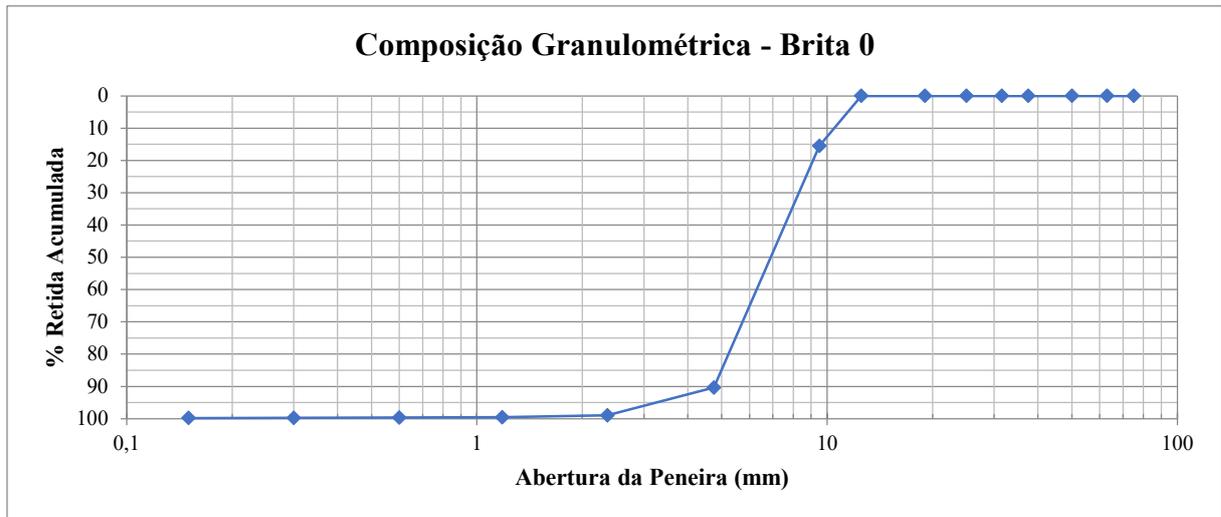
4.1. Propriedades dos agregados

Os agregados utilizados na pesquisa foram caracterizados quanto às suas propriedades físicas, as quais são constituídas pela sua granulometria, massa específica real e aparente, massa unitária e absorção de água. Os dados serão analisados separadamente, e para o caso da areia e do RCV, serão feitas comparações entre os dois materiais.

4.1.1. Granulometria do agregado graúdo

O ensaio de granulometria realizado seguiu os padrões estabelecidos na NBR NM 248 (ABNT, 2003) - “Agregados - Determinação da composição granulométrica”. Os resultados do ensaio de granulometria encontrados para a brita 0 estão mostrados no Gráfico 1, onde tem-se a Curva Granulométrica do material.

Gráfico 1 — Curva granulométrica da Brita 0.



Fonte: Autora (2021).

Com relação à Dimensão Máxima Característica (DMC) e o Módulo de Finura (MF) da brita 0, eles seguem apresentados na Tabela 2. Como se pode observar, a DMC encontrada para o agregado graúdo foi de 19 mm. Tal fato pode estar atrelado à ausência da peneira com malha de abertura de 12,5 mm para a realização do ensaio, sendo então a peneira de abertura de 19 mm a com massa retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5%. O Módulo de Finura não é uma propriedade de análise obrigatória quando se trata do agregado graúdo, todavia foi calculado e obtido o valor de 6,03.

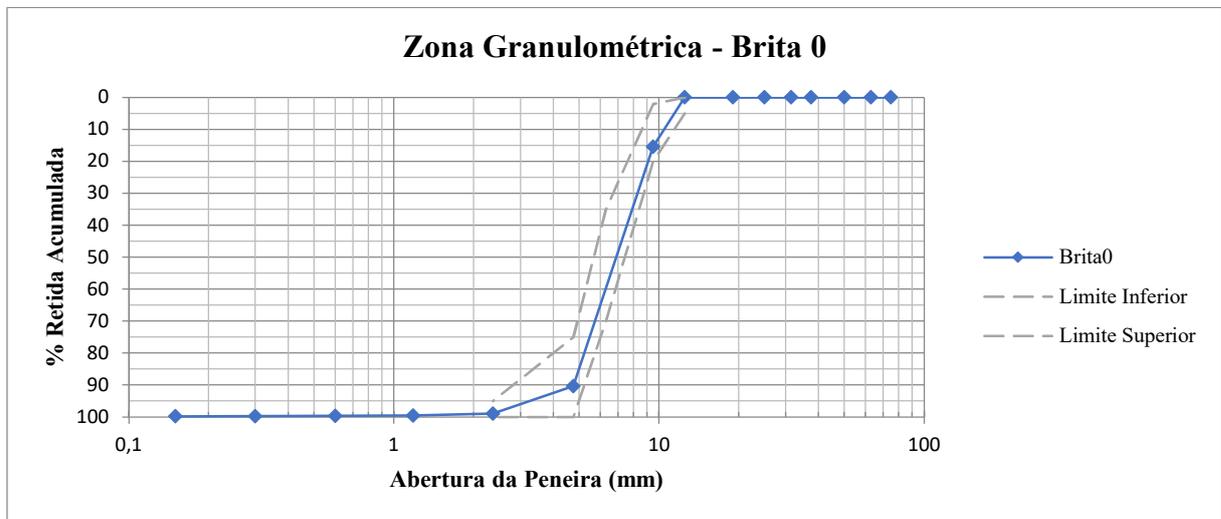
Tabela 2 — Características granulométricas da Brita 0.

CARACTERÍSTICAS BRITA 0	
DMC (mm)	MF
19	6,03

Fonte: Autora (2021).

A NBR 7211 (ABNT, 2009) - “Agregados para concreto - Especificação” traz a Zona Granulométrica, com limites inferior e superior para enquadramento do material. O Gráfico 2 mostra o enquadramento da Brita 0, que como se pode observar encontra-se dentro dos limites estabelecidos para agregados com as dimensões mínima e máxima de 4,75 mm e 12,5 mm, respectivamente. Usou-se essa faixa granulométrica devido a inexistência em norma de uma faixa para agregado com DMC de 19 mm, e como se observa, o material de fato se encontra localizado dentro dessa faixa, todavia com valores muito próximos ao limite superior estabelecido.

Gráfico 2 — Zona granulométrica do agregado graúdo.



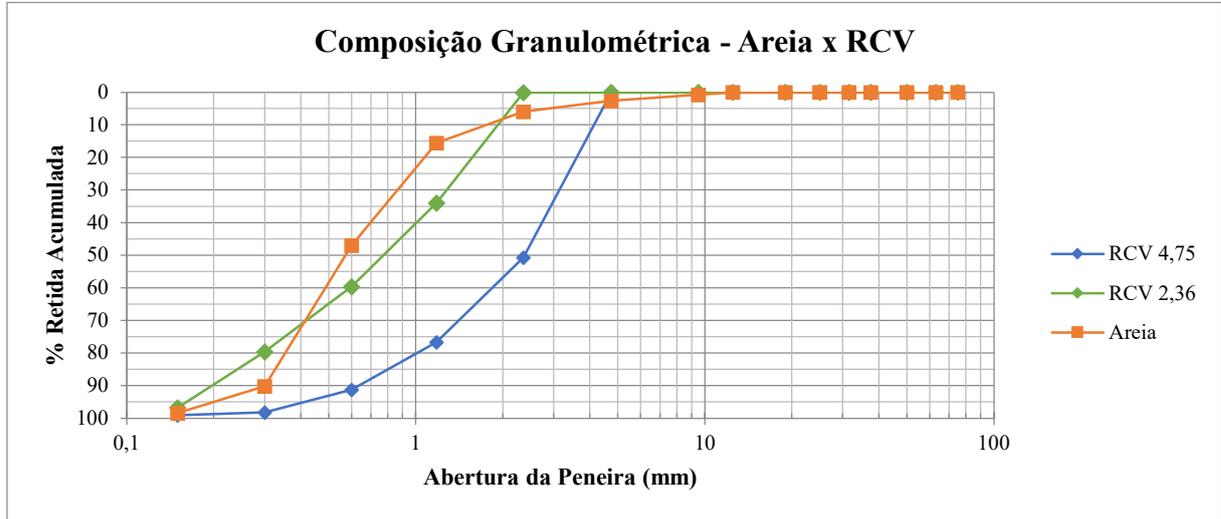
Fonte: Autora (2021).

4.1.2. Granulometria do agregado miúdo

O ensaio de granulometria para o agregado miúdo segue os mesmos padrões estabelecidos para o agregado graúdo, conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003) - “Agregados - Determinação da composição granulométrica”. O ensaio foi realizado para a areia natural e para o resíduo de cerâmica vermelha triturado e passante nas peneiras de 4,75 mm e 2,36 mm,

respectivamente. As curvas granulométricas para a areia e para as duas frações de RCV obtidas através do ensaio estão mostradas no gráfico 3.

Gráfico 3 — Curvas granulométricas dos agregados miúdos.



Fonte: Autora (2021).

Pela análise do gráfico 3, é possível observar que o início das curvas para os três materiais é praticamente coincidente, no entanto a curva do RCV2,36 chega ao ponto máximo um pouco antes das curvas da areia natural e do RCV4,75, fato explicado pela ausência de partículas de dimensões superiores à 2,36 mm, como as pedras mostradas na figura 47, presentes na areia natural.

Figura 47 — Pedras do agregado natural.



Fonte: Autora (2021).

Ademais, é possível analisar a diferença entre as curvas, uma vez que o resíduo, em ambas as faixas granulométricas, possui um crescimento mais linear, que possivelmente está ligado ao fato de sua produção ser artificial, permitindo assim que se tenha controle quanto à

granulometria desejada, o que não é possível com um agregado utilizado da maneira na qual se encontra na natureza, como a areia.

Quanto à faixa de composição dos grãos, que pode ser observada na Tabela 3, para a areia natural e para o RCV2,36 predominam as partículas inferiores a 1 mm em ambos os materiais. Todavia, quando se compara areia natural e RCV4,75, nota-se que as suas composições granulométricas são bastante diferentes, tendo o RCV4,75 a predominância de partículas de dimensões superiores a 1 mm, com aproximadamente 76% dos grãos superiores à 1,2 mm, o que provavelmente corrobora para misturas de concreto mais porosas, devido à ausência de finos para preenchimento dos vazios.

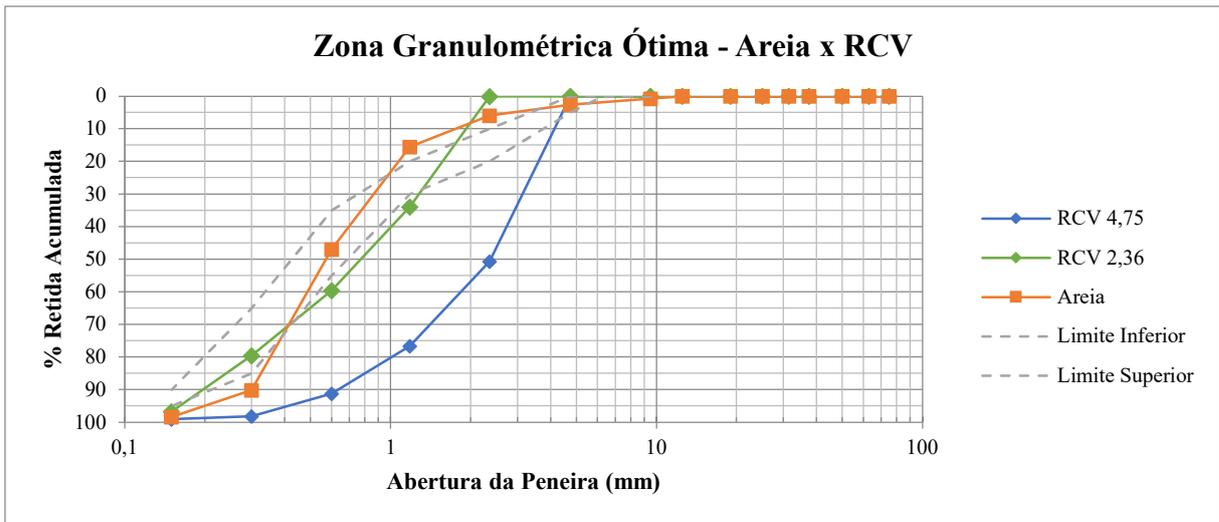
Tabela 3 — Composição dos grãos do agregado miúdo.

COMPOSIÇÃO DOS GRÃOS			
PENEIRA (mm)	MASSA RETIDA ACUMULADA (%)		
	AR. NATURAL	RCV2,36	RCV4,75
9,5	0,78	0,00	0,00
4,75	2,61	0,00	0,00
2,36	5,93	0,07	50,70
1,18	15,56	33,97	76,64
0,6	47,03	59,62	91,24
0,3	90,16	79,58	98,23
0,15	98,37	96,70	99,05
FUNDO	100,00	100,00	100,00

Fonte: Autora (2021).

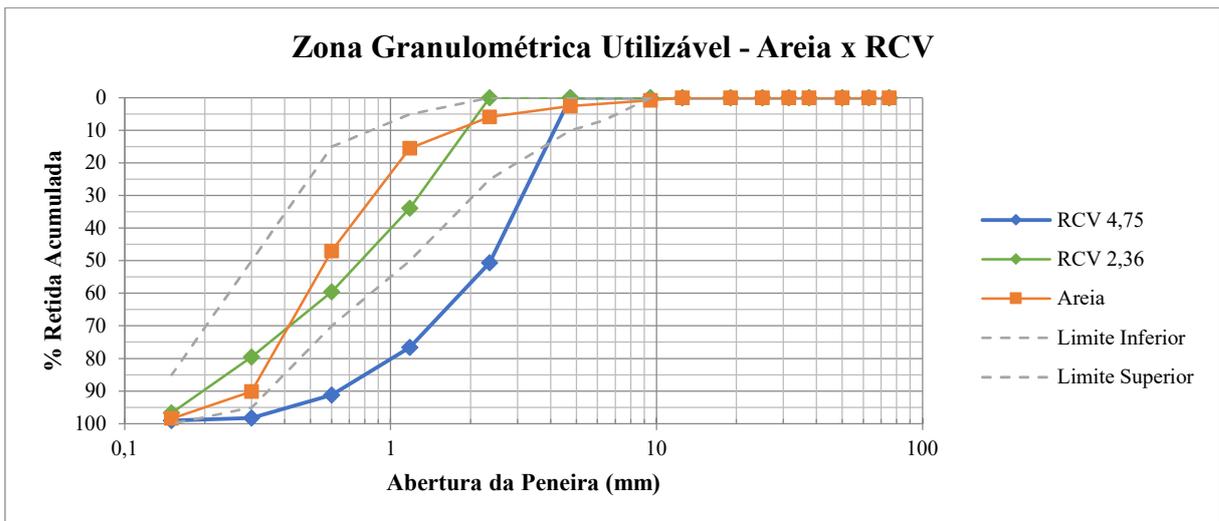
A NBR 7211 (ABNT, 2009) - “Agregados para concreto - Especificação” traz especificações quanto aos limites granulométricos para agregados utilizados na fabricação de concretos. Para o agregado miúdo, a norma especifica limites que constituem a zona ótima e a zona utilizável do material, mostradas nos gráficos 4 e 5, respectivamente. Como se pode observar através dos gráficos, tanto a areia natural quanto o RCV2,36 encontram-se parcialmente dentro da zona ótima, mas totalmente dentro da zona utilizável, sendo assim o seu uso aceito na produção de concretos quanto ao ponto de vista da distribuição granulométrica. Quanto ao RCV4,75, sua curva encontra-se quase que inteiramente fora das zonas ótima e utilizável, sendo então o seu uso não recomendado para fins de produção do concreto estudado.

Gráfico 4 — Zona granulométrica ótima dos agregados miúdos.



Fonte: Autora (2021).

Gráfico 5 — Zona granulométrica utilizável dos agregados miúdos.



Fonte: Autora (2021).

A Tabela 4 traz os dados de Dimensão Máxima Característica (DMC) e Módulo de Finura (MF) para os três agregados miúdos. Como se pode observar, para a areia natural e o RCV2,36 tem-se módulos de finura bastante aproximados e dimensões máximas características diferentes. Já o RCV4,75 possui a mesma DMC que a areia natural, porém o seu o módulo de finura é cerca de 1,6 vezes maior que o da areia natural. Para os agregados miúdos, a NBR 7211 (ABNT, 2009) especifica limites de módulo de finura para a zona ótima, que é de 2,60 à 2,90, estando o apenas o RCV2,36 e a areia natural dentro dessa faixa.

Tabela 4 — Características granulométricas do agregado miúdo.

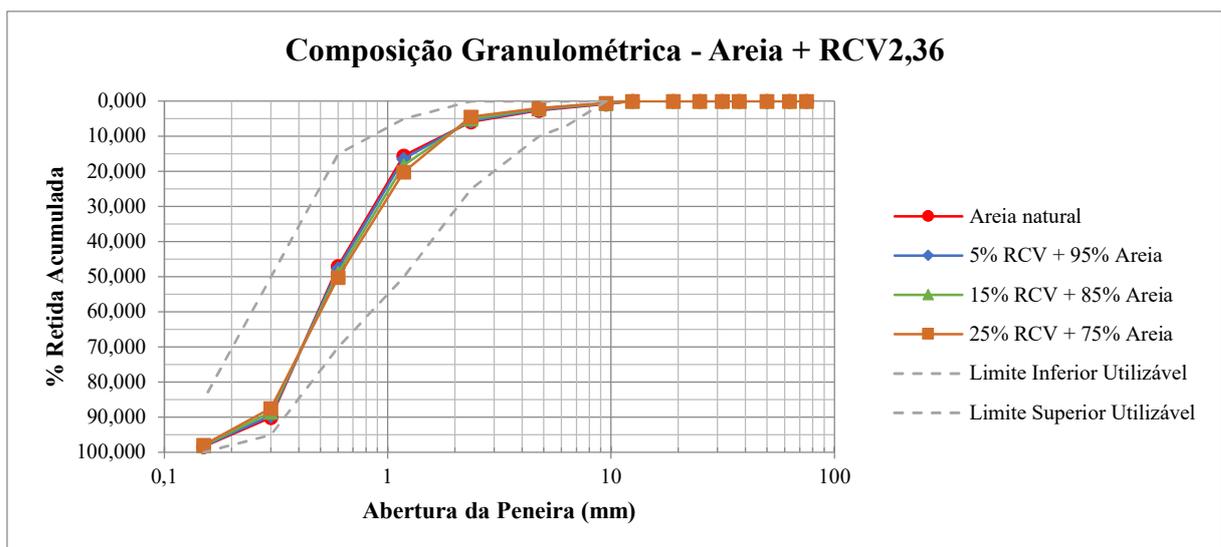
CARACTERÍSTICAS DO AGREGADO MIÚDO		
AGREGADO	DMC (mm)	MF
AREIA	4,75	2,60
RCV2,36	2,36	2,70
RCV4,75	4,75	4,16

Fonte: Autora (2021).

As proporções de substituição parcial do agregado miúdo pelo resíduo de cerâmica vermelha a serem analisadas neste trabalho são de 5%, 15% e 25%. As combinações granulométricas para a areia + RCV2,36 e areia + RCV4,75 podem ser visualizadas nos gráficos 6 e 7, respectivamente.

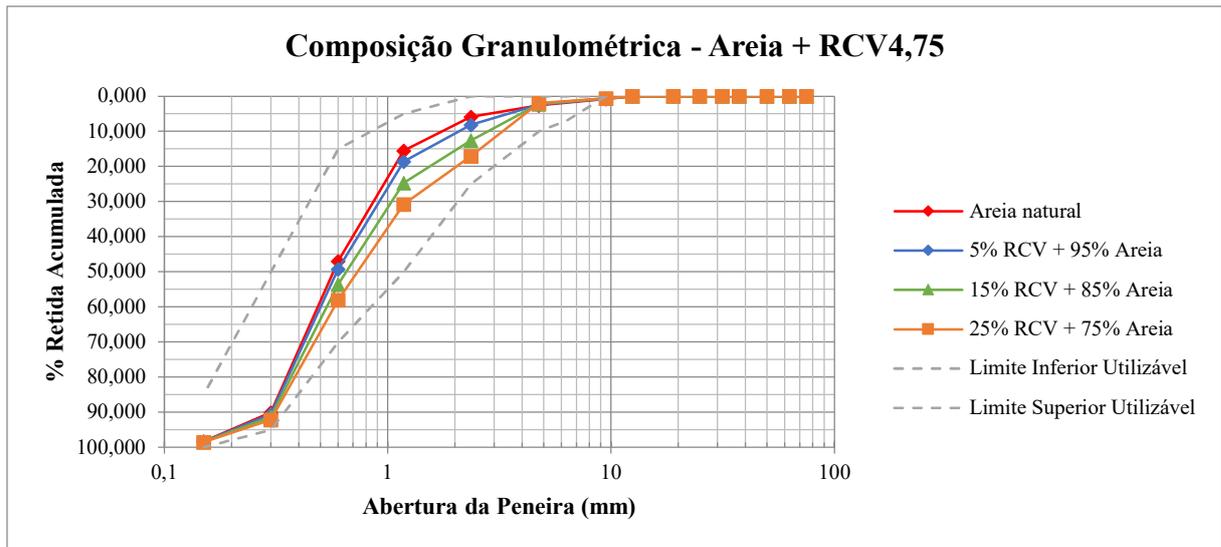
Como se pode observar no gráfico 6, a substituição de parte do agregado miúdo natural pelo RCV2,36 não afeta de maneira significativa a sua curva granulométrica quando comparado a areia natural, seguindo todas as curvas muito próximas umas das outras. Já quanto à substituição pelo RCV4,75, ilustrada no gráfico 7, percebe-se uma maior influência do resíduo, corroborando para um agregado com maior quantidade de partículas grossas quando comparados ao agregado natural, tendo as curvas uma mudança mais perceptível.

Gráfico 6 — Curvas granulométricas da composição areia + RCV2,36.



Fonte: Autora (2021).

Gráfico 7 — Curvas granulométricas da composição areia + RCV4,75.



Fonte: Autora (2021).

Embora ambos estejam dentro da zona utilizável especificada em norma, a utilização da fração menor do resíduo, o RCV2,36, foi a adotada como padrão para os demais ensaios, uma vez que as curvas de composição conjunta de areia e resíduo se apresentam de maneira mais aproximada a curva da areia natural. Além disso, a presença de partículas maiores influencia no módulo de finura do material, cujos valores calculados podem ser observados na tabela 5, onde a maior substituição para o RCV4,75 apresenta $MF = 2,99$, que se configura fora da zona ótima entre 2,60 e 2,90, o que não acontece para as proporções com o RCV2,36, que se encontram todas entre 2,60 e 2,70.

Tabela 5 — Características granulométricas das composições para o agregado miúdo.

CARACTERÍSTICAS DAS COMPOSIÇÕES		
PROPORÇÕES	MÓDULO DE FINURA	
	RCV2,36	RCV4,75
5% RCV + 95% AREIA	2,605	2,678
15% RCV + 85% AREIA	2,615	2,834
25% RCV + 75% AREIA	2,625	2,990

Fonte: Autora (2021).

4.1.3. Massa específica e absorção de água do agregado graúdo

A determinação das massas específica real e específica aparente e da absorção de água do agregado graúdo foi realizada conforme procedimento prescrito na NBR NM 53 (ABNT,

2003) - “Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água”. A Tabela 5 traz os resultados do ensaio.

Tabela 6 — Massa específica real, aparente e absorção de água da Brita 0.

DADOS DA BRITA 0	
Massa específica real seca (g/cm ³)	2,65089
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,60670
Absorção de água (%)	0,64

Fonte: Autora (2021).

Como é possível observar nos resultados obtidos, a absorção de água da brita é muito pequena, o que significa que a sua influência na água de amassamento do concreto não afetará de maneira significativa as suas propriedades, como por exemplo, a trabalhabilidade. Tal fato pode ser observado diretamente nas massas específicas real e aparente, cujos poros permeáveis são desconsiderados e considerados, respectivamente. Como na massa específica real os poros são desconsiderados, tem-se um volume menor e conseqüente uma massa específica maior do que no caso da massa específica aparente.

4.1.4. Massa específica do agregado miúdo e absorção de água do RCV

As massas específicas para a areia natural e para o resíduo foram determinadas a partir de métodos diferentes, isso porque o ensaio prescrito na NBR 9776 (ABNT, 1988) - “Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman”, pelo qual determinou-se a massa específica da areia, não se adequou ao resíduo de cerâmica vermelha (RCV), que absorveu completamente a água contida no frasco, impossibilitando a leitura do deslocamento do volume.

Assim, para o RCV utilizou-se outros dois métodos de determinação, o do Picnômetro, descrita na NBR 6508 (ABNT, 1984) - “Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação de massa específica”, e a mesma utilizada para o agregado graúdo, descrita na NBR NM 53 (ABNT, 2003). O uso de dois diferentes tipos de ensaio permitiu a avaliação e confirmação dos dados obtidos, tendo em vista não haver um ensaio específico para o tipo de material.

Os dados de massa específica para a areia natural e para o RCV estão mostrados na Tabela 6. Como se pode observar, a massa específica do RCV é menor do que a da areia natural, o que significa que, em um mesmo volume de material, a areia possui uma maior massa, sendo

assim mais densa do que o RCV. Assim, a combinação em massa da areia natural com o RCV dentro do concreto corrobora para um maior volume de material do que se a mistura fosse realizada somente com areia.

Tabela 7 — Massa específica dos agregados miúdos.

MASSA ESPECÍFICA AGREGADO MIÚDO	
AGREGADO	MASSA ESPECÍFICA (kg/m ³)
Areia natural	2624,69
Resíduo de cerâmica vermelha	2367,09

Fonte: Autora (2021).

Para a confiabilidade dos resultados, como mencionado, realizou-se dois ensaios com o RCV, sendo um deles o mesmo realizado para os agregados graúdos, onde utilizou-se a fração graúda do resíduo triturado. Para a massa específica, o valor obtido foi de 2375,32 kg/m³, valor que difere em quantidade menor que 0,02 g/cm³ em relação ao valor obtido pelo Picnômetro, o que confirma os dados obtidos para a massa específica do material.

Ademais, através desse ensaio foi possível calcular a também absorção de água do material, que foi de aproximadamente 10,33%, valor considerável quando comparado à brita, que foi apenas de 0,64%. Tal valor de absorção justifica, por exemplo, a impossibilidade da determinação da massa específica pelo frasco de Chapman, uma vez que o material é realmente muito poroso e acaba por absorver grandes quantidades de água. Além disso, tal fato pode influenciar nas características do concreto, principalmente na questão da trabalhabilidade.

A NBR 15116 (ABNT, 2021) aborda alguns requisitos específicos para agregados reciclados que irão fazer parte de compósitos cimentícios. Para agregados do tipo Agregado Reciclado Cimentício (ARCI) ou Agregado Reciclado Misto (ARM), este último que contempla os resíduos de cerâmica vermelha, a norma especifica uma absorção de água inferior a 12%, estando o RCV em concordância com esse limite por apresentar absorção de 10,33%.

4.1.5. Massa unitária dos agregados

A massa unitária para os agregados miúdo e graúdo seguiu as recomendações da NBR NM 45 (ABNT, 2006) - “Agregados - determinação da massa unitária e do volume de vazios”. O ensaio consistiu, basicamente, em determinar a massa presente em um recipiente de volume definido. Os dados obtidos estão mostrados na Tabela 7.

Tabela 8 — Massa unitária dos agregados.

MASSA UNITÁRIA	
AGREGADO	MASSA UNITÁRIA (kg/m ³)
Brita 0	1321,12
Areia natural	1487,61
Resíduo de cerâmica vermelha	1048,65

Fonte: Autora (2021).

Observando a Tabela 7, nota-se que o RCV é o material que possui o menor valor de massa unitária, seguido da brita 0 e depois da areia natural, esta que possui o maior valor. O RCV, proposta de substituição parcial da areia neste trabalho, possui massa unitária cerca de 1,4 vezes menor do que o agregado natural convencionalmente utilizado em concretos. Este baixo valor de massa unitária do RCV recorre, mais uma vez, à ideia de que se trata de um material poroso e, conseqüentemente, com maior possibilidade de absorção de água.

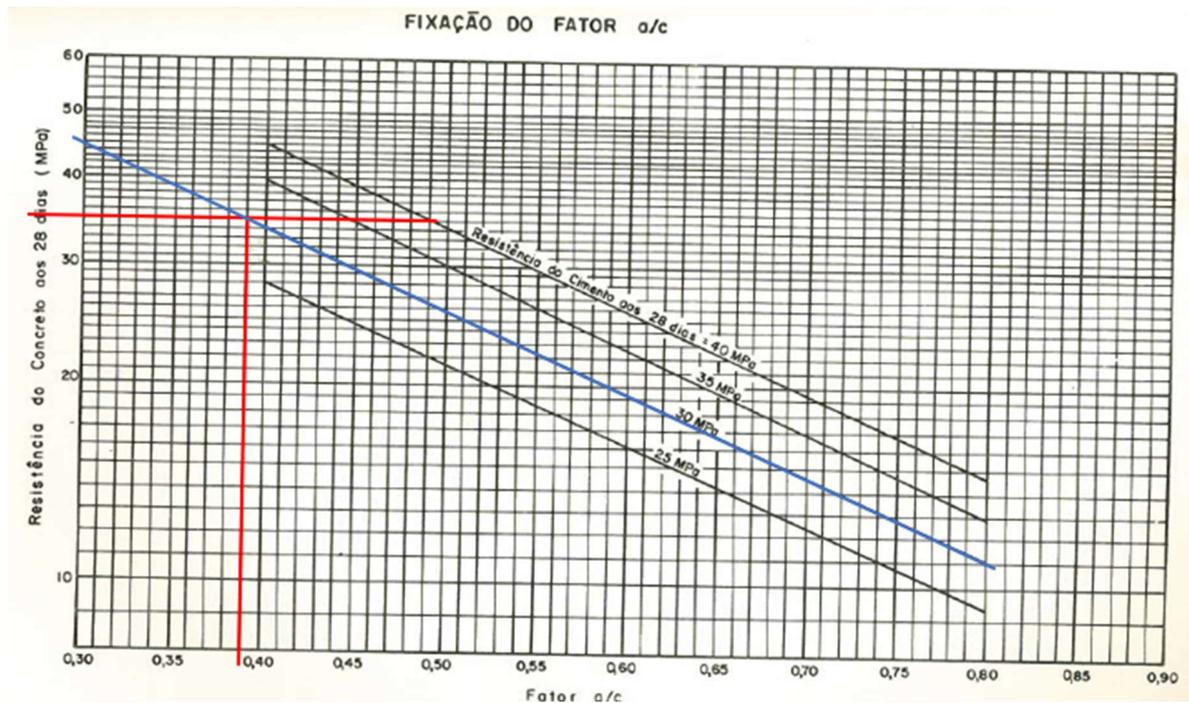
4.2. Propriedades do concreto

Após realizada a caracterização dos agregados utilizados para compor as misturas de concreto, realizou-se ensaios nas massas de concreto em seus estados fresco e endurecido, de maneira a avaliar as possíveis alterações no comportamento do material em virtude da utilização de material não usual, que trata do resíduo de cerâmica vermelha utilizado na pesquisa.

4.2.1. Dosagem do concreto

A dosagem do concreto utilizado na pesquisa levou em consideração as especificações do método abordado pela Associação Brasileira de Cimento Portland. Levando-se em consideração que o cimento utilizado foi o CP II - E com resistência aos 28 dias de 32 MPa e que o objetivo era produzir um concreto que atingisse a resistência a compressão de 35 MPa aos 28 dias, mínima estabelecida para blocos de concreto para pavimento intertravado, o traço obtido inicialmente levava em consideração um fator a/c de 0,39, determinado a partir da curva de cimento de 30 MPa, por não existir uma curva referente ao cimento de 32 MPa, como se pode observar na figura 48.

Figura 48 — Fixação do fator a/c para a pesquisa.



Fonte: Adaptado (ABCP, 1984).

Todavia, por tratar-se de um fator a/c muito baixo e que dificultaria a moldagem dos corpos de prova, além disso tendo sido obtido na curva não correspondente ao cimento real de 32 MPa, utilizou-se um fator a/c um pouco maior, de 0,45, sendo calculadas as demais proporções de materiais do traço a partir desse dado. O traço padrão utilizado na pesquisa foi de 1 : 2,16 : 2,22 : 0,45, o que indica, por exemplo, que para 1 kg de cimento tem-se 2,16 kg de areia, e assim respectivamente para os demais materiais. Os traços com substituição parcial da areia pelo RCV obtidos a partir do traço padrão estão mostrados na Tabela 8.

Tabela 9 — Traços.

TRAÇOS ESTUDADOS					
TRAÇO	PROPORÇÕES DE CONSUMO (kg/kg)				
	Cimento	Areia	RCV	Brita	Água
Referência padrão	1	2,16	0	2,22	0,45
5% RCV	1	2,05	0,11	2,22	0,45
15% RCV	1	1,84	0,32	2,22	0,45
25% RCV	1	1,62	0,54	2,22	0,45

Fonte: Autora (2021).

4.2.2. Preparação do concreto, trabalhabilidade e moldagem

O concreto foi preparado através da mistura mecânica com o auxílio da betoneira, seguindo a ordem de inserção de agregado graúdo, cimento e agregado miúdo, com a água adicionada aos poucos durante o processo. De maneira geral, o fator água/cimento baixo trouxe dificuldades de mistura em todos os traços estudados, uma vez que o cimento formava bolas difíceis de serem quebradas dentro da betoneira, como as mostradas na figura 49, sendo necessário várias vezes parar o equipamento para a realização da quebra manual com o auxílio da colher de pedreiro. Essas bolas eram úmidas por fora e secas por dentro, sendo a quebra necessária para a correta hidratação do cimento.

Figura 49 — Formação de bolas de cimento durante a mistura.



Fonte: Autora (2021).

Para os concretos confeccionados, antes da moldagem dos corpos de prova foi analisada a trabalhabilidade através do ensaio de abatimento do tronco de cone ou *Slump test*, seguindo a NBR NM 67 (ABNT, 1998). Os dados de trabalhabilidade obtidos para as quatro misturas estão destacados na Tabela 9.

Tabela 10 — Abatimento do tronco de cone.

RESULTADOS <i>SLUMP TEST</i>	
TRAÇO	ABAT. DO TRONCO DE CONE (mm)
Referência padrão	0 (<i>No slump</i>)
5% RCV	0 (<i>No slump</i>)
15% RCV	0 (<i>No slump</i>)
25% RCV	0 (<i>No slump</i>)

Fonte: Autora (2021).

De acordo com os dados da Tabela 9, é possível notar que para todos os traços trabalhados foram obtidos concretos com uma consistência seca, ou seja, com uma trabalhabilidade baixa, o que era de se esperar diante da necessidade de se atingir uma resistência de 35 MPa, exigida em norma para os blocos utilizados em pavimentação. Todavia, como todos apresentaram um valor de abatimento igual, em virtude do traço de referência em si já se caracterizar como um traço de aspecto seco, não foi possível analisar quantitativamente a influência da substituição do RCV quanto ao critério da trabalhabilidade.

Ademais, quanto ao aspecto visual das misturas, se pôde observar que o aumento da porcentagem de utilização do RCV como substituição à areia corroborou para concretos ainda mais secos, sendo a substituição de 25% a que se apresentou de maneira mais desfavorável quanto à trabalhabilidade e com maiores dificuldades de mistura, mesmo com o auxílio mecânico da betoneira. A figura 50 mostra a moldagem de um corpo de prova de 16 faces com um concreto com 25% de RCV, como se pode observar o concreto apresenta-se com um aspecto bastante seco, o que tornou o adensamento ainda mais difícil.

Figura 50 — Moldagem de corpo de prova 16 faces com 25% RCV.



Fonte: Autora (2021).

Por se tratar de concreto com uma baixa trabalhabilidade, foram necessárias mais de uma tentativa de moldagem para que se obtivesse sucesso no aspecto visual dos corpos de prova. Para o concreto de referência, que não contava com a presença de resíduo de cerâmica vermelha, a mistura foi preparada com a utilização de todos os materiais em seu estado de umidade natural. Notou-se considerável dificuldade na moldagem manual dos corpos de prova, todavia a maioria apresentou um bom aspecto visual, sem a evidência de poros que pudessem atrapalhar as suas propriedades, sendo estes corpos de prova aprovados na análise visual e encaminhados para os demais ensaios de resistência à compressão e absorção de água. Assim, o lote de referência para os testes foi concluído em uma única tentativa, e pode ser visualizado na figura 51.

Figura 51 — Corpos de prova de referência.



Fonte: Autora (2021).

Quanto ao concreto com a presença de resíduo, foram executadas três tentativas de moldagem para as substituições de 5%, 15% e 25%, até se obter corpos de prova corretamente moldados. O primeiro lote moldado teve o concreto preparado com todos os elementos em seu estado de umidade natural e com a adição de superplastificante, que facilitou a própria mistura por evitar a formação de bolas como no concreto referência. Entretanto, o aditivo utilizado era indicado para argamassas e não para concretos, o que impedia a comparação fiel ao concreto de referência para a análise da influência do RCV, pois o aditivo poderia influenciar nas demais propriedades do concreto. As figuras 52, 53 e 54 trazem os corpos de prova para 5%, 15% e 25% de substituição, respectivamente.

Figura 52 — Corpos de prova 5% RCV com aditivo.



Fonte: Autora (2021).

Figura 53 — Corpos de prova 15% RCV com aditivo.



Fonte: Autora (2021).

Figura 54 — Corpos de prova 25% RCV com aditivo.



Fonte: Autora (2021).

O segundo lote de concreto também foi preparado com os materiais em suas umidades naturais, todavia o RCV foi utilizado em sua fração maior passante na peneira de 4,75 mm e os corpos de prova foram moldados com auxílio de vibrador mecânico. O aspecto final dos elementos mostrou deficiência no adensamento, com grande evidência de poros, localizadas principalmente na parte inferior dos corpos de prova, como observa-se nas figuras 55 e 56. Isso possivelmente está ligado ao fato do concreto ser de aspecto seco, ficando a pasta com dificuldades de infiltrar e preencher os vazios do corpo de prova, além do RCV utilizado contar com a predominância de partículas superiores a 1 mm, reduzindo a quantidade de partículas pequenas capazes de preencher todos os vazios do elemento.

Figura 55 — Vista lateral de corpos de prova com RCV4,75.



Fonte: Autora (2021).

Figura 56 — Vista superior de corpos de prova com RCV4,75.



Fonte: Autora (2021).

O terceiro e último lote foi moldado de maneira totalmente manual e preparado sem a utilização de aditivo, todavia o resíduo passou por uma etapa de pré-molhagem, com o volume de água a ser adicionado calculado a partir da absorção do material de 10,33%, sendo considerada 80% dessa absorção, o que resultou em uma quantidade média de 82,64 g de água para cada 1 kg de resíduo. Visualmente os elementos ficaram em um bom estado, sendo estes encaminhados para os ensaios de resistência à compressão e absorção de água. As figuras 57, 58 e 59 mostram como ficaram estes corpos de prova.

Figura 57 — Corpos de prova 5% RCV pré-molhado.



Fonte: Autora (2021).

Figura 58 — Corpos de prova 15% RCV pré-molhado.



Fonte: Autora (2021).

Figura 59 — Corpos de prova 25% RCV pré-molhado.



Fonte: Autora (2021).

De maneira geral, quanto à mistura e moldagem dos corpos de prova, foi possível observar que mesmo em quantidades pequenas, a utilização do RCV em seu estado de umidade natural corroborou para corpos de prova bastante porosos, sendo estes poros possivelmente capazes de atrapalhar as demais propriedades destes elementos. Todavia, mesmo quando passados por etapa de pré-molhagem, a trabalhabilidade quanto ao aspecto visual e manual do concreto reduziu à medida que se aumentou a porcentagem de substituição, o que pode estar relacionado também ao fato de que a massa específica do RCV é menor do que a do agregado miúdo natural, o que faz com que a substituição em massa aumente o volume de material presente na mistura, e com as outras quantidade constantes, isso significa que a proporção em volume de água/agregado miúdo reduzia com o aumento das substituições.

4.2.3. Absorção de água do concreto

O ensaio de absorção de água foi realizado conforme especifica a norma de peças de concreto para pavimentação, a NBR 9781 (ABNT, 2013). O ensaio foi realizado para os corpos

de prova de 16 faces, os chamados *pavers*, sendo para cada traço ensaiadas 3 peças de concreto, dos três foram selecionados os 2 resultados mais aproximados entre as peças ensaiadas, pois a dificuldade na moldagem dos *pavers* corroborou para a presença de algumas peças com quantidade excessiva de poros. Os dados de absorção estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 11 — Absorção de água do concreto.

ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA			
TRAÇO	ABSORÇÃO DE ÁGUA (%)		ABSORÇÃO MÉDIA (%)
	CP1	CP2	
Referência padrão	3,84	3,95	3,90
5% RCV	3,74	3,60	3,67
15% RCV	3,48	3,36	3,42
25% RCV	4,08	3,85	3,96

Fonte: Autora (2021).

Segundo a norma NBR 9781 (ABNT, 2013), as peças de concreto devem apresentar uma absorção média menor ou igual a 6%, sendo que individualmente nenhuma das peças da amostra pode ultrapassar o valor de 7% de absorção de água. Conforme observa-se na tabela, em nenhum dos traços estudados as peças ultrapassaram o valor máximo de absorção especificado em norma, estando, portanto, aprovadas quanto a este quesito.

Quando se compara os concretos com substituição ao concreto de referência, observa-se que os valores não se encontram de maneira mais desfavorável por conta da presença do resíduo, estando as peças com 5% e 15% de RCV com valores de absorção inferiores ao de referência. Tal fato pode estar associado a presença de maior quantidade de finos na mistura de concreto provenientes do RCV, o que corrobora para o maior preenchimento de vazios e consequentemente menor quantidade de poros propícios à absorção de água. Todavia, os *pavers* não seguem um padrão de diminuição da absorção de água com o aumento da substituição, o que se deve ao fato do aumento da porcentagem de RCV influenciar também de maneira direta na trabalhabilidade da mistura, por conta da absorção de água do material que interfere diretamente na água de amassamento, assim a mistura com 25% de RCV se mostrou com maiores dificuldades de moldagem e consequentemente resultou em peças com mais poros permeáveis.

Entretanto, embora haja uma diferença de absorção entre as peças estudadas, essa diferença não é significativa, estando todos entre os valores de 3,40% e 4,00%. Essas

discrepâncias podem estar associadas ao próprio método de moldagem empregado, que fora totalmente manual, sem a garantia de emprego de um mesmo padrão em todas as peças confeccionadas.

4.2.4. Resistência à compressão

A NBR 9781 (ABNT, 2013) também especifica como requisito obrigatório para aceitação das peças de concreto para pavimentação o ensaio de resistência à compressão. O ensaio foi realizado em corpos de prova cilíndricos, aos 7 e 28 dias de idade, para cada uma das misturas de concreto. Os dados estão mostrados na Tabela 11, que traz as resistências individuais dos corpos de prova e a média para cada traço para as idades de 7 e 28 dias, respectivamente, sendo para cada traço e idade ensaiados 3 corpos de prova.

Tabela 12 — Dados de resistência à compressão do concreto.

DADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO				
TRAÇO	CP1	CP2	CP3	MÉDIA
7 dias				
Referência padrão	24,2732	27,2792	27,2066	26,4163
5% RCV	22,2779	20,0128	23,8248	22,0385
15% RCV	20,0803	22,7350	24,6652	22,4935
25% RCV	17,9832	14,0680	19,9720	17,3411
28 dias				
Referência padrão	36,6820	33,6619	24,5200	31,6213
5% RCV	28,7001	27,5529	27,8190	28,0240
15% RCV	30,6889	30,3744	27,3072	29,4568
25% RCV	25,7844	33,0342	28,9089	29,2425

Fonte: Autora (2021).

Analisando a tabela de uma maneira geral, observa-se certas discrepâncias entre os valores de resistência dos corpos de prova para um mesmo traço. Estas discrepâncias estão muito possivelmente atreladas à problemas de moldagem, ocorridas tanto em virtude do tempo entre moldagens consecutivas dos corpos de prova, uma vez que há perda de água e

consequentemente maiores dificuldades de adensamento, como também pela mudança do operador e pelo próprio cansaço atrelado ao esforço físico necessário à moldagem manual.

Ademais, quando se avalia individualmente cada traço em relação à sua resistência média, observa-se algumas discrepâncias de certa forma acentuadas, como é o caso do concreto de referência aos 28 dias, onde a resistência do CP3 apresenta uma queda em torno de 7 MPa quando comparado a média para o traço. Diante disso, exclusivamente para o caso do concreto de referência aos 28 dias, utilizou-se apenas dois valores, descartando o corpo de prova de 24,52 MPa de resistência, sendo recalculada a média para este traço. Para os demais traços e idades, utilizou-se os valores referentes aos 3 corpos de prova ensaiados. A tabela 12 traz os valores de resistência média adotados para as análises.

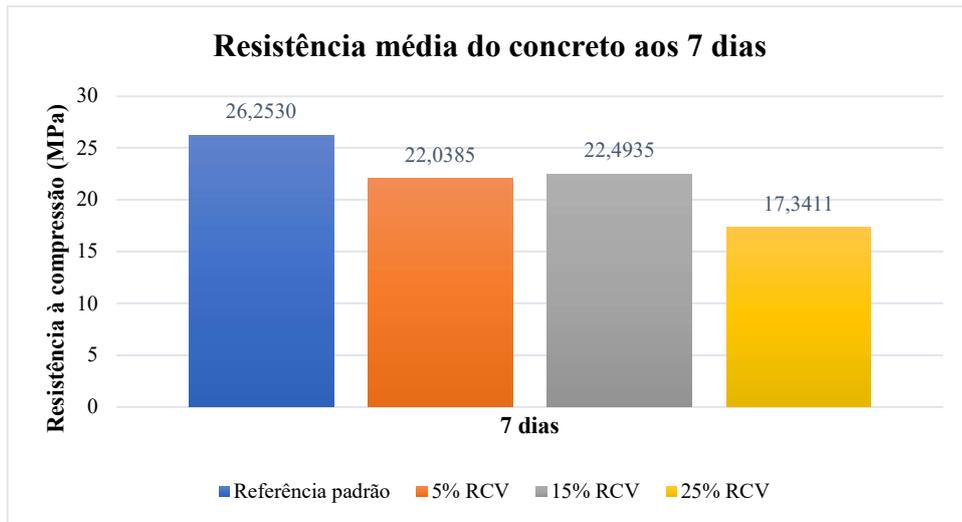
Tabela 13 — Resistência média à compressão do concreto.

RESISTÊNCIA MÉDIA À COMPRESSÃO		
TRAÇO	7 dias	28 dias
Referência padrão	26,4163	35,1719
5% RCV	22,0385	28,0240
15% RCV	22,4935	29,4568
25% RCV	17,3411	29,2425

Fonte: Autora (2021).

Observando a idade de 7 dias, é possível visualizar que há uma queda de resistência das peças em função da substituição parcial do agregado miúdo pelo resíduo quando comparados ao concreto de referência, onde a substituição de 25%, a maior estudada, corroborou para um concreto com um decréscimo em torno de 9 MPa em relação ao traço de referência, o que era esperado em virtude de o resíduo apresentar-se visualmente de maneira mais frágil do que o agregado natural utilizado, que foi a areia. Quanto às substituições de 5% e 15%, é possível notar que as resistências ficaram muito semelhantes, com uma queda em torno de 4 MPa quando comparadas ao de referência. De maneira geral, os concretos 5% RCV e 15% RCV atingiram aos 7 dias mais de 80% da resistência do traço de referência, enquanto o concreto 25% RCV só chegou próximo aos 65%. Essa divergência entre as resistências pode ser observada de maneira melhor através do gráfico 7 abaixo.

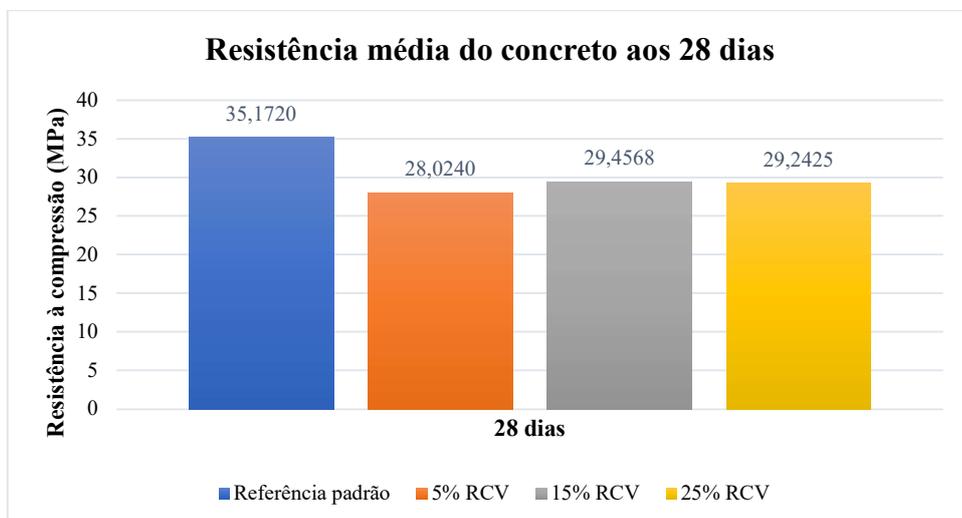
Gráfico 8 — Resistência média à compressão do concreto aos 7 dias.



Fonte: Autora (2021).

Para a idade de 28 dias a resistência também cai quando se compara os traços com RCV ao traço de referência, estando todos os traços com substituição atingindo resistências inferiores, o que era esperado por estar se usando um resíduo de material cerâmico. Entretanto, nota-se uma tendência diferente para os concretos com RCV, onde as três substituições estudadas apresentam valores de resistência média muito próximos entre si, com uma leve subida para as substituições de 15% e 25%, que apresentam valores bastante semelhantes, como se visualiza no gráfico 8. Nesse caso, o RCV 5% atingiu a menor resistência média encontrada para a idade, o que difere da situação aos 7 dias, onde observou-se uma queda significativa para o concreto com 25% de RCV.

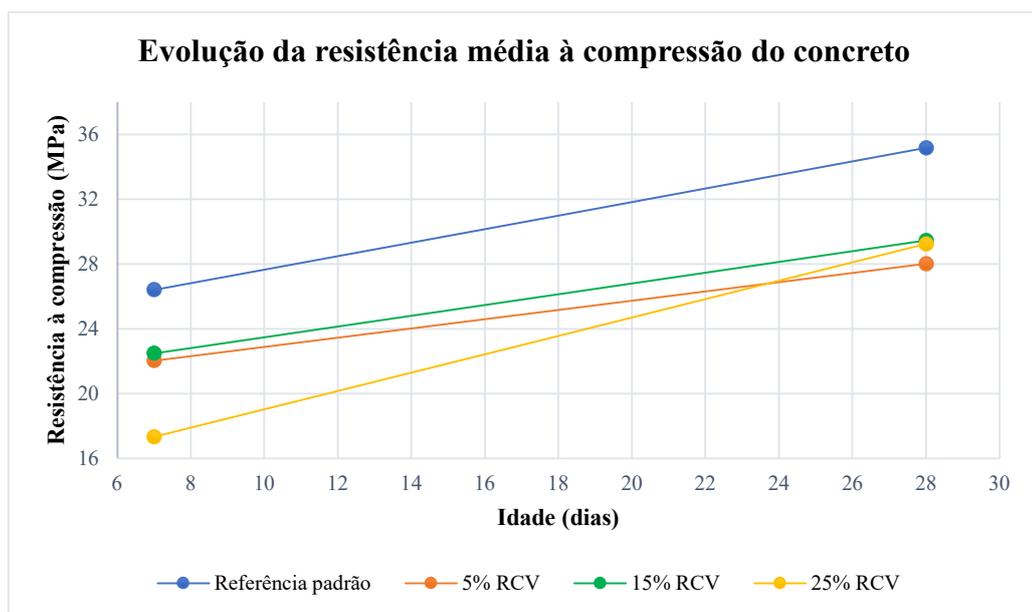
Gráfico 9 — Resistência média à compressão do concreto aos 28 dias.



Fonte: Autora (2021).

Analisando quanto ao desenvolvimento da resistência média dos traços estudados ao longo das idades ensaiadas, mostrado no gráfico 9, é possível observar que o traço com 25% de RCV obteve um crescimento mais acentuado em relação às demais substituições, saindo da menor das resistências medidas entre as peças aos 7 dias, e atingindo a segunda maior resistência aos 28 dias de idade, muito próximo do maior valor entre as substituições. Quanto às outras duas substituições, nota-se que o concreto com 5% de RCV teve o menor desenvolvimento, saindo de uma resistência intermediária aos 7 dias e atingindo a menor das resistências aos 28 dias. De maneira geral, é possível notar que a incorporação do resíduo retardou o ganho de resistência das peças, uma vez que o concreto com 25% RCV apresentou baixa resistência aos 7 dias, mas aos 28 dias atingiu uma resistência equivalente às demais peças com substituição.

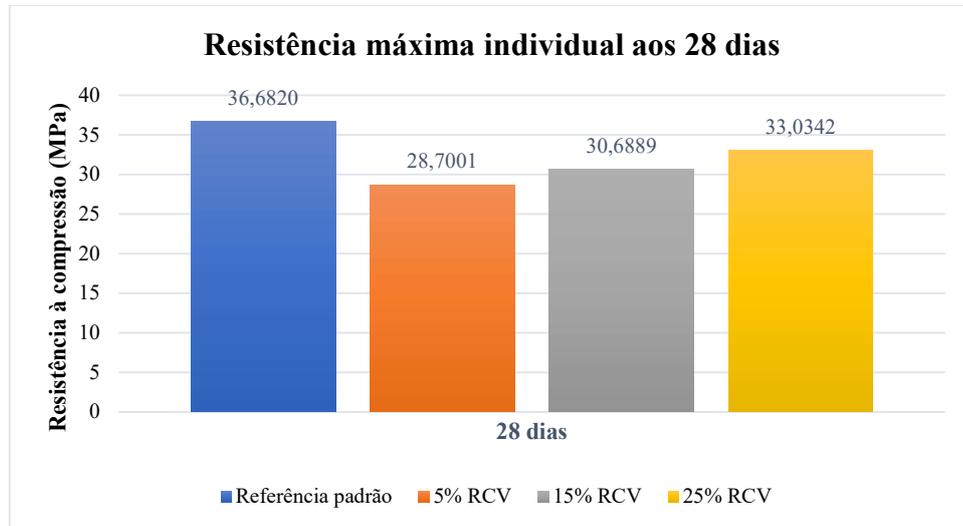
Gráfico 10 — Desenvolvimento da resistência à compressão do concreto.



Fonte: Autora (2021).

Ademais, uma análise foi feita para os corpos de prova que atingiram as maiores resistências individuais aos 28 dias para cada um dos traços estudados, onde observa-se um crescimento da resistência em função do aumento da substituição de RCV, com um aumento em torno de 2,0 MPa do RCV 15% e 4,3 MPa do RCV 25%, ambos em relação ao concreto com 5% de substituição. O crescimento das resistências segue um comportamento aproximadamente linear, seguindo o crescimento das porcentagens estudadas. O gráfico 10 ilustra a observação.

Gráfico 11 — Resistência à compressão máxima individual do concreto aos 28 dias.



Fonte: Autora (2021).

O crescimento da resistência ao longo das substituições analisadas, observado acima, pode estar atrelado à atividade pozolânica desempenhada pelo resíduo triturado, proveniente do aquecimento da argila à altas temperaturas, e também pelo efeito fíler, com os finos do resíduo atuando no preenchimento dos vazios da matriz cimentícia, assim como citou Alcantara (2015) em seu trabalho.

Segundo Sales (2014), os materiais pozolânicos não endurecem por si só quando misturados à água, porém eles adquirem essa propriedade ao reagir com o hidróxido de cálcio dissolvido e formar os compostos de silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio, responsáveis pelo desenvolvimento da resistência mecânica. Segundo Sales (2014), quando adicionado ao concreto, o resíduo de cerâmica vermelha apresenta atividade pozolânica.

Como afirma Silva (2021), as argilas calcinadas a temperaturas não muito elevadas, como os tijolos cerâmicos de segunda, apresentam maior grau de pozolanicidade dentre os materiais cerâmicos.

Assim, quanto à resistência à compressão, embora não se tenha atingido os 35 MPa requeridos para o uso na pavimentação, a utilização do resíduo em sua maior porcentagem estudada neste trabalho, que foi a de 25%, mostrou-se a mais favorável, uma vez que sua resistência média caiu em torno de 0,2 MPa em relação a substituição de 15%, que obteve o maior valor de resistência média calculado, e que a sua resistência individual máxima chegou a 33 MPa para o corpo de prova 3, muito próximo ao limite estabelecido em norma. Ademais, cabe destacar que nem mesmo todas as peças de referência atingiram a resistência de 35 MPa

proposta para o traço, onde apenas uma delas conseguiu atender ao requisito da resistência mínima chegando próximo dos 37 MPa. Ainda, a não uniformidade nos resultados das resistências ensaiadas muito possivelmente está atrelada à questão da moldagem manual, onde não foi possível se estabelecer um padrão, que conseqüentemente apontou para respostas, por vezes, discrepantes.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo objetivou analisar a viabilidade técnica da substituição parcial do agregado miúdo natural pelo resíduo de cerâmica vermelha, proveniente da quebra e descarte de materiais cerâmicos, como tijolos e telhas, em misturas de concreto para a fabricação de blocos intertravados para pavimentação, os conhecidos *pavers*. Além de promover a destinação adequada dos resíduos que atualmente se amontoam em grandes áreas, propiciando a proliferação de doenças e prejudicando a estética local, a iniciativa também traz benefícios ambientais, por reduzir o uso de recursos naturais e o desperdício.

O resíduo coletado foi fragmentado e triturado até chegar ao tamanho de uma areia, sendo peneirado e submetido a ensaios de caracterização física, onde foram analisadas inicialmente duas frações de diferentes tamanhos. Quanto à granulometria, concluiu-se que a faixa passante na peneira de 2,36 mm é a mais indicada para o uso como agregado miúdo, uma vez que se encaixou totalmente dentro da zona utilizável estabelecida por norma, e com módulo de finura bastante aproximado ao da areia, todavia o agregado reciclado possui uma densidade menor, com a maior presença de poros e uma absorção de água relativamente alta, mas que obedece aos requisitos da NBR 15116 (ABNT, 2021).

Quanto às propriedades do concreto no estado fresco, embora realizada a pré-molhagem do RCV, ainda se notou perda de trabalhabilidade quando se aumentava as porcentagens de substituição, dada em virtude da grande absorção de água do material, que ultrapassa 10%. O baixo fator água/cimento atrelado à absorção do resíduo corroborou para grandes dificuldades de moldagem, que resultaram por vezes em peças defeituosas e com grande presença de poros.

A absorção média de água das peças de concreto não ultrapassou o valor de 6% estabelecido em norma, estando todas entre os valores de 3% e 4%. Para as substituições de 5% e 15%, notou-se uma pequena queda na absorção de água quando comparadas ao concreto de referência, o que possivelmente está associado à presença de finos que auxiliaram no preenchimento dos vazios da matriz cimentícia. Todavia, para a substituição de 25% houve um

pequeno aumento, o que não deve estar associado em si à substituição com o resíduo, mas sim à dificuldade de moldagem propiciada pela perda de trabalhabilidade do concreto.

A resistência à compressão simples das peças teve um comportamento que não seguiu um padrão para as duas idades analisadas. Aos 7 dias, observou-se que as substituições de 5% e 15% atingiram cerca de 80% da resistência encontrada para o traço de referência, enquanto a substituição de 25% chegou apenas a 65%. Aos 28 dias, observou-se um padrão diferente de resistência para os concretos com RCV, onde a menor substituição, que era 5%, apresentou o menor valor de resistência, enquanto as outras duas substituições apresentaram valores bastante semelhantes, entre 29 e 30 MPa.

Quanto ao ganho de resistência, observou-se que a substituição de 25% obteve um desenvolvimento mais acentuado ao longo das idades analisadas, uma vez que aos 7 dias apresentou o valor mais baixo de resistência média. Tal fato possivelmente está associado à ação pozzolânica do material cerâmico, influenciando nas reações de ganho de resistência mecânica. Todavia, torna-se necessária a realização de estudo aprofundado quanto à reatividade química desses materiais quando incorporados ao concreto, uma vez que o resíduo de cerâmica vermelha é proveniente do cozimento da argila, que não é um material inerte.

Embora não tenha atingido a resistência de 35 MPa exigida em norma, se analisadas individualmente, uma das peças com substituição de 25% de RCV chegou a 33 MPa, muito próximo ao limite mínimo estabelecido em norma para uso em pavimentação, que é de 35 MPa. A utilização de uma técnica padronizada de moldagem, com o auxílio de equipamentos mecânicos como a vibroprensa, utilizada comumente para a fabricação dos *pavers*, pode melhorar os resultados quanto ao adensamento das peças, e contribuir para que se atinja os 35 MPa mínimos estabelecidos em norma.

O RCV possui potencial para a utilização na pavimentação, sendo a maior porcentagem de substituição estudada a mais indicada, uma vez que apresentou uma queda mínima na resistência média quando comparada ao concreto de 15%, que obteve a maior resistência entre as substituições. Além disso, os valores de absorção obtidos para as peças foram satisfatórios. Porém, são necessários estudos também quanto à questão da durabilidade das peças, um parâmetro importante de análise, uma vez que essas peças vão estar sujeitas à vários esforços continuamente, como os esforços cíclicos da passagem de veículos.

De acordo com o estudado, o resíduo de cerâmica vermelha, ou RCV, mostra-se com elevado potencial para uso na fabricação de peças de concreto para pavimentação intertravada, sendo tanto técnica quanto ambientalmente viável, contribuindo para a produção de peças resistentes, e para construções com um selo de qualidade ambiental, fator muito importante em

tempos de tanta necessidade de preservação, uma vez que se caminha para situações cada vez mais desfavoráveis quanto à exploração de recursos. Ademais, é necessário atentar-se a outros fatores envolvidos na utilização desse material, como a sua viabilidade econômica, uma vez que há um custo na preparação do resíduo, em virtude da necessidade de trituração e separação do material para o seu emprego como agregado na fabricação de concretos.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros realizados na área, sugere-se:

- Estudar porcentagens maiores de substituição, de maneira a analisar até onde a utilização do resíduo é vantajosa tecnicamente;
- Estudar a aplicação do resíduo através da moldagem por vibroprensa, que é uma técnica utilizada para o adensamento de peças de concreto seco ou farofa,
- Analisar a reatividade do material cerâmico dentro da matriz cimentícia, e quais as suas vantagens e desvantagens nas propriedades do concreto no estado endurecido;
- Analisar diferentes técnicas de moldagem e sua influência nas propriedades do concreto no estado endurecido;
- Analisar financeiramente as vantagens de beneficiamento do resíduo para a utilização como substituição aos agregados convencionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCÂNTARA, P. S. X. de. **Blocos intertravados coloridos para pavimentação com incorporação de resíduos de cerâmica vermelha em prol da redução de pigmentos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco - Centro Acadêmico do Agreste, Caruaru, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019.** Anual. ISSN 2179-8303. São Paulo, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Manual de Pavimento Intertravado: Passeio Público.** São Paulo, 2010. 36p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Parâmetros de Dosagem Racional do Concreto.** In: 34ª Reunião de Técnicos da Indústria do Cimento, 1984. Anexo N° 5. Disponível em: < https://abcp.org.br/wp-content/uploads/2016/01/Parametros-dosagem_34aRTIC1983.pdf >. Acesso em: 17 nov. 2021.

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

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

_____. **ABNT NBR 6502: Rochas e solos.** Rio de Janeiro, 1995.

_____. **ABNT NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação de massa específica.** Rio de Janeiro, 1984.

_____. **ABNT NBR 7211: Agregados para concreto.** Rio de Janeiro, 1983.

_____. **ABNT NBR 7216: Amostragem de agregados.** Rio de Janeiro, 1987.

_____. **ABNT NBR 9776: Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman.** Rio de Janeiro, 1987.

_____. **ABNT NBR 9781: Peças de concreto para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio.** Rio de Janeiro, 2013.

_____. **ABNT NBR 9935: Agregados - Terminologia.** Rio de Janeiro, 2011.

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

_____. **ABNT NBR 116697: Cimento Portland - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2018.

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

_____. **ABNT NBR NM 52:** Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **ABNT NBR NM 53:** Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **ABNT NBR NM 67:** Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

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

ASSUNÇÃO, J. W. **Curvas de dosagem para concretos convencionais e aditivados confeccionados com materiais da região do noroeste do Paraná.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

BANCO DO NORDESTE DO BRASIL S/A. **Informe Setorial Cerâmica Vermelha.** Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste - ETENE, 2010. Disponível em: < https://www.bnb.gov.br/documents/88765/89729/ano4_n21_informe_setorial_ceramica_vermelha.pdf/66eb35dc-dd49-420d-a921-26e9efc320d9 >. Acesso em: 17 nov. 2021.

BITTENCOURT, S. F. **Avaliação da resistência à compressão de paviers produzidos com agregados de resíduos de construção e demolição e areia de fundição.** Dissertação (Mestrado em Tecnologia) - Curso de Mestrado da Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2012.

BRASIL. Resolução CONAMA nº. 307, de 05 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, 2002.

CABRAL, Antonio Eduardo Bezerra *et al.* Desempenho de concretos com agregados reciclados de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, São Paulo, SP, v. 55, n. 336, p. 448-460, 2009. DOI: 10.1590/S0366-69132009000400016. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132009000400016> >. Acesso em: 16 nov. 2021.

CLEMENTINO, F. de C.; BARROS, G. R.; SANTOS, P. G. D. e. **Processo produtivo em uma indústria de artefatos de concreto.** Monografia (Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Relatório Final da Etapa 01 - Diagnóstico.** Fortaleza, 2013. Disponível em: < <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/dnpm/publicacoes-economia-mineral/arquivos/extracao-de-argila-no-baixo-jaguaribe-ceara/view> >. Acesso em: 17 nov. 2021.

FABRO, F. *et al.* Influência da forma dos agregados miúdos nas propriedades do concreto. **IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 4, n. 2, p. 191-212, jun. 2011. ISSN 1983-4195.

FERNANDES, Idário D. **Blocos e Pavers: Produção e Controle de Qualidade**. São Paulo: Treino Assessoria e Treinamentos Empresariais Ltda, 2013. ISSN 978-85-62290-03-9.

FONSECA, A. P. **Estudo comparativo de concretos com agregado graúdo reciclado de telha cerâmica e agregado graúdo natural**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

KELES, K. C. **Influência da basicidade da escória de alto forno como adição ao concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

KÖHLER, L. G. **Desempenho Técnico de Blocos de Concreto para Pavimento Intertravado com Resíduo de Construção e Demolição**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2013.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Relatório Técnico 79: Análise-síntese da transformação mineral no país**. Brasil, 2009. Disponível em: < <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/relatorios-de-apoio-ao-pnm-2030-projeto-estal-1/a-transformacao-mineral-no-brasil/documentos/relatorio-ndeg79-analise-sintese-da-transformacao.pdf/view> >. Acesso em: 17 nov. 2021.

PREGARDIER, C. D. **Utilização combinada de resíduo de concreto e resíduo de cerâmica vermelha como agregado graúdo em concreto**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso - Engenharia Civil, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2020.

SALES, A. T. C.; ALFERES FILHO, R. dos S. Efeito do pó de resíduo cerâmico como adição ativa para o concreto. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 113-125, jan./mar. 2014.

SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL. **Plano Nacional de Mineração 2030**. Brasília, 2011. Disponível em: < <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/plano-nacional-de-mineracao-2030-1/documentos> >. Acesso em: 17 nov. 2021.

SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS. **Cerâmica vermelha: Panorama do mercado no Brasil**. Boletim de Inteligência, dezembro/2015. Disponível em: < [http://www.bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/b877f9b38e787b32594c8b6e5c39b244/\\$File/5846.pdf](http://www.bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/b877f9b38e787b32594c8b6e5c39b244/$File/5846.pdf) >. Acesso em: 16 nov. 2021.

SILVA, A. I. D. da. **Estudo do desempenho de concreto com resíduos de tijolos cerâmicos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2021.

SILVEIRA, M. dos S. da. **Arranjo produtivo local: O estudo de caso da cerâmica vermelha de Russas**. Monografia (Bacharel em Ciências Econômicas) - Faculdade de Economia, Administração, Atuária, Contábeis e Secretariado Executivo, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

SIPRES, C. **Análise técnica do uso de resíduos de construção e demolição (RCD) na produção de concreto seco para piso intertravado**. 2019. Projeto de Graduação - Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

SOARES *et al.* O uso de resíduos de construção civil na produção de pavimentação intertravada, uma revisão. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 11, p. 89914-90008, Curitiba, nov. 2020. ISSN 2525-8761.

SOUZA, E. M. da S. *et al.* Avaliação De Blocos Para Pavimento Intertravado Com Substituição Parcial Do Agregado Miúdo Por Resíduos Cerâmicos. **Revista Interdisciplinar em Saúde**, Cajazeiras, 6 (3): 23-44, jul./set. 2019, ISSN: 2358-7490. Disponível em: < <https://research.amanote.com/publication/3K7VAnQBKQvf0BhiDE18/avaliao-de-blocos-para-pavimento-intertravado-com-substituio-parcial-do-agregado> >. Acesso em: 17 nov. 2021.

SOUZA, W. M. de. *et al.* **Diagnóstico da geração de resíduos de cerâmica vermelha na região metropolitana do Cariri**. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, 2018, Maceió. Disponível em: < https://www.confea.org.br/sites/default/files/antigos/contecc2018/civil/100_ddgdrdcvnrmdc.pdf >. Acesso em: 17 nov. 2021.

TORRES, Levi. **Reciclagem de entulho**: fator vital para a construção sustentável. Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição - ABRECON, 2016. Disponível em: < <https://abrecon.org.br/reciclagem-de-entulho-fator-vital-para-construcao-sustentavel/> >. Acesso em: 17 nov. 2021.