

UNIEVANGÉLICA

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

DIVINO DE PAULA RODRIGUES JÚNIOR

LUCAS DE SOUZA BERNARDO

**INFLUÊNCIA DO AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE
REVESTIMENTO CERÂMICO NO CONCRETO**

ANÁPOLIS / GO

2021

DIVINO DE PAULA RODRIGUES JÚNIOR
LUCAS DE SOUZA BERNARDO

INFLUÊNCIA DO AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE
REVESTIMENTO CERÂMICO NO CONCRETO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA

ORIENTADOR: EDUARDO MARTINS TOLEDO

ANÁPOLIS / GO: 2021

FICHA CATALOGRÁFICA

JÚNIOR, DIVINO DE PAULA RODRIGUES / BERNARDO, LUCAS DE SOUZA

Influência do agregado graúdo reciclado de revestimento cerâmico no concreto

75P, 297 mm (ENC/UNI, Bacharel, Engenharia Civil, 2021).

TCC - UniEvangélica

Curso de Engenharia Civil.

1. Agregado Graúdo	2. Concreto
3. Cerâmica	4. Substituição
I. ENC/UNI	II. Bacharel

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

JÚNIOR, Divino de Paula Rodrigues; BERNARDO, Lucas de Souza. Influência do agregado graúdo reciclado de revestimento cerâmico no concreto. TCC, Curso de Engenharia Civil, UniEVANGÉLICA, Anápolis, GO, 75p. 2021.

CESSÃO DE DIREITOS

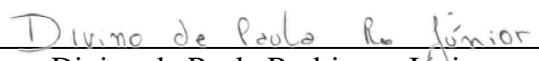
NOME DO AUTOR: Divino de Paula Rodrigues Júnior

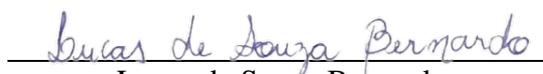
Lucas de Souza Bernardo

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: Influência do agregado graúdo reciclado de revestimento cerâmico no concreto

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil ANO: 2021

É concedida à UniEVANGÉLICA a permissão para reproduzir cópias deste TCC e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste TCC pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.


Divino de Paula Rodrigues Júnior
E-mail: divino.rodrigues@outlook.com.br


Lucas de Souza Bernardo
E-mail: lucasengn5@gmail.com

DIVINO DE PAULA RODRIGUES JÚNIOR
LUCAS DE SOUZA BERNARDO

**INFLUÊNCIA DO AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE
REVESTIMENTO CERÂMICO NO CONCRETO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO CURSO DE
ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL**

APROVADO POR:



EDUARDO MARTINS TOLEDO, Mestre (UniEVANGÉLICA)
(ORIENTADOR)



FILIPE FONSECA GARCIA, Especialista (UniEVANGÉLICA)
(EXAMINADOR INTERNO)



ANDERSON DUTRA E SILVA, Mestre (UniEVANGÉLICA)
(EXAMINADOR INTERNO)

DATA: ANÁPOLIS/GO, 27 DE MAIO DE 2021.

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo, agradeço a Deus pelas bênçãos e forças que me deu para chegar até aqui, sem desistir, e me colocando sob Sua graça e proteção.

Agradeço à minha família pelo apoio durante toda a vida, principalmente à minha mãe, Paula Jane, que sempre me incentivou a não desistir e lutar sempre para alcançar meus objetivos, por meio dos estudos, e meu pai, Divino, que me ensinou seus valores, para me tornar quem hoje sou.

À minha namorada, Bruna, que me ajudou e apoiou nos momentos difíceis, esteve ao meu lado quando precisei e me reforça todos os dias o objetivo de tanto esforço.

Aos companheiros de vida que a faculdade me deu, Lucas e Mathias, que durante toda essa caminhada se empenharam ao máximo para que todos evoluíssemos, sem deixar que o outro desistisse, sempre estando lá para apoiar.

Ao orientador deste trabalho, Eduardo, pela disciplina e companheirismo durante a execução desta pesquisa e pelo conhecimento que nos passou desde o início desta graduação, não medindo esforços para que nos tornemos excelentes profissionais.

Divino de Paula Rodrigues Júnior

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me proporcionado o início e agora a conclusão da minha graduação no curso de Engenharia Civil, por ter me instruído e iluminado ao longo destes 5 anos de grandes aprendizados. A caminhada até aqui não foi nada fácil, mas com toda honra e glória a Deus, consegui vencer todos os desafios e superar todas as dificuldades a qual fui colocado a prova.

Aos meus pais, Adeilson e Ana Lúcia, por estarem sempre presentes, me motivando a cada dia mais buscar o conhecimento através dos estudos, obrigado por sempre apoiarem as minhas escolhas e contribuírem tanto para minha vida pessoal e profissional. A vocês dois sou grato eternamente, e espero que essa seja a primeira grande vitória, de inúmeras outras que poderei compartilhar e comemorar.

Sou grato pela minha noiva Isabela por estar me apoiando a cada dia, sempre me motivando a alcançar o tão esperado título de bacharel em Engenharia Civil. Obrigado por cuidar da nossa filha, nos momentos em que eu dedicava cada segundo aos meus estudos para a realização deste sonho.

A minha pequena Ana Lívia, agradeço por ser minha principal motivação, desde o início quando soube que você viria ao mundo me empenhei a cada vez mais a concluir esta graduação, pois todos os planos da minha vida agora giram em torno de você, minha preciosidade. A você dedico mais esta grande vitória da minha vida, te amo muito filha!

Agradeço ao meu amigo Divino, ao qual tive a honra de realizar este grande estudo, para juntos conseguir produzir este TCC. Grande parceiro, que o conheci antes mesmo da graduação, uma pessoa que levarei como amigo para o resto da minha vida.

Ao Professor e orientador Eduardo Toledo, que nos ajudou ao desenvolvimento desta pesquisa, e pelos outros conhecimentos transmitidos a nós através das matérias que ministrou para nossa turma de forma excepcional e exemplar.

Ao meu amigo e companheiro de turma Mathias, que desde o começo nos acompanha nesta jornada, obrigado pelo empenho em todos os trabalhos e atividades no qual desenvolvemos em grupo, por estar sempre disposto a ajudar.

Por fim quero deixar uma mensagem que li a bastante tempo e guardo comigo desde então: “Todas as conquistas começam com o simples ato de acreditar que elas são possíveis”, Autor desconhecido.

Lucas de Souza Bernardo

RESUMO

Devido à crescente demanda no uso do concreto nas últimas décadas, torna-se cada dia mais evidente a necessidade de soluções que reduzam a agressão ao meio ambiente, causada pela retirada de agregados e elementos utilizados na confecção do concreto da natureza. Buscando soluções para este problema, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho mecânico de concretos produzidos com substituição parcial do agregado graúdo por agregado reciclado da construção civil, a cerâmica. Para isto, foram produzidos 48 corpos de prova, divididos entre traços de referência e de substituição de agregado graúdo por cerâmica, nos graus de 25%, 50% e 75%, os quais foram submetidos ao teste de compressão e tração por compressão diametral. Os restos cerâmicos utilizados na substituição foram lavados, caracterizados e submetidos a testes de laboratório para definir suas propriedades, assim como todos os demais agregados utilizados na confecção do concreto. As propriedades do concreto foram avaliadas em 7 e 28 dias após a moldagem, e foi possível verificar que, quanto maior a taxa de substituição do agregado graúdo, menor se tornou a resistência do concreto, tanto para compressão, quanto tração. Para a substituição de 25%, em 28 dias, o concreto atingiu a resistência esperada de 20MPa, apresentando uma diferença, para menos, de aproximadamente 7% do traço referência. As demais substituições não atingiram o valor esperado de 20MPa aos 28 dias. Outras pesquisas acadêmicas, como a dos engenheiros Araújo, Felix, Silva e Santos (2016), apresentam resultados semelhantes, onde, quanto maior o grau de substituição no concreto, menor será sua resistência em relação ao concreto referência. Portanto, através dos resultados obtidos, avaliando-se o desempenho mecânico do concreto, é possível verificar baixa diferença de resultados entre o traço referência e o traço com substituição de 25% de agregado graúdo, podendo este atender a solicitações de projetos de engenharia, desde que não sejam utilizados para fins estruturais, pois são necessários maiores experimentos para isto.

PALAVRAS-CHAVE: Reciclagem; Agregado graúdo; Substituição; Cerâmica; Concreto;

ABSTRACT

Due to the growing demand in the use of concrete in the last decades, the need for solutions that reduce the aggression to the environment, caused by the removal, from nature, of aggregates and elements used in the manufacture of concrete, becomes increasingly evident. Seeking solutions for this problem, this paper aims to evaluate the mechanical performance of concretes produced with partial replacement of the coarse aggregate by recycled aggregate from civil construction, the ceramic. For this, 48 specimens were produced, divided between reference traces and substitution of coarse aggregate for ceramics, in the degrees of 25%, 50% and 75%, which were submitted to the compression and tensile test by diametrical compression. The ceramic remnants used in the substitution were washed, characterized and subjected to laboratory tests to define its properties, as were all the other aggregates used in making the concrete. The properties of the concrete were evaluated at 7 and 28 days after molding, and it was possible to verify that the higher the rate of substitution of the coarse aggregate, the lower the resistance of the concrete became, both for compression and traction. For the replacement of 25%, in 28 days, the concrete reached the expected strength of 20Mpa, showing a difference, for less, of approximately 7% of the reference line. The other substitutions did not reach the expected value of 20MPa at 28 days. Other academic researches, such as that of engineers Araújo, Felix, Silva and Santos (2016), present similar results, in which the higher the degree of substitution in concrete, the lower its strength compared to the reference concrete. Therefore, through the results obtained, evaluating the mechanical performance of the concrete, it is possible to verify a low difference in results between the reference mix and the mix with substitution of 25% of coarse aggregate, which can meet requests for engineering projects, as long as they are not used for structural purposes, because more experiments are needed for this.

KEYWORDS: Recycling; Coarse aggregate; Substitution; Ceramics; Concrete

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Pirâmide escalonada de Djoser	20
Figura 2 - Ponte Coalbrookdale.....	21
Figura 3 - Edifício Hennebique	22
Figura 4 - Petronas Towers.....	23
Figura 5 - Forma das partículas e o índice de vazios.....	27
Figura 6 - Peneiramento utilizado para graduação do agregado reciclado de revestimento cerâmico.....	50
Figura 7 - Slump test realizado antes da moldagem dos corpos de prova.....	52
Figura 8 – Resultado obtido no gráfico das curvas de Abrams	53
Figura 9 – Corpos de prova moldados.....	60
Figura 10 – Realização do ensaio de compressão axial.....	60
Figura 11 -Realização do ensaio de compressão diametral.....	63
Figura 12 - Evolução da resistência a compressão axial até os 28 dias.....	64
Figura 13 - Corpo de prova do traço de referência.....	66
Figura 14 - Corpo de prova do traço com substituição de 25%	66
Figura 15 - Corpo de prova do traço com substituição de 50%	67
Figura 16 - Corpo de prova do traço com substituição de 75%	67
Figura 17 – Resultados dos ensaios de resistência a compressão axial aos 7 e 28 dias	68
Figura 18 – Resultados dos ensaios de resistência a compressão diametral aos 7 e 28 dias....	68

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Síntese das quatro grandes revoluções na arte de projetar e construir estruturas ..	24
Quadro 2 – Índices da expressão de previsão do módulo de elasticidade do concreto	31
Quadro 3 – Quantidade de material em função da dimensão dos grãos maiores	42
Quadro 4 – Massa mínima de amostra para ensaio	43
Quadro 5 – Consumo de água (C_a) no método de dosagem ABCP.....	45
Quadro 6 – Volume de agregado graúdo (V_b) no método de dosagem ABCP	46
Quadro 7 – Cronograma de ensaios.....	48
Quadro 8 – Resultados dos ensaios de compressão axial aos 7 dias	59
Quadro 9 – Resultados dos ensaios de compressão diametral aos 7 dias.....	62
Quadro 10 - Resultados dos ensaios de compressão axial aos 28 dias	63
Quadro 11 - Resultados dos ensaios de compressão diametral aos 28 dias	65

LISTA DE TABELA

Tabela 1 – Resultados dos ensaios para brita 01	49
Tabela 2 – Resultados dos ensaios para agregado reciclado de revestimento cerâmico	50
Tabela 3 – Resultados dos ensaios para areia média	51
Tabela 4 – Resultados dos ensaios para o cimento.....	51

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLA

ABCP	Associação Brasileira Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CP	Corpo-de-prova
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
RCD	Resíduo de construção e demolição

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	JUSTIFICATIVA.....	15
1.2	OBJETIVOS	17
1.2.1	Objetivo geral	17
1.2.2	Objetivos específicos.....	17
1.3	METODOLOGIA	17
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	18
2	CONCRETO	19
2.1	HISTÓRIA	19
2.2	O FUTURO.....	24
2.3	COMPOSIÇÃO DO CONCRETO	25
2.4	PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO	27
2.4.1	Resistência a compressão	28
2.4.2	Massa específica.....	29
2.4.3	Resistência a tração	29
2.4.4	Módulo de elasticidade.....	30
2.4.5	Fluência	31
2.5	DEGRADAÇÃO AO MEIO AMBIENTE	31
2.5.1	Decapamento ou cava.....	32
2.5.2	Desmonte e carregamento.....	32
2.5.3	Transporte interno	33
2.5.4	Britagem e peneiramento.....	33
2.5.5	Vantagem ou desvantagem	33
3	AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE REVESTIMENTO CERÂMICO.....	34
3.1	METODOLOGIA	34
3.1.1	Traço.....	34
3.1.2	Moldagem dos corpos de prova.....	35
3.1.3	Cura do corpo de prova	35
3.1.4	Preparação da base para ensaio.....	35
3.1.5	Ensaio de resistência a compressão	36
3.1.6	Ensaio de resistência a tração.....	37
3.1.7	Determinação da massa unitária.....	37

3.1.8	Determinação da massa específica do agregado miúdo	38
3.1.9	Determinação da massa específica do agregado graúdo	39
3.1.10	Dimensão máxima característica	40
3.1.11	Módulo de finura	41
3.1.12	Teor de umidade	41
3.1.12.1	Agregado miúdo.....	41
3.1.12.2	Agregado Graúdo	42
3.1.13	Dosagem: método ABCP	44
3.1.13.1	Curva de Abrams	45
3.1.13.2	Consumo de materiais: água, cimento, agregado miúdo, e agregado graúdo	45
3.1.14	Cronograma do procedimento experimental	48
4	PROGRAMA EXPERIMENTAL	49
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS	49
4.1.1	Agregado graúdo: Brita 01	49
4.1.2	Agregado graúdo de substituição: Cerâmica.....	49
4.1.3	Agregado miúdo: Areia média	51
4.1.4	Aglomerante: Cimento.....	51
4.2	DETERMINAÇÃO DO TRAÇO	51
4.2.1	Determinação da fixação da resistência de dosagem:	52
4.2.2	Determinação da relação água/cimento:	53
4.2.3	Determinação do consumo de água:	53
4.2.4	Determinação do consumo de cimento:.....	54
4.2.5	Determinação do consumo do agregado graúdo:	54
4.2.6	Determinação do consumo do agregado miúdo:	55
4.2.7	Traço unitário em massa:	56
4.2.8	Volume de concreto a ser produzido:	56
4.2.9	Quantidade de insumos em massa:	57
4.2.10	Quantidade de massa de agregado reciclado de revestimento cerâmico:	58
4.2.10.1	Traço 25%:.....	58
4.2.10.2	Traço 50%:.....	58
4.2.10.3	Traço 75%:.....	58
4.3	RESULTADOS DOS ENSAIOS	59
4.3.1	Resultado dos ensaios de 7 dias	59
4.3.2	Resultado dos ensaios de 28 dias	62

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
REFERÊNCIAS.....	71

1 INTRODUÇÃO

A grande produção de resíduos sólidos, provenientes da construção civil, coloca em alarme a necessidade da adoção de políticas e estratégias de destinação ou redução de geração dos mesmos. Este tipo de resíduo corresponde a aproximadamente 50% do total de resíduos sólidos gerados em cidades do Brasil e do mundo, sendo 29,1% desse entulho restos de produtos cerâmicos (PINTO, 1999).

É importante destacar as principais fontes de perda de revestimento cerâmico na construção civil, que somam, com outros produtos cerâmicos, quase um terço dos entulhos gerados, seja em obras formais ou informais. Segundo Sacomano, José Benedito e outros (2004), são 3 os principais tipos de perdas de revestimento cerâmico em obras:

- Perdas por transporte: Estão relacionadas ao manuseio inadequado e excessivo de material, por má definição logística.
- Perdas nos estoques: Estoques excessivos devido à má formulação do cronograma de entregas e falta de cuidado no armazenamento.
- Perdas no movimento: Ocorrem devido à movimentação inadequada por parte dos funcionários seja no estoque, seja no local de aplicação final do produto.

Perdas podem ser evitadas e reduzidas com políticas sustentáveis, melhorias em técnicas e planejamento e treinamento com funcionários que atuam na execução do serviço, mas nem todas. Inevitavelmente, será gerado resíduo no decorrer de construções e demolições na construção civil e neste processo deverá haver intervenção dos gestores, os quais, na maioria das vezes, agem passivamente, deixando que o entulho se acumule e seja descartado no meio ambiente, nem sempre em aterros regularizados. Esta situação pode ser denominada “gestão corretiva”, que consiste em descartar o resíduo que é gerado, não buscando soluções para a causa do problema ou provocando intervenções que evitem o alto acúmulo com deposições irregulares.

Além disso, graves problemas ambientais e sanitários são acarretados com o descarte irregular de entulho na natureza. Dentre os problemas ambientais vale citar a contaminação do solo e da água pluvial, que busca ali a infiltração para o lençol freático ou caminho para rios. Problemas sanitários podem ser desenvolvidos com a proliferação de insetos e organismos, que causam doenças e são nocivos à saúde da população.

A forma mais eficaz de reduzir resíduos é na fonte geradora, porém, quando não é possível fazê-lo, é necessário aderir práticas de reciclagem e reuso, que é a segunda melhor opção a ser adotada. Um meio de reutilização de restos de construção é a substituição ou adição

destes ao concreto, desde que as suas características não sejam alteradas ou prejudicadas. Um dos principais empecilhos para o uso de entulhos na construção é conhecer a sua origem e os processos químicos e físicos ao qual foi submetido o material, o que pode alterar sua composição e ação no concreto (SCHALCH, 2002).

Diversos estudos sobre substituição ou adição ao concreto de resíduos reciclados da construção civil e demolição já foram realizados, obtendo resultados mecânicos que são influenciados principalmente pela porcentagem de substituição ou adição de RCD ao concreto. A substituição completa do agregado graúdo causa a perda de resistência entre 20% e 30%, porém com a substituição de menos de 20% do agregado, essa perda de resistência fica abaixo de 5%. Com isso, é necessário maior consumo de cimento na produção do concreto para diminuir a perda de resistência (ALAEJOS *et al.*, 2004). Este consumo de cimento é um importante fator para a resistência do concreto, sendo avaliado na relação *a/c*. Resíduos cerâmicos apresentam alta absorção da água, reduzindo a relação *a/c* do concreto, o que afeta suas características. Para a produção do concreto reciclado é necessário analisar todas as propriedades do material a ser utilizado, como sua resistência mecânica e absorção.

Em baixas relações *a/c*, o agregado se torna o componente mais fraco da mistura, o que limita a resistência à compressão final do concreto. Portanto, à medida em que se aumenta a relação *a/c*, os valores obtidos de resistência do concreto reciclado e do concreto convencional se tornam cada vez mais parelhas (CHEN *et al.*, 2003).

Estudos com o uso de cerâmica proveniente de tijolos para a confecção de blocos de pavimentação de concreto apontaram que a substituição do agregado pode reduzir a densidade e a resistência à compressão, porém aumentar a absorção de água no concreto (POON; CHAN, 2007).

Diante das informações apresentadas, o trabalho tem como foco, além de contribuir com o meio acadêmico/técnico, apresentar as características mecânicas do concreto produzido com agregado graúdo reciclado proveniente de restos de revestimento cerâmico da construção civil.

1.1 JUSTIFICATIVA

No decorrer da evolução histórica o setor da construção civil passou a se destacar pelo contínuo crescimento e aprimoramento, em relação a qualidade e tecnologias empregadas nas edificações. Este processo evolutivo gerou um aumento gradativo na extração de recursos

naturais em todo o planeta, onde cada vez mais as fontes de extração de matéria prima estão ficando longe dos grandes centros urbanos, assim onerando todo o custo da cadeia de produção.

A produção dos agregados utilizados nas obras civis, é um belo exemplo de exploração que vem ocorrendo, onde as jazidas de minérios estão sendo cada vez mais degradadas, ocasionando um grande desequilíbrio ambiental, para poder satisfazer os interesses do mundo da construção. Em média no Brasil, anualmente, é consumido cerca de 210 milhões de toneladas de agregados (gráudo e miúdo) somente na produção de concreto e argamassas, apontam os estudos estimados por John (2000). Diversos outros países seguem o padrão de consumo elevado, como exemplo o Reino Unido consumiu em 1992 uma quantidade aproximada de 240 milhões de toneladas de agregados (KHALAF; DEVENNY *et al*, 2004).

Em paralelo ao crescimento das obras de construção civil, elevou-se também o pensamento crítico sobre as questões ambientais e ecológicas, fazendo com que as empresas e centros de pesquisa deste ramo desenvolvam novas formas de produção de materiais e gestão dos resíduos gerados ao decorrer do processo construtivo. A reciclagem vem contribuindo como forma de amortizar os impactos ao meio ambiente, aplicando assim o conhecido termo de desenvolvimento sustentável.

Diversas pesquisas apontam que é possível usar os resíduos de construção e demolição (RCD) para diversos fins, como: agregados de preenchimento para pavimentação, confecção de concretos (sendo eles moldados in loco ou pré moldados), produção de argamassas dentre outros. Em alguns países já se encontra a utilização destes resíduos em concretos estruturais (MIRANDA, 2000).

Existe a carência de estudo da reutilização de resíduos separadamente, as pesquisas existentes analisam os RCD'S como um só, assim podendo ocorrer uma perda de desempenho das propriedades físico-mecânicas do concreto. Por este motivo deve-se investir em estudos dos materiais de reutilização de uma forma separada, para saber quais são mais benéficos para tal utilização.

Assim é de suma importância que o meio acadêmico contribua para a contínua manutenção e melhoria no processo produtivo dos agregados reutilizáveis, desenvolvendo estudos que comprovem a eficiência e qualidade, conseqüentemente contribuindo para a quebra de certos paradigmas dos modos de produção antigo, assim satisfazendo tanto os produtores quanto a sociedade que clama pela preservação do meio ambiente.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O presente estudo tem como finalidade avaliar, através de ensaios, as propriedades mecânicas do concreto produzido com a substituição parcial de agregados graúdos por agregados reciclados provenientes de revestimento cerâmico.

1.2.2 Objetivos específicos

Para alcançar o estudo proposto, abaixo especifica-se os seguintes passos a serem executados:

- Estudo sobre as propriedades do concreto;
- Analisar a composição do concreto;
- Definir traços do concreto utilizando o agregado reciclado em conjunto com o agregado convencional em diferentes quantidades;
- Realizar testes em laboratório para obter dados sobre as principais propriedades do concreto;
- Comparar os resultados do concreto convencional com os do concreto de agregado reciclado de revestimento cerâmico;
- Definir qual será a melhor aplicação para o concreto composto por agregado reciclado de revestimento cerâmico.

1.3 METODOLOGIA

Neste estudo foi verificado a resistência à compressão e tração do concreto endurecido. Os testes foram feitos por moldes cilíndricos de concreto segundo a NBR 5738 (ABNT, 2016), e os ensaios através das normativas atualmente em uso, tais quais os ensaios à compressão segundo a NBR 5739 (ABNT, 2018) e de tração diametral segundo a NBR 7222 (ABNT, 2011)

O estudo teórico de traço e aplicação do agregado reciclado foi embasado em literaturas, artigos e teses desenvolvidos pela comunidade científica e acadêmica.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O estudo foi dividido em 5 capítulos, contemplando a seguinte cronologia:

- Capítulo 1 - Será feito a exposição do tema, os objetivos traçados para alcançar os resultados esperados, e a relevância do estudo no meio científico e social no qual levou a escolha do tema;
- Capítulo 2 - Contém os conceitos base da pesquisa, tendo como embasamento teórico as revisões literárias amplamente difundidas no meio acadêmico;
- Capítulo 3 - Será apresentado o objeto de estudo, descrevendo suas principais características e propriedades;
- Capítulo 4 - Será realizado a parte experimental, demonstrando todos os passos, seguindo fielmente a metodologia indicada para se obter os resultados. Serão expostos os resultados obtidos no capítulo anterior, comparando com resultados já expressos em outras pesquisas e literaturas;
- Capítulo 5 – Contém a conclusão sobre os resultados obtidos após a análise feita sobre os dados levantados por meio do procedimento experimental.

2 CONCRETO

2.1 HISTÓRIA

Um dos mais importantes materiais utilizados na construção civil é o concreto de cimento Portland, sendo considerado um dos materiais mais recentes descobertos a ser empregado como material estrutural nas edificações e em obras de infraestrutura. Com isso, a construção civil ganhou mais um material para ser empregado em estruturas, por apresentar versatilidade e segurança e, conseqüentemente, aumentar a qualidade de vida da humanidade.

O concreto convencional que conhecemos nos dias atuais foi desenvolvido e utilizado primeiramente pelo inglês John Smeatons no ano de 1756, porém somente a partir do século XX foi empregado com amplitude no ramo civil. Atualmente, o concreto é um dos materiais mais consumidos mundialmente, perdendo apenas para a água. Em virtude disso, inúmeras pesquisas surgem cotidianamente, afim de aprimorar as propriedades deste material cada vez mais.

Para entender como o concreto chegou a este posto de material de construção mais utilizado no planeta, é necessário entender os materiais que eram utilizados em obras civis pelas civilizações antigas. Desde os primórdios, houve quatro grandes revoluções na construção civil no geral: as grandes estruturas construídas por rochas, as exuberantes estruturas metálicas, e por fim o concreto estrutural como material versátil e resistente sendo dividido em dois momentos (descoberta e supremacia do concreto como elemento estrutural).

A primeira revolução da construção civil começou no Egito antigo, onde a sociedade tinha como tradição construir monumentos para abrigar os restos mortais dos seus imperadores. A priori, eram utilizados nessas construções materiais como: madeira, cerâmica e argila; mas como na época não havia tecnologia suficiente para o tratamento destes materiais, a estrutura se deteriorava com o passar do tempo, até entrar em colapso (HELENE; ANDRADE, 2011).

No Governo do imperador Djoser, o até então, político e médico Imhotep gerenciou a construção do templo de acolhimento dos restos mortais do imperador. Nesta gestão Imhotep teve a ousadia e brilhante ideia de utilizar blocos rochosos para projetar e construir a primeira pirâmide do mundo que utilizou este material como estrutura. Os blocos rochosos foram dispostos de uma forma escalonada, e recebeu o nome de Pirâmide escalonada de Djoser (Figura 1) e resistiu até os dias atuais. Graças a isto, Imhotep recebeu o título de primeiro arquiteto do mundo e reinventou as construções através da utilização de blocos de rocha em estruturas de grande porte (HELENE; ANDRADE, 2011).

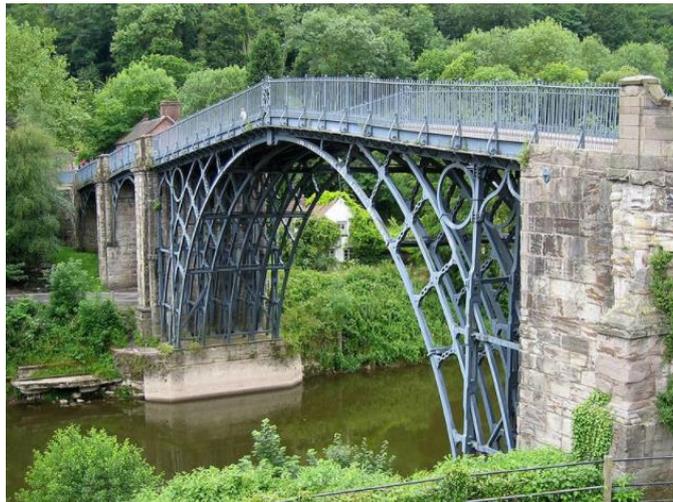
Figura 1 - Pirâmide escalonada de Djoser



Fonte: HELENE; ANDRADE, 2011.

A segunda revolução da construção civil ocorreu no final do século XVIII e início do século XIX, devido a chegada do aço, trazido pela revolução industrial. Este material proporcionou à engenharia construir edifícios autoportantes e estruturas com grandes vãos, assim substituindo grande parte das estruturas em madeiras e blocos de rochas por não conseguirem atingir o mesmo desempenho que o aço.

Uma das primeiras construções a se utilizar o aço majoritariamente como estrutura foi a ponte de *Coalbrookdale Bridge* (Figura 2), executada em 1781, na Inglaterra. Posteriormente em 1883, em Nova York, foi construída a exuberante Ponte do Brooklyn, uma enorme ponte suspensa por cabos de aço galvanizados e sustentada por uma fundação feita com blocos de rocha. No ano de 1889, o mundo da engenharia parou com a inauguração da estrutura mais alta feita até então, 312 metros, a grandiosa *La Tour Eiffel*. A partir de então, diversos edifícios começaram a adotar o aço como elemento estrutural e utilizar as alvenarias para a parte de vedação das estruturas (HELENE; ANDRADE, 2011).

Figura 2 - Ponte Coalbrookdale

Fonte: BRITO, 2013.

O concreto foi utilizado há muito tempo, em 312 a.C, no império Romano, onde os construtores da época utilizaram uma mistura simplória, constituída por cal hidratada e argila pozolânica. Essa mistura foi aplicada na pavimentação da Via Ápia, uma rota bastante conhecida em Roma, e o material apresentava uma resistência muito alta para a época (baixa resistência para o concreto convencional utilizado hoje em dia), resistindo até os dias atuais (KAEFER, 1998). Essa aplicação não foi suficiente para o material ser difundido em outras obras romanas ou em qualquer outra sociedade da época, sendo esquecido até o século XIX.

Foi no ano de 1824 em que o concreto começou a ser novamente utilizado no cenário mundial. Na Inglaterra, John Aspdin patenteou o cimento Portland, sendo considerado o principal material constituinte do concreto (KAEFER, 1998). Nos primeiros anos de utilização, o concreto não foi aplicado para fins estruturais, mas principalmente em peças pré-moldadas como: vigas, postes, vasos, e etc. Em 1875, foi difundido o conceito de concreto armado, fazendo com que empresas dos Estados Unidos, França e Inglaterra iniciassem os primeiros estudos desta combinação como elemento estrutural, com o intuito de tornar o material o foco principal da terceira grande revolução da construção civil, como demonstra o Quadro 1.

Em 1899, o francês François Hennebique construiu a primeira ponte em concreto armado, mostrando que era possível utilizá-lo como elemento principal em sistemas estruturais. E finalmente, em 1901, o francês mostrou ao mundo inteiro o seu edifício residencial (Figura 3) de 7 pavimentos construído em concreto armado, substituindo a estrutura metálica pelo mais novo “esqueleto estrutural”, e a substituição dos pisos de madeira por lajes compostas com concreto e armadura. A partir daí, iniciou-se uma grande revolução, espalhando o concreto para todo o mundo, com o potencial tanto em estruturas como em acabamentos.

Figura 3 - Edifício Hennebique



Fonte: HELENE; ANDRADE, 2011.

No Brasil o concreto teve grande aceitação pelos construtores a partir do século XX, se destacando no cenário global por construir dois edifícios com mais de 100m (edificações muito altas para a época): A Noite e Martinelli. A primeira norma publicada do concreto como elemento estrutural foi no ano de 1931 ficando atrás das grandes potências da época: Alemanha, Estados Unidos, França e Inglaterra.

Até a década de 90, por existir inúmeras indústrias metalúrgicas, o aço ainda competia com o concreto para definir qual material teria supremacia em estruturas de grande porte, mas foi em 1997, na Malásia, que tudo mudou. Na cidade de Kuala Lumpur, a engenharia e arquitetura deu rumo à 4° grande revolução das estruturas, onde foi projetado e construído com concreto de alto desempenho as mais altas estruturas do mundo até então, os edifícios Petronas Tower (Figura 4), com 452m de altura, superando qualquer estrutura já feita até sua data de lançamento. A partir daí, o mundo da construção adotou o concreto como principal material estrutural para edifícios de grande porte, estudando-o e revolucionando-o a cada dia.

Figura 4 - Petronas Towers



Fonte: KAEFER, 1998.

Quadro 1 - Síntese das quatro grandes revoluções na arte de projetar e construir estruturas

Grandes mudanças	Período	Obra emblemática	Projetista	Comentários
1 ^a revolução	2800. a.C. a 2500 a.C.	Pirâmide escalonada de Djoser – Egito.	Arquiteto alquimista, político Imhotep – Egito.	A engenharia e a arquitetura de estruturas podiam construir obras duráveis, majestosas e de grandes proporções.
2 ^a revolução	1779	Iron Bridge em Coalbrookdale - Inglaterra	Arquiteto T. M. Pritchard com aço produzido por Abraham Darby III - Inglaterra	A engenharia estrutural e a arquitetura podiam projetar obras antes inimagináveis, de forma rápida e com segurança, além de construir vãos e alturas nunca vistas anteriormente.
3 ^a revolução	1901	Edifício Hennebique. Rue Danton n.1, Paris – França.	Construtor François Hennebique - França	A engenharia e a arquitetura estrutural podiam ousar muito mais, pois descobriram como combinar dois materiais fantásticos. O concreto tinha a durabilidade da rocha, era compatível com o aço e ainda o protegia “eternamente”.
4 ^a revolução	1997	Edifício Petronas Tower, Kuala Lumpur – Malásia.	Arquiteto Cesar Pelli – Argentina. Projeto estrutural de Thornton Tomasetti – Estados Unidos.	A engenharia estrutural e a arquitetura descobrem as vantagens de rigidez do concreto de alto desempenho, além de seus benefícios para a sustentabilidade da construção civil.

Fonte: HELENE; ANDRADE, 2011.

2.2 O FUTURO

Em 100 anos, o concreto conseguiu superar todos os outros elementos estruturais já utilizados na construção civil, mas ainda é um material em evolução, sendo o foco de pesquisas até os dias atuais. Diante disso, o concreto apresenta um futuro promissor e com limite ainda não definido totalmente.

Nos últimos anos, os países como Canadá e Estados Unidos desenvolveram grandes centros de pesquisas especializados em concreto, os quais têm contribuído para diversos

projetistas em todo o mundo desenvolverem estruturas cada vez mais versáteis, duradouras, e economicamente viáveis e sustentáveis. Atualmente, no Brasil, existem mais de 130 de centros de pesquisa e desenvolvimento voltados para os estudos do concreto (HELENE; ANDRADE, 2011).

Atualmente, as pesquisas se concentram no desempenho mecânico satisfatório do concreto e, ao mesmo tempo, na sustentabilidade, tendo em vista as grandes degradações ambientais que aumentam a cada dia. Diversas pesquisas são desenvolvidas diariamente testando diferentes materiais em sua composição, com quantidades variadas, afim de se obter um material estável, duradouro e com o menor impacto ambiental possível em relação a matéria prima a ser utilizada.

2.3 COMPOSIÇÃO DO CONCRETO

Concreto é o material formado por meio da mistura homogênea de cimento, agregado miúdo, gráúdo e água, com adição ou não de outros elementos e aditivos NBR 12655 (ABNT, 2015), ou seja, para melhor ação deste conjunto, é necessário o estudo de cada elemento em sua unidade e as ações decorrentes da junção dos mesmos. Cada material deve ser criteriosamente escolhido para compor o traço do concreto (quantidades em massa ou volume de cada componente), atingindo assim a trabalhabilidade e resistência indicada pelo projeto em cada situação.

Todos os elementos que constituem a mistura possuem uma função importante e diferente para o resultado final. O cimento *Portland* é um material pulverulento, aglomerante hidráulico (endurece com a ação exclusiva da água) e principal componente da mistura do concreto. A água, em contato com o cimento, forma cristais sólidos, os quais dão resistência ao concreto. Esses dois elementos em conjunto formam a pasta, que é a base principal para o concreto, e tem a função de unir os agregados gráúdo e miúdo (OLDRA *et al*, 2015).

Assim, surge uma importante relação para o estudo do traço e resistência do concreto, a relação água/cimento ou a/c (obtida pela divisão do volume de água empregado pela quantidade de cimento para obtenção da pasta). Este parâmetro influencia diretamente as características físicas e mecânicas do concreto. Quanto maior a relação a/c , maior é a trabalhabilidade e fluidez do concreto, porém, menor é a resistência mecânica. Em relações baixas de a/c , como 0.40, a resistência à compressão, por exemplo, é muito superior do que em relações de 0.60 (HELENE; ANDRADE, 2011). Portanto, definidos os parâmetros de projeto,

deverá ser escolhida a melhor proporção a/c para atender todas as características necessárias para a execução.

A pasta já possui a característica mecânica de resistência à compressão quando endurecido, porém, há meios de obter melhor desempenho e eficácia deste conjunto. Se for mantida apenas a pasta para uso na construção, o gasto seria elevado, pois o cimento é o material mais oneroso da mistura. Por isso, são utilizados agregados para preenchimento do concreto, os quais, além de reduzir o custo final do concreto, reduzindo a quantidade de pasta que seria usada para um determinado volume, possui também a característica de receber tensões que são aplicadas à estrutura, beneficiando a resistência à compressão e reduzindo o efeito de retração volumétrica da pasta, onde, quanto maior o teor de agregados, menor a retração do volume. Assim, são adicionados os agregados miúdos e graúdos à pasta.

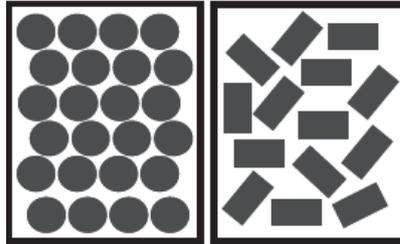
Estes agregados são obtidos pela britagem de granitos, rocha calcária e basaltos, dependendo da região onde são extraídos, além da reciclagem de resíduos, principalmente da construção civil (BAUER, 2019). É feita a britagem e o peneiramento das rochas e os agregados são graduados, separados e classificados (rachão, brita, brita graduada e areia).

A areia é o grão miúdo mais utilizado no concreto, cujos grãos passam na peneira com malha de 4,75mm NBR 7211(ABNT, 2019). No Brasil, o principal agregado miúdo utilizado é a areia natural, a qual é extraída do leito de rios, mas também pode ser artificial, obtida pela britagem de rochas calcárias e basálticas ou granitos, desde que atendam às especificações normativas para uso. Possui a função de agregar volume à mistura e preencher vazios deixados pelo agregado graúdo no concreto (PINHEIRO; CRIVELARO, 2016). Deve ser feito o estudo granulométrico da areia para melhor atender a composição do concreto e definir o agregado miúdo ideal. Geralmente é escolhido o agregado com variações de tamanho para preencher todos os vazios no concreto. Deve haver cuidado especial com a umidade deste grão, que pode alterar significativamente a relação a/c do traço. Ensaio como o da frigideira devem ser realizados para o uso correto do agregado no concreto.

Além deste, há o agregado graúdo, com função essencial de preenchimento de volume e resistência de esforços junto à pasta do concreto. Este é definido granulometricamente pelo método de peneiramento como grãos que passam na malha de 75mm e ficam retidos na malha de 4,75mm. Este ensaio não determina todas as dimensões do agregado, classificando-o apenas pela largura (BAUER, 2019). O ensaio demonstra um resultado de intervalos e não a medida exata do agregado. Este fator culmina em dispersões na forma do grão, o que afeta o empacotamento dos agregados. Partículas com formatos semelhantes e esféricos proporcionam

melhor empacotamento, reduzindo a área de vazios que a pasta deverá preencher, tornando o concreto mais econômico, como mostrado na Figura 5.

Figura 5 - Forma das partículas e o índice de vazios



Fonte: Adaptado de Oliveira *et al.*, 2000, retirado de BAUER, 2019.

Na confecção do concreto, o agregado graúdo mais utilizado é a brita, geralmente extraída do granito. Esta rocha possui resistência à compressão média de 150 MPa, que é muito superior às resistências comumente solicitadas em projetos de engenharia (BAUER, 2019). Por isso, a utilização deste minério não prejudica as características do concreto, mas melhora suas propriedades, principalmente a de resistência axial.

Há também a possibilidade do uso de agregados reciclados para a composição do concreto. De modo geral, podem ser substituídas parcelas do agregado graúdo por outro material semelhante, visando a destinação de resíduos sólidos e entulhos de forma sustentável. Esta substituição deve ser feita de modo a não comprometer as características do concreto, mas para somar às suas propriedades. Os resíduos reutilizados devem ser caracterizados de acordo com sua procedência e processos químicos e físicos aos quais foram expostos. Esta caracterização é definida pela NBR 10004 (ABNT, 2004) e podem ser de classe 1 ou 2, perigosos ou não perigosos, inertes ou não inertes. Para a adição no concreto é necessário que a partícula esteja livre de impurezas e seja inerte (não cause reações prejudiciais com as substâncias presentes na mistura). Estes resíduos devem atender às exigências normativas referentes a resíduos sólidos NBR 10004 (ABNT, 2004).

2.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO

Para a obtenção do concreto é necessário realizar uma série de processos, transformando os materiais previamente conhecidos (pasta + agregado miúdo + agregado graúdo) em um novo material, que ao endurecer, apresenta algumas propriedades físicas, as quais deverão atender requisitos específicos de projetos de obras civis. Essas propriedades são

influenciadas pela qualidade e proporção dos materiais a serem utilizados, influenciando o concreto tanto no seu estado fresco quanto no estado endurecido. O concreto apresenta algumas propriedades mecânicas no seu estado endurecido como: resistência a compressão, massa específica, resistência a tração, módulo de elasticidade, fluência e etc.

2.4.1 Resistência a compressão

O concreto apresenta como principal característica sua resistência a compressão, que deve ser estipulada como base de cálculo para posteriormente ser atingida pelo material ao decorrer do processo construtivo sendo levada em consideração por qualquer engenheiro projetista estrutural. Essa propriedade deve ser monitorada e registrada dentro do período de evolução do concreto (do lançamento até os seus 28 dias) através de ensaios laboratoriais.

No Brasil é necessário seguir algumas etapas, que são normatizadas, para se obter o resultado de resistência a compressão de forma correta. Para coletar o concreto, seja ele em caminhões betoneira ou em betoneiras estacionárias é necessário seguir as regras estabelecidas pela NBR NM 16886 (ABNT, 2020).

Para executar a moldagem e cura dos corpos de prova é necessário seguir as especificações da NBR 5738 (ABNT, 2016), onde serão produzidos corpos de prova cilíndricos com dimensões que variam: 10 cm de diâmetro por 20cm de altura e 15cm de diâmetro e 30cm de altura, posteriormente sendo colocados em câmara úmida ou em tanques imersos por água, proporcionando ao concreto um maior controle de umidade e temperatura.

A NBR 5739 (ABNT, 2018) indica os procedimentos a serem adotados ao se realizar o ensaio de resistência a compressão dos corpos de prova cilíndricos, definindo condições e parâmetros que possam influenciar no resultado final de resistência a compressão do concreto, tais como: tratamento dos corpos de prova, umidade, velocidade do carregamento, etc.

O concreto pode variar sua resistência a compressão de acordo com alguns fatores: classe e tipo do cimento empregado, os agregados a serem utilizados, o tipo de mistura a ser realizada, meio de transporte no qual a mistura será levada, lançamento utilizado, adensamento (se aplicável), a cura e sua desmoldagem. Concretos mais resistentes à compressão apresentam maior controle de qualidade desde a sua produção até a sua desmoldagem.

Para se obter resistência a compressão de cálculo do concreto (F_{cd}), deve-se adotar a expressão matemática presente na NBR 6118 (ABNT, 2014):

- Verificação a ser realizada aos 28 dias ou superior após o lançamento do concreto, através de ensaio de laboratório:

$$F_{cd} = \frac{F_{ck}}{Y_c} \quad (1)$$

Onde: F_{ck} é a resistência a compressão obtida por ensaio de laboratório aos 28 dias após o lançamento do concreto para confirmar o valor adotado no projeto. Y_c é o fator de segurança obtido através da norma.

- Verificação a ser realizada com data inferior aos 28 dias após o lançamento do concreto:

$$F_{cd} = \frac{F_{ck,j}}{Y_c} = \frac{B1 \times F_{ck}}{Y_c} \quad (2)$$

$$B1 = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{j} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\} \quad (3)$$

Onde: B1 é a relação entre $F_{ck,j}/F_{ck}$. j é a idade efetiva do concreto. S é o coeficiente que varia de acordo com o tipo e classe do cimento a ser empregado.

2.4.2 Massa específica

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014) o concreto seco deve apresentar massa específica variando entre 2000 kg/m^3 e 2800 kg/m^3 . Para finalidades de cálculo estrutural a norma especifica que deve-se utilizar para concretos simples (sem armação) um valor de 2400 kg/m^3 , e para concretos armados ou protendidos utilizar um valor de 2500 kg/m^3 , assim garantindo uma maior segurança para o dimensionamento.

2.4.3 Resistência a tração

A resistência a tração não é o ponto forte do concreto, sendo ela considerada um décimo da resistência de compressão quando comparadas. O ensaio de tração é regulamentado pela NBR 7222 (ABNT, 2011), a qual estabelece os procedimentos a serem adotados no ensaio de tração diametral de corpos de prova cilíndricos. Caso não seja possível realizar ensaios em

laboratórios a NBR 6118 (ABNT, 2014) usa por meio de artifícios matemáticos para se chegar ao valor de resistência a tração, a seguinte expressão:

$$F_{ctm} = 0,3 \times F_{ck}^{\frac{2}{3}} \quad (4)$$

Onde F_{ctm} representa o valor de resistência a tração do concreto.

2.4.4 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade do concreto é uma relação entre a rigidez do material em si quando submetido a uma carga em sua área externa, obtido por meio de ensaios regidos pela NBR 8522 (ABNT, 2017). Caso não seja possível determinar o valor do módulo elástico pode-se usar a seguinte expressão matemática, para concretos com idade de 28 dias, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014):

$$E = 5600 \times F_{ck}^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Onde E representa o módulo de elasticidade e F_{ck} o valor da resistência a compressão.

Porém, não se deve considerar apenas a resistência a compressão como fator que irá influenciar no módulo de elasticidade do concreto, os outros fatores que também podem influenciar são:

- Consistência da mistura;
- Quantidade de pasta por metro cúbico;
- Umidade presente nos corpos de prova no momento do ensaio a compressão;
- Característica do agregado graúdo utilizado;

Devido a isto, a NBR 6118 (ABNT, 2014) disponibiliza para fins de cálculos a seguinte expressão:

$$E = a_1 \times a_2 \times 5600 \times F_{ck}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

Onde a_1 é coeficiente selecionado de acordo com o tipo de agregado utilizado no concreto, e a_2 de acordo com a consistência do concreto fresco. O Quadro 2 apresenta os valores referentes a cada coeficiente.

Quadro 2 – Índices da expressão de previsão do módulo de elasticidade do concreto

Natureza do agregado graúdo	a₁	Consistência do concreto	a₂
		fresco	
Basalto e diabásio	1,1	Fluída	0,9
Granito e gnaisse	1,0	Plástica	1,0
Calcário, arenito e metassedimento	0,9	Seca	1,1

Fonte: HELENE; ANDRADE, 2011.

É válido notar que o módulo de elasticidade atuante em estruturas reais é influenciado diretamente pelo grau de qualidade de execução do adensamento do concreto, pela quantidade de pasta em relação ao volume final do concreto e de acordo com a origem mineralógica das rochas utilizadas como agregado (HELENE; ANDRADE, 2011).

2.4.5 Fluência

A fluência do concreto é um fenômeno que ocorre devido ao aumento da deformação do concreto quando exposto a um carregamento com duração maior que 15 minutos, sendo considerada uma carga de longa duração. De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014) a deformação ocasionada pela fluência é dividida em duas partes: fluência rápida e irreversível ocorrendo no período de 24 horas após a aplicação do carregamento e a fluência lenta sendo composta pela deformação lenta irreversível e a deformação lenta reversível.

2.5 DEGRADAÇÃO AO MEIO AMBIENTE

Os materiais utilizados na construção civil, em especial na confecção do concreto, são obtidos da natureza e submetidos a processos para adequação ao uso. Neste ciclo de produção, diversas técnicas são utilizadas até a obtenção do produto final, sendo estas, em sua maioria, ofensivas ao meio ambiente. Importa destacar o principal objetivo do estudo da substituição do agregado graúdo no concreto: amenizar a agressão ao meio ambiente, causado pela extração de minérios.

Como citado anteriormente, o agregado graúdo é obtido pela britagem de rochas. No Brasil, 85% destes agregados provém de granitos, 10% de rochas calcárias e 5% de basaltos. O processo de produção acontece em quatro etapas (BAUER, 2019):

- Decapeamento: Remoção da cobertura de vegetação, de solo e rochas estéreis, para exposição do minério;
- Desmonte e carregamento: Perfuração das rochas, desmonte com explosivos e pré-fragmentação com rompedores hidráulicos;
- Transporte interno: Retirada do produto da mina;
- Britagem e peneiramento: Três estágios de britadores e dois de peneiradores, obtendo as granulometrias dos agregados.

2.5.1 Decapeamento ou cava

O decapeamento ou cava, primeira etapa do processo, consiste em retirar tudo o que está sobre o minério para a extração. Envolve, portanto, retirada da vegetação presente, movimentação de terra e consequente alteração da paisagem do local. Promove também impactos visuais, perda de sementes e vegetação da biota local, assoreamento de corpos hídricos e diversos outros impactos negativos (PORTELLA, 2015). A movimentação de terra é prejudicial ao local de descarte, quando realizada de forma inadequada.

2.5.2 Desmonte e carregamento

O desmonte consiste em reduzir a rocha em fragmentos para transporte ao local de britagem e peneiramento. Esta ação pode ser executada com explosivos ou rompedores hidráulicos. Ambos produzem efeitos negativos à vizinhança do local de mineração e para os trabalhadores da linha de frente. O desmonte da rocha com explosivos acarreta problemas no meio físico, biótico e antrópico. No meio físico vibrações, ruídos e ultra lançamento de resíduos são apontadas como os principais fatores negativos. Já para o meio biótico, há a migração de aves e mamíferos e grandes interferências na vegetação, além das já causadas na etapa de cava. Há também fator negativo para o meio antrópico, afetando a saúde e bem estar da população vizinha e dos trabalhadores empregados no processo. Doenças, danos à saúde, acidentes de trabalho, alteração de paisagem e vegetação são os principais problemas causados às pessoas devido à atividade mineradora (PONTES *et al.*, 2013).

2.5.3 Transporte interno

Depois da redução do tamanho da rocha, esta é transportada para o local em que será beneficiada. O transporte constante de material gera grande poluição e ruídos (somados aos já produzidos no desmonte) advindos dos veículos utilizados. Esta fase pode ser considerada a menos danosa quando comparada às outras.

2.5.4 Britagem e peneiramento

Na última etapa é realizada a britagem e peneiramento para separar os agregados por granulometria. O maquinário responsável por este processo gera grande ruído e levantamento de pó, o qual polui o ar e pode causar doenças respiratórias, principalmente aos trabalhadores no local.

2.5.5 Vantagem ou desvantagem

Dentre todos os impactos negativos gerados pela mineração, cabe citar alguns pequenos impactos positivos desta prática, como a geração de emprego e renda e a estabilidade no fornecimento de matéria-prima às indústrias e à construção civil.

Na balança entre vantagens e desvantagens, há grande peso para o lado negativo. Uma das formas de reduzir a degradação ao ambiente e à saúde da população próxima é a reutilização de material descartado, que reduz o entulho final para aterros e a necessidade de mineração constante de jazidas.

3 AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE REVESTIMENTO CERÂMICO

3.1 METODOLOGIA

A avaliação da influência do agregado reciclado de revestimento cerâmico foi obtida através de ensaios em laboratório, realizando misturas de agregados em composições variadas para confecção dos corpos de provas analisados, assim variando o material constituinte e suas respectivas proporções.

Para realização dos ensaios, foram moldados corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 200mm de comprimento e 100mm de diâmetro, atendendo à exigência normativa da relação $h/d=2$.

O teste à compressão agiu como principal determinante do uso final do concreto, sendo de função estrutural ou não, e foi obtido o resultado através do rompimento de 3 corpos de prova na idade de 7 dias e 3 corpos de prova em 28 dias após a moldagem.

O teste à tração também foi feito em 7 e 28 dias, com o ensaio de 3 corpos de prova em cada dia.

Foram feitos 4 traços de concreto para realização dos ensaios, incluindo o traço referência. No total, foram moldados 48 corpos de prova para obtenção de todos os resultados e parâmetros necessários para os resultados e discussões propostas.

Para todos os agregados e componentes do concreto foram feitos ensaios de caracterização, descritos neste capítulo.

3.1.1 Traço

Foram feitos 4 traços de concreto para moldagem e teste, sendo um deles, o traço referência do trabalho, utilizando os agregados convencionais. Os outros foram feitos com substituição de 25, 50 e 75% do agregado graúdo.

A escolha do grau de substituição foi embasada em artigos e pesquisas científicas da comunidade acadêmica, que mostram em que grau de substituição há melhor relação de eficácia final do concreto e viabilidade de substituição. Geralmente, para maiores substituições, as propriedades mecânicas do concreto são minoradas, tornando o concreto menos eficaz para a sua destinação final. Porém, em substituições de menor grau, como em 25%, as propriedades se alteram com baixa significância, tornando o concreto utilizável em obras de construção civil.

3.1.2 Moldagem dos corpos de prova

Os corpos de prova moldados foram cilíndricos, com comprimento igual a 20cm com tolerância de 2% e o diâmetro da base igual a 10cm, com tolerância de 1%. A escolha deste cilindro se baseia nas prescrições da NBR 5738 (ABNT, 2016), a qual indica que a dimensão básica do corpo de prova deve ser, no mínimo, três vezes maior que a dimensão nominal máxima do agregado graúdo.

As formas para moldagem devem ser estanques e livres de imperfeições. Antes de proceder à moldagem, as formas foram untadas com óleo mineral ou algum lubrificante inerte ao cimento.

O método de adensamento foi manual e realizado em 12 golpes por camada, sendo separado em 2 camadas de igual quantidade. Foi adicionado o concreto no molde até 50% do volume e com uma haste metálica distribuídos os golpes uniformemente, evitando-se golpear a base do molde. Na segunda camada foi preenchido com quantidade em excesso de concreto, e os golpes aplicados de modo que penetrassem, aproximadamente, 20mm da camada anterior. Ao final, realizou-se o arrasamento, eliminando o material em excesso.

Os corpos de prova foram moldados no local onde seriam armazenados para evitar transportes que causassem perturbações ao concreto.

Ao final da moldagem, os corpos de prova foram identificados, com data, hora e registro, identificando a origem do concreto.

Após o endurecimento, os corpos de prova foram transportados ainda nas formas para o local de cura, onde foram desformados. A desforma foi feita 24h após a moldagem.

3.1.3 Cura do corpo de prova

Após a desforma e nova identificação dos corpos de prova, estes foram imediatamente armazenados. Neste caso, colocados em câmara úmida à temperatura de (23 ± 2) °C até seu respectivo tempo de rompimento. Ao retirar o corpo de prova do local de cura, foi impedida a secagem de sua superfície até a realização do ensaio.

3.1.4 Preparação da base para ensaio

Antes de ensaiar os corpos de prova foi necessário preparar suas bases, de modo que se tornassem planas e livres de imperfeições. A NBR 5738 (ABNT, 2016) define que as bases

podem ser retificadas por meios mecânicos, removendo uma fina camada do corpo de prova para tornar a superfície plana. Pode ser feito também através do capeamento, com material apropriado, que possa atingir a mesma resistência requerida do concreto e que dê lisura à superfície após o endurecimento.

Algumas literaturas sugerem que, na ausência ou impossibilidade de realização dos processos normatizados, utiliza-se o Disco de Neoprene¹ no rompimento, a fim absorver as deformações da base do corpo de prova (CHIES *et al*, 2013).

Neste estudo, pela impossibilidade de aplicação dos métodos descritos na NBR 5738 (ABNT, 2016), utilizou-se o Disco de Neoprene.

3.1.5 Ensaio de resistência a compressão

O teste à compressão foi realizado aplicando cargas axiais no centro do corpo de prova (cargas paralelas ao comprimento do cilindro). Para isto, o centro dos pratos da prensa foi alinhado ao do corpo de prova, obtendo a melhor distribuição de carga no cilindro. Neste processo foi utilizado a máquina hidráulica para imprimir força e comprimir a amostra. O resultado apresentado pela prensa é a carga efetiva imprimida no corpo, que será utilizada para cálculo da resistência em MPa da amostra na expressão a seguir:

$$f_c = \frac{4 \times F}{\pi \times D^2} \quad (7)$$

- f_c é a resistência à compressão, expressa em megapascal (MPa);
- F é a força máxima alcançada, expressa em newtons (N);
- D é o diâmetro do corpo de prova, expresso em milímetros (mm);

Ao final do ensaio é avaliada a viabilidade de utilização do concreto para fins estruturais ou não.

A prensa utilizada nos testes deste trabalho apresentou os resultados diretamente em Mpa.

¹ O Disco de Neoprene é um composto polimérico usado para nivelar o topo do corpo de prova e absorver as deformações do concreto. Este possui a dimensão da base do corpo de prova que está sendo ensaiado, neste caso, possui diâmetro de 10mm.

3.1.6 Ensaio de resistência a tração

Foi também realizado ensaio de tração do corpo de prova cilíndrico, segundo a NBR 7222 (ABNT, 2011). A moldagem e dimensões do corpo de prova são idênticos aos de ensaio à compressão, mudando apenas a forma de ensaio na máquina. O corpo de prova foi rompido diametralmente, sendo a força aplicada perpendicularmente ao comprimento da amostra. O cilindro é posicionado nos pratos da prensa, apoiados por fibra de madeira ou aglomerados em toda sua extensão. A carga é então aplicada para rompimento, que apresenta a carga normal que o cilindro resiste. O resultado em MPa é calculado pela expressão a seguir:

$$f_{ct,sp} = \frac{2 \times F}{\pi \times d \times l} \quad (8)$$

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

3.1.7 Determinação da massa unitária

Para realizar a dosagem do concreto foi necessário obter a massa unitária dos agregados, que é a relação entre a massa do material e o seu volume considerando os espaços permeáveis dos grãos e os espaçamentos entre as partículas. Para se obter o valor da massa unitária foram realizados alguns processos manuais, regidos pela NBR NM 45 (ABNT, 2006):

- Secagem da amostra do material em estufa a 110°C, até que o material apresente o mesmo peso com constância;
- Medir o volume do recipiente no qual o material será colocado (V_r);
- Separar o material a ser utilizado, sendo ele no mínimo duas vezes o volume do recipiente que irá comporta-lo durante o ensaio (V_r);
- Pesar o recipiente para obter sua massa (M_r);
- Preencher o recipiente com a amostra, porém evitar que haja compactação, sendo assim soltar o material de uma altura de 10 a 15cm da borda superior;

- Aferir o peso do conjunto recipiente + amostra (M_{ra});
- Realizar todo processo novamente com uma segunda amostra do mesmo material;

Ao terminar todo processo manual citado anteriormente, os valores obtidos foram utilizados na seguinte fórmula:

$$M_U = \frac{M_{ra} - M_r}{V_r} \quad (9)$$

Onde:

- M_u é o valor da massa unitária expresso em g/cm^3 ou kg/dm^3 ;
- M_{ra} é o valor da massa do recipiente + amostra, expresso em g ou kg;
- M_r é o valor da massa do recipiente, expresso em g ou kg;
- V_r é o volume do recipiente expresso em cm^3 ou dm^3 ;

Ao se obter os dois valores (no mínimo) da massa unitária no ensaio, é necessário realizar a subtração entre elas, caso a diferença seja menor ou igual a $0,5 \text{ g/cm}^3$ a amostra está aprovada para se utilizar a média entre os valores da massa unitário, caso contrário todo o ensaio deverá ser refeito. O resultado final deve ser expresso com a utilização de duas casas decimais.

3.1.8 Determinação da massa específica do agregado miúdo

No método de dosagem ABCP foi necessário utilizar a massa específica dos materiais para realizar a dosagem do concreto. A massa específica representa a massa do material em questão excluindo os espaços permeáveis presentes nos grãos dos agregados. Os ensaios responsáveis por aferir este dado são regulamentados pela NBR NM 52 (ABNT, 2009), a qual normaliza os processos para obtenção dos resultados:

- Secagem da amostra do material em estufa a 110°C , até que o material apresente o mesmo peso com constância ou após 24 horas;
- Transferir a amostra para um frasco, e calcular o valor do volume do mesmo;
- Colocar, por completo, a amostra em água com temperatura ambiente durante 24 horas, fazer a aferição da quantidade água que foi utilizado;
- Secar superficialmente a amostra e posteriormente determinar sua massa (M_s – Massa saturada com superfície seca);

- Secar totalmente a amostra em estufa a 110°C, até que o material apresente o mesmo peso com constância ou após 24hrs (M – massa seca);

Ao terminar o procedimento manual é calculado o valor da massa específica do agregado saturado com sua superfície seca:

$$Y = \frac{M_s}{V - V_a} \quad (10)$$

Onde:

- Y é o valor da massa específica do agregado saturado com a superfície seca expresso em g/cm³ ou kg/dm³;
- M_s é a massa do agregado saturado com superfície seca dado em g ou kg;
- V é o volume do frasco em cm³ ou dm³;
- V_a é o volume de água adicionada dado em cm³ ou dm³, fórmula abaixo para se obter o valor:

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{Y_a} \quad (11)$$

Onde:

- m₁ é a massa do conjunto frasco + agregado em g ou kg;
- m₂ é a massa do conjunto frasco + agregado + água em g ou kg;
- Y_a é a massa específica da água em g/cm³ ou kg/dm³;

3.1.9 Determinação da massa específica do agregado graúdo

Para realização do método de dosagem ABCP, foi necessário conhecer a massa específica do agregado graúdo a ser utilizado na confecção do concreto, sendo a massa específica uma relação entre a massa do material seco e o seu volume, incluindo todos os poros permeáveis por onde a água consegue adentrar e passar. Os ensaios responsáveis para se obter este dado são regulamentados pela NBR NM 53 (ABNT, 2009), a qual normaliza e norteia os processos para obtenção dos resultados:

- Colocar a amostra do agregado em estufa a uma temperatura de 110°C, durante 24 horas;

- Após as 24 horas aferir a massa da amostra;
- Colocar a amostra seca em um cesto de arame, submergir o conjunto totalmente em água na temperatura ambiente, juntamente acoplado a uma balança hidrostática, e anotar qual o peso encontrado.
- Retirar o material do cesto, secar toda sua superfície com um pano, o agregado vai aparentar está seco por fora, porém estará saturado por dentro. Após isso aferir seu peso.

$$d_a = \frac{A}{A_s - B} \quad (12)$$

Onde:

- A é a massa do material seco em estufa, g ou Kg;
- B é massa do material submerso na água, g ou Kg;
- A_s é a massa do agregado saturado com superfície seca, dado em g ou Kg;
- d_a é a massa específica do agregado graúdo, expresso em g/cm³ ou Kg/m³

3.1.10 Dimensão máxima característica

Define a distribuição granulométrica de uma amostra do agregado através do peneiramento realizado em peneiras de série normal e intermediária. A quantidade de amostra a ser ensaiada depende da dimensão máxima nominal do agregado, que é determinada pela NBR NM 248 de (ABNT, 2003).

Para execução do ensaio a amostra foi seca em estufa e medida sua massa. As peneiras foram encaixadas para formar um único conjunto, em ordem crescente de abertura da malha, do fundo para o topo. Após isto, colocou-se a amostra na peneira de maior abertura e foi realizada a agitação mecânica por tempo razoável.

Ao final da agitação, retirou-se o material da primeira peneira, de maior abertura, e foram escovados os dois lados da peneira. O material removido no lado interno é considerado retido e o desprendido da parte inferior, passante. Foi feita a mesma verificação em todas as peneiras do conjunto. Determinou-se, então, a massa total de material retido em cada peneira e no fundo.

Como resultado, foi calculada em porcentagem a massa retida em cada peneira, esta porcentagem foi em relação à massa total de amostra medida no início do ensaio. Depois, foi

realizada a porcentagem retida acumulada, que é o somatório da porcentagem retida na peneira com as peneiras anteriores, de maior abertura. Ao chegar ao fundo, a porcentagem deve se aproximar de 100%, condizendo com a massa inicialmente ensaiada.

Desta forma, realizou-se a análise do DMC (dimensão máxima característica), que foi a abertura de malha em que ficou retida acumulada 5% ou imediatamente inferior de agregado.

3.1.11 Módulo de finura

Para o ensaio de módulo de finura foram utilizados os mesmos dados encontrados no ensaio de DMC. O resultado foi obtido pela soma das porcentagens da quantidade de agregado que ficaram retidos nas peneiras de série normal. Posterior o resultado foi dividido por 100:

$$MF = \frac{\sum(\%RA)}{100} \quad (13)$$

- MF é o valor do módulo de finura, sendo sua grandeza adimensional;
- %RA é valor da massa de agregado graúdo retidos nas peneiras de série normal, dado em %.

3.1.12 Teor de umidade

3.1.12.1 Agregado miúdo

O teor de umidade do agregado miúdo foi determinado pelo método da estufa, descrito pela NBR 6457 (ABNT, 2016).

A quantidade de material ensaiado depende da dimensão dos grãos da areia, apresentados no Quadro 3:

Quadro 3 – Quantidade de material em função da dimensão dos grãos maiores

Dimensão dos grãos maiores contidos na amostra, determinada visualmente mm	Quantidade de material (em massa seca) a tomar g	Balança a ser utilizada	
		Capacidade nominal g	Resolução g
< 2	30	200	0,01
2 a 20	30 a 300	1500	0,1
20 a 76	300 a 3000	5000	0,5

Fonte: NBR 6457 (ABNT, 2016).

Foram utilizadas cápsulas metálicas com tampas, nas quais foram inseridas as amostras de areia e levadas à estufa. A cápsula foi pesada antes de iniciar o ensaio, pois esta massa será utilizada no cálculo final.

Ao colocar a amostra na cápsula, todo o conjunto, incluindo a tampa, foram pesados, obtendo-se a massa M1. Após isto, a tampa da cápsula foi removida e a amostra levada à estufa, à temperatura de 105°C a 110°C, onde permaneceu até apresentar constância de massa. Geralmente a secagem do material estará completa entre 16h e 24h.

Ao retirar a cápsula da estufa, foi resfriada até atingir temperatura ambiente para ser pesada. Esta pesagem é feita com a tampa recolocada, obtendo-se M2.

Com esses dados é possível determinar o teor de umidade por meio da fórmula:

$$w = \left(\frac{M1 - M2}{M2 - M3} \right) \times 100 \quad (14)$$

Onde:

- w é o teor de umidade, expresso em porcentagem (%);
- M1 é a massa de areia úmida mais a massa do recipiente, expressa em gramas (g);
- M2 é a massa de areia seca mais a massa do recipiente, expressa em gramas (g);
- M3 é a massa do recipiente, expressa em gramas (g).

3.1.12.2 Agregado Graúdo

Para determinar o teor de umidade do agregado graúdo também foi utilizado o método da estufa, porém descrito pela NBR 9939 (ABNT, 2011).

Para o ensaio foram utilizadas bandejas metálicas inoxidáveis, com dimensão e forma que permitem o espalhamento do agregado em uma camada em seu fundo.

A quantidade de amostra ensaia foi definida de acordo com a dimensão máxima característica do agregado, representado o Quadro 4:

Quadro 4 – Massa mínima de amostra para ensaio

Dimensão máxima característica do agregado mm	Massa mínima da amostra de ensaio g
9,5	1500
12,5	2000
19	3000
25	4000
38	6000
50	8000
76	13000

Fonte: NBR 9939 (ABNT, 2011).

A amostra foi pesada antes de ir à estufa, diretamente na balança, obtendo-se a massa inicial m_i .

Espalhou-se o agregado sobre a bandeja, de modo a formar apenas uma cama ao fundo desta. Foi levado à estufa a (105 ± 5) °C até atingir a massa constante. Esta massa foi obtida quando, em pesagens sucessivas de pelo menos 2h, não indicaram variação maior que 0,1% de perda de massa.

Quando a massa constante foi determinada, o material foi colocado fora da estufa até que atingisse temperatura ambiente, e foi novamente pesado, diretamente na balança, obtendo-se a massa final do ensaio (m_f).

O teor de umidade do agregado graúdo foi determinado através da fórmula:

$$h = \left(\frac{m_i - m_f}{m_f} \right) \times 100 \quad (15)$$

Onde:

- W é o teor de umidade total, expresso em porcentagem (%);
- m_i é a massa inicial do agregado úmido, expressa em gramas (g);
- m_f é a massa final do agregado seco, expressa em gramas (g).

3.1.13 Dosagem: método ABCP

No Brasil o sistema de dosagem de concretos e argamassas são regulamentados pela NBR 12655 (ABNT, 2015), a qual contempla dois métodos de dosagem: empírica e a racional/experimental. Para realização da produção de concreto para corpos de prova no meio acadêmico, é usual que se utilize o método experimental, o qual consiste em ensaiar os materiais em laboratórios para posteriormente fazer o uso dos mesmos na dosagem, assim podendo utilizar suas características específicas para se obter uma mistura para determinadas finalidades.

Dentre os métodos experimentais utilizados no Brasil, temos o ABCP, que fornece resultados aproximados da realidade, sendo necessário testá-lo em laboratório antes de ser executado nas obras, para garantir um melhor desempenho de suas propriedades. Para realizar a dosagem por este método, é necessário saber alguns dados necessários dos materiais que serão utilizados: cimento, agregado graúdo, e agregado miúdo.

Para realizar a dosagem ABCP para obtenção do traço, é necessário saber onde será utilizado o concreto, obtendo assim as seguintes informações: F_{ck} (resistência a compressão do concreto), Slump (consistência necessária do concreto), e as condições de exposição (consequências que o “meio” acarretará ao concreto).

Na parte de materiais foi necessário saber informações específicas do cimento e dos agregados graúdos e miúdos. As informações necessárias referentes ao cimento é o tipo que será empregado, resistência aos 28 dias, e sua massa específica. Já para os agregados no geral, o método exige que se tenha o módulo de finura do agregado miúdo, o diâmetro máximo característico do agregado graúdo, e as massas específicas e unitárias compactadas tanto para o agregado graúdo quanto para o miúdo.

3.1.13.1 Curva de Abrams

A curva de Abrams tem grande relevância no método de dosagem ABCP, pois é através dela que se obtém a relação água-cimento (a/c), a qual influencia na resistência final do concreto e em sua trabalhabilidade. Este fator é variável; quanto maior o fator, mais água terá na mistura e menor será a resistência do concreto, e o inverso também é válido.

O primeiro a estudar e publicar no meio científico sobre esta relação água/cimento foi Abrams. Em 1919, ele apresentou através de testes laboratoriais que a resistência a compressão final do concreto era influenciada diretamente pelo fator água/cimento (GUERRA, 2010).

Definido como lei de Abrams, esta consiste em utilizar uma curva de correlação do fator água/cimento, desenvolvida através dos estudos, em função da resistência a compressão requerida, de acordo com uma idade de referência do concreto, sendo as mais importantes: 1, 3, 7, 14, e 28 dias.

3.1.13.2 Consumo de materiais: água, cimento, agregado miúdo, e agregado graúdo

Para se obter a quantidade de água necessária no traço, utilizou-se uma tabela própria deste método que correlaciona o diâmetro máximo do agregado graúdo (obtido através de ensaio laboratorial) e o abatimento requerido do concreto (slump). O valor do consumo de água é dado em l/m^3 , como mostra o Quadro 5 abaixo:

Quadro 5 – Consumo de água (C_a) no método de dosagem ABCP.

Consumo de água aproximado (l/m^3)					
Abatimento (mm)	Diâmetro Máximo do agregado graúdo (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
40 a 60	220	195	190	185	180
60 a 80	225	200	195	190	185
80 a 100	230	205	200	195	190

Fonte: PÚBLIO PENNA FIRME RODRIGUES, 2016.

O consumo de cimento estabelecido pelo método ABCP foi obtido através da seguinte fórmula:

$$C_c = \frac{C_a}{a/c} \quad (16)$$

Onde:

- C_c é o consumo de cimento dado em kg;
- C_a é consumo de água dado em kg;
- a/c é o fator água/cimento obtido através do diagrama de Abrams;

Para se obter o consumo de agregado graúdo, primeiramente, foi necessário utilizar o Quadro 6, que contém a correlação entre o diâmetro máximo característico e o módulo de finura, obtidos através dos ensaios em laboratório. O volume de agregado da composição é dado em m^3 :

Quadro 6 – Volume de agregado graúdo (V_b) no método de dosagem ABCP

MF	Diâmetro máximo característico (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,755	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

Fonte: PÚBLIO PENNA FIRME RODRIGUES, 2016.

Ao se obter o volume de agregado que foi utilizado no traço, foi realizada a conversão deste volume em massa, através da seguinte fórmula:

$$C_b = V_b \times M_u \quad (17)$$

Onde:

- C_b é o consumo de agregado graúdo dado em kg;
- V_b é o volume de agregado graúdo dado em m^3 ;
- M_u é a massa unitária do agregado graúdo dado em kg/m^3 ;

Já a obtenção do consumo de agregado miúdo é similar com o de agregado graúdo, porém o volume é obtido através da fórmula abaixo:

$$V_m = 1 - \left(\frac{C_c}{Y_c} + \frac{C_b}{Y_b} + \frac{C_a}{Y_a} \right) \quad (18)$$

Onde:

- V_m é o volume de agregado miúdo em m^3 ;
- C_c é o consumo de cimento dado em kg;
- Y_c é a massa específica do cimento expresso em kg/m^3 ;
- C_b é o consumo de agregado graúdo dado em kg;
- Y_b é a massa específica do agregado graúdo expresso em kg/m^3 ;
- C_a é o consumo da água dado em kg;
- Y_a é a massa específica da água expressa em kg/m^3 ;

Posteriormente, para obter o consumo de agregado miúdo, o método ABCP propõe usar a seguinte expressão matemática:

$$C_m = V_m \times Y_m \quad (19)$$

Onde:

- C_m é o consumo de agregado miúdo dado em kg;
- V_m é o volume de agregado miúdo expresso em m^3 ;
- Y_m é a massa específica do agregado miúdo dado em kg/m^3 ;

Ao final da obtenção do consumo de todos os materiais, foi realizada a formulação do traço unitário, o qual serve para realizar a dosagem de qualquer quantidade de concreto a ser

produzido (caso tenha as mesmas características das especificações dos cálculos do traço). O traço é expresso na seguinte ordem: cimento, areia, brita, a/c. Para chegar ao valor unitário é realizada a divisão de todos os consumos (exceto pelo fator água cimento) pelo consumo de cimento:

$$\frac{C_c}{C_c} : \frac{C_m}{C_c} : \frac{C_b}{C_c} : a/c \quad (20)$$

Onde:

- C_c é o consumo de cimento dado em kg;
- C_m é o consumo de agregado miúdo dado em kg;
- C_b é o consumo de agregado graúdo dado em kg;
- a/c é o fator água/cimento expresso como valor adimensional;

3.1.14 Cronograma do procedimento experimental

Para a realização dos testes, foi seguido um cronograma de execução de ensaios e rompimentos. Estas datas e etapas estão descritas no Quadro 7.

Quadro 7 – Cronograma de ensaios

Data de realização	Etapas realizadas
06/02/2021	Quebra manual da cerâmica
10/02/2021	Caracterização dos materiais
18/02/2021	Confecção do traço
25/02/2021	Ensaio de resistência à compressão 7 dias
25/02/2021	Ensaio de resistência à tração 7 dias
18/03/2021	Ensaio de resistência à compressão 28 dias
18/03/2021	Ensaio de resistência à tração 28 dias

Fonte: Próprios autores, 2021.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Para nenhum agregado, exceto a cerâmica, foi realizado o teste de teor de umidade, pois todo o material, proveniente do laboratório de testes, já se encontrava com umidade controlada.

4.1.1 Agregado graúdo: Brita 01

Os ensaios de caracterização da brita 01 foram realizados de acordo com a metodologia (itens 3.1.7, 3.1.9, 3.1.10, 3.1.11). Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados dos ensaios para brita 01

ENSAIO	RESULTADO
ME	2,767g/cm ³
MU	1,43g/cm ³
MF	2,972
DMC	19mm

Fonte: Próprios autores, 2021.

Onde:

- ME é a massa específica do agregado;
- MU é a massa unitária;
- MF é o modulo de finura;
- DMC é o diâmetro máximo;

4.1.2 Agregado graúdo de substituição: Cerâmica

Os procedimentos de caracterização da cerâmica foram realizados de acordo com a metodologia deste trabalho (itens 3.1.7, 3.1.9, 3.1.10, 3.1.11). Os testes feitos foram semelhantes aos utilizados para o agregado graúdo convencional (brita).

Para a utilização da cerâmica reciclada de construção, esta foi triturada manualmente e lavada, para retirada de impurezas e pó proveniente da quebra. Foi utilizada como referência

de dimensão a brita 01 e realizados ensaios (Figura 6) para confirmação do diâmetro máximo característico, devendo este ser igual ao da brita referência.

Figura 6 - Peneiramento utilizado para graduação do agregado reciclado de revestimento cerâmico



Fonte: Autores próprios, 2021.

Para este agregado foi realizado o ensaio de absorção, para determinar a quantidade de água que este absorve por peso. Este é um importante fator, pois deve-se reconsiderar a quantidade de água nos traços de substituição.

Os resultados obtidos de caracterização estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados dos ensaios para agregado reciclado de revestimento cerâmico

ENSAIO	RESULTADO
ME	2,327g/cm ³
MU	1,12g/cm ³
MF	3,007
A	6,61%
DMC	19mm

Fonte: Próprios autores, 2021.

4.1.3 Agregado miúdo: Areia média

Os ensaios descritos na metodologia deste trabalho (itens 3.1.7, 3.1.8, 3.1.11) foram realizados para a areia grossa, excetuando-se o ensaio de teor de umidade do agregado, pois no laboratório escolhido, a umidade dos materiais já estavam em ambiente controlado. Os resultados obtidos na caracterização estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados dos ensaios para areia média

ENSAIO	RESULTADO
ME	2,525g/cm ³
MU	1,52g/cm ³
MF	2,816

Fonte: Próprios autores, 2021.

4.1.4 Aglomerante: Cimento

Para o cálculo do traço pelo método ABCP, apenas a massa específica do cimento é exigida, portanto o resultado é mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados dos ensaios para o cimento

ENSAIO	RESULTADO
ME	3,000g/cm ³

Fonte: Próprios autores, 2021.

4.2 DETERMINAÇÃO DO TRAÇO

Levando em consideração o método de dosagem escolhido anteriormente (ABCP), utilizamos alguns parâmetros, já preestabelecidos, para realizar os cálculos e chegar no traço de referência e nos traços com as substituições parciais dos agregados graúdos. O primeiro valor escolhido foi a resistência a compressão característica (F_{ck}), no qual foi definido o valor de 20 MPa, menor valor encontrado na NBR 6118 (ABNT, 2014) para ser utilizado como concreto estrutural.

O segundo parâmetro estabelecido foi o abatimento utilizado (Figura 7), de 100mm, com uma tolerância de +/- 20mm, preconizado pela NBR 8953 (ABNT, 2015), como é

considerado para um concreto estrutural e com lançamento convencional. O terceiro e último parâmetro foi o desvio padrão, adotado o valor 4 (Sd), utilizado em controle rigoroso, onde o traço é representado inteiramente em massa e possui um controle rígido minucioso da água e umidade.

Figura 7 - Slump test realizado antes da moldagem dos corpos de prova



Fonte: Autores próprios, 2021.

A seguir os cálculos utilizados para obtenção do traço de referência.

4.2.1 Determinação da fixação da resistência de dosagem:

$$F_{cj} = F_{ck} + 1,65 \times Sd \quad (21)$$

Onde:

- F_{cj} é a fixação da resistência de dosagem dado em MPa;
- F_{ck} é a resistência a compressão característica expresso em MPa;
- Sd é o desvio padrão, em unidade adimensional;

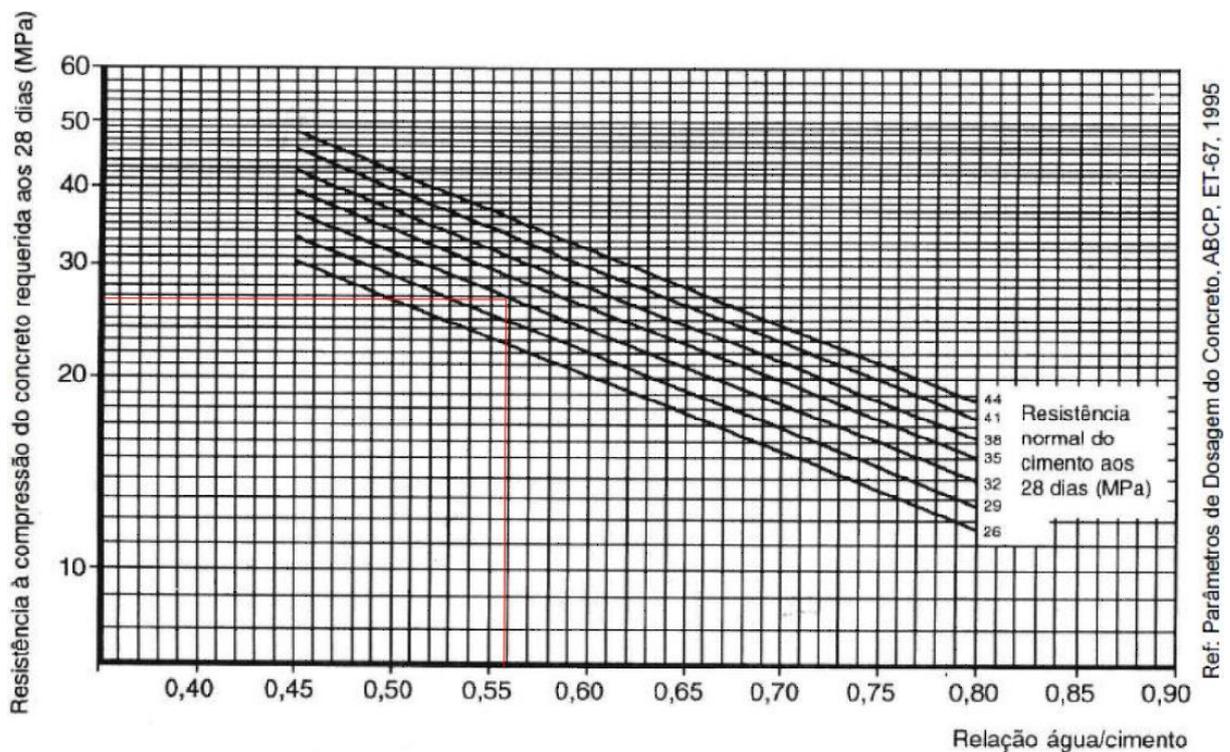
$$F_{cj} = 20 \times 1,65 \times 4$$

$$F_{cj} = 26,6 \text{ MPa}$$

4.2.2 Determinação da relação água/cimento:

Para a determinação da relação água/cimento (a/c) presente no traço do concreto, foi utilizado o gráfico das curvas de Abrams (Figura 8). Os parâmetros utilizados foram a fixação da resistência de dosagem (26,6 MPa) e a resistência normal do cimento aos 28 dias (32 MPa). Para fins de cálculo e confecção do concreto a ser ensaiado foi utilizado o cimento CP II – 32 – Z.

Figura 8 – Resultado obtido no gráfico das curvas de Abrams



Fonte: PÚBLIO PENNA FIRME RODRIGUES, 2016.

O resultado obtido, de acordo com o gráfico, foi o valor de 0,559 para a relação água/cimento.

4.2.3 Determinação do consumo de água:

Para a determinação do consumo de água recorreu-se ao Quadro 5, onde é possível obter o consumo de água em l/m^3 , de acordo com os parâmetros do abatimento (100mm +/- 20mm) e o diâmetro máximo característico do agregado graúdo (Brita 1 = 19mm). O resultado obtido, destacado na Quadro 5, do consumo de água, foi de 205 l/m^3 .

Quadro 5 – Consumo de água (C_a) no método de dosagem ABCP

Consumo de água aproximado (l/m^3)					
Abatimento (mm)	Diâmetro Máximo do agregado graúdo (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
40 a 60	220	195	190	185	180
60 a 80	225	200	195	190	185
80 a 100	230	205	200	195	190

Fonte: PÚBLIO PENNA FIRME RODRIGUES, 2016.

4.2.4 Determinação do consumo de cimento:

O consumo de cimento foi calculado de acordo com a equação 16.

$$C_c = \frac{C_a}{a/c} \quad (16)$$

$$C_c = \frac{205}{0,559}$$

$$C_c = 366,73 \text{ kg}/m^3$$

4.2.5 Determinação do consumo do agregado graúdo:

Para se obter o consumo de brita, foi necessário utilizar o Quadro 6 para descobrir o volume de brita através dos dados do DMC da brita 1 (19mm) e o módulo de finura da areia (2,82). Posteriormente fazendo-se o uso da equação 17, foi feita a conversão do volume encontrado (m^3) para massa (kg).

Quadro 6 – Volume de agregado graúdo (V_b) no método de dosagem ABCP

MF	Diâmetro máximo característico (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,755	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

Fonte: PÚBLIO PENNA FIRME RODRIGUES, 2016.

$$C_b = 0,67 \times 1430 \quad (17)$$

$$C_b = 958,1$$

4.2.6 Determinação do consumo do agregado miúdo:

O volume de areia foi obtido através da equação 18, e em seguida foi transformado em massa através da equação 19, assim determinando o consumo de areia.

$$V_m = 1 - \left(\frac{366,73}{3000} + \frac{958,1}{2770} + \frac{205}{1000} \right) = 0,327 \text{ m}^3 \quad (18)$$

$$C_m = 0,327 \times 2530 = 827,31 \text{ kg} \quad (19)$$

4.2.7 Traço unitário em massa:

Para a criação do traço unitário de referência foi utilizada a equação 20:

$$\frac{C_c}{C_c} : \frac{C_m}{C_c} : \frac{C_b}{C_c} : a/c \quad (20)$$

$$\frac{366,73}{366,73} : \frac{827,31}{366,73} : \frac{958,10}{366,73} : 0,559$$

$$1 : 2,26 : 2,61 : 0,559$$

4.2.8 Volume de concreto a ser produzido:

Para a confecção dos corpos de prova, foram utilizados 4 traços, englobando o traço de referência (com brita 01) e os traços com substituição parcial do agregado graúdo, sendo eles: 25%, 50%, e 75%.

Para atender os ensaios, foi necessário produzir 24 corpos de prova para cada traço, assim totalizando um montante de 48 corpos de prova cilíndricos a serem produzidos. Para calcular a volume de concreto para cada traço, primeiramente foi utilizado o volume do molde cilíndrico do corpo de prova, de acordo com a equação 20. As dimensões do molde cilíndrico foram 10cm de diâmetro e 20cm de altura.

$$V = \pi r^2 h \quad (22)$$

Onde:

- V é o volume do cilindro dado em m³;
- r é o raio da seção transversal expresso em m;
- h é a altura do molde dado em m;

$$V = \pi \times 0,05^2 \times 0,2$$

$$V = 0,00157 \text{ m}^3$$

$$V_t = 0,00157 \times 12 = 0,0188 \text{ m}^3 = 19 \text{ l}$$

Para cada traço foi necessário produzir 23 litros de concreto, considerando um adicional de perda em cima dos 19 litros totais.

4.2.9 Quantidade de insumos em massa:

Para o traço de referência foram utilizados 8,43 kg de cimento; 22,00 kg de brita 01; 19,05 kg de areia; e por fim 4,71 kg de água; todo esse quantitativo foi obtido de acordo com os cálculos abaixo, na equação 23.

$$M_{cim} = \left(\frac{V_t}{\frac{c_c}{Y_c} + \frac{c_m}{Y_m} + \frac{c_b}{Y_b} + \frac{a/c}{Y_a}} \right) \quad (23)$$

Onde:

- M_{cim} é a massa de cimento dado em kg;
- Y_c é a massa específica do cimento dado em kg/m^3 ;
- Y_m é a massa específica da areia expressa em kg/m^3 ;
- Y_b é a massa específica da brita 01 expressa em kg/m^3 ;
- Y_a é a massa específica da água em kg/m^3 ;

$$M_{cim} = \left(\frac{0,023}{\frac{1}{3000} + \frac{2,26}{2530} + \frac{2,61}{2770} + \frac{0,559}{1000}} \right)$$

$$M_{cim} = 8,43 \text{ kg}$$

$$M_{areia} = 8,43 \times 2,26 = 19,05 \text{ kg}$$

$$M_{brita} = 8,43 \times 2,61 = 22,00 \text{ kg}$$

$$M_{\text{água}} = 8,43 \times 0,559 = 4,71 \text{ kg}$$

4.2.10 Quantidade de massa de agregado reciclado de revestimento cerâmico:

Para comparar com o traço do concreto convencional foram criados mais três traços com substituições parciais dos agregados graúdos pelos agregados reciclados de revestimento cerâmico, com as seguintes porcentagens: 25%, 50%, e 75%.

Também foi levada em consideração a inserção de uma quantidade a mais de água nos traços, devido ao agregado reciclado absorver uma maior quantidade de água do que a brita. Através de ensaio realizado em laboratório, em conformidade com a NBR NM 53 (ABNT, 2009), foi encontrado uma absorção para o revestimento cerâmico de 6,61%.

4.2.10.1 Traço 25%:

$$M_{cerâmica} = 22,00 \times 25\% = 5,50 \text{ kg}$$

$$M_{brita} = 22,00 \times 75\% = 16,50 \text{ kg}$$

$$M_{água} = 4,71 + (5,50 \times 6,61\%) = 5,07 \text{ kg}$$

4.2.10.2 Traço 50%:

$$M_{cerâmica} = 22,00 \times 50\% = 11,00 \text{ kg}$$

$$M_{brita} = 22,00 \times 50\% = 11,00 \text{ kg}$$

$$M_{água} = 4,71 + (11,00 \times 6,61\%) = 5,44 \text{ kg}$$

4.2.10.3 Traço 75%:

$$M_{cerâmica} = 22,00 \times 75\% = 16,50 \text{ kg}$$

$$M_{brita} = 22,00 \times 25\% = 5,50 \text{ kg}$$

$$M_{água} = 4,71 + (16,50 \times 6,61\%) = 5,80 \text{ kg}$$

4.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS

4.3.1 Resultado dos ensaios de 7 dias

Aos sete dias após a confecção dos traços e moldagem dos corpos de prova (Figura 9), foram realizados os ensaios de compressão axial (Figura 10) e compressão diametral. Os resultados destes ensaios estão expressos nos Quadros 8 e 9.

Quadro 8 – Resultados dos ensaios de compressão axial aos 7 dias

Traço	Resultado do ensaio de compressão axial (MPa)	Média Final (MPa)
Referência	17,4	16,7
	16,6	
	16,1	
Substituição 25%	16,3	15,6
	15,4	
	15,0	
Substituição 50%	13,8	14,8
	15,4	
	15,2	
Substituição 75%	10,0	10,3
	10,7	
	10,1	

Fonte: Autores próprios, 2021.

Figura 9 – Corpos de prova moldados



Fonte: Autores próprios, 2021.

Figura 10 – Realização do ensaio de compressão axial



Fonte: Autores próprios, 2021.

Como já era esperado, as amostras do traço de referência atingiram valores superiores aos demais traços com substituição do agregado gráúdo convencional pelo material cerâmico.

Aos 7 dias, a resistência a compressão axial do traço de referência e os com substituição de 25 e 50% atingiram valores acima de 70% da resistência de cálculo a ser alcançada (20 MPa). As amostras do traço de substituição de 75%, demonstrou que a fração de agregado reciclado afetou significativamente sua resistência a compressão, assim levando a atingir apenas 51,5% dos 20 MPa estimados inicialmente.

Comparando com os estudos dos engenheiros civis Daniel de Lima Araújo, Ludmylla Pires Felix, Leonardo Costa Silva e Thiago Martins dos Santos; onde estudaram a influência dos agregados reciclados de resíduos de construção nas propriedades mecânicas do concreto (ARAÚJO *et al.*, 2016). Nos estudos realizados, foram utilizados para comparação com o traço de referência traços com substituição parcial do agregado convencional pelo agregado reciclado de resíduos de construção e demolição (RCD), nas proporções de 19%, 43%, 75% e 100%. Para comparação, equiparamos os 19% do estudo do RCD aos 25% de substituição do revestimento cerâmico, e os 43% com os 50% de substituição. Aos sete dias o traço com substituição de 19% do estudo do RCD apresentou resultado de resistência a compressão axial superior ao traço de referência, ficando 26% a mais. O traço com substituição parcial de 43% dos agregados, apresentou aproximadamente 22% de resistência a mais que o traço de referência na idade de sete dias. No traço com substituição parcial de 75% apresentou superioridade de aproximados 9% em relação ao traço de referência, na idade de sete dias.

A substituição do revestimento cerâmico na proporção de 25% ficou aproximadamente 6,6% inferior ao traço de referência, assim com uma diferença significativa quando comparado com o estudo de substituição parcial do RCD na proporção de 19%. Já a substituição do revestimento cerâmico no traço com proporção de 50% apresentou uma inferioridade de 11,37% quando comparado com o traço de referência do mesmo estudo, assim ficando distante do resultado obtido pelo estudo com substituição parcial do RCD na proporção de 43%. Analisando a substituição do agregado reciclado de revestimento cerâmico na proporção de 75% foi constatada, na idade de sete dias, uma diferença negativa de resistência de aproximadamente 38% quando comparado com o traço de referência do mesmo estudo. Já no estudo da substituição parcial do agregado graúdo pelo de RCD, na proporção de 75%, apresentou uma superioridade pequena quando comparado com o traço de referência.

Quadro 9 – Resultados dos ensaios de compressão diametral aos 7 dias

Traço	Resultado do ensaio de compressão diametral (MPa)	Média Final (MPa)
Referência	2,5	2,5
	2,5	
	2,4	
Substituição 25%	2,1	2,4
	2,6	
	2,4	
Substituição 50%	2,0	2,0
	2,0	
	2,0	
Substituição 75%	2,0	1,9
	1,9	
	1,9	

Fonte: Autores próprios, 2021.

Aos sete dias também foi realizado o ensaio de compressão diametral, a fim de se obter a resistência a tração dos diferentes traços analisados. Assim como os resultados obtidos da compressão axial, os valores obtidos de tração seguiram as composições dos traços, ficando os resultados mais elevados para o traço de referência seguindo as proporções de distribuição 25%, 50%, e 75%. A diferença do maior (traço de referência) e menor (traço com substituição 75%) resultado obtido de tração através do ensaio de compressão diametral, ficou em 24%.

4.3.2 Resultado dos ensaios de 28 dias

Aos vinte e oito dias após a confecção dos traços, foram realizados os ensaios de compressão axial e compressão diametral (Figura 11). Os resultados destes ensaios estão expressos nos Quadros 10 e 11.

Figura 11 -Realização do ensaio de compressão diametral

Fonte: Autores próprios, 2021.

Quadro 10 - Resultados dos ensaios de compressão axial aos 28 dias

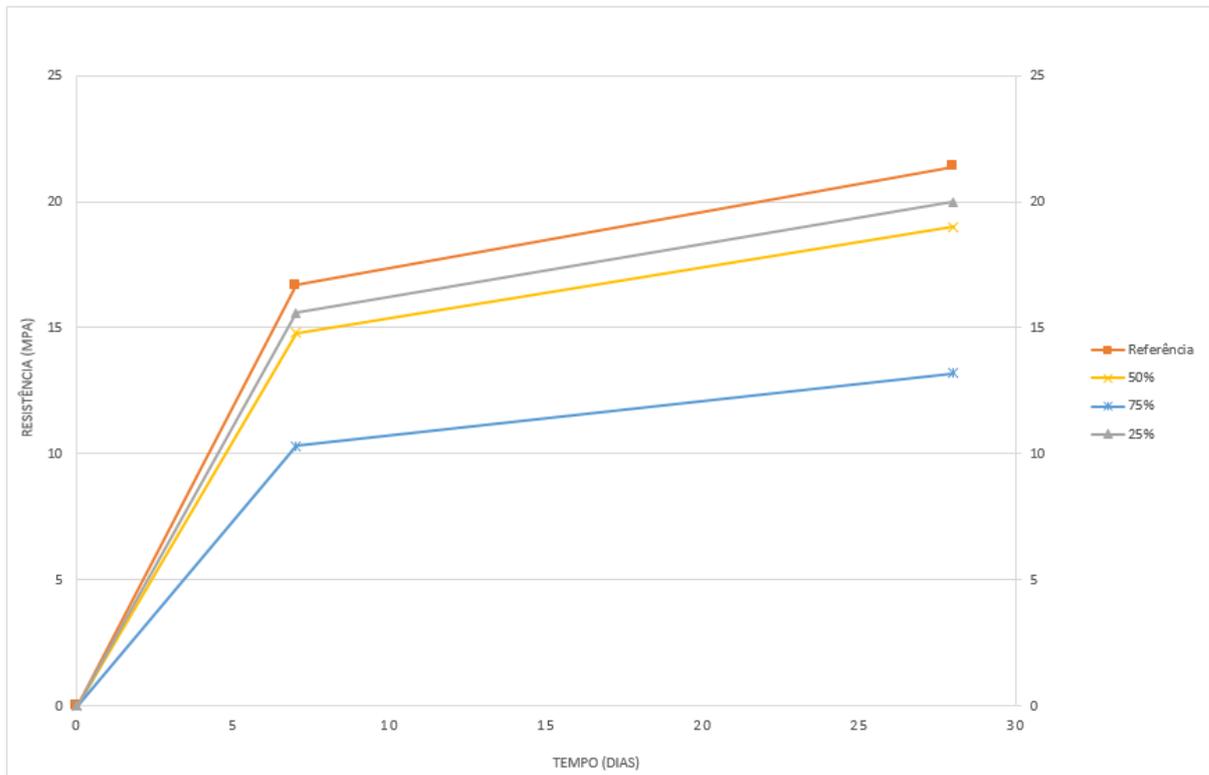
Traço	Resultado do ensaio de compressão axial (MPa)	Média Final (MPa)
Referência	22,3	21,4
	21,3	
	20,7	
Substituição 25%	20,9	20
	19,8	
	19,3	
Substituição 50%	17,7	19
	19,8	
	19,5	
Substituição 75%	12,8	13,2
	13,7	
	13,0	

Fonte: Autores próprios, 2021.

Após a realização do ensaio de compressão axial aos vinte e oito dias, foi constatado que apenas os traços de referência e o com substituição parcial de 25% dos agregados graúdos atingiram a resistência estimada no cálculo, apresentando valores acima e igual à 20 MPa. O

traço com substituição de 50% ficou 5% abaixo do valor estimado. O traço com substituição de 75% ficou 34% abaixo do esperado para uma resistência mínima de 20 MPa, apresentando uma evolução (Figura 12) apenas de 2,9 MPa quando comparado com o resultado de compressão axial aos sete dias.

Figura 12 - Evolução da resistência a compressão axial até os 28 dias



Fonte: Autores próprios, 2021.

Os resultados obtidos no estudo feito pelos engenheiros Araújo *et al.* (2016), demonstrou que os traços com substituição parcial do agregado graúdo de RCD nas proporções de 43% e 75% não atingiram o valor de cálculo, ficando abaixo da resistência estimada 1% e 11% respectivamente. Já o traço com substituição do agregado reciclado do RCD na proporção de 19% apresentou aproximadamente 3% da resistência superior a estimada inicialmente.

Quadro 11 - Resultados dos ensaios de compressão diametral aos 28 dias

Traço	Resultado do ensaio de compressão diametral (MPa)	Média Final (MPa)
Referência	3,2	3,2
	3,2	
	3,1	
Substituição 25%	2,7	3,0
	3,3	
	3,1	
Substituição 50%	2,6	2,6
	2,6	
	2,6	
Substituição 75%	2,6	2,5
	2,4	
	2,4	

Fonte: Autores próprios, 2021.

Aos 28 dias foi feito o ensaio de compressão diametral, a fim de se obter os resultados de tração de todos os traços. Os valores dos traços de referência e o com substituição de 25% ficaram bastante parecidos, marcando apenas uma diferença aproximada de 10% na resistência. Já os traços com substituição de 50% e 75% também ficaram com resultados parecidos entre si, apresentando apenas uma diferença de resistência aproximada de 4%. Comparando com a evolução da idade de 7 dias a 28 dias os traços de 25%, 50%, e 75% apresentaram uma evolução de 0,6 MPa e o traço de referência apresentou um acréscimo de 0,7 MPa em sua resistência a tração.

Após os rompimentos dos corpos de prova por compressão diametral foi possível visualizar como as partículas dos agregados estavam dispostas de acordo com cada proporção de substituição, como mostram as Figuras 13 a 16:

Figura 13 - Corpo de prova do traço de referência



Fonte: Autores próprios, 2021.

Figura 14 - Corpo de prova do traço com substituição de 25%



Fonte: Autores próprios, 2021.

Figura 15 - Corpo de prova do traço com substituição de 50%



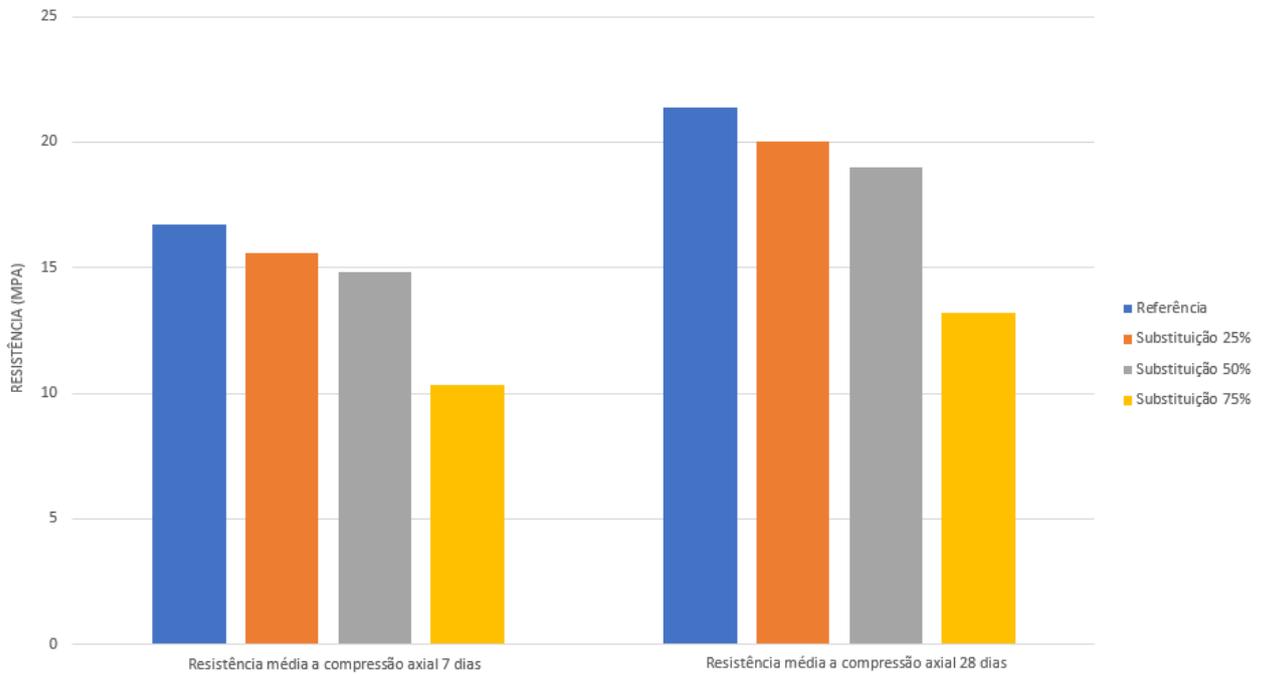
Fonte: Autores próprios, 2021.

Figura 16 - Corpo de prova do traço com substituição de 75%

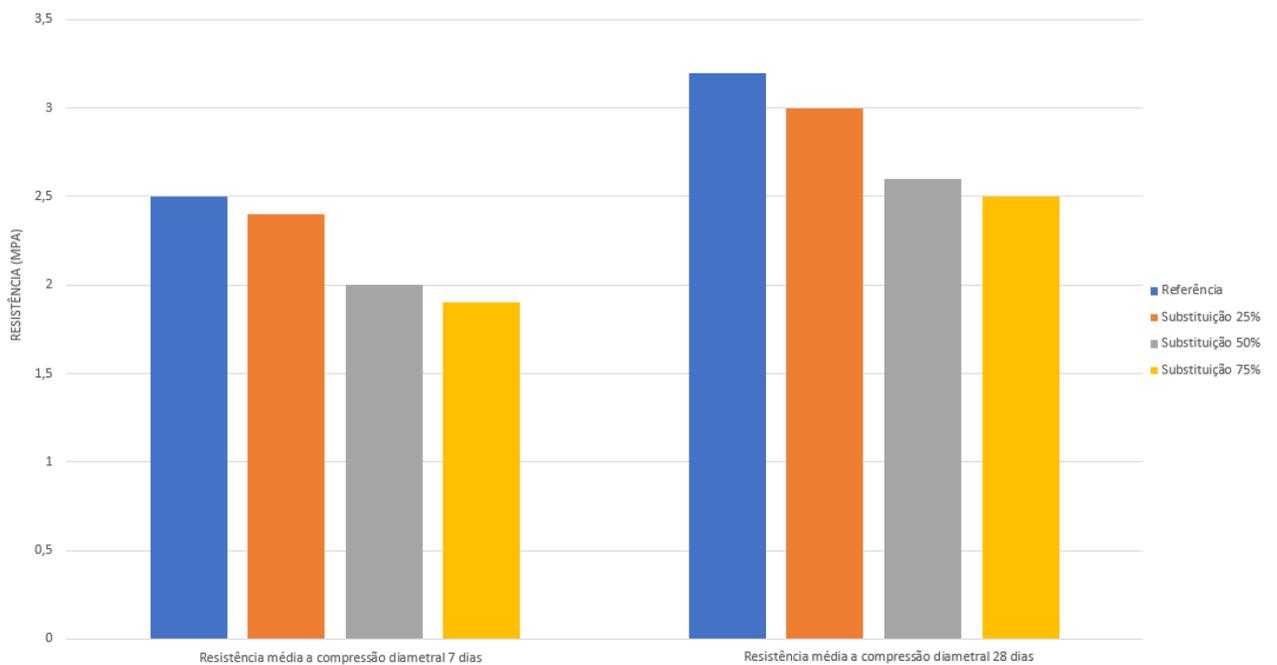


Fonte: Autores próprios, 2021.

As Figuras 17 e 18 apresentam os gráficos que demonstram os resultados das resistências a compressão axial e diametral respectivamente, nas idades de 7 e 28 dias.

Figura 17 – Resultados dos ensaios de resistência a compressão axial aos 7 e 28 dias

Fonte: Autores próprios, 2021.

Figura 18 – Resultados dos ensaios de resistência a compressão diametral aos 7 e 28 dias

Fonte: Autores próprios, 2021.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A avaliação da influência do agregado reciclado no concreto possibilitou o conhecimento das propriedades do concreto fresco e endurecido e a comparação entre o concreto referência, com agregado natural, e o concreto reciclado.

Para o concreto no estado fresco, com a substituição do agregado, foi possível notar a redução de plasticidade e fluidez do concreto por meio do *Slump* teste, devido à alta taxa de absorção da cerâmica.

Para o concreto no estado endurecido, foi verificada sua característica mecânica, apresentando baixa redução de compressão e tração para substituição de 25%. Porém, com o aumento percentual, a resistência foi se tornando cada vez menor e mais distante do traço referência.

Apesar do comportamento promissor apresentado nos resultados desta pesquisa, é necessário realizar mais estudos para confirmar os resultados aqui apresentados. Outras propriedades do concreto devem ser levadas em consideração, como a taxa absorção e vazios, sua fluência e deterioração com o tempo.

O agregado graúdo reciclado da cerâmica foi triturado para obter características próximas à da brita 1, utilizada em todos os traços. O módulo de finura e a dimensão máxima característica apresentaram valores muito aproximados, porém, apresentaram disparidades em sua massa específica, unitária e taxa de absorção de água. Este último fator influencia diretamente na relação a/c do concreto, por isso, deve ser levado em consideração no momento de formulação do traço de substituição.

Com os resultados finais obtidos, principalmente o de compressão, é possível verificar que o grau de substituição ideal, dentre os experimentados neste trabalho, é o de 25%, devido à sua baixa perda de resistência aos 28 dias. Porém, é necessário avaliar a viabilidade econômica de execução desse tipo de traço em uma obra de construção civil, visto que a substituição de apenas 25% do agregado graúdo pode não equilibrar a balança com a economia gerada no menor uso de agregado natural.

Para os testes realizados e resultados obtidos neste trabalho, não é possível assegurar o uso do concreto com substituição para fins estruturais, sendo necessários maiores testes e experimentos para este fim.

De modo geral, este trabalho contribui para a comunidade acadêmica e busca a continuidade dos experimentos, visando a maior utilização e reciclagem de materiais na construção civil.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se os seguintes ensaios e análises:

- Ensaio de absorção do concreto endurecido, com substituição, seja por imersão ou capilaridade;
- Teste que verifique a fluência do concreto e sua resistência às agressões do ambiente;
- Comportamento do concreto com substituição quando utilizado junto ao aço, em concretos armados;
- Ensaio com traços em diferentes relações água/cimento, a fim de verificar o comportamento do concreto endurecido quando há mais cimento na mistura.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Ações e segurança nas estruturas – procedimento: NBR 8681.** 2004

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios: NBR NM 45.** 2006

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente: NBR NM 52.** 2009

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água: NBR NM 53.** 2009

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Amostragem de concreto fresco: NBR NM 16886.** 2020

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova: NBR 5738.** 2016

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos: NBR 5739.** 2018.

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

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

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade: NBR 9779.** 2012.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão: NBR 8522.** 2017.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento: NBR 12655.** 2015.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados para concreto – Especificação: NBR 7211.** 2019.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projetos de estruturas de concreto – Procedimento: NBR 6118.** 2014.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Resíduos sólidos – Classificação: NBR 10004.** 2004.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – Determinação da composição granulométrica: NBR NM 248.** 2003.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização: NBR 6457.** 2016.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **Agregado graúdo – Determinação do teor de umidade total – Método de ensaio: NBR 9939.** 2011.

ALAEJOS, Pilar Gutiérrez *et al.* **International RILEM conference on the use of recycled materials in building and structures.** Barcelona: RILEM Publications S.A.R.L., 2004. 456 p. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=nZVJXxFJN_oC&oi=fnd&pg=PA255&dq=international+rilem+conference+on+the+use+of+recycled+materials+in+buildings+and+structures&ots=tlvtqQmodh&sig=FvcH0ERBWfZcUCVilFI_TBcrlS8#v=onepage&q&f=false>. Acesso em 25 ago. 2020.

ARAÚJO, Daniel Lima *et al.* INFLUÊNCIA DE AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO EM PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO. **Reec - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, Goiânia, v. 11, n. 1, p. 16-34, 8 fev. 2016. Universidade Federal de Goiás. <http://dx.doi.org/10.5216/reec.v11i1.35467>. Disponível em: <https://www.revistas.ufg.br/reec/article/view/35467>. Acesso em: 01 mar. 2021.

BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de Construção.** 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc - Livros Técnicos e Científicos Editora, 2019. 1 v.

BRITO, Carla. **A Ponte de Coalbrookdale.** 2013. Disponível em: <http://estoriasdahistoria12.blogspot.com/2013/11/a-ponte-de-coalbrookdale.html>. Acesso em: 26 out. 2020.

CHEN, How-Ji *et al.* Use of building rubbles as recycled aggregates. **Cement and concrete research.** V. 33, p. 125-132, 2003.

CHIES, Josué Argenta *et al.* **Avaliação do uso do neoprene em ensaios de compressão do concreto.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 55., 2013, Gramado -

Rs. **Anais [...]**. Gramado: Ibracon, 2013. p. 1-12. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Bruno-Silva-26/publication/276265549_Evaluation_of_the_influence_of_neoprene_in_determining_the_compressive_strength_of_the_concrete/links/55e37d8a08ae6abe6e8e74f2/Evaluation-of-the-influence-of-neoprene-in-determining-the-compressive-strength-of-the-concrete.pdf. Acesso em: 13 mar. 2021.

FROTTÉ, Camila *et al.* **Estudo das propriedades físicas e mecânicas de concreto com substituição parcial de agregado natural por agregado reciclado proveniente de RCD. Matéria (Rio de Janeiro)**, Curitiba, v. 22, n. 2, p. 1-10, 22 jun. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620170002.0143>. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762017000200419&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 01 abr. 2020.

GUERRA, Ruy Serafim de Teixeira. **Curva de Abrams**. 2010. Disponível em: <http://www.clubedoconcreto.com.br/2013/05/abaixo-link-para-download-planilha-em.html>. Acesso em: 28 nov. 2020.

HELENE, Paulo *et al.* Concreto de Cimento Portland. In: HELENE, Paulo *et al.* **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2010. Cap. 29. p. 905-944. Disponível em: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/lc48.pdf>. Acesso em: 07 out. 2020.

JOHN, Vanderley Moacyr *et al.* **Reciclagem de Resíduos na Construção Civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 2000. 113 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000. Cap. 4. Disponível em: https://www.ietsp.com.br/static/media/media-files/2015/01/23/LV_Vanderley_John_-_Reciclagem_Residuos_Construcao_Civil.pdf. Acesso em: 20 ago. 2020.

KAEFER, Luís Fernando. **A Evolução do Concreto Armado**. 1998. 43 f. TCC (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia de Construção Civil, Unesp, São Paulo, 1998. Cap. 3. Disponível em: <http://wwwp.feb.unesp.br/lutt/Concreto%20Protendido/HistoriadoConcreto.pdf>. Acesso em: 08 out. 2020.

KHALAF, Fouad M.; DEVENNY, Alan S.. **Recycling of Demolished Masonry Rubble as Coarse Aggregate in Concrete**: review. 4. ed. Reston: American Society Of Civil Engineers, 2004. 16 v. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290899-1561%282004%2916%3A4%28331%29>. Acesso em: 20 ago. 2020.

MIRANDA, Leonardo Fagundes Roseback. **Estudo de fatores que influem na fissuração de revestimentos de argamassa com entulho reciclado**. 2000. 190 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da

Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000. Cap. 5. Disponível em: https://www.ietsp.com.br/static/media/media-files/2015/01/23/Dissert_Leonardo_Miranda_-_Fissuracao_Argamassa_de_RCD_Reciclado.pdf. Acesso em: 22 ago. 2020.

OLDRA, Gean *et al.* **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com baixos teores de sílica de casca de arroz.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 57., 2015, Bonito - Ms. Bonito: Ibracon, 2015. v. 1, p. 1-15. Disponível em: https://pileconobre.com.br/wp-content/uploads/2016/09/congresso_brasileiro_concreto_2015_57CBC0689.pdf. Acesso em: 07 out. 2020.

PINHEIRO, Antonio Carlos; CRIVELARO, Marcos. **Materiais de Construção.** 2. ed. São Paulo: Saraiva, 2016. 144 p.

PINTO, Tarcísio de Paula. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana.** 1999. Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <http://www.casoi.com.br/hjr/pdfs/gestresiduossolidos.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2020.

PÚBLIO PENNA FIRME RODRIGUES. Associação Brasileira de Cimento Portland. **Parâmetros da dosagem racional do concreto.** 2016. Disponível em: <https://abcp.org.br/download/parametros-da-dosagem-racional-do-concreto/>. Acesso em: 30 nov. 2020

PONTES, Julio Cesar de. **Impactos de vizinhança proporcionados pelo desmonte de rocha com uso de explosivos: Estudo de caso na “mineração DANTAS GURGEL & CIA LTDA”, Caicó-RN.** 2013. 86 f. Tese (Doutorado) - Curso de Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande/pb, Campina Grande, 2013. Disponível em: <https://memoria.ifrn.edu.br/bitstream/handle/1044/1395/Julio%20Cesar%20De%20Pontes.pdf?sequence=1>. Acesso em: 14 out. 2020.

POON, Chi-Sun; CHAN, Dixon. **The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong.** 2007. Hong Kong. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344906001480#!>. Acesso em: 25 ago. 2020.

PORTELLA, Márcio Oliveira. **Efeitos colaterais da mineração no meio ambiente.** Revista Brasileira de Políticas Públicas, Brasília, v. 5, nº 2, 2015 p.263-276. Disponível em http://www.pick-upau.org.br/galeria/2017.05.13_galeria-revista-brasileira-politicas-publicas/revista-brasileira-politicas-publicas-download.pdf. Acesso em: 12 out. 2020.

SACOMANO, José Benedito *et al.* **Administração de produção para empresa de construção civil:** o gerenciamento de obras baseado em critérios competitivos. São Paulo: Editora Arte e Ciência, 2004. 183 p. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt->

BR&lr=&id=MPqfwc2t0noC&oi=fnd&pg=PA15&dq=Administracao+de+Producao+Para+Empresa+de+Construcao+Civil&ots=Wf1FdZTk77&sig=CwgSKGPsRfg1DEVKbqqyaRFQkGU#v=onepage&q&f=false>. Acesso em: 23 ago. 2020.

SCHALCH, Valdir *et al.* **Gestão e gerenciamento de resíduos sólidos**. 2002. 93 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002. Disponível em: <http://www.falcoit.com.br/blog/images/easyblog_images/500/GESTAO-DE-RESIDUOS-SOLIDOS-2002.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2020.