

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

AMANDA IZABEL DUTRA DA SILVA

ESTUDO DO DESEMPENHO DE CONCRETO COM RESÍDUOS DE TIJOLOS
CERÂMICOS

Joinville

2021

AMANDA IZABEL DUTRA DA SILVA

ESTUDO DO DESEMPENHO DE CONCRETO COM RESÍDUOS DE TIJOLOS
CERÂMICOS

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: Profa. Dra. Valéria Bennack.

Joinville

2021

AMANDA IZABEL DUTRA DA SILVA

ESTUDO DO DESEMPENHO DE CONCRETO COM RESÍDUOS DE TIJOLOS
CERÂMICOS

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), 22 de setembro de 2021.

Banca Examinadora:

Prof. Dra. Valéria Bennack
Orientadora
Presidente

Prof^ª. Dra. Anelize Borges Monteiro
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof^ª. Dra. Helena Paula Nierwinski
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho a todas as mulheres que
buscam espaço na Engenharia Civil.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à inteligência suprema e a todos os seres de luz que me guiaram até aqui.

A minha mãe, grande inspiração, Angela Remor, por não medir esforços para me proporcionar a oportunidade de estudar, e ser meu apoio financeiro e emocional, todos esses anos.

À Universidade Federal de Santa Catarina que me permitiu ter acesso à educação gratuita.

As pessoas que fizeram parte dessa jornada comigo e emprestaram seus ombros e ouvidos durante os momentos de pouca fé e desânimo.

Agradeço especificamente aos meus amigos e futuros colegas de profissão, Aturiê Melo, Bianca Schlickmann, Joyce Delfino e Murilo Sabka, que tanto me apoiaram para trabalhos acadêmicos, consultei durante as disciplinas e debati sobre horizontes profissionais.

Também aos demais amigos, que apesar de não fazerem ideia, contribuíram muito para meu estado mental e emocional, Maria Gabriela, Letícia Pacher, Lucas Zobot, Marcela Bogado, Heloísa Prestes e Carolina Juliana.

À minha orientadora Valéria Bennack e Vanessa Aparecida de Lima por acolherem este trabalho com compreensibilidade e pelas correções voltadas ao aprimoramento do mesmo.

A todos os professores que se dispuseram a lecionar, com paciência e diligência. Em especial, à banca avaliadora deste trabalho Helena Paula Nierwinski e Anelize Borges Monteiro.

À Perville e ao colaborador e egresso da UFSC, Vinícius R. Krause, que me auxiliou nos ensaios deste trabalho.

À equipe PET-EMB, que me ensinou a trabalhar em equipe e a desenvolver competências como proatividade, postura e organização. Em especial, ao professor Carlos Sacchelli, que foi um exemplo de liderança.

À empresa ESATI Júnior, que me oportunizou as primeiras noções de um ambiente empresarial.

RESUMO

O uso de insumos na construção civil gera resíduos em grande escala, sendo responsável por 40% dos resíduos gerados no Brasil. Uma alternativa empregada atualmente é o reaproveitamento no próprio processo de produção de novos artefatos cerâmicos, embora seja possível a trituração dos mesmos para serem usados como agregados em diversos componentes. A reciclagem destes resíduos dentro da construção civil pode ser uma solução a ser adotada. Este trabalho teve como objetivo verificar a possibilidade de utilização dos resíduos de cerâmica vermelha em concretos, pela substituição parcial de 15 e 30% do agregado miúdo como alternativa para reutilização desse material. Visando analisar o emprego dos resíduos de tijolos cerâmicos dentro do concreto, foram realizados ensaios físicos para notar o comportamento da resistência à compressão simples (f_c), tração por compressão diametral e ensaio de índice de vazios, além de observar resultados de absorção de água e densidade relativa. Foram moldados 16 corpos de prova contendo a substituição parcial de agregado miúdo por resíduos de tijolos cerâmicos e 8 corpos de prova sem substituição, possuindo o mesmo traço para referência. Os concretos passaram pelo teste de abatimento do tronco de cone (*slump*) para verificação de suas consistências no estado fresco, além dos ensaios de resistência à compressão simples e tração diametral aos 28 dias. Ao comparar as propriedades mecânicas dos diferentes concretos, foi possível verificar a influência da substituição proposta. A consistência do concreto foi aumentando à medida que o teor de substituição aumentou, sendo necessário corrigir a relação água/cimento em busca da mesma trabalhabilidade obtida pelo concreto de referência no teste de abatimento do tronco de cone. Os concretos com substituição apresentaram ganho de resistência nos ensaios de compressão simples e tração diametral para o teor de 15% e tendo uma queda de resistência para o teor de 30%. Mesmo com a queda apresentada no traço com maior teor de resíduos, foi observado que o menor resultado de resistência à compressão foi para o traço referência, isto é, sem substituição. A absorção de água por imersão e a porosidade, por sua vez, diminuíram à medida que foram adicionados resíduos cerâmicos. Sendo assim, foi constatado que a substituição, mesmo que parcial, de agregado miúdo por resíduo cerâmico trouxe benefícios até consideráveis ao concreto mas deve ser utilizado com ressalva pela grande variabilidade na composição dos mesmos, de modo que, não é possível oferecer garantias para escalar este resultado.

Palavras-chave: Tijolos cerâmicos. Concreto. Substituição de agregado miúdo.

ABSTRACT

The use of inputs in civil construction generates waste on a large scale, accounting for 40% of the waste generated in the economy. An alternative currently used is the reuse in the production process of new ceramic artifacts, although it is possible to crush them to be used as aggregates in various components. The recycling of these residues within civil construction can be a solution to be adopted. This work aimed to verify the possibility of using red ceramic waste in concrete, by partially replacing 15 and 30% of fine aggregate as an alternative for reusing this material. Aiming to analyze the use of ceramic brick residues inside the concrete, physical tests were carried out to note the behavior of the resistance to simple compression (f_c), tension by diametrical compression and open porosity test, in addition to observing results of water absorption and density relative. Sixteen specimens were molded containing the partial replacement of fine aggregate by ceramic brick residues and 8 specimens without replacement, having the same trace for reference. The concretes underwent the slump test to verify their consistency in the fresh state, in addition to the simple compressive strength and diametral tensile strength tests at 28 days. By comparing the mechanical properties of different concretes, it was possible to verify the influence of the proposed replacement. The consistency of the concrete increased as the replacement content increased, making it necessary to correct the water/cement ratio in search of the same workability obtained by the reference concrete in the slump test of the cone trunk. The concrete with replacement showed strength gain in the simple compression and diametrical tensile tests for 15% grade and a strength drop for 30% grade. Even with the drop presented in the mix with the highest residue content, it was observed that the lowest compressive strength result was for the reference mix, that is, without substitution. Water absorption by immersion and porosity, in turn, decreased as ceramic residues were added. Therefore, it was found that the replacement, even if partial, of fine aggregate by ceramic waste brought considerable benefits to concrete, but it should be used with reservation due to the great variability in their composition, so that it is not possible to offer guarantees to scale this result.

Keywords: Ceramic bricks. Concrete. Fine aggregate replacement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curvas granulométricas de agregado miúdo ideais para algumas normas	27
Figura 2 - Zona de transição do concreto	31
Figura 3 - Efeito dos resíduos cerâmicos e de concreto como agregado no concreto	33
Figura 4 - Interação dos fatores que influenciam a resistência do concreto	35
Figura 5 - Ensaio de tração por compressão diametral	37
Figura 6 - Relação entre a porosidade e a resistência à compressão	38
Figura 7 - Resíduo de tijolos cerâmicos utilizados	40
Figura 8 - Fluxograma metodológico	41
Figura 9 - Conjunto de peneiras para determinação de distribuição granulométrica	44
Figura 10 - Ensaio do abatimento do tronco de cone - Traço Referência	48
Figura 11 - Corpos de prova com resíduos de tijolos cerâmicos em 0, 15 e 30%	49
Figura 12 - Prensa hidráulica para ensaio de compressão	50
Figura 13 - Corpos de prova (T0, T1 e T2) rompidos no ensaio de tração por compressão diametral	51
Figura 14 - Curva granulométrica da areia natural utilizada	55
Figura 15 - Curva granulométrica do resíduo de tijolos cerâmicos utilizados	57
Figura 16 - Comparação gráfica entre resultados do ensaio de resistência à compressão	60
Figura 17 - Comparação gráfica entre resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral	61
Figura 18 - Relação entre resistência à compressão e índice de vazios em concretos com substituição de agregado miúdo por resíduo cerâmico em diferentes teores	64

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais compostos do cimento Portland	19
Quadro 2 - Propriedades do concreto influenciadas pelas características do agregado	24
Quadro 3 - Propriedades do cimento CP II-F	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Terminologia utilizada no comércio para pedras britadas.....	23
Tabela 2 - Porcentagens retidas acumuladas segundo aberturas de malha.....	24
Tabela 3 - Limites de distribuição granulométrica para agregados miúdos	26
Tabela 4 - Série de Peneiras	43
Tabela 5 - Composição dos traços de concreto em massa (kg).....	47
Tabela 6 - Resultado das propriedades físicas dos agregados graúdos utilizados.....	53
Tabela 7 - Resultados de propriedades físicas dos agregados miúdos naturais utilizados	54
Tabela 8 - Propriedades físicas do resíduo de tijolos cerâmicos utilizados.....	56
Tabela 9 - Resultado do <i>Slump Test</i> e fatores água/cimento	59
Tabela 10 - Resultados do ensaio de resistência à compressão axial simples.....	59
Tabela 11 - Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	61
Tabela 12 - Resultados de Ms, Msat e Mi	62
Tabela 13 - Correlação entre índices físicos e propriedades mecânicas.....	63
Tabela 14 - Resultado do índice de vazios para o concreto em estado endurecido.....	64
Tabela 15 - Absorção de água dos concretos	65
Tabela 16 - Resultados da densidade aparente do concreto endurecido.....	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANICER – Associação Nacional de Indústria Cerâmica

CTJ – Centro Tecnológico de Joinville

NBR – Norma brasileira

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

SC – Estado de Santa Catarina

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. OBJETIVOS	15
1.1.1. Objetivo Geral	15
1.1.2. Objetivos Específicos	15
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1. CONCRETO	18
2.1.1. Cimento Portland	19
2.1.1.1. Hidratação do cimento	20
2.1.2. Agregados	21
2.1.2.1. Agregado graúdo	23
2.1.2.2. Agregado miúdo	25
2.1.3. O uso de resíduos de tijolos cerâmicos no concreto.....	28
2.1.4. Dosagem do concreto.....	29
2.2. PROPRIEDADES DO CONCRETO	30
2.2.1. Trabalhabilidade	32
2.2.1.1. Trabalhabilidade em concretos com resíduos.....	33
2.2.2. Resistência à compressão simples	34
2.2.3. Resistência à tração por compressão diametral.....	36
2.2.4. Porosidade	37
3. METODOLOGIA.....	39
3.1. MATERIAIS.....	39
3.1.1. Resíduo de tijolos cerâmicos	39
3.1.2. Cimento	40
3.1.3. Agregados	41
3.1.4. Água	41
3.2. MÉTODOS	41
3.2.1. Moagem do resíduo de tijolo cerâmico	42
3.2.2. Caracterização dos agregados	42
3.2.2.1. Granulometria dos agregados	42
3.2.2.2. Massa unitária.....	45
3.2.3. Dosagem de concreto e execução	46

3.2.4. Ensaio de abatimento do tronco de cone (<i>Slump Test</i>)	47
3.2.5. Moldagem dos corpos de prova	49
3.2.6. Resistência à compressão axial simples	50
3.2.7. Resistência à tração por compressão diametral	50
3.2.8. Índices físicos: absorção de água, índice de vazios e densidade aparente	52
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
4.1. PROPRIEDADES FÍSICAS DO AGREGADO GRAÚDO	53
4.2. PROPRIEDADES FÍSICAS DO AGREGADO MIÚDO	54
4.3. PROPRIEDADES FÍSICAS DO RESÍDUO DE TIJOLO CERÂMICO	55
4.4. COMPARATIVO ENTRE AGREGADO MIÚDO E RESÍDUO DE TIJOLOS CERÂMICOS	57
4.5. RESULTADOS DO ENSAIO DE ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE (<i>SLUMP TEST</i>).....	58
4.6. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL SIMPLES.....	59
4.7. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	61
4.8. RESULTADOS DOS ÍNDICES FÍSICOS DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO	62
4.8.1. Índice de vazios no estado endurecido	63
4.8.2. Absorção de água	65
4.8.3. Densidade aparente	65
6. CONCLUSÃO	67
REFERÊNCIAS	69

1. INTRODUÇÃO

Sendo os artefatos cerâmicos tão antigos a ponto de serem comparados à descoberta do fogo, foi dado à cerâmica uma infinidade de propósitos de utilização ao longo do período histórico. Segundo Oliveira (2016), até o final do século XIX, os produtos cerâmicos eram moldados com métodos artesanais e tinham fins domésticos e decorativos. Mesmo quando destinou-se o uso para a construção civil e à área industrial, ainda eram produzidas manualmente e com alto padrão de qualidade.

Após o século XIX, com o advento da revolução industrial, a *indústria cerâmica* aderiu à produção em massa, iniciando a fabricação em escala industrial de produtos cerâmicos a partir de matérias-primas naturais. Havendo maior necessidade de controle de matérias-primas e dos produtos e processos, entre 1900 e 1940, a ciência estudava o que tinha se obtido na prática. Nessa época, o cimento também começou a ser produzido industrialmente, com tecnologia experimental (OLIVEIRA, 2016).

De acordo com Callister (2002), somente a partir de 1940, com o desenvolvimento da Ciência dos Materiais, na qual são estudadas a composição e a estrutura das substâncias, assim como as causas das propriedades, a ciência passou a antecipar a prática, com estudos aprofundados para se prever e obter produtos com propriedades almejadas.

Segundo o mesmo autor, a área de pesquisa e desenvolvimento de materiais tornou-se uma das mais importantes para se obter relações satisfatórias entre os custos e os benefícios no que diz respeito ao emprego de materiais e novas aplicações. Ainda prevalecem muitos fatores que estabelecem a necessidade de fabricação de materiais cerâmicos (principalmente na área de engenharia), e com isso, também cresce a demanda por pesquisa de melhorias, novos produtos e finalidades.

Cassa, Carneiro e Brum (2001) afirmam que o uso de insumos na construção civil gera resíduos em grande escala, e esses, por sua vez, necessitam ser gerenciados. O macrocomplexo da indústria da construção civil é responsável por 40% dos resíduos gerados no Brasil. Há a predominância de restos de argamassa, tijolos, telhas e placas cerâmicas.

Além da preocupação com a geração de resíduos, atualmente, encontrar bons agregados naturais próximos às áreas urbanas é considerado cada vez mais difícil. Há, cada vez mais, um aumento das distâncias entre as fontes de recursos naturais e os locais de novas construções. Problemas com o gerenciamento dos resíduos, a escassez de áreas de disposição e a limpeza urbana são pontos que devem ser considerados (HANSEN, 1992).

Incorporar resíduos ao concreto é interessante, uma vez que o concreto é produzido em larga escala, tem fácil aplicação e é flexível. Além disso, é considerado durável e razoavelmente resistente a agentes químicos e físicos, o que torna uma das maneiras mais eficientes de gerenciar resíduos de construção e demolição (BANTHIA; CHAN, 2000).

Os trabalhos já publicados sobre o tema indicam um cenário de potencialidades em relação a aplicação de resíduos de tijolos cerâmicos em concretos e argamassas.

Vejmelková *et al.* (2012), analisaram resíduos de tijolos triturados com níveis de substituição ao cimento de 10, 20, 40 e 60% na produção do concreto. Foi visto que, a densidade do concreto diminuiu com o aumento do percentual de substituição, enquanto o índice de vazios seguiu o caminho inverso. Para um teor de substituição de até 10% foram adquiridas maiores valores para resistência à compressão, entretanto, a partir do teor de 20%, os valores foram reduzidos drasticamente. Os resultados evidenciaram que há uma tendência de melhoria da resistência pelo aumento de finos propiciados pela substituição até certo ponto.

Em um trabalho desenvolvido por Cordeiro *et al.* (2002), foram avaliadas argamassas e concretos com teores de substituição do cimento de 10, 15 e 20% por resíduos de tijolos moídos. Os tijolos utilizados foram triturados até passarem na peneira 200. Para todos os teores, a resistência à compressão tanto da argamassa, quanto do concreto com substituição foi melhor do que o concreto de referência. As análises dos corpos de provas feitas com 28 dias de idade aferiram um aumento de resistência em torno de 20%, sendo os melhores resultados obtidos para o teor de 15% de substituição.

Toledo Filho *et al.* (2007), utilizaram resíduos de tijolos moídos em argamassas com substituição de 0% a 40%, tanto para cimento quanto para agregados. Foi observado que, para teores de até 20% de substituição, houve uma influência positiva na resistência à compressão. No entanto, as substituições com teores mais elevados apresentaram redução de resistência, atribuído principalmente pelas altas relações de água/cimento demandadas pela mistura.

Os produtos de concreto de cimento Portland com substituição parcial de agregados por resíduos de tijolos cerâmicos moídos podem ser analisados. Com o intuito de contribuir para essa área de conhecimento, este trabalho contempla a produção de concretos com resíduos de tijolos cerâmicos com substituição parcial do agregado miúdo em teores de 15% e 30% em massa. Para efeitos comparativos, foram analisadas algumas propriedades físicas e mecânicas como o comportamento da resistência à compressão simples (f_c), tração por compressão diametral e ensaio de porosidade, além de absorção de água e índice de vazios.

1.1. OBJETIVOS

O presente trabalho busca aferir a resistência à compressão simples e diametral e alguns índices físicos, bem como comparar resultados obtidos com e sem a substituição de agregados oriundos do resíduo de tijolos cerâmicos na dosagem de concreto. Portanto, é proposto mensurar a influência da inserção de resíduos de tijolos cerâmicos na produção de concreto por meio de um programa de ensaios laboratoriais definido por meio dos objetivos a seguir.

1.1.1. Objetivo Geral

Avaliar a influência na substituição parcial do agregado miúdo por resíduos de tijolos cerâmicos no concreto mediante os resultados de ensaios laboratoriais característicos.

1.1.2. Objetivos Específicos

- a) caracterizar os agregados graúdos, miúdos e os resíduos de tijolos cerâmicos através de ensaios de granulometria, massa unitária e massa específica;
- b) definir dosagem para a substituição de agregado miúdo por resíduo de tijolo cerâmico em percentuais de 15% e 30% em massa;
- c) determinar a resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral de concreto com resíduo de tijolos cerâmicos;
- d) avaliar o desempenho da substituição parcial sugerida em concreto através do ensaios comparativo de consistência teste de abatimento do tronco de cone (*slump test*);
- e) determinar índices físicos para os traços propostos (índice de vazios, absorção de água e densidade relativa);
- f) comparar desempenho mecânico entre o concreto com substituição e o concreto convencional.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

De acordo com a Associação Nacional de Indústria Cerâmica (ANICER, 2009), a indústria cerâmica representa 4,8% das indústrias de construção civil. Em 2009, materiais cerâmicos estavam presentes em mais de 90% das alvenarias e coberturas construídas no país. Ainda considerando um consumo igual ao de produção (76 bilhões de peças), foi registrado um consumo médio per capita de 384 peça/habitantes no Brasil, sendo a região Sul a principal consumidora, com um resultado de 657 peça/habitante na região.

Com a aprovação da Lei nº12.305/10, que instaurou a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), ficou prevista a redução da produção dos rejeitos. Sendo uma das suas principais propostas um conjunto de medidas que permitem o crescimento da reciclagem e reutilização dos rejeitos sólidos, encaminhando-os de forma ambientalmente correta, quando possível (BRASIL, 2010).

Segundo Lucena (2005), na indústria cerâmica tradicional existe uma grande quantidade de resíduos e rejeitos. Além disso, em média, o entulho retirado dos canteiros de obra no Brasil é composto por cerca de 80% de tijolos, que poderiam ser triturados e utilizados como agregado em diversos componentes. De acordo com Vieira, Souza e Monteiro (2003), embora estes resíduos possam ser reaproveitados no próprio processo de produção dos artefatos cerâmicos, a reciclagem destes na própria construção civil pode ser uma solução.

John (1996) ressalta que os materiais necessários para produção da grande maioria dos componentes de construção precisam de um volume significativo de embasamento técnico. Por conta disso, para que um novo produto seja aceito no mercado é necessário conhecer muito bem o seu comportamento físico, químico e tecnológico. Deste modo, é preciso avaliar cuidadosamente os impactos que possam ser gerados.

A aplicação de resíduos dentro do concreto levou um longo tempo até ser consolidado, mas, de modo geral, são tratados como subprodutos e utilizados como insumos para construção civil, como os casos de escórias de alto forno e sílica ativa (QUEBAUD; BUYLE-BODIN, 1999).

A substituição de areia natural por agregado fino de tijolo, conforme um trabalho apresentado por Khatib (2005), não causa uma redução substancial na resistência a longo prazo mesmo em níveis elevados de substituição. Foi observado que até 50% de substituição, a resistência mostrou-se similar aos valores de referência, mas com 100% de substituição ocorreu uma pequena redução, com perda de resistência de até 10%.

O efeito de materiais inferiores à dimensão de 75 μ m de resíduos de tijolos nas propriedades das argamassas e desempenho dos revestimentos foi analisado por Miranda e Selmo (2006). A água total para diferentes teores de mistura de cerâmica triturada foi corrigida para obter um índice de consistência de 285 ± 15 mm. Os autores verificaram que os agregados de alvenaria comparados a outros tipos de agregados reciclados como blocos de concreto, apresentaram uma composição granulométrica menos contínua. Além disso, foi observado que para agregados reciclados o consumo de água do concreto aumentou, bem como os teores de finos da mistura e o que trouxe conseqüentemente uma redução na trabalhabilidade.

Poon e Chan (2006) substituíram 20% do uso de areia natural por agregado triturado fino de tijolo e telha para estudar os efeitos em algumas propriedades do concreto. As misturas não foram pré-saturadas previamente e tinham relação de água/cimento de 0,55. Aos 28 dias, foi atingida resistência característica de 45 MPa para todas as misturas.

Um estudo foi elaborado na Turquia por Binici (2006) sobre a aplicação de resíduos industriais cerâmicos como um substituto possível para agregados miúdos convencionais. Foram mantidos constantes o consumo de cimento e a relação água/cimento proposta para o concreto referência. Os teores de substituição foram de 40%, 50% e 60% em volume. Foi relacionado aumento de resistência com maiores teores de substituição, sendo a máxima resistência obtida com teor de 60% para todas as idades.

Com as reflexões obtidas até agora por meio de trabalhos variados, percebe-se comprovadamente que a substituição de agregados em concreto ou argamassas por resíduos cerâmicos influenciam no desempenho do produto final, tanto em seu estado fresco quanto endurecido. A discussão abre hipóteses de que composições entre agregados naturais e resíduos de tijolos cerâmicos podem trazer efeitos positivos. Isto porque, de acordo com Zordan (1997) e Xavier (2001), materiais cerâmicos apresentam características que contribuem para as propriedades mecânicas de concretos e argamassas produzidos.

Diante do contexto apresentado, a pesquisa tem como enfoque avaliar a influência da substituição do agregado miúdo natural por resíduos de tijolos cerâmicos nas propriedades do concreto.

Para fins de comparação entre concreto convencional e aquele com o emprego de resíduos de tijolos cerâmicos, será avaliado o desempenho por meio de ensaios característicos como resistência à compressão simples e compressão diametral, além da caracterização dos resíduos e avaliação do impacto que estes têm sobre os ensaios de densidade e porosidade.

2.1. CONCRETO

De acordo com Petrucci (1998), o concreto pode ser definido como um material proveniente da mistura de um aglomerante com um ou mais materiais inertes à água, que misturado, oferece condições de plasticidade e com o tempo, adquire propriedades como coesão e resistência. Segundo Fornasier (1985), o concreto é constituído normalmente de um volume de 65 a 75% de agregados graúdos e miúdos envoltos em uma matriz de pasta de cimento.

Souza e Ripper (2009) comentam que os agregados graúdos têm a função de reduzir a retração e aumentar a resistência aos esforços mecânicos. Os autores ainda afirmam que para os agregados miúdos (que geralmente são areia e cascalho), a baixa densidade é um indicativo do material ser poroso e pouco resistente. Segundo Carrasquillo (1985 apud FORNASIER, 1985), deve-se usar o mínimo de agregado miúdo necessário para dar trabalhabilidade.

Limeira (2000) e outros autores como Neville e Brooks (2013) citam que dentre as propriedades do concreto no estado endurecido, a resistência à compressão é considerada a mais relevante. A análise da resistência à compressão é obtida a partir do ensaio de compressão axial, sendo considerado o índice geral de resistência do concreto o valor obtido aos 28 dias de cura.

Partindo para uma classificação quanto à resistência, Mehta e Monteiro (2008) consideram o concreto como: de baixa resistência (<20MPa); de moderada resistência (entre 20MPa a 40MPa); e alta resistência (>40MPa). Por sua vez, o concreto de moderada resistência, é chamado por estes autores, como concreto normal ou comum, por ser utilizado na maioria das obras estruturais, deixando a aplicação do concreto de alta resistência apenas para aplicações especiais.

Segundo Yazigi (2008), os principais fatores que influenciam na durabilidade e resistência de uma estrutura de concreto são o controle tecnológico dos materiais empregados na mistura, a correta execução da estrutura e o estudo da dosagem. A dosagem do concreto leva em consideração as características que se deseja obter do concreto em seu estado fresco e endurecido, considerando a resistência, a estanqueidade, a trabalhabilidade e a retração mínima (BAUER; NORONHA, 2000).

Farias e Palmeira (2007) definem que as propriedades do concreto irão depender das características que seus agregados possuem, podendo ser citado: massa específica aparente, porosidade, composição granulométrica, forma e textura. A resistência à compressibilidade e sanidade dos concretos (já endurecidos) estão atreladas diretamente à porosidade e à composição mineralógica dos agregados a serem utilizados.

Recena (2015) salienta que ao delimitar uma dosagem para o concreto, não é visado a obtenção do concreto mais resistente, mas o conveniente para a aplicação. O mesmo autor cita que os aspectos que levam à dosagem do concreto são conflitantes, pois ao passo que é necessário adquirir trabalhabilidade, durabilidade e resistência, não é possível desassociar os aspectos econômicos para a mistura.

2.1.1. Cimento Portland

De acordo com Neville (2013), as matérias-primas utilizadas na produção do cimento consistem, essencialmente, em calcário, sílica, alumina e óxido de ferro que interagem entre si no forno e formam uma série de produtos mais complexos, obtendo um estado de equilíbrio químico. Essa condição, no entanto, se altera no resfriamento e a velocidade do resfriamento afeta o grau de cristalização e o total de material amorfo presente no clínquer frio.

Segundo o mesmo autor, a suposição que o clínquer pode ser considerado como em um estado de equilíbrio congelado é adotada para os cálculos de percentuais dos compostos dos cimentos comerciais, a partir da quantidade medida de óxidos presentes no clínquer. Quatro compostos normalmente são apontados como os principais constituintes do cimento, que estão no Quadro 1, a notação abreviada descreve cada óxido por letra.

Quadro 1 - Principais compostos do cimento Portland

Nome do composto	Composição em óxidos	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Fonte: Neville (2013, p. 8).

Neville (2013), cita que além dos principais compostos listados, existem *compostos secundários*, como MgO , TiO_2 , Mn_2O_3 , K_2O e Na_2O . A nomenclatura de “compostos secundários”, se dá principalmente pela sua quantidade e não pela sua importância. Os conhecidos como *os álcalis* - óxidos de sódio e potássio (Na_2O e K_2O), podem reagir com alguns agregados, causando uma reação que gera a desintegração do concreto, além de afetarem a velocidade do ganho de resistência do cimento.

As proporções reais dos diversos compostos variam sensivelmente de um cimento para outro, podendo-se obter diferentes tipos de cimentos por meio da proporcionalidade adequada de matérias-primas. Controlar as propriedades necessárias para cimentos por meio da

especificação de limites dos quatro compostos principais possibilitaria a eliminação de diversos ensaios físicos normalmente utilizados. No entanto, há a dificuldade de calcular uma composição precisa o suficiente e levar em consideração todas as propriedades importantes do cimento (NEVILLE, 2013).

2.1.1.1. Hidratação do cimento

De acordo com Neville (2013), água e cimento constituem a pasta onde acontecem reações que tornam o material aglomerante. A presença da água e dos compostos listados no Quadro 1, apresentada anteriormente, resultam em uma massa firme e resistente, denominada pasta de cimento hidratada.

Mehta e Monteiro (2008) citam que a pasta cimento hidratada é constituída por compostos como 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.

De acordo com os mesmos autores, a resistência característica dos sólidos da pasta de cimento sucede principalmente, devido às forças de Van der Waals, as quais geram atração e conseqüentemente, aderência entre os produtos sólidos. A distribuição de vazios interfere negativamente no desempenho mecânico final. A ruptura do concreto em estado sólido, durante a aplicação de carga, começa nos grandes vazios capilares e nas microfissuras invariavelmente presentes.

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 esses produtos, aderentes não apenas entre si, como também aos grãos de clínquer anidro e partículas de agregado miúdo e graúdo (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), o cimento anidro é produzido a partir da moagem de um clínquer com uma pequena quantidade de sulfato de cálcio, formando uma mistura heterogênea de vários compostos submetidos à alta temperatura. Sendo assim, o cimento anidro é caracterizado como um pó cinza de partículas angulares com dimensões que variam entre 1 e 50 μm .

Segundo Neville (2013), a velocidade da hidratação do cimento diminui de forma contínua, de modo que, após um longo período, como 28 dias, ainda exista uma quantidade razoável de cimento não-hidratado (anidro). A hidratação completa do cimento, em condições normais, é mais favorável para as partículas menores de cimento. Diante disso, é possível concluir que a hidratação acontece ao longo de uma redução gradual da dimensão da partícula de cimento.

De acordo com o mesmo autor, a evolução da hidratação do cimento pode ser determinada por diferentes meios: quantidade de Ca(OH)_2 na pasta; calor de hidratação liberado; massa específica da pasta, quantidade de água quimicamente combinada, total de cimento não-hidratado e indiretamente pela resistência da pasta.

Sendo a hidratação do cimento uma reação exotérmica, a taxa de liberação de calor é um indicativo da velocidade de hidratação. A duração dos picos de hidratação é considerada curta e é sequenciada por um período de 1 a 2 horas, denominado *período de dormência* ou indução, onde a velocidade é baixa e a pasta de cimento é trabalhável (NEVILLE, 2013).

Neville (2013), cita que, de forma sucinta, a pasta de cimento fresca é uma rede plástica de partículas de cimento em água e tendo iniciado o processo de endurecimento, a pasta endurecida consiste em produtos hidratados, mal cristalizados, derivados dos diversos compostos, alguns compostos secundários, cimento anidro e espaços residuais preenchidos com água, chamados de poros capilares, além de vazios intersticiais.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), o grau de hidratação do cimento tem efeito direto na porosidade, o que afeta por consequência, a resistência obtida. Cimentos caracterizados como mais finos, hidratam-se mais rapidamente, o que leva à uma porosidade mais baixa para uma dada relação água/cimento e, de modo correspondente, à uma resistência mais elevada nas primeiras idades (1, 3 e 7 dias). Os cimentos Tipo IV, Tipo V e com escórias de alto-forno e pozolânicos, comparados aos cimentos Portland Tipo I, Tipo II e Tipo III ASTM, hidratam-se mais lentamente até os 28 dias. Todavia, as diferenças normalmente tendem a desaparecer após alcançado um grau de hidratação semelhante.

2.1.2. Agregados

Lay (2003) aponta três fatores que embasam a mistura da pasta de cimento hidratada com agregados. A mistura entre agregados e a pasta de cimento ocorria em razão do custo, pois os agregados, geralmente, tem um custo menos elevado do que o cimento. Posteriormente, foi verificado que o uso do agregado reduzia a retração e a fluência, gerando maior estabilidade

dimensional. Além disso, o agregado proporciona maior durabilidade ao concreto por ser menos sensível aos processos de deterioração do que a pasta de cimento.

Stocco (2013) cita razões econômicas e técnicas para o uso do máximo teor de agregado e o mínimo de cimento. O autor ainda afirma que também há de se considerar as razões ambientais, visto que, para cada tonelada de cimento utilizada, são lançados entre 603 e 714 kg de CO₂ na atmosfera. Portanto, a economia de cimento numa dosagem de concreto colabora para a diminuição de gases de efeito estufa à atmosfera.

De acordo com Campos *et al.* (2007 apud STOCCO, 2013), os agregados possuem definição simples e abrangente e podem ser considerados de suma importância não apenas para a economia do país mas também para a melhoria da qualidade de vida do povo. São os bens minerais mais consumidos no mundo e satisfazem necessidades de moradia até grandes obras de infraestrutura.

De acordo com Prudêncio (2018), a seleção das características de agregados interfere no resultado final do concreto na relação entre qualidade e custo além de influenciarem de modo substancial na trabalhabilidade e na aspereza do produto final.

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

Segundo Quiroga (2003), a textura superficial dos grãos é preconizada no Brasil pela norma brasileira (NBR) 7389:2019 e é avaliada, normalmente, de forma visual, definindo empiricamente o quanto a superfície do agregado é lisa ou áspera. O autor sugere a utilização do parâmetro de empacotamento de grãos ou em termos do teor de vazios intergranulares como método para avaliação indireta da forma e textura.

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

A NBR 7211 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS [ABNT], 2019) cita a composição dos agregados como: grãos minerais compactos, duros, estáveis, limpos nos quais as substâncias contidas não afetam a hidratação e o endurecimento do cimento, a proteção da armadura contra corrosão, a durabilidade e quando requerido, o aspecto visual do concreto.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), os agregados não influenciam diretamente em reações químicas com a água, e por isso são chamados de materiais inertes do concreto.

Albuquerque (2000) cita também que os agregados são compostos de misturas de partículas de tamanhos distintos. Neville (1982) complementa ressaltando que nos concretos convencionais, as características físicas como tamanho e volume são muito mais relevantes do que a composição química dos mesmos.

Segundo a NBR 7211 (ABNT, 2019), os agregados para concreto diferenciam-se entre agregados graúdos e miúdos. A classificação dos agregados é dada conforme as dimensões das partículas e massas específicas, onde o termo agregado graúdo é utilizado para partículas maiores de 4,75mm e agregados miúdos, denominados como partículas finas, apresentam tamanho inferior a 4,75mm.

2.1.2.1. Agregado graúdo

Para agregados graúdos, versões anteriores da NBR 7211, utilizavam a nomenclatura de: brita 0, brita 1, brita 2, brita 3 e brita 4 correspondendo à dimensão granulométrica do material. Liah (2014) descreve as terminologias utilizadas no comércio para pedras britadas de acordo com seu diâmetro na Tabela 1.

Tabela 1 - Terminologia utilizada no comércio para pedras britadas

Terminologia	Dimensões nominais (mm)
Brita 0	$4,8 < \emptyset \leq 9,5$
Brita 1	$9,5 < \emptyset \leq 19,0$
Brita 2	$19,0 < \emptyset \leq 25,0$
Brita 3	$25,0 < \emptyset \leq 38,0$
Brita 4	$38,0 < \emptyset \leq 76,0$

Fonte: Liah (2014, p. 8).

A NBR 7211 (ABNT, 2019) atualizou a nomenclatura de acordo com as zonas granulométricas, tendo seu limite também ampliado, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Porcentagens retidas acumuladas segundo aberturas de malha

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada				
	Zona granulométrica $d/D^{1)}$				
	4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
9,5 mm	2 - 15 ²⁾	80 ²⁾ - 100	95 - 100	-	-
6,3 mm	40 ²⁾ - 65 ²⁾	92 - 100	-	-	-
4,75 mm	80 ²⁾ - 100	95 - 100	-	-	-
2,36 mm	95 - 100	-	-	-	-

Notas: 1) Zona granulométrica correspondente à menor (d) e à maior (D) dimensões do agregado graúdo;

2) Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo cinco unidades percentuais em apenas um dos limites marcados com 2). Essa variação pode também estar distribuída em vários desses limites.

Fonte: NBR 7211 (ABNT, 2019, p. 9).

Para Fornasier (1985), a forma e a textura do agregado graúdo afetam o concreto de forma indireta, agregados maiores e alongados têm maior tendência à microfissuração e à propagação de fissuras. De acordo com Mehta e Monteiro (2008), as características que mais influenciam nas propriedades do concreto, decorrem da microestrutura da rocha matriz, condições prévias de exposição e processo de fabricação do agregado. O Quadro 2 apresenta uma relação entre as propriedades do concreto e algumas dessas características.

Quadro 2 - Propriedades do concreto influenciadas pelas características do agregado

PROPRIEDADES DO CONCRETO	CARACTERÍSTICAS RELEVANTES DO AGREGADO
Resistência mecânica	Resistência mecânica e sanidade Textura superficial Limpeza Forma dos grãos Dimensão máxima
Retração	Módulo de elasticidade Forma dos grãos Textura superficial Limpeza Dimensão máxima
Módulo de elasticidade	Granulometria Módulo de elasticidade Coeficiente de poisson
Resistência à derrapagem	Tendência ao polimento (abrasão) Textura superficial
Economia	Forma dos grãos Textura superficial Granulometria Dimensão máxima Beneficiamento requerido Disponibilidade

Fonte: adaptado de Sbrighi (1999 apud WEIDMANN, 2008, p. 9).

Segundo Helene e Terzian (1993), a dimensão do agregado influencia no custo do produto final. Quanto maior a dimensão máxima característica do agregado, mais econômico será o concreto. Lay (2003) também afirma que, do ponto de vista da economia, agregados maiores podem apresentar vantagem.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), quanto maior o tamanho do agregado, menor será a área superficial por unidade de volume, correspondentemente, menor será a demanda de água para um teor de cimento especificado. Portanto, a quantidade necessária de pasta de cimento é reduzida. Neville (1997), complementa que desse modo, para uma dada trabalhabilidade, a relação água/cimento é inferior, devido a menor demanda de água exigida e conseqüentemente, elevando-se a resistência.

Entretanto, Lay (2003), faz ressalvas quanto a outras implicações, por exemplo, quando o processo de transporte for por bombeamento, é necessário estar de acordo com às exigências dos equipamentos. As características do concreto armado, por meio de instruções normativas, possuem limitações estruturais relativas ao cobrimento de armadura e espessura da seção de concreto. Além disso, agregados com dimensões elevadas também interferem na prática, pois pode haver congestionamento entre o material e as barras de armadura, dependendo do espaçamento.

Outras interferências também são pontuadas por Neville (1997) que estão relacionadas à área de aderência e defeitos de britagem. A diminuição da superfície específica gera menor demanda de água e conseqüentemente menor área de aderência. Ademais, grãos maiores tendem a apresentar mais defeitos na britagem, quando comparados a partículas menores, contrapondo-se aos efeitos positivos da seleção por agregados com maiores dimensões características.

2.1.2.2. Agregado miúdo

De acordo com Prudêncio (2018), o agregado miúdo, devido à maior área de superfície e teor pulverulento tem relevância para a otimização do traço. As propriedades físicas e composição mineralógica influenciam na trabalhabilidade e afetam a relação água/cimento. Weidmann (2008), cita que, sobretudo, agregados miúdos podem levar a reduções significativas no consumo de cimento e afetar a trabalhabilidade e a resistência.

A NBR 7211 (ABNT, 2019) determina que a distribuição granulométrica deve atender aos limites estabelecidos na Tabela 3. Entretanto, podem ser utilizados como agregado miúdo para concretos materiais com distribuição diferente desde que com estudos prévios.

Tabela 3 - Limites de distribuição granulométrica para agregados miúdos

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 μm	15	35	55	70
300 μm	50	65	85	95
150 μm	85	90	95	100

Notas: 1) o módulo de finura da zona ótima viária de 2,20 a 2,90; 2) o módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20; 3) o módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,60.

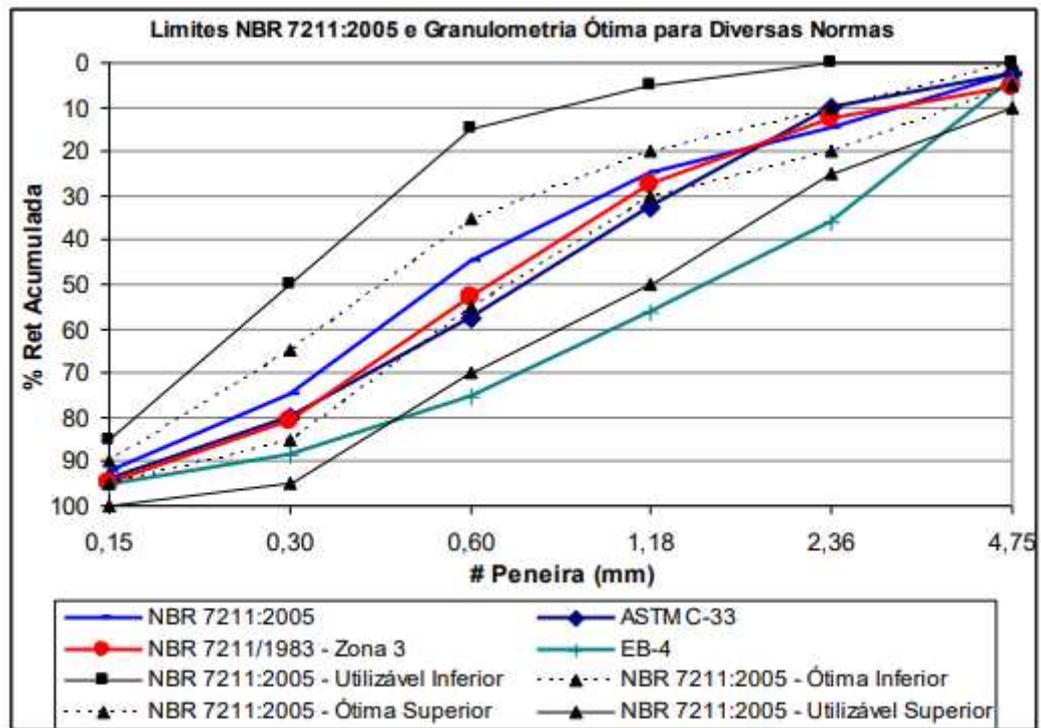
Fonte: NBR 7211 (ABNT, 2019, p. 5).

De acordo com a NBR 16973 (ABNT, 2021), caracteriza-se como agregado miúdo os materiais passantes na peneira de malha 4,75mm. Em relação a limites inferiores, Mehta e Monteiro (1994) não consideram o material passante na malha 0,15mm como parte do agregado miúdo. Já Neville (1997), adota 60 μm como limite inferior, classificando nesta peneira o silte (60 a 2 μ) e a argila (partículas ainda menores).

Weidmann (2008), trata por agregado miúdo todo o material passante na malha 4,75mm mas não considera limites inferiores para o tamanho dos grãos. Além disso, denomina todo o material passante na peneira 0,075mm (75 μm) como material pulverulento, empregando o termo de “microfinos” para tal.

Ainda, o mesmo autor, destacou que a norma brasileira de especificação de agregados para concretos modificou algumas vezes nas últimas décadas e as curvas ideais sugeridas diferenciam-se uma das outras. A Figura 1, apresenta algumas prescrições de normas já utilizadas para classificar o agregado miúdo, como a ASTM C33-93 e a EB-4.

Figura 1 - Curvas granulométricas de agregado miúdo ideais para algumas normas



Fonte: Weidmann (2008, p. 18).

De maneira geral, para agregados miúdos, sua influência está diretamente ligada à trabalhabilidade e à aspereza da mistura. Já foi evidenciado que quanto maior é o material retido nas peneiras de limites superiores, maior é a aspereza de concretos e argamassas produzidos, o que influencia o empacotamento dos grãos, o teor de vazios granulares e pode deixar zonas de transição menos resistentes (WEIDMANN, 2008).

Quiroga (2003), pontua que as areias de britagem, que representam atualmente a maior parte dos agregados miúdos utilizados, apresentam normalmente teores entre 10 e 20% de microfinos, o que é considerado superior ao limite apresentado por normas americanas. Entretanto, Quiroga (2003), Ahn (2000), Bigas e Gallias (2002) e Lodi (2006), utilizaram teores significativos de microfinos e obtiveram bons resultados em concretos.

De acordo com Weidmann (2008), a utilização de maiores quantidades de microfinos pode vir a ser favorável em algumas situações. Segundo Kronlof (1994 apud WEIDMANN, 2008), os microfinos podem ter efeito no empacotamento dos grãos, denominado efeito filer, além de melhorar as zonas de transição (interface dos grãos maiores com a pasta). Todavia, Neville (1997), ressalta que o excesso pode ser prejudicial para a resistência à abrasão e em casos de congelamento e degelo.

Weidmann (2008) afirma que a utilização dos agregados miúdos com substituição parcial ou total das areias naturais, tem crescido consideravelmente. Dentre os principais

motivos, estão o aumento das restrições ambientais à exploração e a escassez das jazidas de areia natural de boa qualidade, próximas aos grandes centros consumidores.

2.1.3. O uso de resíduos de tijolos cerâmicos no concreto

Os materiais cerâmicos podem apresentar características que contribuem para a melhoria das propriedades mecânicas de concretos e argamassas. Foi observado que o material cerâmico finamente moído poderia contribuir com alguma reatividade pozolânica, o que poderia aumentar o desempenho mecânico dos concretos em idades mais avançadas (ZORDAN, 1997; XAVIER, 2001).

Mehta e Monteiro (1994) e Neville (1997) definem as pozolanas como substâncias constituídas de sílica e alumina que, ao entrar em contato com a água se combinam com hidróxido de cálcio e outros componentes do cimento se tornando estáveis à água e com propriedades aglomerantes. A classificação das pozolanas pode ser dividida pela sua origem como naturais: rochas vulcânicas; e artificiais: argilas de qualquer tipo e subprodutos industriais como cinzas volantes, cinzas de casca de arroz e sílica ativa.

Weidmann (2008) cita que as pozolanas artificiais podem ser obtidas em qualquer lugar e assim, apresentam alto potencial de utilização para produção de argamassas e concretos. O processo de produção, que ocorre a temperaturas que variam entre 500°C e 900°C, aumenta a porosidade das partículas e conseqüentemente, a superfície ativa.

De acordo com Levy (1997), os materiais cerâmicos de 2ª linha utilizados na construção civil são produzidos exatamente com temperaturas de queima que variam numa faixa que geram instabilidade à estrutura interna das argilas e permitem uma reação pozolânica. Desta forma, quando finamente moídos, estes materiais podem possuir uma estrutura que apresenta não só certa atividade pozolânica em presença de hidróxido de cálcio mas também na presença de demais elementos da pasta de cimento Portland.

Entretanto, Neville (1997), faz ressalvas sobre as argilas (menores que 2µm), devido à finura elevada e composição mineralógica. Estas características podem aumentar consideravelmente a demanda de água quando comparado a outros tipos de resíduos e microfinos. Também é observado que, quanto mais finas são as partículas, maiores são as possibilidades de serem aderidas às partículas de agregados, o que prejudica a aderência e resistência.

Há diversas hipóteses em relação aos efeitos do resíduo cerâmico e suas parcelas de microfinos. Poon e Chan (2006), afirmam que partículas muito finas dificultam o controle da

trabalhabilidade da mistura, reduzem os resultados do abatimento do tronco de cone (*slump test*) e contribuem para exsudação (processo de separação entre a água de amassamento e agregados).

Já Pedrozo (2008), constatou em seu trabalho um efeito benéfico pela utilização dos agregados de resíduos cerâmicos no controle de retração plástica do concreto. Além disso, foi observado que, por conta da porosidade, estes materiais podem atuar como um reservatório de água dentro da mistura, auxiliando a cura interna do concreto durante o processo de endurecimento.

De modo geral, alguns autores como Khatib (2005) e Poon e Chan (2006) apontam que as principais diferenças entre os agregados miúdos convencionais e agregados reciclados cerâmicos são: maior absorção de água, heterogeneidade na composição e menor resistência dos grãos, para os resíduos.

2.1.4. Dosagem do concreto

Segundo Assunção (2002), as metodologias de dosagem do concreto evoluíram ao longo dos últimos anos. Começou-se a ponderar sobre as propriedades como durabilidade, retração e reologia da pasta. Aos poucos, foram surgindo termos como “dosagem empírica”, “dosagem racional” e “dosagem experimental”, e conseqüentemente os métodos de dosagem.

De acordo com Richard (1996), a dosagem do concreto visa criar um material com o mínimo de defeitos e vazios que atinja a resistência recomendada para sua utilização. Para isso, alguns princípios são levados em consideração, como: diminuição de heterogeneidade e otimização da distribuição granulométrica de agregados, controle da relação água/cimento, além de possíveis utilizações de tratamentos térmicos ou incorporação de aditivos.

Para Tutikian e Helene (2011), a resistência mecânica do concreto é o parâmetro mais frequente a ser especificado. Embora a resistência à tração também seja comum em diversas utilizações, como para projetos de pavimentos em concreto, tradicionalmente, a resistência à compressão é reconhecida como critério principal de dosagem e controle da qualidade.

Mehta e Monteiro (2008), apontam que certos pesquisadores e profissionais consideram a dosagem de concreto mais como uma arte do que como uma ciência. Isto porque, de acordo com os autores, qualquer estudo de dosagem tem fundamentos científicos e tecnológicos mas também envolve uma parte experimental em laboratório e/ou em campo.

Tutikian e Helene (2011) relacionam os seguintes princípios que devem ser levados em consideração:

- a) a resistência à compressão de um concreto é 95% explicada pela resistência da pasta, podendo ser alcançada por uma pasta de cimento simples;
- b) a relação água/cimento é essencial para a resistência à compressão;
- c) quanto maior a dimensão máxima característica do agregado graúdo e quanto menor o seu abatimento, ou seja, concretos de consistência seca, são mais baratos em relação aos de consistência fluída.

Os métodos empíricos consideram a relação água/cimento como o parâmetro mais importante para concretos. Ao definir os materiais e a relação água/cimento, a resistência e a durabilidade passam a ser características autênticas para manter a trabalhabilidade da mistura. (TUTIKIAN; HELENE, 2011)

Ainda de acordo com os mesmos autores, embora estes métodos não exijam conhecimentos prévios a respeito do cimento, adições e agregados, sob a ótica da durabilidade, sempre é conveniente contar com informações prévias de laboratório, como: presença de pó e de argilas, granulometria dos agregados, presença de sulfatos ou materiais carbonosos.

Segundo Levy (2011), estudos de concreto sustentável incluem aqueles que se propõem a reduzir a emissão de gases prejudiciais durante a fabricação de cimentos ou que se prestem a consumir rejeitos industriais, como entulhos da construção. Em seu estudo, o autor mostrou ser vantajoso o emprego de agregados reciclados provenientes de concretos e de resíduos cerâmicos.

Ao longo dos estudos realizados, foi percebido que concretos sustentáveis com altos teores de adições de minerais, como o caso de compostos argilosos, cinzas volantes e metacaulim, requerem modificação na determinação do teor de argamassa, principalmente quando se realiza a substituição em igualdade de massa, devido a diferença de volume da pasta proveniente das divergências das massas específicas (TUTIKIAN; HELENE, 2011).

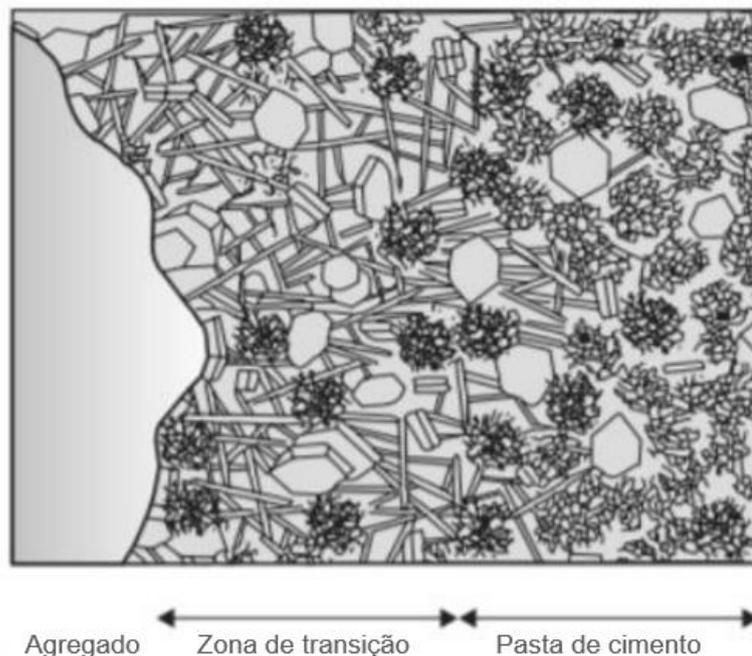
2.2. PROPRIEDADES DO CONCRETO

De acordo com Prudêncio (2018), as características do concreto dependem de uma série de fatores a serem trabalhados. As propriedades do concreto, tanto no estado fresco (por exemplo, trabalhabilidade e consistência) como no endurecido (índices físicos, resistência à compressão simples, tração por compressão diametral e durabilidade), são fatores essenciais para o desenvolvimento adequado do produto final e um bom desempenho concordante com as aplicações do concreto na construção civil.

Em termos de microestrutura, segundo Paulon e Kircheeim (2011), o concreto é caracterizado mediante a presença de três fases: agregados graúdos e miúdos, matriz porosa envolvente aos agregados e regiões de transição, as quais fazem interface entre as outras duas.

A interface apresenta-se como uma região com menos resistência, além de ser mais suscetível à propagação de fissuras, devido à maior quantidade de poros e formação de cristais maiores vinculados ao processo de hidratação. A Figura 2, a seguir, mostra a região mais frágil do concreto.

Figura 2 - Zona de transição do concreto



Fonte: Mehta e Monteiro (2008, p. 43).

Em seu estado endurecido, Mehta e Monteiro (2008) apontam as propriedades almeçadas no concreto, sendo estas, a resistência, a estabilidade dimensional e a durabilidade. Estas características estão diretamente relacionadas com a microestrutura e a hidratação da pasta de cimento.

A partir do processo de hidratação do cimento, os produtos sólidos formados na microestrutura influenciam as propriedades mecânicas do composto final. Os produtos sólidos formados constituem uma região heterogênea e menos resistente com várias fases desuniformes. Esse tipo de arranjo pode contribuir para a baixa capacidade de resistência à tração e à propagação de fissuras na zona de transição (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

2.2.1. Trabalhabilidade

Mehta e Monteiro (2008) citam que a trabalhabilidade é uma das principais características no concreto em seu estado fresco. Entretanto, é considerado um atributo difícil de mensurar quantitativamente, pois é necessário levar em consideração não apenas o fim a ser utilizado como também, particularidades como transporte, lançamento e adensamento.

Para Duran e Fracaro (2011), existem dois parâmetros a serem observados ao tratar de trabalhabilidade: a coesão e consistência. Segundo Mehta e Monteiro (2008), a primeira, refere-se à capacidade de resistir à segregação durante o processo de adensamento, proveniente dos materiais finos e das proporções entre agregados miúdos e graúdos. Já a consistência, relaciona a mobilidade com a umidade da mistura de concreto, sendo determinada por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*).

Conforme Neville e Brooks (2013), os principais fatores que influenciam na trabalhabilidade são: o tipo e a granulometria dos agregados, relação agregado/cimento, a finura do cimento e agregados, a temperatura, a presença de aditivos (como por exemplo, superplastificantes), e principalmente a quantidade de água na mistura.

De acordo com Lodi (2006), ao serem utilizados grãos com maior finura há necessidade de uma quantidade de água superior para atingir uma trabalhabilidade adequada. A textura e a geometria dos agregados também importam.

Segundo Sbrighi (2006), quando há uma granulometria equilibrada é possível alcançar uma mistura trabalhável e econômica. Recena (2014), cita que a trabalhabilidade do concreto deve ser associada ao seu comportamento reológico, caracterizado pela maior ou menor mobilidade da mistura fresca diante à ação da força da gravidade ou diante a um estímulo externo, como a vibração ou compactação.

Silveira (2015) cita que obter qualidade na trabalhabilidade do concreto fresco pode antecipar problemas futuros como falhas na resistência, excesso de permeabilidade, problemas de compactação, entre outros.

De acordo com Oliveira (2004), mesmo que o aumento de água seja considerado um dos fatores que prejudicam a resistência e melhoram a trabalhabilidade, os altos teores de água/cimento nem sempre atuam contra a resistência do concreto. De modo geral, a quantidade de água adequada diminui o atrito interno e facilita a compactação da mistura, podendo, em algumas situações, condicionar a uma resistência mais elevada.

Duran e Fracaro (2011) enfatizam que nenhum ensaio é realmente capaz de fornecer uma análise integral de trabalhabilidade do concreto. O ensaio mais conhecido, o abatimento

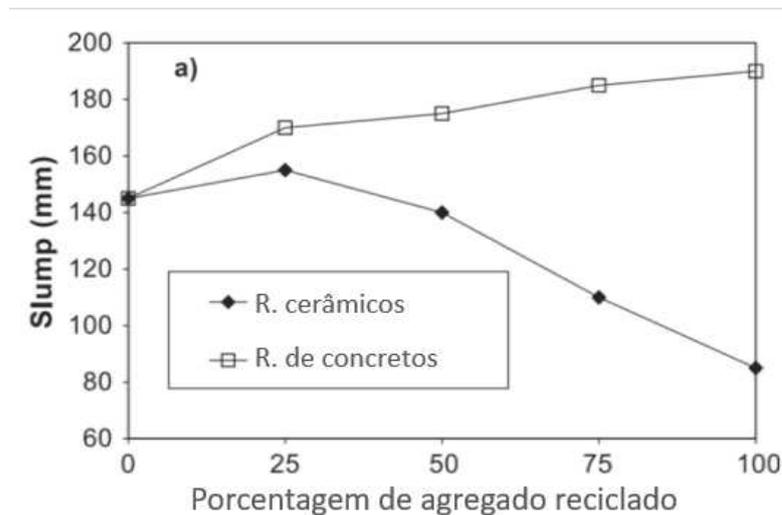
do tronco de cone (*slump test*), mede a consistência do concreto. Esta medida é considerada referência para a trabalhabilidade do concreto e costuma ser especificado dependendo da utilização.

2.2.1.1. Trabalhabilidade em concretos com resíduos

Segundo Topçu e Sengel (2004), a trabalhabilidade do concreto com resíduos é mais baixa, e por conta disso, geralmente requer maiores adições de água. Em seu trabalho, Pedrozo (2008) atrelou a utilização de frações finas de agregados com resíduos cerâmicos à perda de trabalhabilidade. De acordo com o autor, a composição granulométrica dos resíduos altera a cinética de hidratação dos concretos.

Em seu estudo, Khatib (2005), pôde verificar que, para agregados finos cerâmicos, havia uma redução significativa nos resultados dos ensaios de consistência - o ensaio do abatimento do tronco de cone (*slump test*). A Figura 3 apresenta a evolução do *slump* para teores de resíduos cerâmicos e de concreto - chamados pelo autor de agregados reciclados, em 0%, 25%, 50%, 75% e 100% e uma relação água/cimento fixa de 0,5.

Figura 3 - Efeito dos resíduos cerâmicos e de concreto como agregado no concreto



Fonte: Khatib (2005, p. 46).

Concretos com resíduos cerâmicos perdem mais trabalhabilidade do que com resíduos de concreto (KHATIB, 2005). De acordo com Mehta e Monteiro (2008), a perda de trabalhabilidade pode ser considerada como a perda de fluidez do concreto fresco devido ao enrijecimento gradual, das alterações que ocorrem durante a pega da pasta de cimento e dos produtos de hidratação.

Quando os agregados e resíduos porosos são adicionados a seco na mistura, devido às taxas de absorção de água de cada material, ocorre a perda de trabalhabilidade também pela diminuição da quantidade de água disponível para a hidratação da pasta (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Segundo Tenório (2007), a porosidade dos agregados de modo geral, influencia o estado fresco do concreto, entretanto, seus efeitos negativos podem ser minimizados por meio de: aumento da quantidade de água no traço; pré-molhagem; aumento no consumo de cimento; uso de adições ou aditivos; eliminação da fração de finos ou utilização de agregados menos porosos.

2.2.2. Resistência à compressão simples

Mehta e Monteiro (2008) citam que a resistência pode ser definida como a medida limite de tensão para que o material alcance o rompimento. Para os concretos, a resistência é atingida ao ocorrer a solidificação da mistura contendo aglomerante, água, cimento e agregados, sendo necessária a hidratação deste elemento. A hidratação do cimento é considerada um processo lento, a qual leva à variação de resistência do concreto ao longo da vida útil, mas principalmente durante o estágio inicial, conhecido como processo de cura.

De acordo com Andrade e Tutikian (2011 apud PRUDÊNCIO, 2018), a resistência à compressão axial é associada a outras propriedades do concreto no estado endurecido, direta ou indiretamente. Além de ser uma das principais propriedades especificadas em projetos estruturais, possui relação com a durabilidade, outra característica valorizada dentro da engenharia civil.

No estado endurecido, a resistência à compressão axial é definida como a tensão limite que a peça pode suportar, sofrendo ruptura se for submetida além desse valor. Nos ensaios de compressão, o corpo de prova é considerado rompido ao possuir pequenas fissuras internas, não sendo necessário apresentar evidências de fraturas externas (PRUDÊNCIO, 2018).

De acordo com Botelho e Marchetti (2004), o tipo de cimento exerce influência na velocidade com que a resistência é adquirida pela escolha deste elemento. A resistência do concreto está interligada a vários fatores, dentre eles, o cenário em que ocorre a mistura e a fase de cura.

A NBR 12655 (ABNT, 2006), a indicada para o cálculo de resistência à compressão do concreto, relaciona resistência média do ensaio à compressão (f_{cj}), com a resistência característica adotada (f_{ck}) e desvio padrão de dosagem (S_d). Abaixo é apresentada a equação

(1) contida nesta norma, que incorpora conceitos da curva de distribuição normal de Gauss, e de seus limites de confiança, cuja interpretação deve considerar o valor de 1,65 como correspondente ao quartil de 5%, considerando que para o caso do concreto, apenas 5% dos corpos de prova devem possuir uma resistência à compressão (f_c) incompatível com o valor de resistência característica (f_{ck}).

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65 \times S_d \quad (1)$$

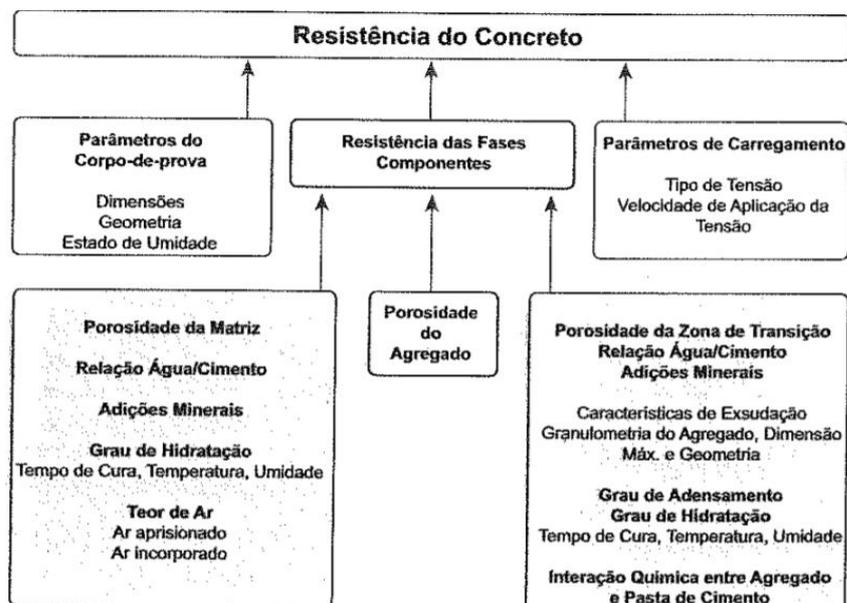
Onde:

- f_{cj} – resistência média do concreto à compressão;
- f_{ck} – é a resistência característica do concreto;
- S_d – desvio-padrão da dosagem.

Para a avaliação da dispersão de resultados de ensaios à compressão devem ser aplicadas estratégias capazes de homogeneizar alguns dos fatores influentes da produção dos corpos de prova. A qualidade dos ensaios deve estar desvinculada às condições que envolvem a produção do concreto, a moldagem e a cura destes elementos. Sendo assim, todos os corpos de prova devem apresentar condições similares de análise (GIDRÃO, 2014).

Na Figura 4, estão apresentados os fatores que influenciam nos resultados quanto à resistência à compressão. Tendo como objetivo minimizar os efeitos provenientes da produção dos corpos de prova, transferindo para o ensaio de compressão, a responsabilidade pela discrepância dos resultados obtidos.

Figura 4 - Interação dos fatores que influenciam a resistência do concreto



Fonte: Mehta e Monteiro (2008, p. 67).

Prudêncio (2018) ressalta a relação água/cimento como um dos principais fatores conectados com a resistência à compressão. Sendo assim, ao diminuir o consumo de água ou aumentar o consumo de cimento pode-se elevar a resistência. Todavia, a primeira ação impacta diretamente na trabalhabilidade e a segunda, aumenta os custos do material. É por isso que é fundamental a seleção de agregados que melhorem as características técnicas da mistura e tornem o material mais econômico.

Botelho e Marchetti (2004) definem o ensaio de resistência do concreto como rápido, pois dado o momento em que se inicia a aplicação de tensões de compressão não decorre muito tempo até o ápice onde ocorre a ruptura da estrutura. O ensaio do concreto em seu estado endurecido permite a compreensão das características finais de resistência. Para tal, é realizada a consolidação de uma amostra do concreto, moldado em corpos de prova ainda em estado fresco, que passa a endurecer em uma câmara úmida, promovendo a cura do material de maneira ideal, conforme a NBR 5738 (ABNT, 2016).

2.2.3. Resistência à tração por compressão diametral

Conforme Silva *et al.* (2001), a resistência à tração pode ser limitante de ruptura para uma estrutura. Em determinadas estruturas de concreto, as solicitações predominantes são de tração na flexão ou tração pura, portanto, a resistência à compressão não é o único parâmetro que determina a capacidade resistente.

Segundo Muley, Varpe e Ralwani (2015 apud DAGNONI, 2018), ao se tratar de concreto, quando comparado à resistência à compressão, a resistência à tração é muito menor, sendo cerca de um décimo da resistência de compressão.

É possível associar, segundo Mehta e Monteiro (2008), a reduzida capacidade de resistência à esforços de tração do concreto, a sua dificuldade de interromper a propagação de fissuras, quando submetido a este tipo de esforço.

Ainda de acordo com o mesmo autor, quando a direção de propagação das fissuras é transversal à direção principal de tensão, a área disponível para suportar a carga fica reduzida, aumentando as tensões nas extremidades da fissura. Dessa forma, por ter uma superfície de ruptura menor, não é necessário um elevado gasto energético para a ruptura por tração, caracterizando um comportamento frágil.

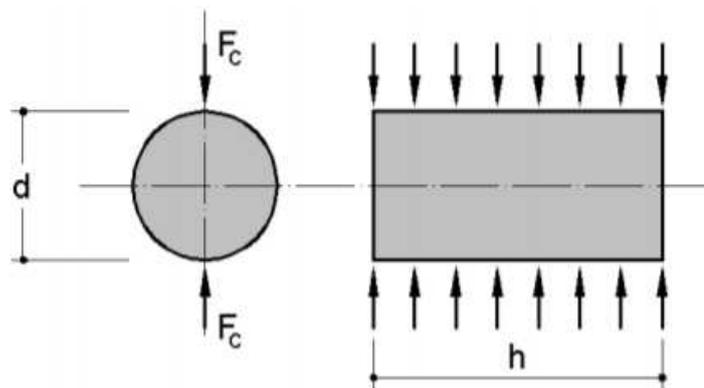
No caso de um concreto simples (sem armadura), uma fissura representa uma barreira à propagação de tensões, com isso haverá um desvio de linhas de tensão que irão se concentrar nas bordas da fissura, e quando esta tensão superar a resistência da matriz ocorrerá ruptura por

fragilidade do material. Se porventura o esforço for cíclico, da mesma forma, pode-se apresentar ruptura por fadiga, ou seja, para cada ciclo haverá uma pequena propagação de fissuras, aumentando progressivamente a concentração de tensões em sua extremidade, levando à ruptura (PEREIRA *et al.*, 2019).

Segundo Libânio, Muzardo e Santos (2004), para obter uma análise da resistência média do concreto à tração, dentre outros ensaios, o mais utilizado é o ensaio de tração na compressão diametral (splitting test), internacionalmente conhecido como Ensaio Brasileiro.

De acordo com os mesmos autores, para a realização do ensaio é moldado um corpo de prova cilíndrico de 15 cm por 30 cm, o qual é colocado com o eixo horizontal entre os pratos de uma prensa. E então, aplica-se força até sua ruptura por tração indireta, chamada ruptura por fendilhamento. A Figura 5 mostra a atuação da prensa em relação ao corpo de prova.

Figura 5 - Ensaio de tração por compressão diametral



Fonte: Libânio *et al.* (2004, p. 4).

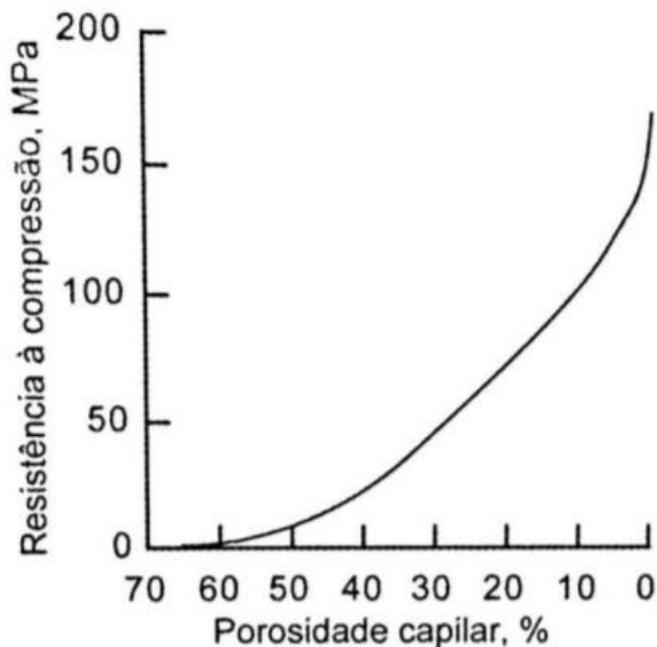
2.2.4. Porosidade

De acordo com Lodi (2006), a porosidade é a relação entre o volume ocupado pelos vazios e poros e o volume total do concreto, podendo ser subdividida em duas classificações: porosidade aberta e porosidade fechada. É denominado como porosidade aberta quando os vazios são interligados por canais e com o meio externo, e a porosidade fechada, quando não existe comunicação entre poros.

Há três formas de obter resultados sobre a porosidade, segundo Recena (2014), a porosidade capilar, a qual permite que o fluido possa se movimentar sem alterar o volume; a porosidade gel, de menores diâmetros, composta pela água evaporável; e a porosidade ar, oriunda de bolhas de ar que interrompem canais capilares.

Para Mehta e Monteiro (2008), a porosidade é um fator muito importante relacionado à resistência à compressão. Além disso, há ainda várias condicionantes que influenciam na porosidade do concreto, como as características e proporções dos materiais que formam o traço do concreto, o grau de compactação, as condições de cura, dentre outros. A porosidade e a resistência à compressão possuem relação inversa, ou seja, com o aumento de porosidade, é percebido a diminuição da resistência à compressão do concreto, conforme Figura 6.

Figura 6 - Relação entre a porosidade e a resistência à compressão



Fonte: Mehta e Monteiro (2008, p. 51).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a resistência encontra-se na parte sólida de um material, portanto, os vazios são considerados prejudiciais à resistência. A concentração de tensão e a subsequente ruptura do material quando há aplicação de carga começam nos grandes vazios capilares e nas microfissuras presentes.

Carrijo (2005) observou em seu trabalho a porosidade dos concretos produzidos com agregados que continham resíduos, separados em faixas de densidade medindo a absorção de água e o índice de vazios. Foi constatado que essas duas propriedades cresceram à medida que a relação de água/cimento aumentou e a massa específica dos agregados diminuía. Dessa forma, foi percebido que a porosidade do agregado teve um efeito significativo em relação à porosidade do produto final.

3. METODOLOGIA

Este trabalho trata de uma pesquisa experimental e segundo Gil (2007), este tipo de pesquisa consiste na determinação de um objeto de estudo e na seleção de variáveis que seriam capazes de influenciá-lo ou de serem influenciadas. À vista disso, é delimitado formas de controle e definidas maneiras de observação dos efeitos produzidos. Assim, este experimento buscou estudar o desempenho do concreto com adição de resíduos de tijolos cerâmicos dentro de um ambiente laboratorial por meio de ensaios controlados.

No presente capítulo serão descritas as etapas experimentais realizadas para a obtenção dos resultados finais. Na primeira parte é feita a exposição dos tipos de materiais utilizados, juntamente com sua caracterização e origem. Ao discorrer sobre os métodos é apresentado um fluxograma dos caminhos percorridos para a obtenção de resultados analisados, e a descrição das etapas dos ensaios laboratoriais. Neste trabalho foram analisados o ensaio de compressão e de tração por compressão diametral além ensaios de índices físicos como densidade, porosidade e absorção de água.

3.1. MATERIAIS

Para a elaboração deste trabalho foi realizada, a mistura dos elementos que constituem o concreto: cimento, agregados (grãos e miúdos) e água, além da incorporação de resíduos de tijolos cerâmicos. A escolha dos materiais bem como a forma que foram obtidos estão descritas nas seções a seguir.

3.1.1. Resíduo de tijolos cerâmicos

O resíduo utilizado no presente estudo consistiu de fragmentos de cerâmica vermelha, com dimensões variadas, provenientes de uma obra, localizada no Município de Joinville, Estado de Santa Catarina (SC), conforme observado na Figura 7.

Figura 7 - Resíduo de tijolos cerâmicos utilizados



Fonte: a autora (2021).

3.1.2. Cimento

O cimento utilizado no trabalho foi o CP II -F, oriundo da empresa Votorantim. Segundo Medeiros-Júnior (2014), os limites para as características do material segundo normas vigentes são apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3 - Propriedades do cimento CP II-F

Propriedades	CP II-F
Resíduo na peneira 75 μm (%)	≤ 12
Área específica (m^2/kg)	≥ 260
Início de pega (h)	≥ 1
Fim de pega (h)	≤ 10
Expansibilidade a quente (mm)	≤ 5
Expansibilidade a frio (mm)	≤ 5
Resistência à compressão - 3 dias (MPa)	≥ 10
Resistência à compressão - 7 dias (MPa)	≥ 20
Resistência à compressão - 28 dias (MPa)	≥ 32

Fonte: Medeiros-Júnior *et al.* (2014).

3.1.3. Agregados

Obtidos na empresa Rudnick minérios, foram utilizados, os seguintes agregados: areia média como agregado miúdo, e brita 0 como agregado graúdo.

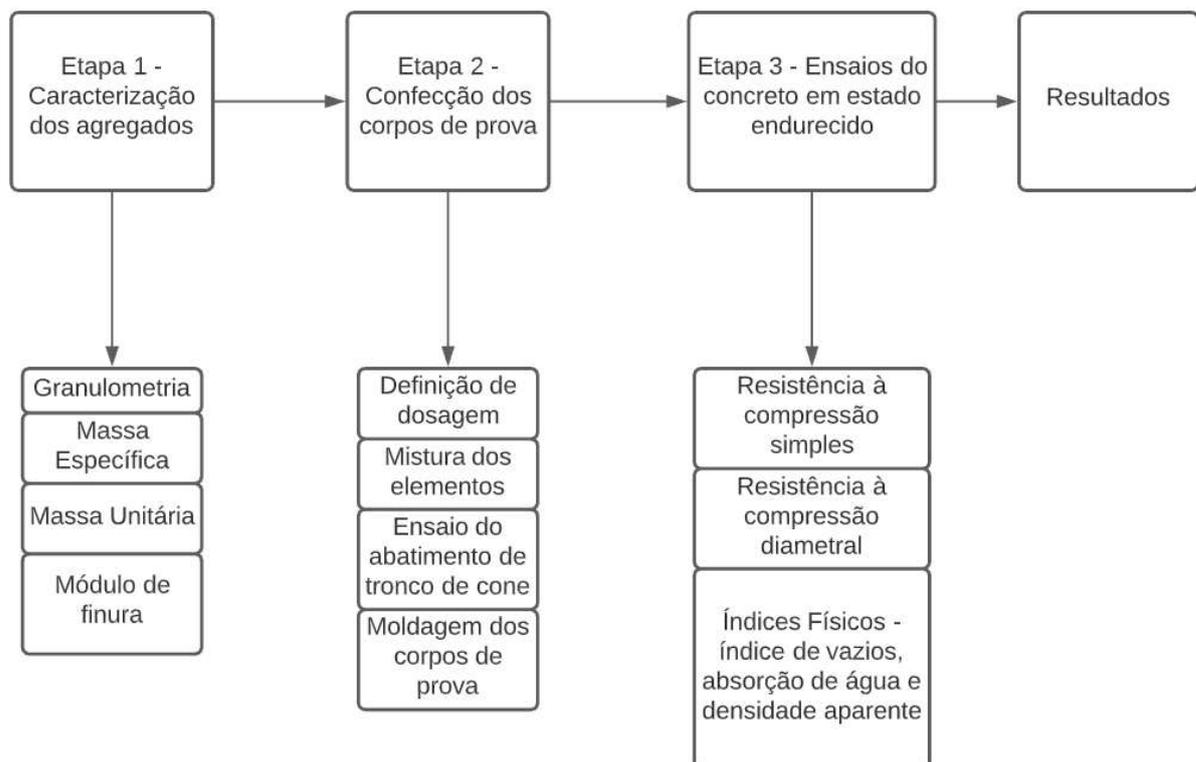
3.1.4. Água

A água utilizada para a realização do concreto foi proveniente da rede de abastecimento de Joinville – SC. Sendo, portanto, classificada como potável e livre de impurezas.

3.2. MÉTODOS

De posse dos materiais deu-se sequência aos procedimentos e ensaios necessários para a avaliação do desempenho do concreto com resíduos de tijolos cerâmicos. A realização deste experimento contemplou algumas etapas, conforme apresentado no fluxograma abaixo (Figura 8).

Figura 8 - Fluxograma metodológico



Fonte: a autora (2021).

3.2.1. Moagem do resíduo de tijolo cerâmico

Para a caracterização e posteriormente para a utilização como substituição de areia foi necessário que o resíduo passasse por um processo de moagem, selecionando partículas passantes na peneira de malha 4,75mm, classificando assim, o resíduo como agregado miúdo.

Neste experimento com resíduos de tijolos cerâmicos, foi utilizado para o beneficiamento um Moinho de Bolas, modelo SONNEX I-4205, fabricado pela CONTENCO, disponível no Laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável do Centro Tecnológico de Joinville (CTJ) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). O procedimento consistiu em colocar 4,5 kg de material seco, aplicando-se 4500 rotações com a carga de bolas metálicas constantes. O material resultante foi então peneirado nas peneiras da ABNT nº 50, 100, 200 e 350, com o objetivo de caracterizar o material por sua granulometria, e obter separadamente apenas o resíduo com a finura adequada para os experimentos.

Uma das desvantagens desse procedimento é o baixo rendimento, pois após a moagem, uma vez que em função de sua finura, as partículas de material moído aglutinam-se facilmente, é dificultada a passagem do material nas peneiras de malhas mais finas como a Nº 200 a 350 (VIEIRA *et al.*, 2003).

3.2.2. Caracterização dos agregados

Para a caracterização dos agregados foram utilizados dois métodos: ensaios de granulometria regidos pela norma NBR NM 248 (ABNT, 2003) e ensaios para obtenção de propriedades físicas, seguindo a NBR 9778 (ABNT, 2009), o que possibilitou o conhecimento de características como absorção de água, porosidade e massa específica. As seções subsequentes descrevem com maior grau de aprofundamento a realização dos procedimentos.

3.2.2.1. Granulometria dos agregados

A granulometria consiste no estudo de como ocorre a distribuição de dimensões dos grãos. A determinação das características granulométricas dos materiais é realizada conforme o ensaio normatizado pela NBR NM 248 (ABNT, 2003). Esta norma apresenta os equipamentos a serem utilizados, como as peneiras recomendadas, para a realização da caracterização dos

agregados miúdos e graúdos e dos resíduos de tijolos cerâmicos. A Tabela 4 apresenta as séries de peneiras que se encontram na norma.

Tabela 4 - Série de Peneiras

<i>Serie Normal / Série Normal</i>	<i>Serie Intermedia / Série Intermediária</i>
75 mm	-
-	63 mm
-	50 mm
37,5 mm	-
--	31,5 mm
--	25 mm
19 mm	-
-	12,5 mm
9,5 mm	-
-	6,3 mm
4,75 mm	-
2,36 mm	-
1,18 mm	-
600 µm	-
300 µm	-
150 µm	-

Fonte: NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Para a execução do ensaio foi separada uma amostra de cada agregado: brita (agregado graúdo), areia (agregado miúdo) e resíduos de tijolos cerâmicos. Todas as amostras foram levadas à estufa para perda de umidade em temperatura de 105°C por 24 horas. Após o processo na estufa, amostras de 500g foram retiradas e a pesagem foi realizada após atingirem a temperatura ambiente.

Para o ensaio, as peneiras foram dispostas na ordem de 19mm; 12,5mm; 9,5mm; 6,3mm; 4,75mm, 2,36mm; 1,18mm, 0,6mm, para o agregado miúdo, enquanto que as peneiras para ensaio de agregado miúdo foram dispostas na ordem 6,3mm; 4,75mm, 2,36mm; 1,18mm, 0,6mm; 0,3mm; 0,15mm, 0,075mm formando um único conjunto provido de tampa e fundo. A Figura 9 mostra o conjunto de peneiras utilizado para determinação de distribuição granulométrica.

Figura 9 - Conjunto de peneiras para determinação de distribuição granulométrica



Fonte: a autora (2021).

Ao peneirar os agregados em peneiras normatizadas, o tempo de peneiramento é suficientemente adequado para garantir a passagem total dos grãos com dimensão inferior ao da abertura da malha. Assim, a classificação granulométrica do material é obtida por meio da observação da abertura de malha da peneira pela qual passam os agregados ensaiados.

Conforme disposto pela NBR NM 248 (ABNT, 2003), o módulo de finura e a dimensão máxima característica dos agregados foram calculados. Sendo o primeiro, definido pela soma das porcentagens de agregados acumuladas nas peneiras de série normal e dividido por 100. Já a dimensão máxima característica do agregado é definida como a abertura de peneira na qual ficou retido 5% dos agregados, ou uma porcentagem ligeiramente inferior.

A composição granulométrica dos agregados reciclados graúdos e finos, varia conforme o tipo de resíduo processado, os equipamentos utilizados e a dimensão do resíduo antes de ser processado. A melhor forma para o uso em concretos e argamassas é a que se assemelha às curvas de areias e britas naturais, mas no geral, as distribuições granulométricas dos resíduos apresentam-se satisfatórias para a utilização (LIMA, 1999).

3.2.2.2. Massa unitária

A relação entre massa e volume ocupado pelos grãos de agregados define a massa unitária ou, também chamada, massa aparente. Conforme disposto na NBR 16972 (ABNT, 2021), o mesmo ensaio é utilizado para a determinação deste índice para agregados graúdos e miúdos. Foi utilizado um recipiente cilíndrico de volume conhecido e então, a massa foi determinada sem nenhum tipo de compactação. A equação da massa unitária é demonstrada a seguir pela Equação 2.

$$Mu = \frac{m1-m2}{V} \quad (2)$$

Onde:

- Mu = massa unitária (kg/m^3);
- $m1$ = massa do recipiente com o material (kg);
- $m2$ = massa do recipiente (kg);
- V = volume do cilindro (m^3).

Segundo Sbrighi Neto (2005), a massa unitária de várias proporções está entre os procedimentos mais utilizados em métodos de dosagem, visto que, a maior proporção de massa unitária reflete num menor volume de vazios da mistura.

3.2.2.3. Massa Específica

De acordo com a NBR 16916 (ABNT, 2021), a massa específica é a relação entre o volume do sólido e a massa do agregado seco em estufa até a sua constância, considerando os poros impermeáveis. Seguindo as instruções da mesma norma, para a execução do ensaio foram pesados 500 g de amostra e inseridos no frasco Chapman, e após o repouso, foi introduzido 500ml de água no frasco. Passada 1 hora, aproximadamente, foi completado com água até a marca de 500 cm^3 para a determinação da massa. A leitura do nível d'água foi realizada pelo conjunto água e agregado ou resíduo, aferindo o volume ocupado em cm^3 . A massa específica aparente do agregado seco foi calculada pela Equação 3.

$$d1 = \frac{m}{V-Va} \quad (3)$$

Onde:

- $d1$ = massa específica do material analisado (g/cm^3);

- m = massa da amostra seca em estufa (g);
- V = volume do frasco (cm^3);
- Va = volume da água adicionada ao frasco (cm^3).

A massa específica dos concretos também é influenciada pela substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo reciclado. Poon e Chan (2006) verificaram uma diminuição gradual da massa específica do concreto conforme o teor de substituição de agregados naturais. A massa específica dos agregados pode ser calculada, segundo a NBR 16916 (ABNT, 2021), pela Equação 4, abaixo.

$$d_3 = \frac{m}{(V-Va) - \frac{(ms-m)}{\rho_{ag}}} \quad (4)$$

Onde:

- d_3 = massa específica do agregado em gramas (cm^3);
- m = massa da amostra seca em estufa (g);
- V = volume do frasco (cm^3);
- Va = volume da água adicionada ao frasco (cm^3);
- ms = massa da amostra na condição saturada superfície seca (g);
- ρ_{ag} = massa específica da água (g/cm^3).

3.2.3. Dosagem de concreto e execução

Para a definição de um traço unitário em massa para o concreto, foi utilizado o procedimento de dosagem experimental para a obtenção de um concreto sem fins estruturais.

Propondo-se partir de um estudo inicial para a definição de um traço de referência, foi considerado o traço elaborado por Poon e Chan (2006), tendo como relação 1:4,8 (cimento: agregados). Porém, visando maior trabalhabilidade e economia, foi ajustado uma proporção de 1:5, para constituir o traço de referência T0, em massa, em 1:3:2:0,8 (cimento: agregado miúdo: agregado graúdo: relação água/cimento), aderindo ao traço utilizado por Souza, Soriano e Patino (2018).

Para este trabalho, foi definida a substituição de agregado miúdo comumente denominado como areia, por resíduos de tijolos cerâmicos moídos em percentuais de 15 e 30% em massa. Para manter a trabalhabilidade, avaliada quantitativamente pelo ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*), a relação água/cimento foi ajustada durante o

procedimento, conforme os resultados obtidos *in loco*. Sendo assim, a tabela de composição de traço pode ser exemplificada abaixo (Tabela 5).

Tabela 5 - Composição dos traços de concreto em massa (kg)

Traço	Cimento	Agregado Graúdo	Agregado miúdo		Água
			Areia	Cerâmica	
T0	1,0	2	3	0	0,8
T1	1,0	2	2,55	0,45	0,9
T2	1.0	2	2.1	0.9	0.925

Fonte: a autora (2021).

Para realizar a mistura do concreto referência, foram seguidos os seguintes passos:

- a) imprimação da betoneira com uma porção de argamassa de traço 1:2 e relação água cimento de 0,6.
- b) introdução de modo individual dos materiais seguindo a ordem de água (80% do pré-estabelecido); agregado graúdo em sua totalidade; cimento em totalidade; e também, toda a massa de agregado miúdo proposta;
- c) mistura de todos os materiais por 10 minutos;
- d) adição do restante (20%) da quantidade de água proposta;
- e) antes do ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*), foi verificado se havia, na superfície exposta do concreto, grandes evidências de vazios, o que seria indicador de falta de argamassa.
- f) com uma colher de pedreiro, foi verificado se o desprendimento concreto estava ocorrendo de modo coeso e homogêneo. Após as verificações, partiu-se para o ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*).

3.2.4. Ensaio de abatimento do tronco de cone (*Slump Test*)

A avaliação da consistência é normalmente aferida pelo ensaio do abatimento do tronco de cone (*Slump Test*), o qual permite a verificação da coesão e fluidez da mistura. Este parâmetro pode ser definido em função da necessidade de uso do concreto e da eficiência dos equipamentos de produção e adensamento da mistura.

O ensaio foi realizado conforme as recomendações da ABNT NBR 16889 (ABNT, 2020), com o auxílio de um tronco de cone, uma barra de aço redonda e uma trena. Esta medida

foi determinada a fim de igualar os resultados de trabalhabilidade dos concretos com substituição parcial por resíduos de tijolos cerâmicos e o concreto de referência.

Após os componentes de cada um dos traços serem homogeneizados mecanicamente numa betoneira, foi realizada a verificação do abatimento do tronco de cone (*Slump Test*) em milímetros e a moldagem em corpos de prova cilíndricos, conforme a Figura 10.

Figura 10 - Ensaio do abatimento do tronco de cone - Traço Referência (T0)



Fonte: a autora (2021).

A relação água/cimento, conforme já mencionado, foi iniciada a 0,8 e posteriormente foi adequada para manter a trabalhabilidade das misturas em $(40 \pm 0,5)$ mm. A adequação foi derivada da aferição sucessiva do resultado do ensaio de abatimento do tronco de cone.

De acordo com os ensaios de abatimento foi possível observar, na Figura 10, a presença de vazios, o que influencia na resistência à compressão do concreto em estado endurecido. É perceptível a presença de uma espessa camada de água ao redor da base do concreto, oriunda da mistura, que revela a tendência de exsudação de água, o que apontaria para uma maior necessidade de partículas finas.

Em concretos que são transportados, o teor de argamassa seca depende ainda da sua perda durante o transporte e bombeamento. Por conta disso, é usualmente estimado entre 2% a 4% de perdas nestas condições (TUTIKIAN; HELENE, 2011).

3.2.5. Moldagem dos corpos de prova

O processo de moldagem dos corpos-de-prova seguiu a NBR 5738 (ABNT, 2016) para as diferentes formulações. A seguir, a Figura 11 apresenta os corpos de provas moldados pela autora.

Figura 11 - Corpos de prova com resíduos de tijolos cerâmicos com teores de substituição em 0, 15 e 30%



Fonte: a autora (2021).

Durante a moldagem dos corpos de prova, foi realizada a vibração mecânica das misturas, o que possibilitou maior uniformidade. Após desmoldados, os corpos de prova permaneceram numa câmara úmida em processo de cura por um período de 28 dias.

Após a desforma, os corpos de prova foram submetidos ao processo de saturação por imersão em água por um período de 26 dias. Sendo retirados da imersão 24 horas antes do rompimento, precedendo o ensaio de compressão axial simples.

Os corpos de prova utilizados para o desenvolvimento deste trabalho possuíam as dimensões de 10 cm x 20 cm (diâmetro x altura) e a moldagem e cura dos mesmos foram realizadas de acordo com as orientações da NBR 5738 (ABNT, 2016).

Inicialmente, foram moldados 16 corpos de prova de concreto com resíduos de tijolos cerâmicos (para os traços T1 e T2), sendo 8 para ensaio de compressão simples e 8 para o ensaio de tração na compressão diametral. Sendo utilizado uma única idade de rompimento, 28 dias. Da mesma forma, com o intuito de comparar os resultados que o concreto teria com adição de

resíduos, para cada idade foram moldados 8 corpos de provas sem resíduos de tijolos cerâmicos (T0), possuindo a mesma proporção de cimento e agregados.

3.2.6. Resistência à compressão axial simples

Para a determinação da compressão simples do concreto foram seguidos os procedimentos conforme dispostos na NBR 5739 (ABNT, 2018). Para o ensaio, foi utilizada uma prensa de classe 2, com capacidade máxima de carga de 100 tf, conforme apresentado na Figura 12. O ensaio de compressão foi realizado com 28 dias de cura, na construtora Perville Engenharia e Empreendimentos Ltda, que permitiu o acesso ao equipamento necessário.

Figura 12 - Prensa hidráulica para ensaio de compressão



Fonte: a autora (2021).

3.2.7. Resistência à tração por compressão diametral

De acordo com Mendes (2002), a resistência à tração é importante para as estruturas de concreto, pois servem como parâmetro para a verificação da aderência entre concreto e armadura e no estabelecimento de critérios nos estados últimos de utilização e de serviço, além de oferecer uma estimativa de carga onde se inicia a formação de fissuras. Neste trabalho, a

resistência à tração é determinada experimentalmente através do ensaio de tração por compressão diametral.

Segundo Falcão e Soares (2002), o ensaio brasileiro de compressão diametral para determinação indireta da resistência à tração foi desenvolvido pelo professor Lobo Carneiro para concreto-cimento. O ensaio consiste na aplicação de duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão em um cilindro, gerando tensões de tração uniformes e perpendiculares ao diâmetro.

Esta prática, popular na caracterização de misturas asfálticas, é conhecida não somente pela facilidade de execução mas também pela possibilidade de utilização do mesmo corpo de prova cilíndrico e dos equipamentos usados para a obtenção da resistência à compressão axial (FALCÃO; SOARES, 2002).

O procedimento adotado para a execução do ensaio de tração indireta do concreto por compressão diametral seguiu as definições da norma NBR 7222 (ABNT, 2011). Foram utilizados 12 corpos de prova, divididos em 3 grupos de 4 corpos de prova para cada traço: 4 provenientes do concreto referência e 4 de cada porcentagem de substituição parcial de resíduos de tijolos cerâmicos (15% e 30%) em massa. A Figura 13 apresenta um exemplo de cada grupo, T0, T1 e T2, respectivamente.

Figura 13 - Corpos de prova (T0, T1 e T2) rompidos no ensaio de tração por compressão diametral



Fonte: a autora (2021).

3.2.8. Índices físicos: absorção de água, índice de vazios e densidade aparente

Os ensaios das propriedades físicas foram realizados por meio do ensaio de Arquimedes, seguindo a NBR 9778 (ABNT, 2009), para a determinação da absorção de água, índice de vazios (ou porosidade aberta) e densidade aparente (ou massa específica). Foram retiradas amostras provenientes dos corpos de prova, porém partidos em pedaços menores, e então pesados nos estados: seco, saturado com a superfície seca e submerso. A partir destas pesagens foi possível determinar os índices físicos do concreto no estado endurecido.

As propriedades como absorção de água, índice de vazios e densidade aparente são obtidas respectivamente pelas seguintes formulações apresentadas nas Equações 5, 6 e 7.

$$A = \frac{Msat - Ms}{Ms} \times 100 \quad (5)$$

$$Iv = \frac{Msat - Ms}{Msat - Mi} \times 100 \quad (6)$$

$$\rho a = \frac{Ms}{Msat - Mi} \times 1000 \quad (7)$$

Onde:

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

Foram utilizadas 3 amostras do concreto produzido com volume mínimo de 1500cm³. As amostras foram submetidas à secagem em estufa a 105°C por um período de 72 horas e então determinada sua massa (Ms). Após, as amostras foram imersas em água por mais 72 horas e a massa foi aferida novamente (Msat). Para a finalização, as amostras foram sustentadas por uma cesta de aço, fixadas por uma balança de precisão e imersa em água. Os resultados obtidos durante a imersão foram definidos como massa hidrostática (Mi).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo será realizada a apresentação dos resultados obtidos neste trabalho, como propriedades físicas dos agregados, propriedades mecânicas do concreto para os diferentes traços propostos e os índices físicos do concreto em estado endurecido.

4.1. PROPRIEDADES FÍSICAS DO AGREGADO GRAÚDO

Os resultados das propriedades físicas dos agregados graúdos como módulo de finura, dimensão máxima característica, massa específica e massa unitária, ficaram dentro do esperado para a classificação de brita 0, estes estão apresentados na Tabela 6, a seguir.

Tabela 6 - Resultado das propriedades físicas dos agregados graúdos utilizados

Agregado Graúdo		
Peneiras(mm)	%Retido	%Acumulado
12,7	0	0
9,52	11,75	11,75
4,8	57,2	68,95
2,4	15,38	84,33
1,2	12,21	96,54
<1,2	3,46	100
Total	100	-
Módulo de Finura		5,62
Dimensão Máxima Característica (mm)		4,8
Graduação		Brita 0
Massa Específica (kg/dm ³)		2,61
Massa Unitária (kg/dm ³)		1,35

Fonte: a autora (2021).

4.2. PROPRIEDADES FÍSICAS DO AGREGADO MIÚDO

Os resultados das propriedades físicas dos agregados miúdos como módulo de finura, dimensão máxima característica, massa específica e massa unitária, ficaram dentro do esperado para a classificação de areia média, estes estão apresentados na Tabela 7, a seguir.

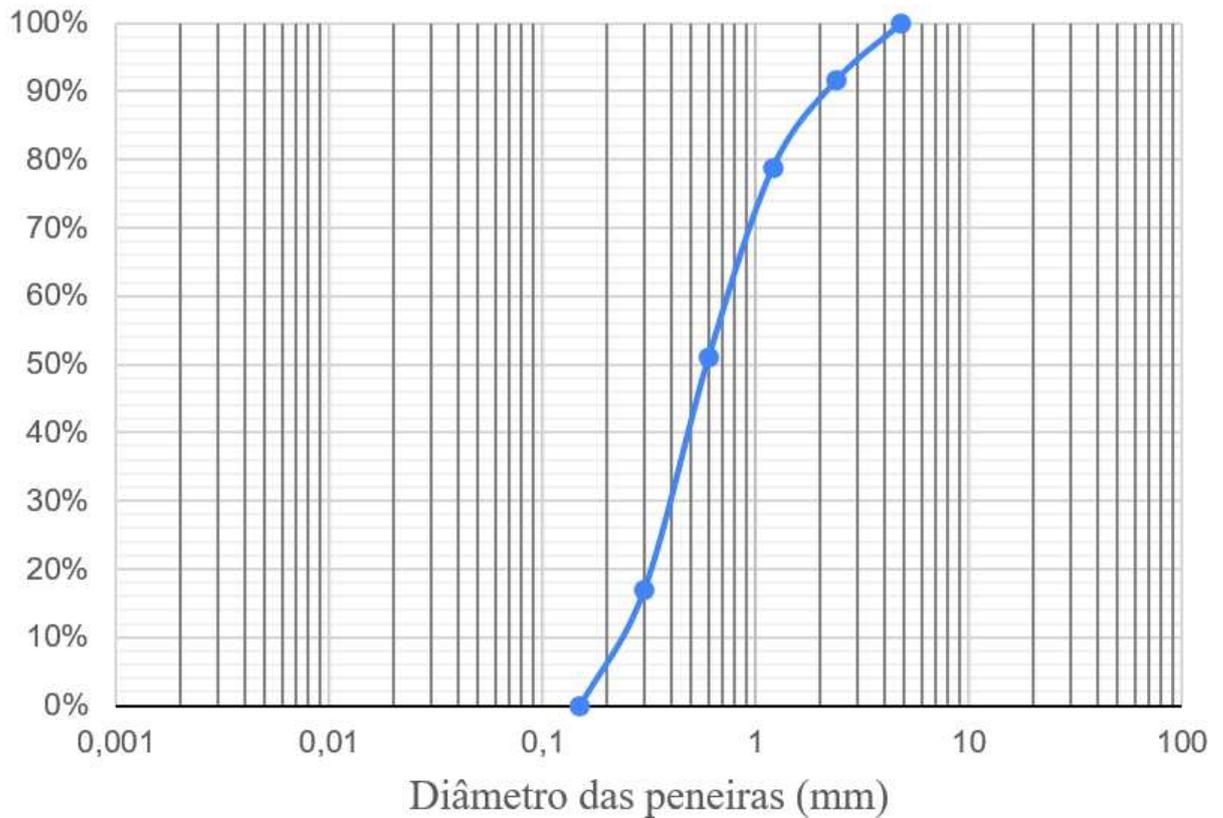
Tabela 7 - Resultados de propriedades físicas dos agregados miúdos naturais utilizados

Agregado miúdo natural		
Peneiras(mm)	%Retido	%Acumulado Retido
\	0,1	0,1%
2,4	8,2	8,3%
1,2	13	21,3%
0,6	27,8	49,1%
0,3	33,9	83,0%
0,15	17	100,0%
<0,15	0	100,0%
Total	100	-
Módulo de Finura		2,62
Dimensão Máxima Característica (mm)		4,8
Graduação		Areia Média
Massa Específica (kg/dm ³)		2,62
Massa Unitária (kg/dm ³)		1,55

Fonte: a autora (2021).

Para fins comparativos posteriores, construiu-se a curva granulométrica da areia média utilizada neste trabalho, esta pode ser observada na Figura 14.

Figura 14 - Curva granulométrica da areia natural utilizada



Fonte: a autora (2021).

4.3. PROPRIEDADES FÍSICAS DO RESÍDUO DE TIJOLO CERÂMICO

Observou-se que, para o resíduo de tijolos cerâmicos um maior percentual de partículas finas menores que 0,15 mm, quando comparado ao agregado miúdo. A seguir, na Tabela 8, estão as propriedades físicas do resíduo de tijolos cerâmicos utilizados.

Tabela 8 - Propriedades físicas do resíduo de tijolos cerâmicos utilizados

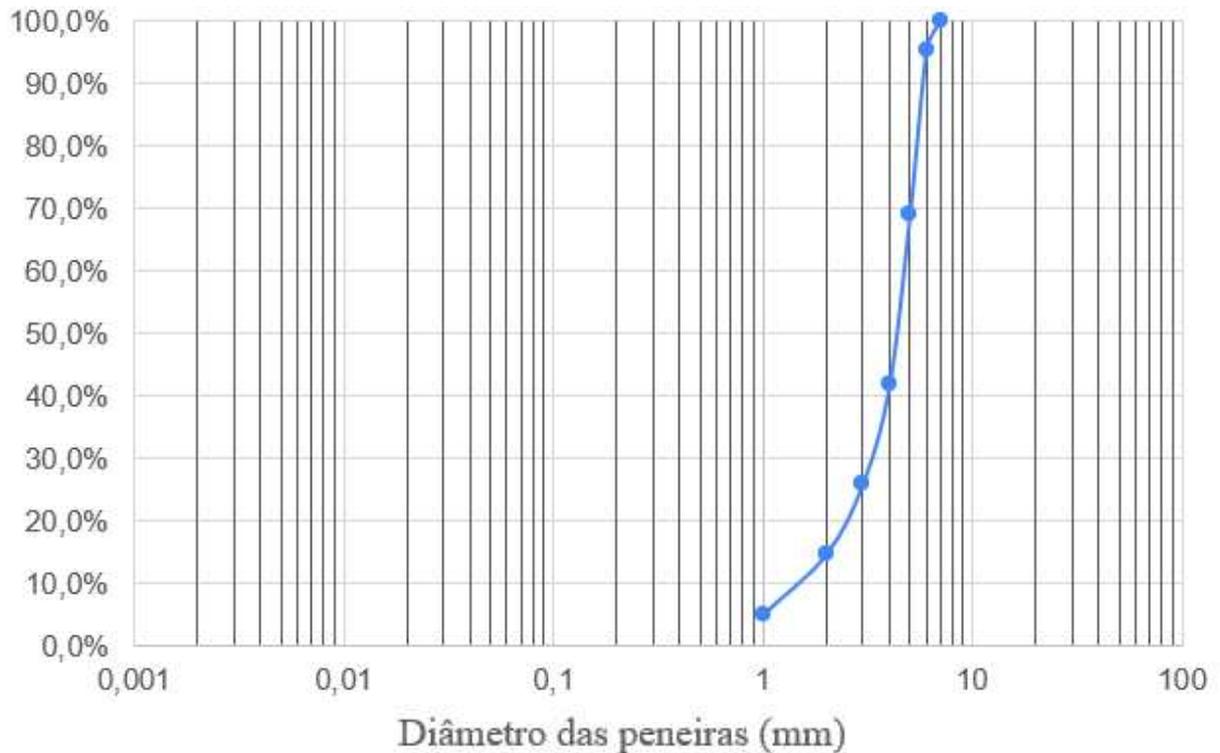
Resíduo de tijolos cerâmicos		
Peneiras(mm)	%Retido	%Acumulado
4,8	4,9%	4,9%
2,4	9,6%	14,6%
1,2	11,5%	26,0%
0,6	15,7%	41,8%
0,3	27,1%	68,9%
0,15	26,4%	95,3%
<0,15	4,7%	100,0%
Total	100,0%	-
Módulo de Finura		2,51
Dimensão Máxima Característica (mm)		4,8
Graduação		-
Massa Específica (kg/dm ³)		2,59
Massa Unitária (kg/dm ³)		1,47

Fonte: a autora (2021).

As massas específicas e unitárias dos resíduos de tijolos cerâmicos obtiveram valores 2,7% e 9,1% menores do que os agregados naturais, respectivamente. Este resultado pode ser explicado pelo fato de que os resíduos apresentam maior porosidade, o que influencia nestes valores.

A julgar pelo módulo de finura, o resíduo se mostrou mais fino que a areia natural. Além disso, a distribuição granulométrica do resíduo apresentou menos uniformidade que a granulometria da areia média, o que pode ser observado por meio da curva granulométrica apresentada pela Figura 15, a seguir.

Figura 15 - Curva granulométrica do resíduo de tijolos cerâmicos utilizados



Fonte: a autora (2021).

Ao avaliar a composição granulométrica do resíduo, é possível perceber que 4,7% do material tem dimensão menor que 0,15mm, em comparação a nenhuma porcentagem passante quando se tratou da areia média utilizada, o que aumenta as chances desse material contribuir para um efeito pozolânico, elevando a resistência. A diminuição da dimensão do material, também reflete no aumento do consumo de água, conforme visto anteriormente.

4.4. COMPARATIVO ENTRE AGREGADO MIÚDO E RESÍDUO DE TIJOLOS CERÂMICOS

A massa específica do resíduo apresentou-se menor que a da areia natural, fato que poderia ter contribuído para a maior porosidade do mesmo. Essa maior porosidade pode afetar negativamente a resistência, mas não é o único fator que rege esta característica para os concretos confeccionados.

Ao comparar a curva granulométrica do agregado miúdo e do resíduo, pôde-se observar que a areia natural possui uma granulometria considerada mais adequada dentro das zonas ótimas. Já o resíduo de tijolos cerâmicos ficou mais próximo da zona utilizável inferior.

Além disso, o resíduo apresentou maior percentual nas peneiras extremas para classificação granulométrica de areia média, ou seja, não só apresentou maior percentual retido nas peneiras com diâmetros superiores (#4,75mm a #1,18mm) quanto nas de diâmetro inferiores (#0,15mm e #0,30mm).

Já foi mencionado que o teor de partículas finas pode influenciar na quantidade de água de amassamento necessária, o que atua contra o ganho de resistência. Uma significativa parcela de frações finas inferiores a 75 µm pode prejudicar a qualidade dos resíduos quanto ao uso no concreto, tanto pela presença de argilominerais, como pelo aumento na demanda de água, além de poder trazer consequências no desempenho ante a fissuração e aderência.

Simultaneamente, muito se é discutido sobre a parcela de finos de resíduos cerâmicos maximizar a atividade pozolânica da mistura. Essa potencialidade pode gerar ganhos na resistência à compressão, evidenciados em alguns estudos que puderam obter bons resultados com agregados reciclados até certas porcentagens de substituição.

Considerando a perda de trabalhabilidade ao longo do aumento dos teores de substituição e conseqüentemente, maior demanda de água, é esclarecido que o comportamento do produto final foi substancialmente influenciado pelo resíduo cerâmico.

Desta forma, é possível confirmar algumas características já esperadas neste trabalho, como por exemplo: a taxa de absorção de água do material cerâmico é, de modo significativo, maior que o da areia natural; maiores quantidades de finos podem interferir tanto positivamente quanto negativamente na resistência; a quantidade necessária de água de amassamento é sensível aos agregados miúdos e substituições; as massas unitárias e específicas dos agregados são consideravelmente relevantes para estas características do produto final.

4.5. RESULTADOS DO ENSAIO DE ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE (*SLUMP TEST*)

Visando manter a mesma trabalhabilidade do concreto referência foi adequado a relação a/c, que conforme mencionado anteriormente, é um dos principais fatores que alteram a consistência do concreto no estado fresco. Foi determinada a quantidade de água necessária para cada uma das misturas alcançar o índice de consistência ($40 \pm 0,5$)mm, conforme preconiza a NBR 7215 (ABNT, 2009).

Os resultados obtidos no ensaio *Slump Test*, deixaram evidente que a relação água/cimento aumentou consideravelmente quanto o maior teor de substituição. Abaixo na Tabela 9, estão apresentadas, as relações água/cimento obtidas para a mesma consistência.

Tabela 9 - Resultado do *Slump Test* e fatores água/cimento

Nome	Resíduo Cerâmico (%)	Abatimento/Slump (mm)	Fator água/cimento
T0 (REF)	0	40mm	0,8
T1	15	40,5mm	0,9
T2	30	39,8mm	0,925

Fonte: a autora (2021).

A quantidade de água foi adicionada até que os concretos com resíduos atingissem uma consistência de forma a manter a mesma trabalhabilidade de modo a não prejudicar o processo de moldagem dos corpos de prova.

4.6. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL SIMPLES

Os resultados de resistência à compressão obtidos para os traços propostos estão apresentados na Tabela 10 abaixo.

Tabela 10 - Resultados do ensaio de resistência à compressão axial simples

Resistência à compressão axial							
Traço	Teor de substituição (%)	Resistência à compressão individual (MPa)				Média (MPa)	fator água/cimento
T0	0	12,68	13,88	13,65	14,61	13,70	0,8
T1	15	15,09	15,41	16,65	16,76	15,98	0,9
T2	30	14,91	14,35	14,39	14,59	14,56	0,925

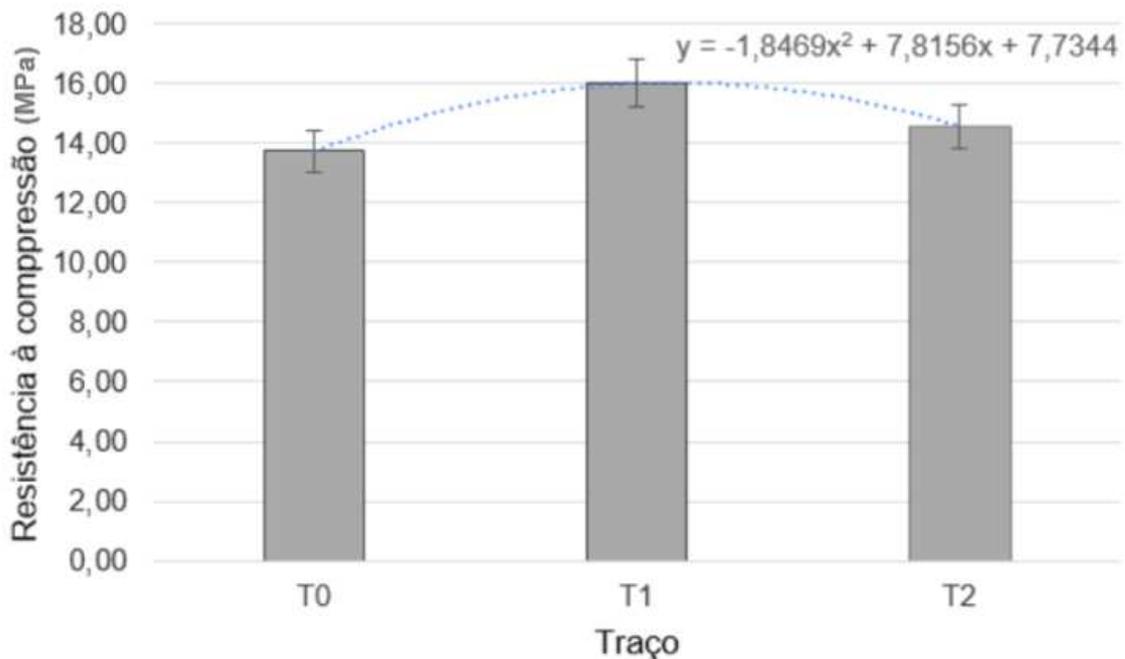
Fonte: a autora (2021).

Por meio da observação dos resultados, é possível dizer que o material cerâmico incrementou a resistência à compressão simples, tanto para os teores de 15% e 30% de substituição. De fato, o incremento não teve um aumento proporcional conforme maior o percentual de substituição, o que já era esperado de acordo com trabalhos anteriores, exceto o de Bicini (2006).

Quanto à resistência à compressão, não foi observado uma redução sistemática como foi apresentado por alguns estudos revistos anteriormente. Neste trabalho, pôde-se observar

que a presença de resíduos cerâmicos incrementou a resistência à compressão, principalmente para o traço de 15% de substituição. A Figura 16 apresenta uma comparação gráfica entre os resultados obtidos para os diferentes tipos de traços obtido aos 28 dias.

Figura 16 - Comparação gráfica entre resultados do ensaio de resistência à compressão



Fonte: a autora (2021).

A substituição da areia pelo agregado cerâmico fino, causou um aumento na resistência de até 15%. Foi possível verificar também que o traço T2 (30% de substituição), embora tenha perdido resistência em relação ao traço anterior (T1), continuou apresentando valores mais elevados que o traço referência (T0 - com 0% de substituição).

Por conta disso, é possível constatar que em até certo ponto, o aumento na quantidade de finos na mistura atrelado ao efeito pozolânico que o uso do material cerâmico possivelmente agrega, pode ser favorável para a resistência. Entretanto, ao passar de um ponto ótimo desconhecido e dependente de características intrínsecas a cada mistura, o aumento na quantidade de água e outras consequências que o alto teor de finos gera, contrapõe-se aos seus próprios efeitos positivos.

4.7. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

A Tabela 11, a seguir, apresenta os resultados obtidos para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral para os diferentes tipos de traços.

Tabela 11 - Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral

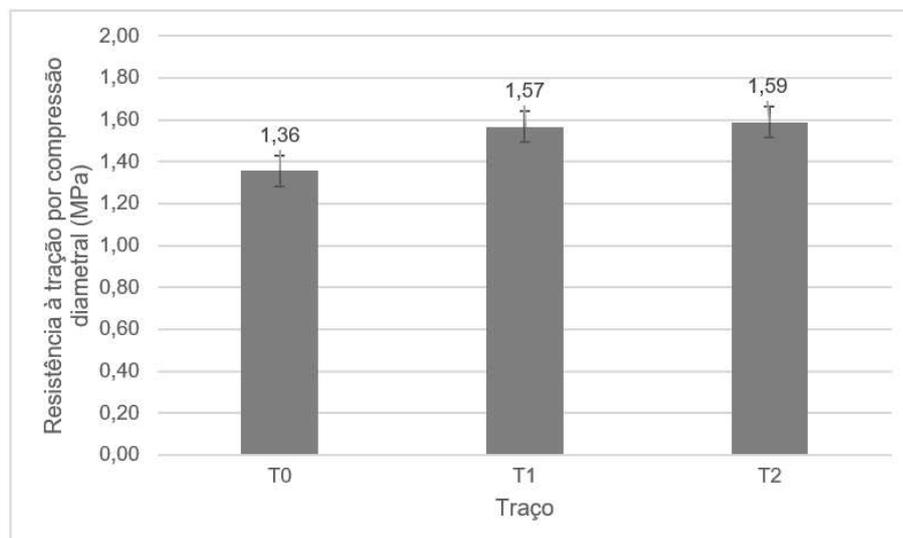
Resistência à tração por compressão diametral								
Traço	Teor de substituição (%)	fc individual (Mpa)				Média	Relação entre a resistência de compressão axial simples (%)	fator água/cimento
T0	0	1,53	1,26	1,35	1,29	1,36	9,90%	0,8
T1	15	1,46	1,66	1,56	1,59	1,57	9,81%	0,9
T2	30	1,36	1,43	1,92	1,64	1,59	10,91%	0,925

Fonte: a autora (2021).

Observa-se na Tabela 11, que em média, todos os valores encontrados para os traços com substituição foram superiores aos obtidos no concreto referência (T0). Porém, observa-se que os valores de resistência à tração ainda são bastante inferiores comparado à resistência à compressão e que os efeitos de modo geral, ficaram dentro do esperado, correspondendo, em média, a 10% da resistência à compressão.

Abaixo, a Figura 17 apresenta uma comparação gráfica entre os resultados obtidos para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

Figura 17 - Comparação gráfica entre resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral



Fonte: a autora (2021).

De acordo com a Figura 17, verifica-se a influência da substituição parcial do agregado miúdo por resíduo de tijolos cerâmicos na resistência à tração por compressão diametral dos concretos estudados.

Analisando tecnicamente os resultados, o acréscimo de finos e a utilização de resíduos cerâmicos foram benéficos aos concretos submetidos a ensaios de tração por compressão diametral.

Entretanto, os valores obtidos para 15 e 30% de substituição ficaram mais próximos entre si do que comparado com o traço T0, evidenciando que altos teores de substituição podem não contribuir linearmente para os ganhos de resistência à tração.

4.8. RESULTADOS DOS ÍNDICES FÍSICOS DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

A Tabela 12 a seguir apresenta os valores retirados como massa seca (Ms), massa saturada com superfície seca (Msat) e massa submersa (Mi) para extrair as características de índices físicos.

Tabela 12 - Resultados de Ms, Msat e Mi

Traços	Massa Seca (Ms) em kg	Massa Saturada Superfície Seca (Msat) em kg	Massa Submersa (Mi) em kg
Média T0 (Referência)	3437,4	3471,6	1951,2
Média T1 (15% de substituição)	3544,6	3565,5	1994,8
Média T2 (30% de substituição)	3440,7	3472,7	1941,9

Fonte: a autora (2021).

Com os valores obtidos, é possível calcular os índices físicos como: absorção de água, índice de vazios e a densidade aparente do concreto. A Tabela 13 apresenta o compilado de resultados extraídos para os índices físicos juntamente com a correlação entre as propriedades de resistência à compressão e à tração por compressão diametral e posteriormente, os resultados serão discutidos separadamente.

Tabela 13 - Correlação entre índices físicos e propriedades mecânicas

Traço	Teor de resíduo cerâmico (%)	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração por compressão (MPa)	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)	Densidade aparente (kg/m ³)
T0	0	13,70	1,36	0,99%	2,25%	2260,85
T1	15	15,98	1,57	0,82%	1,33%	2256,70
T2	30	14,56	1,59	0,93%	2,09%	2247,57

Fonte: a autora (2021).

Por meio dos resultados obtidos para a taxa de absorção de água do concreto em seu estado endurecido para cada tipo de traço, é observado que a menor taxa de absorção de água corresponde ao traço T1, com substituição de 15% de agregado miúdo por resíduo de tijolos cerâmicos.

Isso pode ser explicado pelo fato de que o T1, o qual também teve a maior resistência à compressão, teve o maior percentual de adição de água em relação à quantidade de resíduos presentes. Isto é, para 15% de substituição do agregado miúdo por resíduo, a quantidade de água teve um aumento de 12,5% em relação ao concreto referência, mas para 30% de substituição (T2), foi adicionado apenas mais 2,77% de água em relação ao T1, o que justifica ambos os traços (T0 e T2) terem maior absorção de água que o T1.

É possível observar que o T1 teve o menor índice de vazios e também apresentou o maior resultado de resistência à compressão, comprovando que a relação entre a resistência à compressão e o índice de vazios pode ser tratada como inversa, conforme apresentado anteriormente.

4.8.1. Índice de vazios no estado endurecido

A Tabela 14, a seguir, apresenta os resultados obtidos para o índice de vazios do concreto em seu estado endurecido para cada tipo de traço.

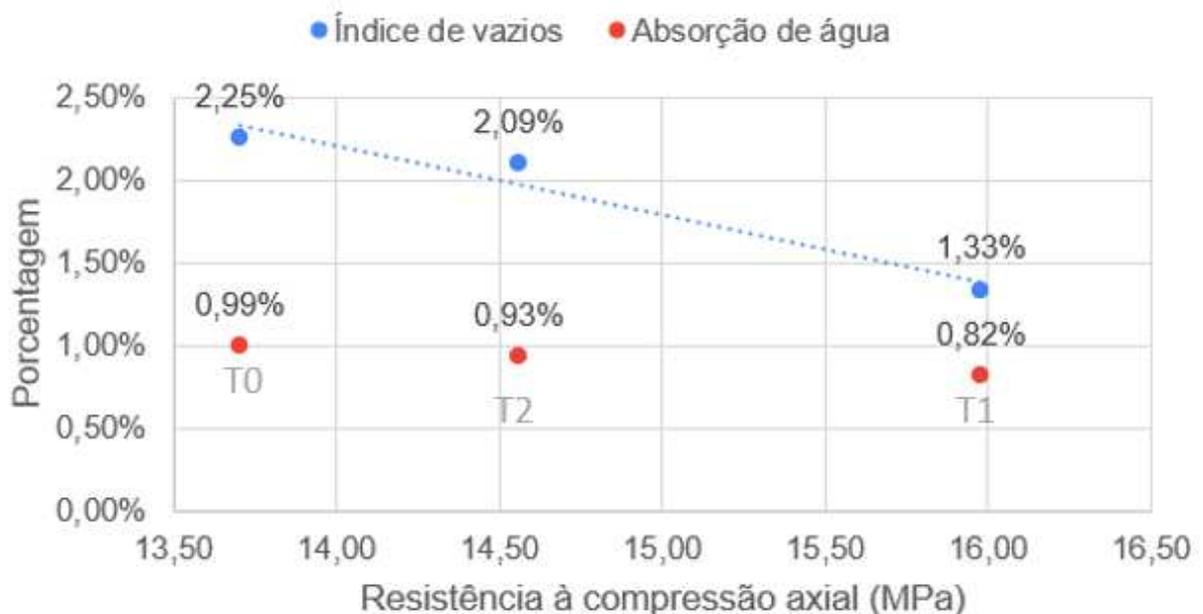
Tabela 14 - Resultado do índice de vazios para o concreto em estado endurecido

Índice de vazios (%)		
Traço	Teor de resíduo cerâmico (%)	Índice de vazios (%)
T0	0	2,25%
T1	15	1,33%
T2	30	2,09%

Fonte: a autora (2021).

A resistência à compressão de um concreto é inversamente proporcional ao índice de vazios, devido a porosidade. É possível constatar que, conforme o esperado, o traço com a menor resistência também é o que apresenta maior índice de vazios. A relação pode ser adequadamente descrita por uma equação de primeiro grau, apresentada na Figura 18, evidenciando que as propriedades no estado endurecido do concreto com resíduos cerâmicos se assemelham às verificadas em concretos convencionais. A Figura 18 também mostra os resultados de absorção de água que serão discutidos a seguir.

Figura 18 - Relação entre resistência à compressão, índice de vazios e absorção de água em concretos com substituição de agregado miúdo por resíduo cerâmico em diferentes teores



Fonte: a autora (2021).

4.8.2. Absorção de água

Constam na Tabela 15 os valores de absorção de água medidos para os 3 traços propostos: referência (T0), com substituição de 15% (T1) e com substituição de 30% (T2) por resíduos de tijolos cerâmicos. Foi considerada a média entre os corpos de prova para fazer a análise da propriedade.

Tabela 15 - Absorção de água dos concretos

Absorção de água (%)		
Traço	Teor de resíduo cerâmico (%)	Absorção de água (%)
T0 (REF)	0	0,99
T1	15	0,82
T2	30	0,93

Fonte: a autora (2021).

Pode-se notar, tanto pela Figura 18, quanto pela Tabela 15, que os concretos com resíduos (T1 e T2) não apresentaram maior absorção de água que o concreto referência (T0), e também, tiveram um menor índice de vazios, demonstrando que os resíduos não influenciaram tão negativamente na porosidade do composto. Afinal, foi observado que mesmo aumentando a quantidade de água, houve uma redução nesta propriedade.

4.8.3. Densidade aparente

A Tabela 16, a seguir, apresenta os resultados obtidos para a densidade aparente do concreto para diferentes tipos de traços.

Tabela 16 - Resultados da densidade aparente do concreto endurecido

Densidade aparente		
Traço	Teor de resíduo cerâmico (%)	Densidade aparente (kg/m³)
T0	0	2260,85
T1	15	2256,7
T2	30	2247,57

Fonte: a autora (2021).

Os resultados de densidade aparente do concreto em estado endurecido seguiram redução ao maior teor de resíduos de tijolos cerâmicos, isso deve-se a diferença entre massas específicas do agregado miúdo e do resíduo. Todavia, pode-se notar que, entre os traços T0 e T1 não houve diferença significativa, representando menos de 0,2% de variação. Isto é, apesar de ter-se reduzido parcialmente a massa específica do agregado miúdo, a densidade aparente do concreto se manteve, praticamente, equivalente.

6. CONCLUSÃO

Embora a adição de resíduos de tijolos cerâmicos moídos possa promover uma estrutura mais homogênea e conseqüentemente com menor índice de vazios, existe uma grande variabilidade na composição destes resíduos advindos de fatores como, temperatura de queima, composição da matéria-prima, homogeneidade e outros elementos que podem gerar variação nos resultados das características dos concretos utilizando este resíduo.

A finura do pó e a temperatura de queima dos materiais cerâmicos influenciam nas características do concreto produzido. Quando se aumenta a quantidade de finos, a atividade pozolânica e o efeito "filler" podem ser maximizados, contribuindo para a resistência à compressão do produto final. Porém, como visto anteriormente, o aumento da finura pode provocar maior necessidade de água para obter a mesma trabalhabilidade comparado ao concreto convencional, sendo capaz de contribuir para o aumento da porosidade no concreto, fator que atua contra a resistência.

Mesmo com as restrições impostas, os finos de resíduos cerâmicos podem apresentar um efeito positivo. Materiais cerâmicos apresentam características que favorecem algumas propriedades mecânicas de concretos. Argilas calcinadas em temperaturas não muito elevadas (que é o caso de tijolos cerâmicos de segunda linha, por exemplo) são os materiais cerâmicos que apresentam maior grau de pozolanicidade.

A massa específica do resíduo apresentou menores valores que a da areia natural, além disso, o resíduo apresentou maior percentual de partículas nas peneiras extremas para classificação granulométrica de areia média.

O desempenho do concreto no ensaio comparativo de consistência (*Slump Test*) conforme o aumento dos teores de substituição, exigiu incremento de 11% a 15% na quantidade de água para traços com substituição de areia por 15% e 30% de resíduos de tijolos cerâmicos. Este resultado evidenciou uma perda de trabalhabilidade considerável, esclarecendo que o comportamento do produto no estado fresco foi substancialmente influenciado pelo resíduo cerâmico.

A substituição da areia pelo agregado cerâmico, causou um aumento na resistência à compressão axial simples de até 15%, visto de acordo com o traço caracterizado pela substituição de 15% do agregado miúdo. Foi possível verificar também que o traço T2 (30% de substituição), embora tenha perdido resistência em relação ao traço anterior (T1), continuou

apresentando valores médios mais elevados que o traço referência (T0 - com 0% de substituição).

O acréscimo de finos e a utilização de resíduos cerâmicos foram benéficos aos concretos submetidos a ensaios de tração por compressão diametral. Os resultados apresentaram incrementos de 15% e 16% na resistência à tração para os traços com 15% e 30% de substituição, respectivamente.

Os dados observados como taxas de absorção de água e índice de vazios do concreto endurecido, em função da relação água/cimento e/ou em função do teor de substituição do agregado miúdo por resíduo cerâmico, mostram que nem sempre essas propriedades demonstram aumentar ou diminuir proporcionalmente à medida que se alteram essas características. Os valores de absorção de água e do índice de vazios não apresentaram relação imediata e inversamente proporcional entre a porosidade e resistência à compressão.

Em trabalhos anteriores mencionados, os resultados de resistência à compressão com valores mais elevados para os concretos contendo cerâmica triturada, são atribuídos à reação pozolânica causada pelos teores de sílica e alumina dos agregados cerâmicos com o produto de hidratação do cimento. Entretanto, estes resultados não podem ser considerados conclusivos quanto à influência pozolânica de materiais cerâmicos.

É possível apenas dizer que há indícios de que existe um efeito pozolânico e que ele depende do tipo e quantidade de material que está sendo utilizado, sendo necessário estudos mais aprofundados e relacionados caso a caso.

Para trabalhos futuros, pode ser sugerido:

- A avaliação do desempenho mecânico no concreto com a substituição de resíduos oriundos de outras cerâmicas, como telhas;
- A verificação do desempenho mecânico do concreto com a substituição dos mesmos percentuais de teores para estes resíduos sem a alteração da relação água/cimento;
- A avaliação da influência do desempenho mecânico de concretos com maiores percentuais de substituição de agregado miúdo pelos resíduos cerâmicos;
- A avaliação da influência do desempenho mecânico de concretos pela substituição de outros elementos, como cimento e agregado graúdo;
- A avaliação do desempenho de argamassas com substituição do agregado miúdo pelos resíduos cerâmicos.

REFERÊNCIAS

AHN, N. **An experimental study on the guidelines for using higher contents of aggregate microfines in Portland cement concrete**. 2000. Dissertation (Ph.D Thesis) – University of Texas, Austin, 2000.

ALBUQUERQUE, A. S. Agregados. *In*: BAUER, L. A. F. (org). **Materiais de construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA (ANICER). **Relatório anual: 2009**. Rio de Janeiro: ANICER, 2009. Disponível em: https://www.anicer.com.br/wp-content/uploads/2016/11/relatorio_2009.pdf. Acesso em: 30 nov. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12655**. Controle de cimento Portland: preparo, controle e recebimento: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16889**. Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16916**. Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16972**. Agregados: determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16973**. Agregados: determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738**. Concreto: procedimento para moldagem e cura dos corpos-de-prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5739**. Concreto: ensaio de compressão de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7211**. Agregados para concreto: especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7222**. Concreto e argamassa: determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9778**. Argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 248**. Agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

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

BANTHIA, N.; CHAN, C. Use of recycled aggregate in plain and fiber-reinforced shotcrete. **Concrete International**, [s. l.], v. 22, n. 6, 2000.

BAUER, L. A. F.; NORONHA, M. A. A. Estudo de dosagem. *In*: BAUER, L. A. F. (org). **Materiais de construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

BIGAS, J. P.; GALLIAS, J. L. Effect of fine mineral additions on granular packing of cement mixtures. **Magazine of Concrete Research**, [s. l.], v. 54, n. 3, p. 155-164, 2002.

BINICI, H. Effect of crushed ceramic and basaltic pumice as fine aggregates on concrete mortars properties. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 21, n. 6, p. 1191-1197, 2006.

BOTELHO, M. H. C.; MARCHETTI, O. **Concreto armado, eu te amo**. 2. ed. São Paulo: Edgar Blucher, 2004.

BRASIL. **Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010**. Brasília, DF: Presidência da República, 2010. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=636>. Acesso em: 22 nov. 2020

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

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

CORDEIRO, G. C. *et al.* Caracterização de resíduo de tijolo cerâmico moído para uso como aditivo mineral em concretos e argamassas. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44., 2002, Belo Horizonte, MG. **Anais [...]**. Belo Horizonte: IBRACON, 2002.

DAGNONI, V. H. **Análise das propriedades mecânicas, físicas e morfológicas do concreto com adição da fibra de carbono picotada**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura) – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2018.

FALCÃO, M. F. B.; SOARES, J. B. Considerações sobre o ensaio de compressão diametral no estudo de materiais de pavimentação. *In*: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 16., 2002, Natal, RN. **Anais [...]**. Natal: ANPET, 2002.

FARIAS, M. M.; PALMEIRA, E. M. Agregados para a construção civil. *In*: ISAIA, G. C. (ed.) **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2007.

FORNASIER, R. S. **Porosidade e permeabilidade do concreto de alto desempenho com microsilica**. 1985. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1985.

GIDRÃO, S. S. **Avaliação experimental do grau de confiabilidade dos ensaios à compressão do concreto efetivados em laboratórios**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2007.

HANSEN, T. C. **Recycled of demolished concrete and masonry**. London: Chapman e Hall, 1992.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil**: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. 2000. Tese (Livre docência) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

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

LAY, J. The effects of natural aggregates on the properties of concrete. *In*: NEWMAN, J.; CHOO, B. S. **Advanced concrete technology constituent materials**. Burlington: Elsevier, 2003.

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

LIAH, E. R. **Materiais de construção I**. Apostila do Curso de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica de Goiás. Goiânia: PUC Goiás, 2014.

LIBÂNIO, M. P.; MUZARDO, C. D.; SANTOS, S. P. **Estruturas de concreto**. Apostila do Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas. Campinas: Unicamp, 2004.

LIMA, J. A. R. **Proposição de diretrizes para a produção e normalização de resíduos de construção reciclado e de suas aplicações em argamassa e concretos**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

LIMEIRA, R. D. **Concreto: qualidade, classificação e propriedades**. Apostila do Curso de Tecnologia em Construção de Edifícios da Universidade Estadual de Campinas. Campinas: Unicamp, 2000.

LODI, V. H. **Viabilidade técnica e econômica do uso de areia de britagem em concretos de cimento Portland na região de Chapecó, SC**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

LUCENA, L. F. L. *et al.* Diagnóstico da geração de resíduos da construção civil no Município de Campina Grande. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GESTÃO E ECONOMIA DA CONSTRUÇÃO. Anais [...]*. Porto Alegre: [s. i.], 2005.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A. *et al.* Investigação da resistência à compressão e da resistividade elétrica de concretos com diferentes tipos de cimento. **Revista ALCONPAT**, Mérida, v. 4, n. 2, p. 116-132, 2014.

MEERT, R. L. B. **Concreto com incorporação de lodo de estação de tratamento de água in natura como agregado miúdo**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura) – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2019.

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

MENDES, S. E. S. **Estudo experimental de concreto de alto desempenho utilizando agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Departamento de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

MIRANDA, L. F. R.; SELMO, S. M. S. Part II: Analysis of the effect of materials finer than 75 μ m under accelerated aging performance. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 20, p. 625-633, 2006.

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

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

OLIVEIRA, A. L. **Contribuição para a dosagem e produção de peças de concreto para pavimentação**. 2004. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

OLIVEIRA, O. M. **Utilização de resíduos da indústria cerâmica para obtenção de novos produtos cerâmicos**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

- PEDROZO, R. F. E. **Influência da substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado fino em propriedades argamassas e concretos**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- PEREIRA, L. S. *et al.* Caracterização e controle do concreto com fibras para obras de infraestrutura com ensaio de tração indireta. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO CBC*, 61., 2019. **Anais [...]**. Fortaleza: [s. i.], 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/337161163_Caracterizacao_e_controle_do_concreto_com_fibras_para_obras_de_infraestrutura_com_ensaio_de_tracao_indireta. Acesso em: 30 nov. 2020.
- 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**, [s. l.], v. 20, n. 8, p. 569-577, 2006.
- PRUDÊNCIO, L. A. **Análise de viabilidade da exploração de jazidas de arenito para a produção de agregado miúdo para uso em concretos de cimento Portland**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.
- QUEBAUD, M. R.; BUYLE-BODIN, F. A reciclagem de materiais de demolição: utilização dos agregados reciclados no concreto. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO. Anais [...]*. São Paulo: ABCP, 1999.
- QUIROGA, P. N. **The Effect of the aggregates characteristics on the performance of Portland cement concrete**. 2003. Dissertation (Ph.D Thesis) – Faculty of the Graduate School of The University of Texas, Austin, 2003.
- RECENA, F. A. P. **Dosagem e controle da qualidade de concretos convencionais de cimento Portland**. Porto Alegre: EdiPUCRS, 2015.
- RICHARD, P. Water environmental and nanostructural network in a reactive powder concrete. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 18, n. 1, p. 23-29, 1996.
- SBRIGHI NETO, C. A importância dos conceitos tecnológicos na seleção de agregados para argamassas e concretos. **Revista Areia e Brita**, [s. l.], n. 12, p. 26-28, 2000.
- SBRIGHI NETO, C. Agregados para concreto. *In: ISAIA, G. C. (ed.). Ensino, pesquisa e realizações*. São Paulo: IBRACON, 2005.
- SILVA, E. F.; SILVA, M. R.; OLIVEIRA, M. O. F. **Resistências à tração por compressão diametral e por flexão de prismas em concretos de alto desempenho**. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, 43., 2001, Foz do Iguaçu, PR. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: [s. i.], 2001.

SILVEIRA, W. H. **Estudo na trabalhabilidade do concreto para blocos de vedação com consistômetro de Vebe**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica do Paraná, Campo Mourão, 2015.

SOUZA, F. C. **Avaliação de propriedades mecânicas e físicas do concreto com a adição de pó de brita**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura) – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2019.

SOUZA, M. F.; SORIANO, J.; PATINO, M. T. O. Resistência à compressão e viabilidade econômica de blocos de concreto dosado com resíduos de tijolos cerâmicos. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 3, p. 1-11, 2018.

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) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

TENÓRIO, J. J. L. **Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição visando aplicações estruturais**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Alagoas, Maceió, 2007.

TOLEDO FILHO, R. D. *et al.* Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 37, n. 9, p. 1357-1365, 2007.

TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. **Dosagem dos concretos de cimento Portland**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2002, Florianópolis, SC. **Anais [...]**. Florianópolis: IBRACON, 2011.

VEJMELOVÁ, E. *et al.* Properties of high performance concrete containing fine-ground ceramics as supplementary cementitious material. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 34, n. 1, p. 55-61, 2012.

VIEIRA, C. M.; SOARES, T. M.; MONTEIRO, S. N. Massa cerâmica para telhas: características e comportamento de queima. **Cerâmica**, São Paulo, v. 49, n. 312, p. 245-250, 2003.

WEIDMANN, D. F. **Contribuição ao estudo da influência da forma e da composição granulométrica de agregados miúdos de britagem nas propriedades do concreto de cimento Portland**. 2008. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

XAVIER, L. L. **Diagnóstico do resíduo da construção civil na cidade de Florianópolis**. 2008. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

YAZIGI, W. **A técnica de edificar**. 9. ed. São Paulo: SINDUSCON, 2008.

ZORDAN, S. E. **A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto.** 1997. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.