

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

BRUNO ALBERTO LIGOCKI PINTO WESCHENFELDER

ANÁLISE DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DO CONCRETO COM SUBSTITUIÇÃO
DO AGREGADO MIÚDO POR CERÂMICA

Joinville
2023

BRUNO ALBERTO LIGOCKI PINTO WESCHENFELDER

ANÁLISE DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DO CONCRETO COM SUBSTITUIÇÃO
DO AGREGADO MIÚDO POR CERÂMICA

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientadora: Dra. Valéria Bennack

Joinville

2023

BRUNO ALBERTO LIGOCKI PINTO WESCHENFELDER

ANÁLISE DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DO CONCRETO COM SUBSTITUIÇÃO
DO AGREGADO MIÚDO POR CERÂMICA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 05 de Dezembro de 2023.

Banca Examinadora:

Dra. Valéria Bennack
Orientador(a)/Presidente

Dra. Helena Paula Nierwinski
Membro(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Dra. Anelize Borges Monteiro
Membro(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho à minha família,
que sempre me apoiou durante toda a graduação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família por todo incentivo financeiro e emocional durante toda a minha graduação.

A todos os professores e servidores da UFSC Joinville que fizeram parte dessa jornada.

À Jenifer Godoy de Lima, por ser meu porto seguro e estar comigo em todos os momentos

Agradeço a todos os amigos os quais dividi moradia, Rodrigo Inocência Cane, Matheus Wesley Mickley, Brenno Vilpert, Gabriel Borges, Andrei Luis Rigodanzo, Igor Avila e tantos outros da República Castelo. Vocês foram a minha família longe de casa.

À minha orientadora Valéria Bennack por toda paciência, ensinamentos e orientações para a execução deste trabalho.

Ao Rodrigo Voigt pelos auxílios prestados para a execução dos ensaios no laboratório.

Agradeço também à Atlética Camaleão, que durante os 4 anos em que fiz parte da gestão me fez crescer e amadurecer muito. Todas as pessoas que tive a oportunidade de trabalhar junto em prol do esporte universitário fizeram a diferença.

Por fim, agradeço aos amigos que fiz durante toda a faculdade, em especial os amigos da Kuase Rep, Neverland e República Castelo, por todos os momentos de descontração e risadas.

RESUMO

O cimento é um material utilizado amplamente na Engenharia Civil nas mais diversas obras, sendo o principal componente do concreto. A cerâmica é um dos materiais utilizados em grande escala na construção civil, estando presente em azulejos, telhas e tijolos, contribuindo para a geração de entulho. A reciclagem desse material que seria descartado pode ser uma solução sustentável, através de Usinas de Reciclagem de Entulho (URE), dando o destino correto aos Resíduos de Construção e Demolição. Este trabalho tem como objetivo avaliar a substituição parcial de agregado miúdo no concreto, utilizando resíduos de cerâmica, verificando sua resistência à compressão e índices físicos, como absorção d'água, índice de vazios e densidade aparente. Foram moldados corpos-de-prova de concreto com 0%, 15% e 25% de substituição dos agregados em massa, para posterior ensaio de compressão simples aos 28 dias e ensaios dos índices físicos. Os resultados dos ensaios demonstraram uma pequena melhora na resistência à compressão do concreto com substituição do agregado, porém ocorreu um aumento na absorção d'água e índice de vazios da mistura. Foi constatado que a substituição pode ser benéfica se o concreto com adição de resíduos for utilizado para fins não estruturais.

Palavras-chave: Resíduos. Concreto. Cerâmica. Substituição de agregado.

ABSTRACT

Cement is a material widely used in Civil Engineering in the most diverse works, being the main component of concrete. Ceramic is one of the materials used on a large scale in civil construction, being present in tiles, tiles and bricks, contributing to the generation of rubble. Recycling this material that would otherwise be discarded can be a sustainable solution, through Rubble Recycling Plants (RRP), giving the correct destination to Construction and Demolition Waste. This work aims to evaluate the partial replacement of fine aggregate in concrete, using ceramic waste, checking its compressive strength and physical indices, such as water absorption, void index and apparent density. Concrete specimens were molded with 0%, 15% and 25% replacement of aggregates in mass, for subsequent simple compression tests at 28 days and physical index tests. The test results demonstrated a small improvement in the compressive strength of the concrete with the replacement of the aggregate, but there was an increase in the water absorption and void ratio of the mixture. It was found that replacement can be beneficial if waste-added concrete is used for non-structural purposes.

Keywords: Waste. Concrete. Ceramics. Aggregate replacement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de cimento Portland.....	18
Figura 2 - Cerâmica de tijolos.....	24
Figura 3 - Fluxograma	24
Figura 4 - Cerâmica parcialmente moída.....	25
Figura 5 - Peneiramento	26
Figura 6 – Materiais utilizados	27
Figura 7 - Corpos de prova em estado fresco	28
Figura 8 - Corpos de prova após 24 horas	29
Figura 9 - Prensa hidráulica.....	30
Figura 10 - Corpos de prova rompidos	30
Figura 11 - Curvas granulométricas dos agregados miúdos	33
Figura 13 - Resistência média à compressão.....	36
Figura 14 - Absorção d'água.....	37
Figura 15 - Índice de vazios.....	38
Figura 16 - Densidade aparente	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características do cimento	23
Tabela 2 - Traço utilizado	27
Tabela 3 - Granulometria da areia média	32
Tabela 4 - Granulometria da cerâmica	33
Tabela 5 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão	35
Tabela 6 - Massa seca, Massa saturada e Massa hidroestática	36
Tabela 7 - Índices físicos	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCERAM – Associação Brasileira de

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRECON – Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição

CP – Cimento Portland

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

RCD – Resíduos de construção e demolição

SC – Santa Catarina

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

LISTA DE SÍMBOLOS

MPa	Mega Pascal
mm	Milímetro
g	Gramas
cm	Centímetros
l	Litros
μm	Micrômetro
min	Minutos
kg	Quilogramas
α	Alfa – Fator água/cimento
kN	Quilo Newton
m	Metro

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. OBJETIVOS	14
1.1.1. Objetivo Geral	14
1.1.2. Objetivos Específicos	14
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1. CONCRETO	16
2.1.1. Cimento Portland	17
2.1.2 Agregados	18
3. METODOLOGIA	22
3.1 MATERIAIS	22
3.1.1 Agregados	22
3.1.2 Cimento Portland	22
3.1.3 Água	23
3.1.4 Cerâmica	23
3.2 MÉTODOS	24
3.2.1 Moagem da cerâmica	25
3.2.2 Caracterização dos agregados	26
3.2.3 Definição da dosagem dos concretos	26
3.2.4 Confeção dos corpos de prova	27
3.2.5 Resistência à compressão simples	29
3.2.6 Índices físicos	31
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
4.1 GRANULOMETRIA DOS AGREGADOS MIÚDOS	32
4.2 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO DO CONCRETO	34
4.2.1 Resistência à compressão simples	34
4.2.1 Índices físicos	36
5. CONCLUSÃO	40
REFERÊNCIAS	41

1. INTRODUÇÃO

O cimento, principal constituinte do concreto, é um material utilizado amplamente na Engenharia Civil nas mais diversas obras, como rodovias, pontes, usinas hidrelétricas e residências. Sua origem remete ao século XVIII, quando o cimento Portland foi patenteado e desencadeou uma verdadeira revolução na construção, pelas suas propriedades de resistência a esforços, moldabilidade e hidráulica (Itambé, 2008).

Dyer (2015) afirma que o concreto é onipresente na construção moderna por possuir características que nenhum outro material de construção possui, por ser forte e quimicamente muito inerte, podendo durar por séculos. Entretanto, há uma relativa imaturidade em relação à tecnologia do concreto, implicando em problemas de desempenho.

Durante a Segunda Guerra Mundial foi registrada a primeira aplicação significativa de resíduos de construções, que foi na reconstrução das cidades europeias devastadas pela guerra. Os edifícios foram demolidos e os escombros ou entulhos resultantes foram britados para produção de agregado a fim de atender à demanda da época (ABRECON, 2023 *apud* Levi, 1995)

Atualmente, ações para reduzir e destinar os resíduos da Construção Civil tornaram prioritárias e conduzem a estudos de novas ferramentas de gerenciamento de Resíduos de Construção e Demolição (RCD). As Usinas de Reciclagem de Entulho (URE) são importantes agentes que além de fornecer um destino final para os RCD, também são um ponto de reinserção na cadeia produtiva da Construção Civil (Paschoalin Filho *et al.*, 2019).

Nesse contexto, a argila está presente na história humana desde os primórdios, sendo a matéria-prima para a obtenção da cerâmica. Ela é utilizada para a produção de diversos utensílios até hoje, como vasos, pratos, e na construção civil é usada nos azulejos, telhas e tijolos (Associação Brasileira de Cerâmica – ABCERAM, 2022).

Considerando-se a possibilidade da reutilização de resíduos cerâmicos, este trabalho tem como objetivo avaliar a substituição parcial de agregado miúdo no concreto, por resíduos descartados de tijolos utilizados em construções. Será verificada a substituição parcial de 15% e 25% do agregado em massa, testando

através de ensaios as propriedades físicas e mecânicas, como resistência à compressão, índice de vazios, absorção de água e ensaio de porosidade.

Será analisada a resistência do concreto à compressão simples, comparando os resultados obtidos com o concreto sem a substituição parcial de agregado por cerâmica, bem como a verificação da influência da cerâmica na mistura.

1.1. OBJETIVOS

Considerando-se a problemática da geração de resíduos na Construção Civil, bem como a destinação ecologicamente dos mesmos, propõe-se neste trabalho os seguintes objetivos:

1.1.1. Objetivo Geral

Analisar a influência da substituição parcial do agregado miúdo por cerâmica no concreto, através dos resultados obtidos em laboratório.

1.1.2. Objetivos Específicos

- a) Caracterizar os agregados utilizados na mistura;
- b) Definir a dosagem para substituição do agregado miúdo em percentuais de 15% e 25% em massa;
- c) Determinar a resistência à compressão simples;
- d) Obter os índices físicos da mistura proposta, como índice de vazios, porosidade e densidade relativa;
- e) Comparar o desempenho do concreto com a substituição parcial em relação ao concreto referência.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A preocupação com o meio ambiente é um tema relevante atualmente, devido à escassez crescente de recursos naturais. Por isso, é fundamental encontrar alternativas que agridam menos o planeta, reciclando resíduos oriundos da construção civil.

Estima-se que a construção civil consome entre 20 e 50% do total de recursos naturais utilizados, o que leva à necessidade de mudança de postura da sociedade, da iniciativa privada e dos administradores públicos acerca do problema (Rodrigues, 2019).

Cardoso (2010) afirma que o desenvolvimento econômico de um país está ligado diretamente com questões ambientais e com a escassez dos recursos naturais, por isso a indústria da construção civil vem buscando alternativas por meio de técnicas que possam viabilizar a sustentabilidade dessa atividade produtiva.

Porém, toda indústria produz rejeitos e com o advento da Lei nº 12.305/10, da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (Brasil, 2010), está prevista a redução da produção de rejeitos pelas indústrias, propondo um aumento da reutilização de resíduos sólidos e, conseqüentemente, a reciclagem.

Segundo a pesquisa setorial da ABRECON (2020), nas regiões metropolitanas do país, ainda há poucas usinas de reciclagem RCD para atender a demanda regional, enquanto nos pequenos municípios, essa necessidade poderia ser suprida pela disseminação de consórcios intermunicipais, incentivados pela Política Nacional de Resíduos Sólidos.

Conforme Khatib (2005), a substituição de areia natural por agregado fino de tijolo não causa uma redução substancial na resistência do concreto a longo prazo, mesmo em níveis elevados de substituição. Observou-se que em até 50% de substituição a resistência mostrou-se similar aos valores de referência. Já com 100% de substituição ocorreu uma perda de resistência de até 10%.

No trabalho de Poon e Chan (2006), 25% da areia natural foi substituída por agregado triturado fino de tijolo e telha para avaliar os efeitos em algumas propriedades do concreto com as misturas não pré-saturadas com relação água/cimento de 0,55. Ao fim de 28 dias, a resistência característica foi de 47,5 MPa para as misturas, enquanto para a mistura referência a resistência foi de 68,5 MPa.

Segundo a Associação Brasileira de Cerâmica (ABCERAM, 2022), a abundância de matérias-primas naturais, fontes alternativas de energia e disponibilidade de tecnologias práticas embutidas nos equipamentos industriais fizeram com que as indústrias cerâmicas evoluíssem rapidamente e muitos tipos de produtos dos diversos segmentos cerâmicos atingissem nível de qualidade mundial com apreciável quantidade exportada.

Os estudos de Khatib (2005), Poon e Chan (2006), Mariano *et al.* (2019) e Sales e Alferes Filho (2012) comprovam que a substituição do agregado miúdo por cerâmica em concretos e argamassas modifica o seu desempenho final. No presente trabalho será avaliada a influência dessa substituição nas propriedades do concreto, se comparado a um traço de concreto referência.

2.1. CONCRETO

Segundo Neville (1997), o concreto é um material da construção civil composto por uma mistura de cimento, pedras britadas, água e areia e, se necessário, pode-se usar aditivos e outras adições. Já Petrucci (1998) define o concreto como sendo um material oriundo da mistura de um aglomerante com um ou mais materiais inertes à água que, quando recém misturado, deve oferecer condições de plasticidade que facilitem as operações de manuseio indispensáveis ao lançamento nas formas, adquirindo com o tempo resistência e coesão.

O cimento pode ser descrito como um material com propriedades adesivas e coesivas, atuando como aglomerante no concreto. A água, por sua vez, é necessária para produzir uma mistura de trabalhabilidade adequada e hidratar o cimento, sendo os agregados os responsáveis pela resistência do concreto. Se tiverem propriedades indesejáveis, não conseguem produzir um concreto resistente (Neville, 2016).

Bauer (2013) cita que os agregados correspondem a cerca de 80% do peso e 20% do custo de um concreto estrutural sem aditivos e podem apresentar diversas características, sendo imprescindível um estudo cuidadoso e controle de qualidade antes e durante a execução da obra.

Neville (2016) destaca que a resistência do concreto com uma determinada proporção de mistura é bastante influenciada pelo seu grau de adensamento, sendo a consistência da mistura fundamental para que o concreto possa ser transportado, lançado, adensado e acabado facilmente sem segregação.

Mehta e Monteiro (2008) dividem o concreto em três categorias, com base nos valores obtidos do ensaio de resistência à compressão: concreto de baixa resistência (< 20 MPa), concreto de resistência moderada (entre 20 e 40 MPa) e concreto de alta resistência (> 40 MPa). O concreto de resistência moderada, segundo os mesmos autores, é considerado o concreto normal ou comum, sendo utilizado na maioria das obras.

Neville e Brooks (2013) afirmam que a resistência à compressão é considerada a propriedade mais importante do concreto no estado endurecido. Esse valor de resistência é obtido por meio do ensaio de compressão axial após 28 dias de cura.

2.1.1. Cimento Portland

O cimento Portland, constituinte mais importante do concreto, é o resultado da moagem de um produto denominado clínquer, que tem como matéria-prima o calcário e a argila. Ele é formado por silicatos e aluminatos de cálcio, praticamente sem a presença de cal livre. Esses silicatos e aluminatos hidratam-se quando são misturados com água, produzindo o endurecimento da massa e o ganho de resistência buscado (Petrucci, 1998).

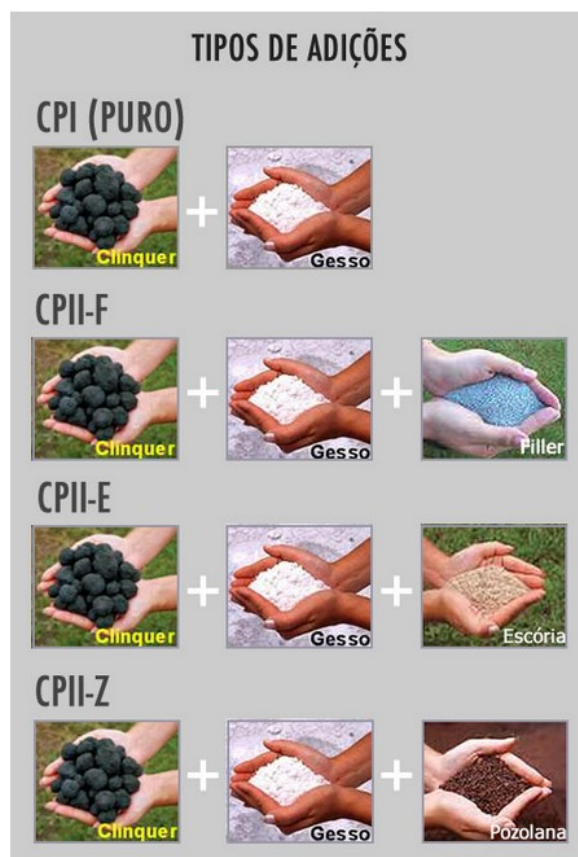
De acordo com Mehta e Monteiro (2008), a pasta cimento hidratada é composta por silicato de cálcio hidratado, que compõe até 60% do volume de sólidos, seguidos de cristais de hidróxido de cálcio, constituindo até 25% da mistura, além de sulfoaluminatos de cálcio, grãos de clínquer não hidratados e vazios como espaços interlamelares, vazios capilares e ar incorporado.

A aderência entre superfícies sólidas, atribuídas às forças de Van der Waals, depende do grau da ação da adesividade. Os pequenos cristais de silicato de cálcio hidratado, sulfoaluminatos de cálcio hidratados e aluminatos de cálcio hidratados possuem grandes áreas superficiais e adesividade, sendo aderentes, além de entre si, aos grãos de clínquer anidro e partículas de agregado miúdo e graúdo (Mehta e Monteiro, 2008).

A Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2023) diz que o mercado nacional dispõe de 8 opções de cimento, que atendem às mais variadas necessidades. O cimento Portland comum (CP I) é referência devido às suas

características e propriedades aos demais tipos básicos de cimento Portland. O Cimento Portland Composto (CP II-E, CP II-Z e CP II-F) tem adições de escória, pozolana e filer em proporções um pouco maiores que no CP I, conforme Figura 1.

Figura 1 - Tipos de cimento Portland



Fonte: ABCP (2023).

2.1.2 Agregados

Os agregados utilizados na mistura do concreto são de suma importância para garantir a qualidade do produto. Petrucci (1998) define agregado como um material granular, sem forma e volume definidos, normalmente inerte, com dimensões e formas adequadas para sua utilização em obras de engenharia.

Cerca de 75% do volume do concreto é ocupado pelos agregados, o que implica em considerar relevante a qualidade do agregado a ser utilizado, pois suas propriedades afetam significativamente o desempenho estrutural do concreto (Neville e Brooks, 2013). Sendo assim, há motivação para realizar ensaios em laboratório para investigar as características dos agregados.

Conforme Stocco (2013), existem razões econômicas e técnicas para utilizar o máximo teor de agregado e o mínimo de cimento, afirmando que há também de se considerar as razões ambientais, levando em conta que para cada tonelada de cimento utilizada são lançados entre 603 e 714 kg de CO² na atmosfera.

A aspereza, conhecida também como textura superficial dos grãos, origina-se de uma série de características da rocha matriz, como granulação, dureza, estrutura dos poros, além da ação do atrito a que os grãos foram expostos (Mehta e Monteiro, 2008).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a textura superficial afeta diretamente a demanda de água do concreto e a aderência entre a pasta de cimento e os agregados. Quanto mais rugoso for o material, maior será a demanda por água para o mesmo parâmetro de abatimento do tronco de cone (*Slump Test*).

2.1.2.1 Agregado miúdo

O agregado miúdo mais utilizado na construção civil é a areia natural. Ela é aplicada na fabricação de concreto, argamassa e também na pavimentação. É composta, principalmente, por grãos de quartzo e desempenha um papel fundamental na durabilidade das estruturas.

Algumas propriedades dos agregados miúdos, como peso específico, módulo de finura e granulometria, são correlacionadas diretamente com a resistência à compressão, absorção de água e porosidade (Silva *et al.*, 2020).

Por ser amplamente utilizada, a extração da areia natural é uma atividade comum ao redor do mundo. Se for feita irregularmente, pode ocasionar sérios danos à natureza, como erosão e perda de biodiversidade.

2.1.2.2 Agregado graúdo

O agregado graúdo influencia diretamente na resistência à compressão do concreto. A NBR 7211 (ABNT, 2022) define agregado graúdo como agregados cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha 75 mm e retém-se na peneira com abertura de malha de 4,75 mm. Também define como requisito sua composição, feita

de minerais duros, estáveis e duráveis, não podendo conter substâncias de natureza e em quantidade que possam afetar o endurecimento e a hidratação do cimento.

A produção de brita envolve a extração de rochas em jazidas que, posteriormente, passa por um processo de britagem. Os elementos de rocha extraídos são primeiramente fragmentos em tamanhos maiores para depois serem submetidos a britadores para redução de tamanho até atingir as granulometrias desejadas (Tavares *et al.*, 2017).

2.1.2.3 Cerâmica

Segundo Callister e Rethwisch (2016) o termo cerâmica vem da palavra grega *keramikos*, que significa “matéria queimada”. Isso indica que as propriedades desse material são normalmente obtidas através de um processo de tratamento térmico em alta temperatura chamado queima.

Garcia *et al.* (2015) afirma que há décadas a indústria do cimento utiliza adições minerais em substituição parcial ao clínquer no cimento Portland. As adições minerais são substâncias silicosas finamente cominuídas, que uma vez adicionadas ao cimento e ao concreto, interagem química e fisicamente com os produtos da hidratação do cimento, modificando sua microestrutura.

O efeito químico dos minerais é decorrente da capacidade de reação da adição mineral com o hidróxido de cálcio $[Ca(OH)_2]$ gerado durante a hidratação do cimento, denominado reação pozolânica. Quanto à efeitos físicos podem ser gerados vários, como efeito microfiller, refinamento da estrutura dos poros e alteração da microestrutura (Garcia *et al.*, 2015).

No trabalho de Mariano *et al.* (2019), o aumento do teor de cerâmica adicionada ao concreto promoveu um aumento da resistência à compressão. Com 10% de substituição do agregado, o concreto mostrou uma pequena redução na resistência, mas para teores de substituição acima de 15%, a resistência aumentou. Porém, a argila composta pelos minerais quartzo e microlina promoveram uma redução da porosidade.

Já no trabalho de Sales e Alferes Filho (2012), a adição de 10% e 40% de cerâmica no concreto mostrou uma redução na resistência à compressão, enquanto

a substituição de 20% do agregado mostrou resultados benéficos, sendo considerado pelos autores como teor ótimo, por promover a melhor combinação de efeito filler sem prejuízo à trabalhabilidade. Em relação às propriedades físicas, as misturas apresentaram valores bem próximos entre si, tanto para o ensaio de absorção d'água quanto para o índice de vazios.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentadas as etapas do processo experimental para obter o resultado final. Primeiramente serão expostos os materiais utilizados no processo e, posteriormente, serão expostas as etapas percorridas nos ensaios laboratoriais para a obtenção do resultado final.

3.1 MATERIAIS

Para a execução dos ensaios de laboratório foram utilizados areia, cimento Portland, brita 1, água e cerâmica.

3.1.1 Agregados

Os agregados utilizados no laboratório são provenientes da empresa Rudnick Minérios, localizada na cidade de Joinville, Santa Catarina. A areia e a brita foram adquiridas de acordo com a especificação desejada, sendo comercializadas como areia média e brita 1.

3.1.2 Cimento Portland

O cimento Portland utilizado no laboratório, da marca Supremo, tipo CP-II-F-32, possui características fornecidas pelo fabricante, conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Características do cimento

ENSAIOS MECÂNICOS		NORMA	
MECHANICAL TESTS ESSAIS MECANIKUES		NBR 18697	
IDADE	Resistência à Compressão		
AGE	Compressive Strength Résistance à la Compression		
1 dia day jour	MPa	16,08	--
3 dias days jours	MPa	25,22	≥ 10
7 dias days jours	MPa	29,20	≥ 20
28 dias days jours	MPa	35,79	≥ 32

ENSAIOS FÍSICOS		NORMA	
PHYSICAL TESTS ESSAIS PHYSIQUES		NBR 18697	
Massa Específica (g/cm ³) Specific Weight Masse Volumique		3,01	
Peso Litro (g/l) Bulk Density Densité Apparent		NA	
Resíduo de Peneiração (%) Sieve Residue Residue de Tamisage	90 µm	NA	
	75 µm	0,88	≤ 12,0
	45 µm	9,76	
	32 µm	22,22	
Sup. Específica de Blaine (cm ² /g) Blaine Spec. Surface Surface spécif. Blaine		4390	≥ 2600
Água na Pasta Normal (%) Water Demand Eau de Gâchage		26,91	
Tempo de Pega (min) Setting Time Temps de Prise	Início Initial Debut	250	≥ 60
	Fim Final Fin	320	≤ 600
Expansibilidade (mm) Soundness Expansion		0,00	≤ 5,0

Fonte: Supremo (2023)

3.1.3 Água

A água utilizada nos ensaios é proveniente da rede de abastecimento da empresa Águas de Joinville, localizada em Joinville, Santa Catarina.

3.1.4 Cerâmica

A cerâmica utilizada para a substituição do agregado miúdo é comercializada na cidade de Joinville, Santa Catarina. É caracterizada como cerâmica vermelha, proveniente de pedaços de tijolos comuns de seis furos conforme Figura 2.

Figura 2 - Cerâmica de tijolos

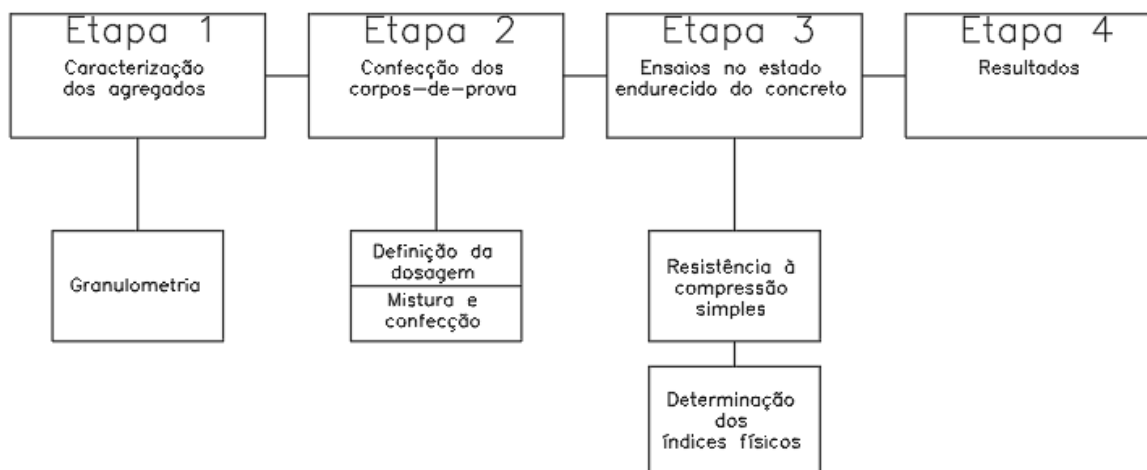


Fonte: O Autor (2023)

3.2 MÉTODOS

Para os ensaios de laboratório foi estipulado um fluxograma para melhor organização das etapas necessárias, conforme Figura 3.

Figura 3 - Fluxograma



Fonte: O Autor (2023)

3.2.1 Moagem da cerâmica

Para a realização da moagem da cerâmica, inicialmente foram separados nove tijolos de seis furos, totalizando, em massa, cerca de 6,5 kg de material. Em seguida, com golpes de martelo, os tijolos foram fragmentados em lascas para facilitar o transporte e a realização da operação de moagem. Como o laboratório onde os experimentos foram realizados estava com o equipamento Moinho de Bolas em manutenção, foi realizada a moagem manual, através de sucessivos golpes de martelo até que o material atingiu, visualmente, uma granulometria parecida com areia conforme Figura 4.

Figura 4 - Cerâmica parcialmente moída



Fonte: O Autor (2023)

3.2.2 Caracterização dos agregados

Conforme a etapa 1 apresentada na Figura 2, deu-se início à caracterização dos agregados. O ensaio de granulometria foi executado seguindo as diretrizes da NBR NM 484 (ABNT, 2003). Para a execução, amostras dos agregados miúdos (areia e cerâmica) foram levadas à estufa por 24 horas na temperatura de 105°C, para depois serem separadas em amostras de 600 g (areia) e 1000 g (cerâmica). Todo o material foi passado nas peneiras 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 600 µm, 300 µm e 150 µm, conforme Figura 5. Posteriormente, as peneiras foram pesadas para construção da tabela granulométrica.

Figura 5 - Peneiramento



Fonte: O Autor (2023)

3.2.3 Definição da dosagem dos concretos

Conforme a etapa 2 apresentada na Figura 2, o método de dosagem escolhido para a realização do experimento foi o IPT-USP, utilizando como base a tabela fornecida por Helene e Terzian (1993). O traço referência adotado foi de 1:1,34:2,16 com teor a/c de 0,52, conforme Tabela 2. Essas características do traço resultam

numa maior economia de água e material, porém acarretam em uma menor resistência física do concreto e menor trabalhabilidade do material no estado fresco.

Os traços T0, T1 e T2 correspondem, respectivamente, ao traço sem substituição de agregado miúdo, traço com substituição de 15% em massa do agregado miúdo e traço com substituição de 25% em massa do agregado miúdo.

Tabela 2 - Traço utilizado

Traço	Teor α	Traço Unitário			Consumo (kg)			
		Cimento	Ag. Miúdo	Brita	Cimento	Areia	Brita	Cerâmica
T0	0,52	1	1,34	2,16	5,417	7,258	11,7	0
T1	0,52	1	1,34	2,16	5,417	6,170	11,7	1,09
T2	0,52	1	1,34	2,16	5,417	5,444	11,7	1,81

Fonte: O Autor (2023)

3.2.4 Confeção dos corpos de prova

Após os traços definidos, deu-se início à confecção dos corpos de prova, seguindo as diretrizes da NBR 5738 (ABNT, 2015). Primeiramente, todos os materiais foram separados em recipientes e pesados, conforme Figura 6.

Figura 6 – Materiais utilizados



Fonte: O Autor (2023)

No total 12 moldes de dimensões 10x20 cm foram untados com desmoldante e montados para a correta execução do ensaio, sendo 4 corpos-de-prova por traço. Então, deu-se início à mistura dos materiais dentro da betoneira, inicialmente do traço denominado T0, seguindo a seguinte ordem: cerca de 60% do total de água, agregado graúdo em sua totalidade, agregado miúdo em sua totalidade, cimento em sua totalidade, e o restante da água. Os materiais foram misturados por cerca de 7 minutos e, ao fim desse ciclo, iniciou-se a moldagem dos corpos de prova.

O material foi alocado nos corpos de prova através de 2 camadas, adensando-as com 12 golpes. No final da moldagem, a superfície foi arrasada utilizando-se uma colher de pedreiro. A betoneira foi então lavada, e o processo se repetiu para os outros traços denominados T1 e T2. Os corpos de prova foram alocados em uma superfície plana por 24 horas e, após esse período, foram desmoldados para aguardar seu processo de cura de 28 dias, conforme Figuras 7 e 8.

Figura 7 - Corpos de prova em estado fresco



Fonte: O Autor (2023)

Figura 8 - Corpos de prova após 24 horas



Fonte: O Autor (2023)

3.2.5 Resistência à compressão simples

Para o ensaio de resistência à compressão simples, seguindo para a etapa 3 apresentada anteriormente na Figura 2 foi utilizado o equipamento da empresa Instron, modelo Emic 23-100, com capacidade de gerar até 1000 kN de carga, conforme Figura 9. O ensaio foi realizado ao final de 28 dias de cura do concreto, no Laboratório de Materiais da UFSC campus Joinville.

Figura 9 - Prensa hidráulica



Fonte: O Autor (2023)

A Figura 10 apresenta a situação em que os corpos de prova estavam após o rompimento.

Figura 10 - Corpos de prova rompidos



Fonte: O Autor (2023)

3.2.6 Índices físicos

Os ensaios de índices físicos, como o índice de vazios, absorção d'água e massa específica, foram realizados de acordo com as diretrizes da NBR 9778 (ABNT, 2009). Alguns pedaços dos corpos de prova foram retirados após o seu rompimento para que fossem posteriormente pesados no seu estado seco, saturado com superfície seca e submerso. Assim, foram obtidos os valores para serem utilizados nas Equações 1, 2 e 3 abaixo:

$$A = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \quad (1)$$

$$Iv = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s - M_i} \quad (2)$$

$$\rho_a = \frac{M_s}{M_{sat} - M_i} \quad (3)$$

Onde:

- A = absorção de água (%);
- Msat = massa saturada da amostra (g);
- Ms = massa seca da amostra (g);
- Mi = massa hidrostática da amostra (g);
- Iv = índice de vazios (%);
- ρ_a = densidade aparente (kg/m³).

Para a execução do ensaio, foram separadas pequenas amostras do concreto endurecido, com no mínimo 1500 cm³. Em seguida, as amostras foram colocadas em estufa e mantidas à temperatura de 105°C por um período de 72 horas, e suas massas foram aferidas.

Após a aferição, as amostras foram submergidas em água por 72 horas novamente, enxugadas com um pano úmido e tiveram suas massas aferidas. Para finalizar, com o auxílio de uma cesta metálica e uma balança hidrostática, as amostras foram submergidas em água para terem sua massa hidrostática determinada.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 GRANULOMETRIA DOS AGREGADOS MIÚDOS

Os resultados dos ensaios de granulometria dos agregados miúdos utilizados no experimento ficaram dentro do esperado para se enquadrarem como areia média, apresentados na Tabela 3 a seguir:

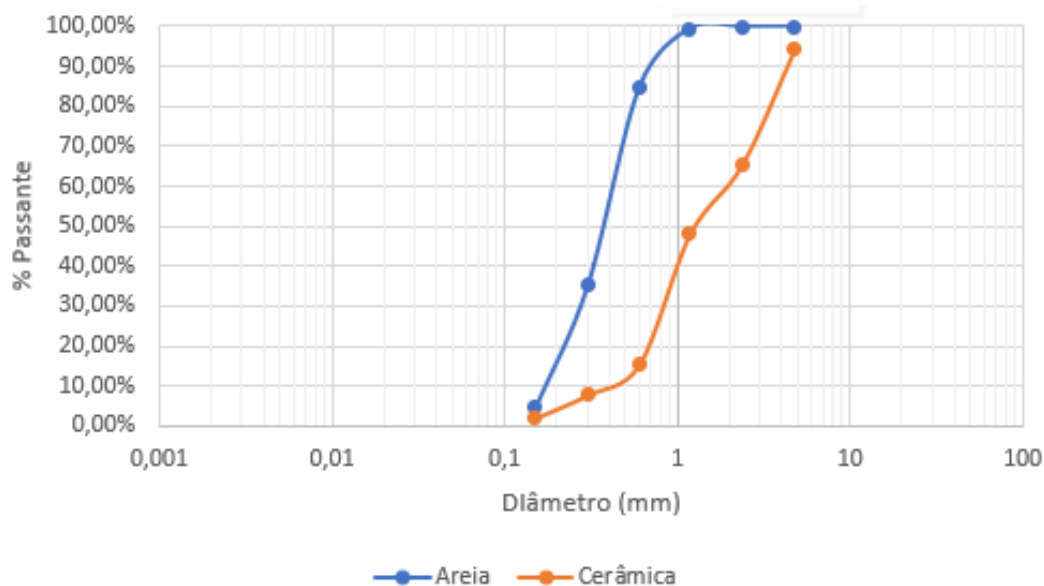
Tabela 3 - Granulometria da areia média

Peneira(mm)	Massa areia média	% Média	Retido acumulado	% Passante
4,75	0,175	0,03%	0,03%	99,97%
2,36	0,355	0,06%	0,09%	99,91%
1,18	3,045	0,51%	0,60%	99,40%
0,6	87,02	14,50%	15,09%	84,91%
0,3	299,005	49,81%	64,90%	35,10%
0,15	182,395	30,38%	95,29%	4,71%
Fundo	28,3	4,71%	100,00%	0,00%
Total	600,295	100,00%	100,00%	0,00%
		Módulo de Finura	1,76	
		DMC	1,18	

Fonte: O Autor (2023).

Para fins comparativos, a curva granulométrica da areia média e da cerâmica utilizadas neste trabalho foram diagramadas, conforme Figura 11.

Figura 11 - Curvas granulométricas dos agregados miúdos



Fonte: O Autor (2023).

Tratando-se da cerâmica, pode-se observar uma diferença granulométrica em relação à composição, módulo de finura e Dimensão Máxima Característica, apresentado na Tabela 4 a seguir:

Tabela 4 - Granulometria da cerâmica

Peneira(mm)	Massa cerâmica	% Média	Retido acumulado	% Passante
4,75	60	5,77%	5,77%	94,23%
2,36	300	28,85%	34,62%	65,38%
1,18	180	17,31%	51,92%	48,08%
0,6	340	32,69%	84,62%	15,38%
0,3	80	7,69%	92,31%	7,69%
0,15	60	5,77%	98,08%	1,92%
Fundo	20	1,92%	100,00%	0,00%
Total	1040	100,00%	100,00%	0,00%
		Módulo de Finura	3,67	
		DMC	>4,75	

Fonte: O Autor (2023).

O módulo de finura e a Dimensão Máxima Característica obtidos com o ensaio granulométrico da cerâmica são maiores em relação à areia natural. Este fato pode ser explicado devido à ausência de um moinho mecânico durante a etapa da moagem,

o que acarretou em grãos de dimensões maiores, em média, se comparado à média da areia.

É possível observar que 6,63% dos agregados utilizados passam pela peneira de 0,15mm, o que contribui para a elevação da resistência do material devido ao seu efeito pozolânico. A curva granulométrica da cerâmica, apresentada na Figura 11, demonstra que há mais homogeneidade na distribuição granulométrica se comparado à areia.

Comparando a curva granulométrica da areia média com a da cerâmica mostrada na Figura 11, observa-se comportamentos diferentes. Enquanto a curva da areia demonstra a ausência de grãos maiores que 0,6mm, a curva granulométrica da cerâmica mostra uma maior variedade de diâmetros.

As Tabelas 3 e 4 apresentadas anteriormente mostram que os grãos de cerâmica apresentaram maior percentual retido nas peneiras superiores entre 0,6 e 2,36mm, enquanto os grãos de areia estão mais presentes nas peneiras inferiores de 0,15 a 0,6mm. Esse fato pode ter acarretado na melhora da resistência da mistura, pelos dois agregados estarem mais presentes em zonas distintas que, melhorando o grau de compactação, acarretam numa boa distribuição granulométrica.

É importante ressaltar que as características da argila a qual deu origem a cerâmica utilizada certamente influenciam em sua resistência. Tanto a composição mineral quanto a temperatura de queima afetam sua porosidade, que influencia na resistência e absorção d'água, ou seja, o concreto com resíduo depende de características intrínsecas para ser viável a sua aplicação.

4.2 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO DO CONCRETO

Abaixo estão listados os resultados dos ensaios no estado endurecido do concreto, como resistência à compressão simples e índices físicos

4.2.1 Resistência à compressão simples

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão estão demonstrados na Tabela 5. O ensaio foi realizado após o ciclo de cura do concreto de 28 dias para todos os traços.

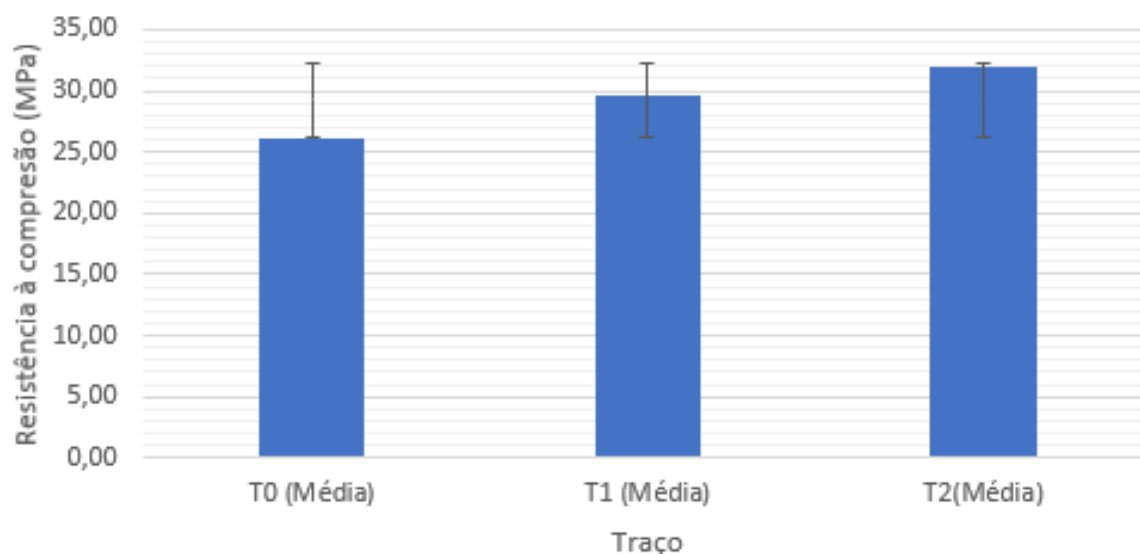
Tabela 5 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão

Traço	Força máxima aplicada[kN]	Resistência à compressão [MPa]	Média das resistências [MPa]
T0-1	199,32	25,38	26,07
T0-2	206,27	26,26	
T0-3	193,79	24,67	
T0-4	219,61	27,96	
T1-1	255,92	32,59	29,68
T1-2	233,58	29,74	
T1-3	223,76	28,49	
T1-4	219,21	27,91	
T2-1	269,75	34,35	32,05
T2-2	219,85	27,99	
T2-3	258,98	32,97	
T2-4	258,35	32,89	
Média	229,87	29,27	
Mediana	221,81	28,24	
Mínimo	193,79	24,67	
Máximo	269,75	34,35	
Desvio padrão	25,39	3,23	

Fonte: O Autor (2023).

Observando os resultados, nota-se que os traços T1 e T2 apresentaram resistência à compressão superior ao traço T0, este sem a substituição do agregado. O gráfico da Figura 12 ilustra a diferença da resistência média dos traços utilizados.

Figura 12 - Resistência média à compressão



Fonte: O Autor (2023).

Verificando o gráfico da Figura 13, o traço T1 teve um incremento de 13,85% na resistência em relação ao traço de referência. Já o T2 obteve um ganho de 22,94% em relação a T0, sendo o traço que obteve a maior resistência dentre todas as formulações, atingindo o valor máximo de 34,35 MPa. Nota-se uma certa proporcionalidade em relação ao ganho de resistência e o percentual de agregado substituído, o que corrobora os resultados de Mariano *et al.* (2019). Observando o caráter das rupturas, constatou-se que todos os traços apresentaram ruptura frágil.

4.2.1 Índices físicos

A Tabela 6 mostra os resultados obtidos de Massa seca, Massa saturada e Massa hidrostática para cada formulação do concreto.

Tabela 6 - Massa seca, Massa saturada e Massa hidrostática

	Mseca(g)	Msat(g)	Mi(g)
T0	35,5	38,1	19,83
T1	89,25	97,16	48,49
T2	85,36	94,25	47,02

Fonte: O Autor (2023).

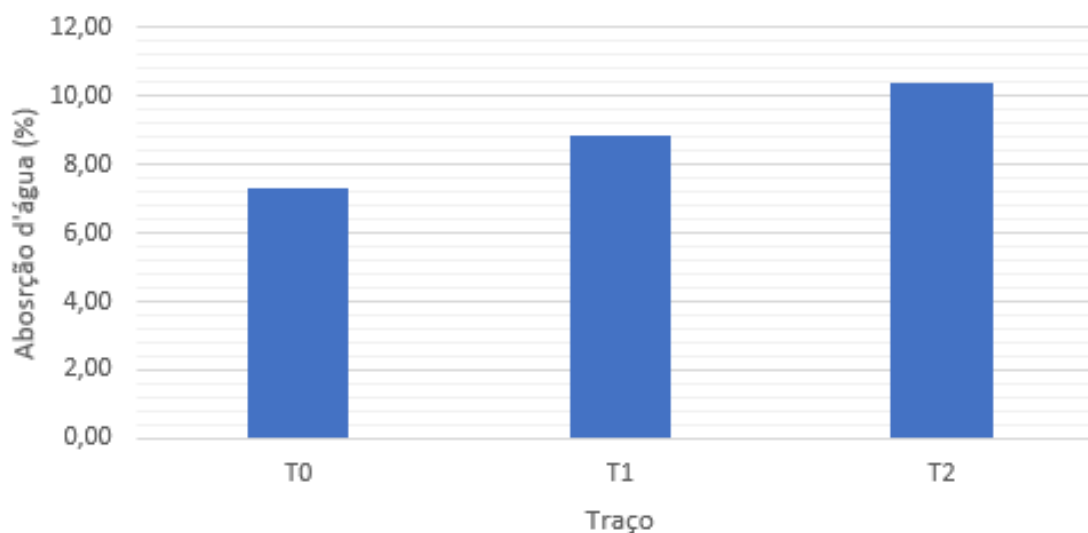
Utilizando-se esses valores, é possível calcular a absorção d'água (A), índice de vazios (lv) e densidade aparente (ρ_a) de cada traço. A Tabela 7 apresenta os respectivos resultados dos ensaios, e as Figuras 13, 14 e 15 demonstra-os graficamente para posterior comparação.

Tabela 7 - Índices físicos

	A(%)	lv(%)	$\rho_a(\text{kg/m}^3)$
T0	7,32	14,23	1943,08
T1	8,86	16,25	1833,78
T2	10,41	18,82	1807,33

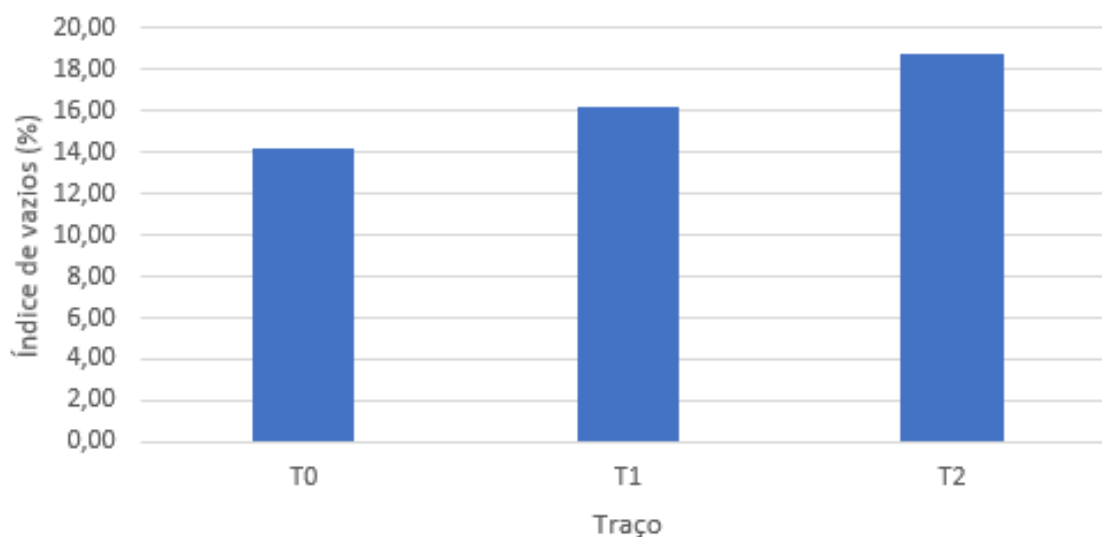
Fonte: O Autor (2023).

Figura 13 - Absorção d'água



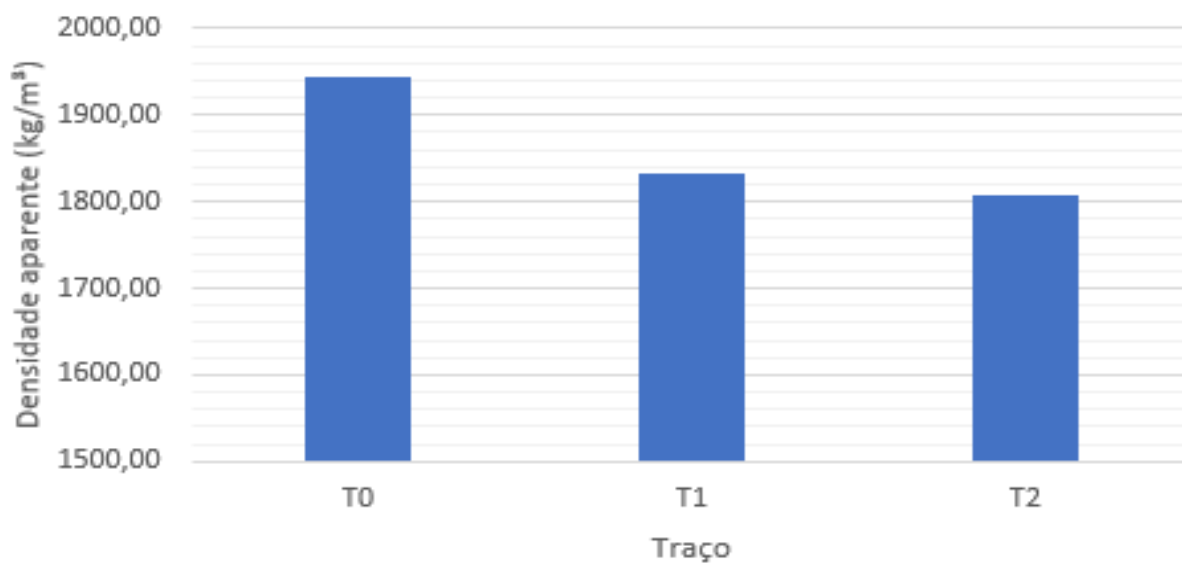
Fonte: O Autor (2023).

Figura 14 - Índice de vazios



Fonte: O Autor (2023).

Figura 15 - Densidade aparente



Fonte: O Autor (2023).

Ao analisar os resultados, comparando-os com o traço T0, observa-se um aumento de absorção de água e índices de vazios. Enquanto o traço T1 teve um aumento aproximado de 21% na absorção de água e 14% no índice de vazios, o traço T2 apresentou ganhos 20% maiores, em média. Esses resultados refutam Sales e Alferes Filho (2012), onde não houve variação significativa nesses índices. O aumento

da porosidade pode ser explicado pela maior absorção d'água da cerâmica, que durante o processo de cura faz surgir pequenos vazios no interior do concreto.

Os resultados de densidade aparente do concreto em estado endurecido mostram diminuição de aproximadamente 6,5% nos traços com substituição de agregado. Essa variação de densidade pode ter sido influenciada pela diferença de tamanho dos grãos dos agregados utilizados em cada traço, bem como a porosidade da cerâmica utilizada.

A NBR 8953 (ABNT, 2015) classifica como adequados para fins estruturais concretos que apresentam densidade entre 2000 kg/m^3 e 2800 kg/m^3 , portanto a baixa densidade desqualifica o uso dos traços T0, T1 e T2 para este fim. Vale ressaltar que, devido ao aumento de absorção d'água e índice de vazios, conseqüentemente há o aumento da capilaridade e porosidade do concreto, facilitando a ação de intempéries na armadura e aumentando o risco estrutural. Por outro lado, por se tratar de concreto leve, pode ser usado como concreto de enchimento.

5. CONCLUSÃO

Ao verificar a característica dos agregados, a cerâmica moída apresentou Dimensão Máxima Característica e Módulo de finura superiores ao agregado de areia natural, ou seja, tornou a mistura mais homogênea, o que pode ter contribuído para o ganho de resistência.

A substituição do agregado ocasionou um ganho médio de resistência à compressão de até 23%, mas piorou outras características importantes do concreto, como absorção d'água e índice de vazios. Devido à diferença de massas específicas dos agregados, a densidade aparente diminuiu em média 6,5%, caracterizando-se como concreto leve.

A porosidade e capilaridade elevada dos traços T1 e T2 podem comprometer a armadura e, por isso, não seria recomendado para uso estrutural. Recomenda-se a utilização para vedação ou enchimento, como alternativa sustentável para a reciclagem de resíduos oriundos da construção civil.

É certo que a temperatura de queima, composição da argila e outros elementos da cerâmica influenciam nos resultados das características dos concretos com a adição desse resíduo, mas em questão de redução de densidade e ganho de resistência a substituição pode ser benéfica para tais aplicações.

É importante ressaltar que a quantidade exagerada de substituição possivelmente diminuirá sua resistência, devido ao aumento de absorção d'água e consequente índice de vazios. Portanto, o uso deve ser controlado a fim de se obter um teor ótimo para ganho de resistência e porosidade.

Para trabalhos futuros, é sugerido:

- A verificação das demais características físico-químicas da cerâmica;
- A avaliação de desempenho com maior porcentagem de substituição do agregado;
- A avaliação de argamassas feitas com resíduos cerâmicos;
- A verificação de desempenho utilizando outros resíduos da construção civil como alternativa à areia.

REFERÊNCIAS

ABCP. **A versatilidade do cimento brasileiro**. Disponível em: <https://abcp.org.br/cimento/tipos/>. Acesso em: 02 dez. 2023.

ADIÇÃO DE RESÍDUO CERÂMICO EM CONCRETO. Pelotas: Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. **Cerâmica no Brasil**: considerações gerais. Disponível em: <https://abceram.org.br/consideracoes-gerais/>. Acesso em: 21 fev. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. **Informações Técnicas**: definição e classificação. Disponível em <https://abceram.org.br/definicao-e-classificacao/>. Acesso em: 21 fev. 2022.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: Abnt, 2009.

BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de construção 1**. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

CALLISTER JUNIOR, William D.; RETHWISCH, David G.. **Ciência e Engenharia de Materiais**. Rio de Janeiro: Ltc, 2016.

CARDOSO, J. R. A. **Uso do agregado de entulho da construção civil de Manaus – AM para obtenção de bloco de argamassa celular**. Curitiba. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Gerência de Pesquisa e Pós-graduação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

CASSA, J. C. S.; CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A. S. **Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção**. Salvador: Edufba, 2001.

CIMENTOS, Secil. **Cimento-Produtos-Supremo**. Disponível em: <https://www.supremocimento.com.br/produtos/>. Acesso em: 25 out. 2023.

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, 2021, Dindigul. **Effect of Fine Aggregate Properties on Cement Mortar Strength**. Dindigul: Psna College Of Engineering & Technology, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221478532035608X>. Acesso em: 05 set. 2023.

DYER, Thomas. **Durabilidade do Concreto**. Rio de Janeiro: Moderna, 2015.

FREITAS JUNIOR, Gerson Alves de. **Recursos naturais e desenvolvimento econômico: uma revisão do debate teórico**. 2012. 79 f. Tese (Doutorado) - Curso de Economia Política, Puc, São Paulo, 2012

GARCIA, E. Avaliação da atividade pozolânica dos resíduos de cerâmica vermelha produzidos nos principais polos ceramistas do Estado de S. Paulo. In: CERÂMICA, 61., 2015, São Paulo. **Anal.** São Paulo: Ipt, 2015. p. 251-258.

HELENE, Paulo; TERZIAN, Paulo. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini, 1993.

ITAMBÉ. **Origem do Cimento**. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/origem-do-cimento/>. Acesso em: 21 fev. 2022.

KHATIB, J. M. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 763-769, 2005.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Ibracon, 2008.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. São Paulo: Bookman, 2016.

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

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

POON, C. S.; CHAN, D. Paving blocks made with recycled concrete aggregate and crushed clay brick. **Construction and Building Materials**, v. 20, n. 8, p. 569-577, 2006.

RODRIGUES, LOPES. Aproveitamento do RCD (resíduos de tijolo cerâmico) para fabricação de artefatos de concreto. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, v. 1, ano 04, ed. 05, p. 137-156, maio 2019.

STOCCO, J. L. **Influência da granulometria e da forma de agregados graúdos de britagem para uso em concretos dosados em central. Florianópolis**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

USINAS DE RECICLAGEM DE ENTULHO. [S.l.]: Revista Tecnologia e Sociedade, 2017.