



Uema
CAMPUS BACABAL

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE ESTUDOS SUPERIORES DE BACABAL
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL BACHARELADO

MARIA GABRIELA DE SOUSA SILVA

**DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS α_E PARA AGREGADOS GRAÚDOS
ALTERNATIVOS EM CONCRETOS COM BASE NA NBR 6118:2014**

Bacabal

2023

MARIA GABRIELA DE SOUSA SILVA

**DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS α E PARA AGREGADOS GRAÚDOS
ALTERNATIVOS EM CONCRETOS COM BASE NA NBR 6118:2014**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão para o grau de bacharelado em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Alisson Rodrigues de Oliveira Dias

Bacabal

2023

S581d Silva, Maria Gabriela de Sousa.

Determinação de parâmetros αE para agregados graúdos alternativos em concretos com base na NBR 6118:2014 /Maria Gabriela de Sousa Silva – Bacabal-MA, 2023.

65 f: il.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil Bacharelado - Universidade Estadual do Maranhão-UEMA/ Campus Bacabal-MA, 2023.

Orientador: Prof.º Me. Alisson Rodrigues de O. Dias.

1. Concreto 2. Agregados graúdos alternativos 3. Resistência à compressão 4. Módulo de elasticidade 5. Parâmetros αE

CDU: 624.012.45

Elaborada por Poliana de Oliveira J. Ferreira CRB/13-702 MA

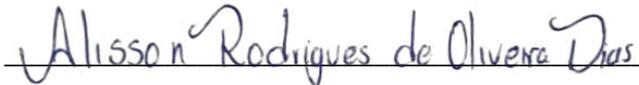
MARIA GABRIELA DE SOUSA SILVA

**DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS α E PARA AGREGADOS GRAÚDOS
ALTERNATIVOS EM CONCRETOS COM BASE NA NBR 6118:2014**

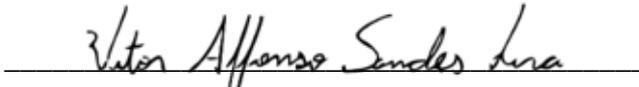
Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão para o grau de bacharelado em Engenharia Civil.

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA



Prof. Me. Alisson Rodrigues de Oliveira Dias (Orientador)
Mestre em Estruturas e Construção Civil
Universidade Estadual do Piauí



Prof. Esp. Vitor Affonso Sandes Lira
Especialista em Estruturas de Concreto Armado e Fundações
Universidade Estadual do Maranhão



Documento assinado digitalmente

CÉLIO HONORATO DE OLIVEIRA

Data: 12/03/2024 11:04:08-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Esp. Célio Honorato de Oliveira
Especialista em Gestão de Projetos
Universidade Estadual do Maranhão

Agradeço a Deus por sempre estar comigo e ter me fortalecido durante toda esta trajetória, e a todos que acreditam nos meus sonhos, em especial minha mãe e minha irmã.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por ter me mantido na trilha certa durante esta jornada com saúde e forças para chegar até o final.

À minha mãe, Iracy, e à minha irmã, Eliene, minhas inspirações de vida, que sempre estiveram ao meu lado me apoiando ao longo de toda a minha trajetória e, em todos os momentos, acreditaram e torceram por mim, assim como os demais membros de minha família.

Agradeço ao meu orientador, Alisson, por aceitar conduzir o meu trabalho de pesquisa, por todo o apoio, pelos conhecimentos e disposição dedicada a este trabalho, além de ter sido um exemplo de professor durante parte de minha trajetória acadêmica.

Também agradeço aos meus companheiros e amigos de curso, Sâmyo e Thyago, por terem feito parte desta jornada, por compartilharem comigo bons momentos, assim como os momentos difíceis ao longo desses anos.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para realização deste trabalho.

RESUMO

Tendo em vista que a indústria da construção civil tem se expandido bastante nos últimos tempos, a demanda por recursos naturais para a execução de produtos e serviços tem aumentado na mesma proporção, acarretando uma série de desafios, especialmente no que se refere aos impactos ambientais gerados por essa atividade. O presente estudo trata sobre a determinação de parâmetros αE para agregados graúdos alternativos em concretos com base na NBR 6118:2014. Para tanto, foi necessário selecionar os resíduos da indústria da construção civil a serem empregados como agregados graúdos alternativos, levando-se em consideração os que são mais pesquisados na literatura, além de verificar e comparar os valores experimentais de resistência característica à compressão e módulo de elasticidade dos concretos, obtidos por meio dos ensaios mecânicos realizados em cada uma das pesquisas escolhidas, assim como aplicar, na equação da NBR 6118:2014, os valores de resistência característica à compressão e módulo de elasticidade, encontrados nas pesquisas realizadas, e determinar o valor do parâmetro αE para os agregados graúdos alternativos em estudo. Realizou-se, então, uma revisão de literatura com o levantamento de estudos bibliográficos que apresentam ensaios relacionados à substituição do agregado graúdo natural por agregados graúdos alternativos. Assim, dentre essas diferentes pesquisas, foi selecionada apenas uma para cada tipo de resíduo empregado como agregado graúdo alternativo em concretos, os quais foram o Resíduo de Construção e Demolição (RCD), o Resíduo de Concreto (RC) e o Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV). Diante disso, verificou-se que os valores de αE foram obtidos por meio da metodologia empregada, em que foi possível concluir que este estudo contribui para um futuro aprimoramento da norma em estudo, permitindo, então, a possibilidade de incorporação de parâmetros αE para agregados graúdos alternativos e, ao mesmo tempo, incentivando a utilização de diferentes opções de materiais disponíveis na indústria da construção, e não apenas os convencionais.

Palavras-chave: Concreto. Agregados graúdos alternativos. Resistência à compressão. Módulo de elasticidade. Parâmetros αE .

ABSTRACT

Considering that the civil construction industry has expanded a lot in recent times, the demand for natural resources for the execution of products and services has increased in the same proportion, causing a series of challenges, especially with regard to the environmental impacts generated for that activity. The present study deals with the determination of αE parameters for alternative coarse aggregates in concrete based on NBR 6118:2014. For that, it was necessary to select the waste from the civil construction industry to be used as alternative coarse aggregates, taking into account those that are most researched in the literature, in addition to verifying and comparing the experimental values of characteristic resistance to compression and modulus of elasticity of concrete, obtained through mechanical tests carried out in each of the chosen surveys, as well as applying, in the NBR 6118:2014 equation, the values of characteristic strength to compression and modulus of elasticity, found in the surveys carried out, and determining the value of the αE parameter for the alternative coarse aggregates under study. A literature review was then carried out with a survey of bibliographical studies that present essays related to the replacement of natural coarse aggregate by alternative coarse aggregates. Thus, among these different studies, only one was selected for each type of waste used as an alternative coarse aggregate in concrete, which were Construction and Demolition Waste (CDW), Concrete Waste (RC) and Red Ceramic Waste (RCV). In view of this, it was verified that the αE values were obtained through the methodology employed, in which it was possible to conclude that this study contributes to a future improvement of the norm under study, thus allowing the possibility of incorporating αE parameters for aggregates alternative materials and, at the same time, encouraging the use of different options of materials available in the construction industry, and not just the conventional ones.

Keywords: Concrete. Alternative coarse aggregates. Compression resistance. Modulus of elasticity. αE parameters.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Desenho esquemático ilustrando os componentes de um concreto.....	15
Gráfico 1 - Representação esquemática do módulo de elasticidade secante (E_{cs}) do concreto.....	20
Gráfico 2 - Representação esquemática do módulo de elasticidade tangente inicial (E_{ci}) do concreto.....	21
Gráfico 3 - Curvas comparativas de resistência à compressão versus deformação do agregado, pasta de cimento e concreto.....	23
Figura 2 - Modelo de uma pasta de cimento Portland bem hidratada.....	24
Figura 3 - Modelo da estrutura da pasta - Pontos cheios: partículas de gel; Espaços intersticiais: poros de gel; Espaços com C: poros capilares.....	26
Figura 4 - Representação esquemática da zona de transição e da matriz da pasta de cimento no concreto.....	28
Figura 5 - Resíduos de Construção e Demolição (RCD).....	33
Quadro 1 - Classificação dos Resíduos de Construção e Demolição.....	34
Figura 6 - Resíduos de Concreto (RC).....	37
Figura 7 - Resíduos de Concreto gerados pela indústria de pré-moldados.....	38
Figura 8 - Composição do Resíduo de Concreto.....	39
Figura 9 - Depósito de resíduo cerâmico.....	44
Quadro 2 - Apresentação da síntese dos artigos incluídos na revisão de literatura.....	50
Quadro 3 - Parâmetros αE de agregados graúdos convencionais e de agregados graúdos alternativos obtidos nesta pesquisa.....	55

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Objetivos	11
1.1.1 Objetivo Geral.....	11
1.1.2 Objetivos Específicos.....	11
1.2 Justificativa	12
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1 Caracterização do concreto	14
2.2 Propriedades mecânicas do concreto no estado endurecido	16
2.2.1 Resistência à compressão simples do concreto.....	17
2.2.2 Módulo de elasticidade do concreto.....	18
2.2.3 Fatores que influenciam o módulo de elasticidade.....	21
2.2.3.1 Estrutura interna do concreto.....	21
2.2.3.1.1 Fase agregado.....	22
2.2.3.1.2 Matriz da pasta de cimento.....	24
2.2.3.1.3 Zona de transição.....	27
2.2.4 Equações propostas pela NBR 6118:2014 para estimar o módulo de elasticidade.....	29
2.2.5 Uso de resíduos de construção civil como agregados graúdos alternativos no concreto.....	30
2.2.5.1 Principais agregados graúdos alternativos empregados em concretos.....	32
2.2.5.1.1 Resíduo de Construção e Demolição (RCD).....	32
2.2.5.1.2 Resíduo de Concreto (RC).....	36
2.2.5.1.3 Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV).....	43
3 METODOLOGIA	47
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	49

4.1	Análise dos dados obtidos.....	50
4.2	Determinação de parâmetros αE para os agregados graúdos alternativos em estudo.....	52
5	CONCLUSÃO.....	56
	REFERÊNCIAS.....	58

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a indústria da construção civil tem desempenhado um papel significativo no que tange ao crescimento econômico, em decorrência da demanda por novas infraestruturas, habitações e edifícios comerciais, por exemplo. No entanto, é importante destacar que esse crescimento acelerado tem trazido consigo uma série de desafios, especialmente no que se refere aos impactos ambientais gerados por essa atividade.

Nesse contexto, conforme Oliveira (2021, p.6), a indústria da construção constitui um relevante indicador do desenvolvimento de um país. No entanto, embora esse setor contribua significativamente para a economia, o mesmo é responsável por gerar resíduos, o que resulta em um problema ambiental e administrativo que interfere em todas as sociedades e que impulsiona a busca por soluções em todo o mundo.

Diante do exposto, Isaia (2017, apud CAVALIERE, 2020, p.22), acrescenta que, com o desenvolvimento econômico de um país, aliado ao aumento exponencial da população, aumenta-se a busca pela extração de mais recursos naturais, com a finalidade de satisfazer ao nível de exigência da sociedade, por meio da construção de novos hospitais, obras de saneamento e de infraestrutura, dentre outros. Nesse sentido, nos últimos anos, têm sido desenvolvidas diversas pesquisas com a finalidade de minimizar os impactos ambientais, decorrentes dos rejeitos industriais, bem como da extração exacerbada de recursos naturais, através da mineração, para a fabricação dos materiais empregados nas construções.

Tendo em vista esse cenário, faz-se necessário adotar medidas sustentáveis na construção civil. Assim, tem se tornado uma prioridade a busca por alternativas que reduzam o consumo de recursos naturais, minimizem a geração de resíduos e promovam a eficiência energética. Além disso, é fundamental considerar a preservação dos ecossistemas locais e a mitigação dos impactos ambientais, visando a sustentabilidade a longo prazo. Nesse contexto, a pesquisa e o desenvolvimento de novas tecnologias e práticas construtivas contribuem para tornar sustentável o setor em questão. Em razão disso, a busca por soluções inovadoras, como a utilização de materiais alternativos e processos de construção mais eficientes, contribui não apenas para reduzir os impactos ambientais, mas também para otimizar o desempenho das edificações e melhorar a qualidade de vida das pessoas.

Dentro desse contexto, Beneduzi (2020, p.7) ressalta que aprimorar técnicas de reaproveitamento de materiais na construção civil tem se mostrado uma estratégia eficaz para minimizar os impactos ambientais e promover a sustentabilidade. Através do beneficiamento e reutilização de insumos considerados entulhos, como cerâmica, argamassa e concreto, por

exemplo, é possível obter materiais com propriedades similares aos originais, contribuindo para a redução do consumo de recursos naturais e a diminuição da quantidade de resíduos descartados inadequadamente. Essas práticas representam uma importante ação em prol do meio ambiente, proporcionando a economia de energia, a redução da emissão de gases de efeito estufa e a preservação de ecossistemas naturais.

Portanto, levando-se em consideração as informações supracitadas, vale ressaltar que este trabalho tem a finalidade de realizar um estudo acerca dos agregados graúdos alternativos comumente empregados em concretos, em substituição ao agregado graúdo natural, com foco nas propriedades mecânicas desses concretos produzidos, como o módulo de elasticidade e a resistência à compressão, por meio das quais serão determinados parâmetros αE (coeficiente em função da natureza do agregado que influencia o módulo de elasticidade) para os agregados originados de resíduos, sendo estes o foco de estudo do presente trabalho, os quais são: Resíduo de Construção e Demolição (RCD), Resíduo de Concreto (RC) e Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV).

Tal determinação será realizada com base em equações empíricas presentes na NBR 6118:2014 (norma voltada para o projeto de estruturas de concreto) e revisões da literatura, contribuindo, então, para que se possa estipular os coeficientes αE para os tipos de agregados em estudo, uma vez que, na norma em questão, há apenas parâmetros referentes a agregados convencionais.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral determinar parâmetros αE para agregados alternativos empregados em substituição ao agregado graúdo convencional em concretos, com base nas equações propostas pela NBR 6118:2014, para que seja possível, então, estipular coeficientes αE para cada tipo de resíduo de construção civil a ser abordado neste estudo, ampliando, assim, a disponibilidade desses coeficientes presentes na norma em questão.

1.1.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos deste trabalho, tem-se os listados a seguir:

- Selecionar os resíduos da indústria da construção civil a serem empregados como agregados graúdos alternativos, com base nos que são mais pesquisados na literatura;

- Analisar diferentes pesquisas para um mesmo tipo de agregado graúdo alternativo aplicado em concretos e, assim, escolher um estudo para cada um desses agregados, no qual conste as informações necessárias para a realização do trabalho;
- Verificar e comparar os valores experimentais de resistência característica à compressão e módulo de elasticidade dos concretos, obtidos por meio dos ensaios mecânicos realizados em cada uma das pesquisas escolhidas;
- Aplicar, na equação da NBR 6118:2014, os valores de resistência característica à compressão e módulo de elasticidade encontrados nas pesquisas realizadas;
- Determinar o valor do parâmetro αE para os agregados graúdos alternativos em estudo, os quais são provenientes de resíduos da indústria da construção civil, empregados em substituição ao agregado graúdo convencional em concretos.

1.2 Justificativa

Levando em consideração o atual cenário do setor da construção civil, o qual tem se expandido bastante nos últimos tempos, o interesse em realizar esse estudo surgiu mediante a demanda cada vez mais acentuada por recursos naturais para a execução de produtos e serviços nesse setor. Dessa forma, a presente pesquisa apresenta uma abordagem voltada à sustentabilidade na indústria da construção civil.

Nesse sentido, é cabível destacar a necessidade de atualização e adequação das diretrizes normativas às demandas contemporâneas da indústria da construção civil, tendo em vista que a utilização de agregados alternativos é uma prática cada vez mais comum, visando a sustentabilidade e o aproveitamento de materiais reciclados ou provenientes de fontes não convencionais. Em outras palavras, contribuir para a adequação de uma determinada norma desse setor estimula a sustentabilidade na construção civil, ao viabilizar o uso de materiais alternativos e reduzir a dependência de recursos naturais escassos.

Posto isto, tendo em vista que, com a revisão da NBR 6118:2014, houve uma mudança na equação empregada para estimar o valor do módulo de elasticidade tangente inicial do concreto, com a introdução do coeficiente αE , sendo o mesmo relacionado à natureza mineralógica do agregado graúdo empregado para a produção do concreto estrutural, faz-se necessário aprofundar-se no estudo do agregado graúdo, uma vez que este é determinante no módulo de elasticidade. Além disso, a norma supracitada deixa a desejar ao apresentar apenas valores do parâmetro αE para os agregados convencionais comumente utilizados.

Em decorrência disso, determinar os possíveis parâmetros representativos de agregados graúdos alternativos conhecidos, com base no módulo de elasticidade e resistência

característica à compressão, consiste em uma medida inovadora para o estudo das propriedades dos concretos produzidos com agregados alternativos, assim como para padronizar os coeficientes αE de agregados não convencionais, contribuindo para o campo científico voltado para esse ramo, já que não há uma normativa que forneça os valores de coeficientes para tais agregados.

Ao mesmo tempo, a abordagem sobre o uso de agregados alternativos em concretos consiste em uma solução sustentável, uma vez que há sempre uma grande preocupação quanto ao desenvolvimento científico e tecnológico, pois, no que tange ao ramo da construção civil, há a extração de agregados naturais e os resíduos que a mesma gera afetam significativamente os recursos naturais. Assim sendo, a substituição do agregado graúdo natural por agregados não convencionais, constitui uma alternativa para mitigar tanto o volume extraído da natureza quanto o descartado por esse setor construtivo.

De modo geral, a pesquisa proposta apresenta relevância tanto do ponto de vista técnico, ao preencher uma lacuna normativa, quanto do ponto de vista prático, ao fomentar a adoção de práticas sustentáveis na indústria da construção civil.

No que tange ao ponto de vista social, esta pesquisa apresenta grande relevância, pois contribui para o avanço da indústria da construção civil de forma sustentável, uma vez que a utilização de agregados alternativos pode diminuir o consumo de recursos naturais, reduzir a geração de resíduos e promover a preservação do meio ambiente. Assim sendo, ao sugerir uma nova abordagem que deveria ser feita pela norma e tentar fornecer, para tanto, parâmetros adequados para o uso desses materiais, este estudo incentiva práticas mais sustentáveis na construção civil, o que impacta positivamente a sociedade como um todo.

Em relação ao âmbito acadêmico, este estudo contribui para o desenvolvimento do conhecimento científico e tecnológico, já que, ao investigar e determinar parâmetros para agregados graúdos alternativos, a pesquisa preenche uma lacuna de conhecimento e oferece uma base técnica sólida para futuros estudos e trabalhos relacionados, já que se trata de um assunto pouco explorado. Além disso, o presente trabalho incentiva a interdisciplinaridade, pois envolve a combinação de conhecimentos em engenharia, normas técnicas e materiais alternativos, contribuindo para a formação de profissionais mais capacitados.

No que concerne ao nível pessoal, o presente trabalho proporciona uma oportunidade de crescimento e desenvolvimento profissional, uma vez que permite ao pesquisador envolvido neste estudo aprofundar seus conhecimentos na área, adquirir experiência em pesquisa científica, desenvolver habilidades de análise e interpretação de dados e fortalecer suas competências no que diz respeito à redação acadêmica e comunicação

científica. Ademais, o pesquisador em questão poderá contribuir ativamente para o avanço da sua área de atuação, impactando positivamente a sociedade por meio de seu legado científico.

Em outras palavras, esta pesquisa, voltada para a determinação de parâmetros αE para agregados graúdos alternativos provenientes de resíduos da construção civil, promove a sustentabilidade nesse setor, contribui para o avanço do conhecimento científico e proporciona oportunidades de crescimento profissional para o responsável pela pesquisa e demais envolvidos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

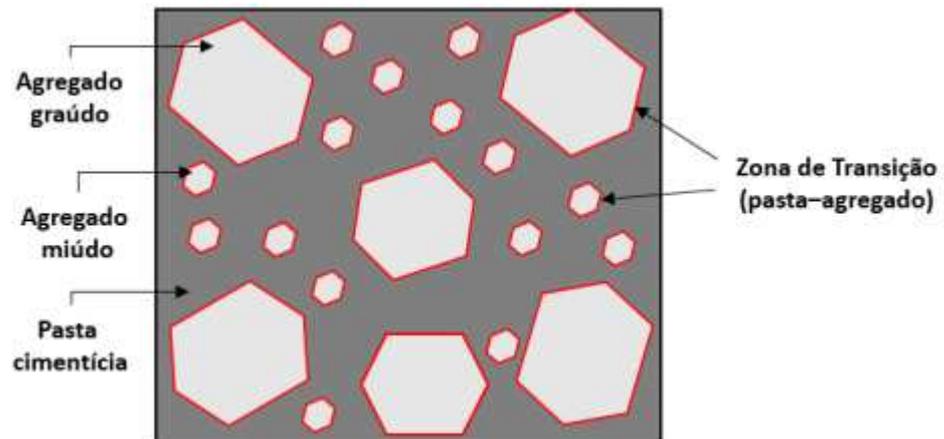
2.1 Caracterização do concreto

De acordo com Verian (2018), conforme citado por Costa *et al.* (2019, p.1), em razão de o concreto ser o material mais consumido em todo o mundo, o mesmo destaca-se como um dos mais utilizados pela indústria da construção. No que tange aos principais constituintes da mistura de concreto, tem-se os seguintes: cimento, agregados (miúdos e graúdos), água e aditivos. Vale ressaltar que dentre os componentes supracitados, os agregados representam cerca de 70% a 80% do volume do concreto. Como exemplos de agregados naturais comumente empregados, pode-se citar: areia, pedra britada e cascalho, os quais são obtidos por meio da mineração de recursos naturais, bem como em pedreiras.

Nesse sentido, é cabível mencionar que, em decorrência da demanda por melhorias nas propriedades do concreto, como a de resistência no estado endurecido, por exemplo, tem-se inserido na mistura do mesmo outros componentes, tais como os aditivos, como já foi mencionado, e as adições, os quais são capazes de proporcionar tais melhorias nas propriedades desse material.

Em outras palavras, Mehta e Monteiro (2006), Aitcin (2000) e Wu *et al.* (2001) definem o concreto como sendo um material compósito constituído basicamente pela mistura de agregados (graúdo ou miúdo) em uma matriz, sendo esta a pasta de cimento (apud SILVA, 2018, p.28), como pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Desenho esquemático ilustrando os componentes de um concreto.



Fonte: Silva (2018).

Ainda conforme os autores supracitados, as características e teores desses materiais, assim como as interações entre os mesmos na zona de transição de interface (*Interfacial Transition Zone* - ITZ) determinam o comportamento e desempenho do concreto.

Segundo Silva (2018, p.28), no que concerne a concretos convencionais, o agregado graúdo constitui grande parte do volume dos mesmos (correspondendo a cerca de 45%), consistindo, portanto, no componente de maior proporção. Desse modo, assim como o volume e porosidade da pasta de cimento (determinada pela relação água/cimento), as peculiaridades dos agregados graúdos também podem influenciar as propriedades mecânicas do concreto, tais como o módulo elástico e a resistência à compressão.

Nesse contexto, cabe ressaltar que, em se tratando de microestrutura do concreto, sendo esta constituída por agregado, pasta de cimento e zona de transição (na interface entre o agregado e a pasta de cimento), a fase agregado é a mais densa e firme. Por outro lado, como fases mais frágeis, tem-se a matriz pasta de cimento e a zona de transição, os quais são preponderantes na resistência do concreto, segundo Mehta e Monteiro (2014), conforme citado por Beneduzi (2020, p.24-25). Ainda de acordo com os autores mencionados, a zona de transição possui grande parte dos vazios que constituem o concreto e, nestes, fica armazenada a maior quantidade da água absorvida.

Desse modo, para que se conheça e controle as propriedades do concreto, deve-se conhecer também tanto a microestrutura do concreto e as propriedades particulares dos elementos que a constituem, quanto a relação entre os mesmos.

Assim sendo, conforme Ambrozewicz (2012, apud SILVA, 2018, p.16), para que se obtenha um concreto com boas propriedades, como é o caso de valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade, por exemplo, de modo que obedeçam aos critérios

exigidos para a execução do projeto estrutural, além do fator econômico, faz-se necessário estudar estes aspectos: propriedades dos materiais constituintes; propriedades do concreto, bem como os fatores que podem ocasionar a alteração das mesmas; proporcionamento adequado, assim como execução cuidadosa da mistura; controle do concreto durante a fabricação e depois do endurecimento do mesmo; entre outros.

Vale lembrar que o concreto possui boa resistência à compressão, em que os valores acerca dessa propriedade são obtidos por meio do rompimento de corpos de provas e, conseqüentemente, são empregados no dimensionamento de elementos estruturais. No entanto, no que se refere a esforços de tração, esse material dispõe de baixa resistência. Tal ocorrência apresenta-se como uma das principais justificativas para a inserção de aço à mistura, transformando-o, então, em concreto armado, conforme Celestino (2018, p.21).

Dentre as razões pelas quais o concreto apresenta-se como o material mais utilizado na construção civil, é cabível destacar as considerações de Jacintho (2019, apud CAVALIERE, 2020, p.28), o qual explica o alto consumo desse compósito por este ser um ótimo material para ser empregado em edificações, pela mobilidade nas formas, durabilidade, baixo custo de fabricação e manutenção do mesmo.

Há, ainda, outras justificativas, como as enunciadas por Mehta e Monteiro (2014), conforme citado por Cavaliere (2020, p.28), as quais são as seguintes: a facilidade de se obter elementos estruturais de concreto com formas e tamanhos variados; o baixo custo, assim como a rápida disponibilidade do material para a obra; a resistência ao fogo, bem como ao carregamento cíclico; e a capacidade do concreto de enfrentar a ação da água sem, no entanto, sofrer forte degradação.

Em decorrência de tais justificativas, o concreto é bastante empregado na cadeia de produção da construção civil, compreendendo desde a fabricação de elementos estruturais para a construção de edificações (tais como: pilares, vigas e lajes), a confecção de estruturas destinadas ao armazenamento e transporte da água (como, por exemplo: tubos, reservatórios e cisternas), até a execução de elementos estruturais de maior complexidade para utilização na infraestrutura urbana (como pavimentos, pontes e viadutos, por exemplo), como afirma Cavaliere (2020, p.28).

2.2 Propriedades mecânicas do concreto no estado endurecido

De acordo com Carrijo (2005), as características do agregado graúdo são determinantes nas propriedades do concreto. Nesse sentido, a porosidade é um dos principais fatores que influenciam a resistência, durabilidade e permeabilidade desse material. Além disso,

a forma, a dimensão e a origem do agregado também definem as propriedades físicas e mecânicas do mesmo (apud BENEDUZI, 2020, p.8-9).

Celestino (2018, p.15) enfatiza que o dimensionamento estrutural de elementos de concreto armado está associado, especialmente, à resistência à compressão e, por meio desta, são determinados outros parâmetros empregados nos cálculos, como o módulo de elasticidade, por exemplo, o qual é utilizado para cálculos de deformações, tais como deslocamentos e flechas.

No que diz respeito às propriedades mecânicas do concreto quando o mesmo se encontra no estado endurecido, neste trabalho, será dado enfoque apenas às variáveis de resistência à compressão simples e módulo de elasticidade.

2.2.1 Resistência à compressão simples do concreto

Trata-se da propriedade mecânica principal do concreto no estado endurecido, uma vez que a mesma está diretamente relacionada à confiabilidade e segurança das estruturas. Por meio dessa propriedade, é possível controlar a qualidade, a resistência no processo de dosagens, assim como a estabilidade e segurança que a estrutura terá, de acordo com Neville e Brooks (2010, apud AFRICANO, 2021, p.39).

Tendo em vista que a resistência à compressão é considerada umas das propriedades mais importantes do concreto, Mehta e Monteiro (2000, apud SILVA, 2018, p.17) caracterizam-na como sendo a capacidade que esse material possui de resistir a tensões sem sofrer ruptura. Ainda conforme os autores supracitados, a resistência é a propriedade comumente determinada, uma vez que, em comparação às demais propriedades, proporciona maior facilidade na execução do seu ensaio, bem como consiste na propriedade mais solicitada do concreto quando empregado em estruturas. Ademais, é importante mencionar que várias propriedades podem ser associadas à resistência, como o módulo de elasticidade, por exemplo.

De acordo com Beneduzi (2020, p.24), a porosidade e a relação água/cimento estão entre os fatores que intervêm na resistência à compressão, uma vez que os mesmos dependem da textura e da forma do agregado graúdo empregado, bem como do tamanho das seções deste. Em relação a isso, Gonçalves (2001), conforme citado por Beneduzi (2020, p.24), acrescenta que o grau de adensamento e as condições de cura, assim como o tipo e dimensão do agregado, também são fatores que influenciam essa propriedade. No que tange à execução do ensaio, outros aspectos intervenientes estão relacionados ao formato do corpo de prova, ao tipo e à velocidade da tensão aplicada.

Sob outra perspectiva, Neville e Brooks (2013) comentam que a resistência à compressão está relacionada à integridade da estrutura da pasta de cimento, isto é, à existência de poros e descontinuidades que provocam a diminuição da resistência do concreto. Além disso, outro aspecto que pode ocasionar a redução da resistência diz respeito à microfissuração originada entre o agregado e a interface da pasta de cimento. Os autores mencionados ressaltam, ainda, que o parâmetro para o qual se deve voltar maior atenção, ao longo do processo de produção do concreto, é a relação água/cimento, a qual está diretamente associada com a resistência do mesmo, em razão de essa relação determinar a porosidade da pasta de cimento e, por consequência, influenciar o seu desempenho no que tange à resistibilidade (apud MEDEIROS, 2022, p.20).

Vale ressaltar que a resistência do concreto é determinada por meio de ensaios normalizados pela ABNT NBR 5739: 2018.

2.2.2 Módulo de elasticidade do concreto

Segundo Neville (2016), conforme citado por Medeiros (2022, p.20), a capacidade de resistência do concreto diante das tensões impostas é indispensável em um projeto estrutural, o que contribui para que a avaliação dessa propriedade seja pertinente. No entanto, é importante destacar que sempre há uma deformação relacionada à tensão das cargas solicitantes em uma determinada estrutura. Dessa forma, ao longo da concepção de um projeto estrutural, faz-se necessário voltar a atenção para a relação entre tensão e deformação.

De acordo com Schneider (2020, apud MEDEIROS, 2022, p.20), tal associação é obtida mediante a razão entre tensão e deformação do material no sistema elástico (referente à capacidade do material voltar ao seu estado normal quando a tensão cessa), no qual se denomina módulo de elasticidade do concreto, e consiste em uma propriedade que varia de acordo com o traço, agregados, adensamento e cura do concreto.

Gonçalves (2001) destaca que o módulo de elasticidade do concreto está diretamente associado à porosidade do agregado. Logo, tendo em vista que esta intervém na massa específica do agregado, com base nessa medida quantitativa, é possível obter, então, uma estimativa da influência no módulo de elasticidade. O referido autor também enfatiza que o módulo de elasticidade aumenta com a resistência do concreto, no entanto, tal ocorrência depende, ainda, do módulo de elasticidade do agregado empregado, bem como da proporção do volume do mesmo (apud BENEDEZI, 2020, p.27).

Em vista disso, por meio dos estudos realizados por Bilesky *et al.* (2018, apud CAVALIERE, 2020, p.33), acerca do módulo de elasticidade em concretos fabricados com

agregados graúdos de naturezas petrográficas distintas (como calcário, diabásio e granito), concluiu-se, de forma experimental, que, para uma mesma relação água/cimento, tem-se que o módulo de elasticidade é influenciado pela natureza mineralógica do agregado graúdo. Ou seja, a natureza do tipo de agregado intervém consideravelmente nos valores de módulo.

Acerca disso, Mehta e Monteiro (2014) acrescentam que, em razão da alteração do agregado graúdo na constituição do concreto, por consequência, o módulo de elasticidade será afetado. Dessa forma, entre as características que influenciam o módulo de elasticidade do concreto, a porosidade no que se refere ao agregado graúdo destaca-se como sendo a principal. Em outras palavras, a porosidade do agregado define a sua rigidez, e esta controla a capacidade do agregado de limitar a deformação da matriz. Neville (2016), por sua vez, comenta que os agregados densos apresentam um módulo de elasticidade mais elevado. Geralmente, quanto maior for a quantidade de agregados graúdos que possuam módulo de elasticidade alto em uma mistura de concreto, maior será o módulo de elasticidade desse concreto (apud SARTORTI *et al.*, 2018, p.3).

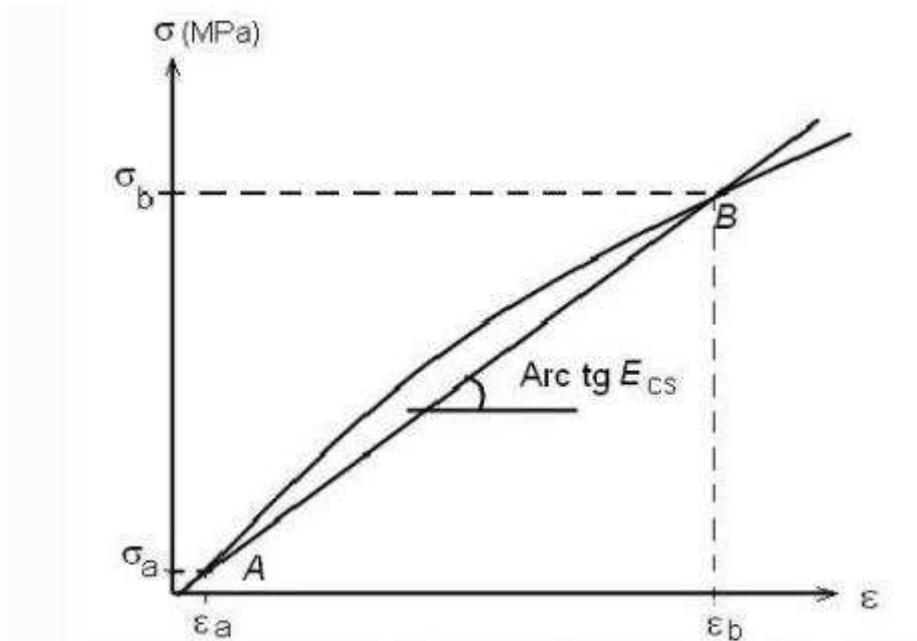
Ainda de acordo com Mehta e Monteiro (2014), como citado por Cavaliere (2020, p.55), quanto ao concreto, comentam que a resistência à compressão característica do mesmo está diretamente associada ao módulo de deformação, pois ambos são influenciados pela porosidade das partes que compõem o concreto, as quais são: o agregado, a matriz cimentícia e a zona de transição na interface. Além do aspecto porosidade, a relação água/cimento, o teor de ar incorporado, as adições minerais e o grau de hidratação do cimento são fatores determinantes no módulo de deformação da matriz cimentícia.

Ainda com base nos autores mencionados, dentre os parâmetros intervenientes na determinação da relação tensão-deformação do concreto, pode-se destacar a zona de transição na interface, já que essa região comumente é caracterizada por vazios capilares, microfissuras e cristais orientados de hidróxido de cálcio. Desse modo, os aspectos determinantes na porosidade da zona de transição na interface são os seguintes: relação água/cimento, adições minerais, características do agregado (tais como: granulometria, dimensão máxima e geometria), interação química entre agregado e pasta de cimento e grau de hidratação do cimento. Assim como no caso da matriz cimentícia e da zona de transição na interface, a porosidade do agregado também influencia a rigidez do agregado e do concreto.

De acordo com as NBRs 8522 (2008) e 6118 (2014), como foi evidenciado por Silva (2018, p.19), o módulo de elasticidade pode ser obtido empiricamente, por meio de equações, ou por ensaios mecânicos laboratoriais. E, ainda, a propriedade em questão possui os seguintes tipos principais: módulo de elasticidade secante (E_{cs}) e módulo de elasticidade

tangente inicial (E_{ci}). No que tange ao primeiro tipo mencionado, o mesmo diz respeito ao coeficiente angular encontrado entre a reta AB (sendo esta secante do gráfico tensão-deformação) e o eixo das deformações específicas do concreto (ϵ), como está representado no Gráfico 1.

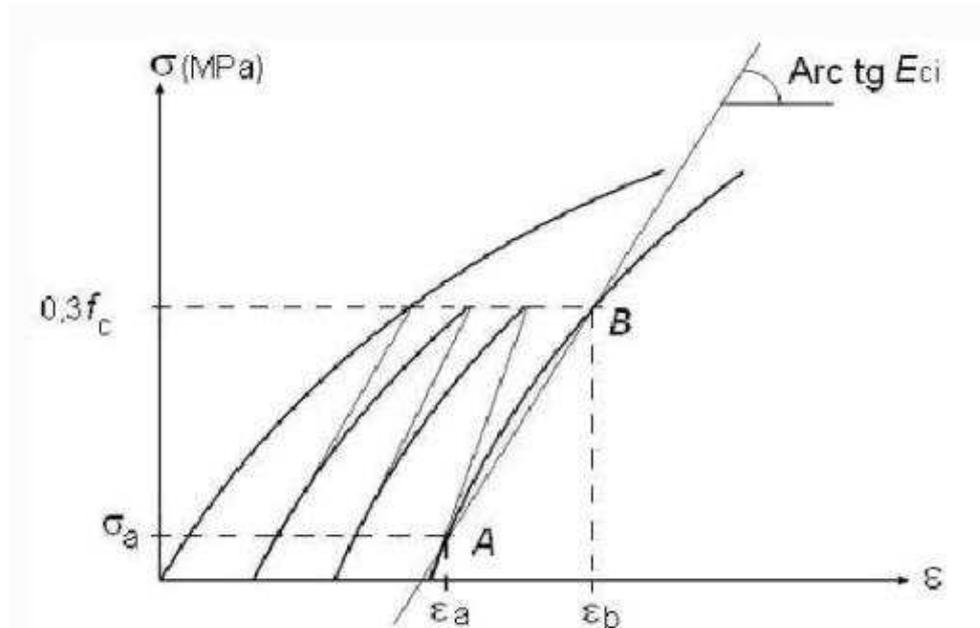
Gráfico 1 – Representação esquemática do módulo de elasticidade secante (E_{cs}) do concreto.



Fonte: ABNT NBR 8522 (2008).

Quanto a esse tipo de módulo de elasticidade, na NBR 6118 (2014, apud SILVA, 2018, p.20) enfatiza-se que o mesmo é empregado para analisar o comportamento de um elemento estrutural, quando este ainda está trabalhando dentro do regime elástico.

Como ressalta a ABNT NBR 8522 (2008), conforme mencionado por Silva (2018, p.20), o módulo de elasticidade tangente inicial, por sua vez, é considerado equivalente ao módulo de elasticidade secante, quando este está cortando o gráfico tensão-deformação nas tensões σ_a e σ_b , em que esta última corresponde a 30% da resistência à compressão do concreto (30 % f_c) em estudo, como pode ser analisado no Gráfico 2.

Gráfico 2 - Representação esquemática do módulo de elasticidade tangente inicial (E_{ci}) do concreto.

Fonte: ABNT NBR 8522 (2008).

Assim sendo, o módulo de elasticidade do concreto apresenta-se como um dos fatores imprescindíveis no que concerne ao dimensionamento estrutural, visto que essa propriedade permite estimar o comportamento em serviço da estrutura quando a mesma está submetida à ação de cargas, assim como indicar as distribuições de deformações e deslocamentos, como destaca Gujel (2014), conforme citado por Cavaliere (2020, p.23-24).

2.2.3 Fatores que influenciam o módulo de elasticidade

De acordo com Celestino (2018, p.24), a análise do comportamento elástico do concreto inicia-se pelo entendimento dos fatores que influenciam no desempenho das estruturas constituídas por esse material, a fim de prever o seu comportamento e, dessa forma, aprimorar o uso dos materiais empregados na elaboração do mesmo, com o objetivo de atender aos esforços solicitantes da maneira mais eficiente possível. Nesse sentido, a seguir, serão apresentados alguns desses fatores que impactam no módulo de elasticidade, os quais foram mencionados no tópico anterior, no entanto, faz-se necessário realizar um estudo mais detalhado para cada um desses aspectos intervenientes.

2.2.3.1 Estrutura interna do concreto

Conforme afirma Santos (2020, p.52), a estrutura interna que constitui o concreto é caracterizada por ser heterogênea e extremamente complexa. Em razão disso, esse material pode ser analisado como sendo composto por partículas de agregado envoltas por uma matriz

porosa de pasta de cimento. Além disso, há nessa composição uma zona de transição entre as duas fases, a qual possui características peculiares. Assim, essas três fases principais são identificadas como: agregado, matriz da pasta de cimento e zona de transição (ZT). Tais fases serão descritas a seguir.

2.2.3.1.1 Fase agregado

Ambrozewicz (2012) conceitua o agregado como sendo um material granular que, geralmente, é quimicamente inativo e possui forma e volume variáveis. Apesar de ser um material de baixo custo, se comparado aos demais materiais empregados na produção do concreto, é importante atentar-se à qualidade do mesmo, tendo em vista que o agregado corresponde, pelo menos, a três quartos do volume total do concreto.

Vale ressaltar que os agregados podem ser classificados em miúdo e graúdo, conforme o tamanho dos grãos, como consta na ABNT NBR 9935 (2011), assim como na ABNT NBR 7211 (2022), as quais definem o agregado miúdo como sendo aquele cujos grãos passam pela peneira com uma abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 μm . O graúdo, por sua vez, conforme essas normas, corresponde ao agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm.

Segundo Bauer (2008, apud SILVA, 2018, p.7), além do modo de classificação supracitado, pode-se classificar os agregados, ainda, de acordo com a sua origem, sendo considerados como naturais aqueles encontrados na natureza em forma de partícula, e artificiais, os que são os obtidos por meio de processos industriais. Nesse sentido, em razão da existência de diferentes origens, é perceptível que as propriedades físicas irão variar conforme o tipo de agregado.

Mehta *et al.* (1994), conforme citado por Celestino (2018, p.23), destacam que o agregado corresponde ao principal fator interveniente na massa unitária, no módulo de elasticidade e na estabilidade dimensional do concreto. Desse modo, é cabível destacar que a porosidade é a característica preponderante dos agregados que intervém no módulo de elasticidade, já que a mesma define a rigidez do agregado, e esta, por sua vez, controla a capacidade do mesmo de atenuar as deformações na matriz. Em razão disso, quanto mais agregados com alto módulo de elasticidade forem empregados, maior será o módulo de elasticidade do concreto.

Em contribuição a isso, Alexander e Mindess (2008) comentam que o módulo de elasticidade do concreto é influenciado principalmente pelo módulo de elasticidade e volume

das fases que o constituem. Embora a rigidez da pasta de cimento e as características da zona de interface também exerçam influência sobre o módulo do concreto, a principal contribuição decorre do agregado graúdo, em virtude de este corresponder à fase de maior concentração volumétrica dentro do material composto. Normalmente, observa-se que, sob carga de compressão, o agregado graúdo natural apresenta maior rigidez em comparação à pasta de cimento, conforme ilustrado no Gráfico 3. Assim sendo, o agregado graúdo possui a capacidade de reduzir a deformabilidade do concreto.

Gráfico 3 - Curvas comparativas de resistência à compressão versus deformação do agregado, pasta de cimento e concreto.



Fonte: Scrivener, Crumbie e Laugesen (2004).

Com base no Gráfico 3 e no que afirma Celestino (2018, p.23-24), é perceptível a influência da presença do agregado no concreto, visto que, apesar de este apresentar um módulo de elasticidade elevado, suas características como forma, matriz, porosidade e superfície exercem grande influência, reduzindo, assim, o módulo de elasticidade do concreto. Além disso, há, ainda, outras propriedades que interferem no módulo de elasticidade, tais como a dimensão máxima, a textura, granulometria e a composição mineralógica, as quais podem afetar a interação entre o agregado e a pasta de cimento na zona de transição e, conseqüentemente, a configuração da curva tensão-deformação.

Em contribuição a isso, Mehta e Monteiro (2014) argumentam que a fase agregado desempenha um papel crucial na massa unitária e no módulo de elasticidade do concreto. De acordo com tais autores, as características físicas dos agregados podem ser mais relevantes que a sua composição química ou mineralógica. Isso se justifica pelo fato de a dimensão e a forma

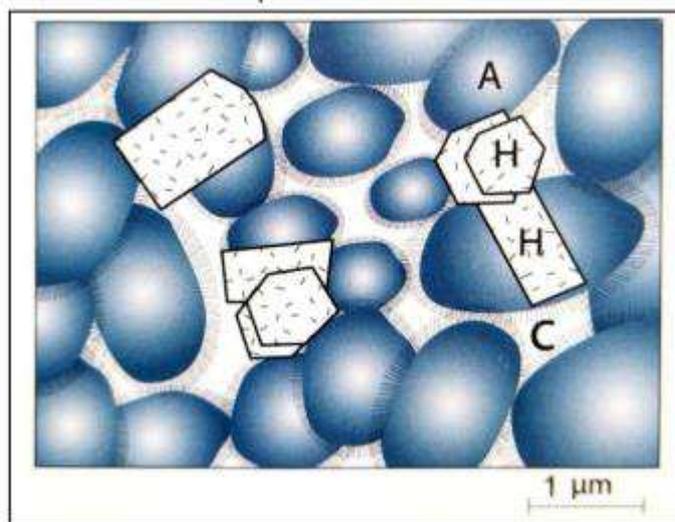
do agregado afetarem indiretamente a resistência, já que quanto maior o tamanho e a proporção de partículas alongadas e achatadas, maior será o acúmulo de água em volta da superfície do agregado, contribuindo, assim, para o enfraquecimento da zona de transição na interface pasta-agregado (apud CAVALIERE, 2020, p.36).

2.2.3.1.2 Matriz da pasta de cimento

Santos (2020, p.52) considera que, na composição de uma mistura de concreto de cimento Portland, a matriz da pasta de cimento exerce a função de envolver tanto os grãos de agregados miúdos quanto os de graúdos. Nesse sentido, os compostos hidratados de cimento, como os silicatos de cálcio hidratado (C-S-H), que possuem uma morfologia geralmente fibrosa, o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), o qual se cristaliza em placas hexagonais sobrepostas, e, também, a etringita (sulfoaluminato de cálcio), que se cristaliza em forma de “agulhas” no início do processo de hidratação, constituem os principais componentes dessa matriz.

Cavaliere (2020, p.37), por sua vez, pondera que a pasta de cimento é constituída pela combinação do pó anidro de cimento com a água, resultando em reações químicas conhecidas como hidratação do cimento. Na Figura 2, tem-se a representação de um modelo da microestrutura de uma pasta de cimento bem hidratada, em que se observa a falta de uniformidade no que se refere ao tamanho e à forma das partículas sólidas.

Figura 2 - Modelo de uma pasta de cimento Portland bem hidratada.



Fonte: Mehta e Monteiro (2014, apud CAVALIERE, 2020, p.37).

Conforme Mehta e Monteiro (2014, apud CAVALIERE, 2020, p.37-38), na pasta de cimento Portland bem hidratada apresentada na imagem acima, as partículas representadas por “A” dizem respeito aos silicatos de cálcio hidratado (C-S-H), os quais possuem dimensão

coloidal de 1 a 100 nm e constituem cerca de 50% a 60% do volume de sólidos. Assim, essas partículas são responsáveis pela maior parte da resistência e durabilidade da pasta em questão. Os sólidos identificados por “H” correspondem a produtos cristalinos hexagonais (como o $\text{CH}=\text{C}_4\text{AH}_{19}=\text{C}_4\text{ASH}_{18}$, por exemplo, com largura de $1\mu\text{m}$).

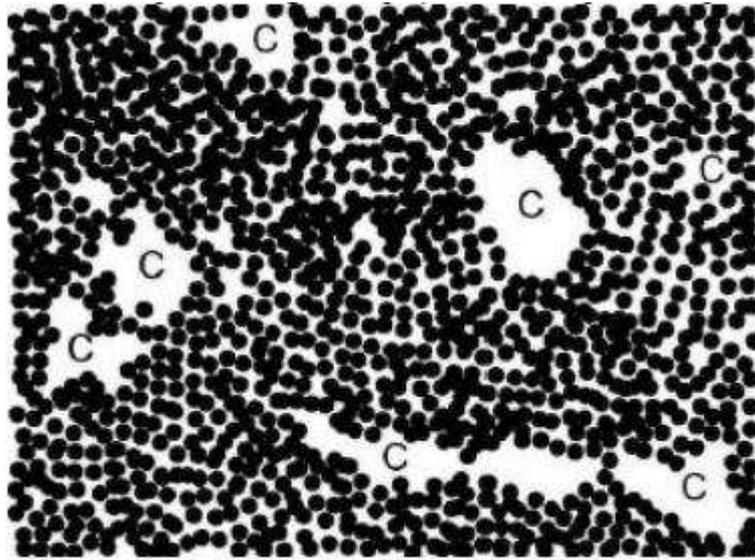
Além disso, de acordo com os autores supracitados, os cristais de hidróxidos de cálcio representam 20% a 25% do volume de sólidos e sua morfologia pode variar de acordo com o espaço disponível, temperatura de hidratação e presença de impurezas no sistema. Os cristais de sulfoaluminato de cálcio, por sua vez, compõem de 15% a 20% do volume de sólidos da pasta, desempenhando um papel secundário nas relações microestrutura-propriedade. No caso dos espaços vazios indicados com “C”, estes correspondem aos vazios capilares na pasta de cimento, os quais não são preenchidos pelos produtos da hidratação do cimento, mas sim por água.

É relevante ressaltar que Mehta e Monteiro (2014), ainda conforme citado por Cavaliere (2020, p. 38), com base em suas informações, discorrem que a existência de grandes vazios capilares no concreto pode ser prejudicial à sua resistência, uma vez que, ao ocorrer a aplicação de uma determinada carga sobre o concreto, ocorre uma grande concentração de tensão nos vazios capilares de maior tamanho, assim como nas microfissuras presentes. Nesse sentido, vale destacar que a redução da relação água/cimento ou o aumento do grau de hidratação resultam em uma diminuição no volume de vazios capilares na pasta de cimento hidratada.

Ainda em se tratando de composição da matriz, Mehta e Monteiro (2008, apud SANTOS, 2020, p.53) comentam que a pasta de cimento apresenta diversos tipos de vazios, como está representado na Figura 3. Tais vazios são categorizados em poros de gel (situados no espaço interlamelar do C-S-H, com dimensões entre 5 e 10 nm), poros capilares (os quais ocupam o espaço deixado pelos componentes sólidos da pasta e têm tamanhos variando de 0,01 a 10 nm) e os poros de ar aprisionado (com tamanhos que podem variar de 50 a 200 nm, exercendo uma grande influência na resistência e no módulo de elasticidade do concreto).

Em relação ao exposto acima, é importante ressaltar, que o volume e as dimensões dos poros dependem da relação água/cimento, bem como do grau de hidratação do cimento, sendo que a continuidade dos poros também desempenha um papel essencial no que tange à influência das propriedades mecânicas do concreto. Nesse sentido, quando a relação água/cimento é reduzida, por exemplo, ocorre um aumento na ligação entre os agregados e a pasta de cimento, resultando, conseqüentemente, em um aumento na resistência à compressão. Isso se dá devido à influência na espessura e porosidade da zona de transição.

Figura 3 - Modelo da estrutura da pasta – Pontos cheios: partículas de gel; Espaços intersticiais: poros de gel; Espaços com C: poros capilares.



Fonte: Neville (1997, apud SANTOS, 2020, p.53).

Além disso, no que tange à composição do cimento, Pacheco (2006) destaca que, se houver uma elevada proporção de C_3S (silicato tricálcico) e C_3A (aluminato tricálcico), é esperado que tanto a resistência à compressão quanto o módulo de elasticidade sejam altos nas idades de 7, 14 e 28 dias. Em contrapartida, se a proporção de C_2S (silicato dicálcico) for maior, a resistência e o módulo de elasticidade inicial serão baixos, porém, a resistência e o módulo final serão altos. Contudo, Sideris, Manita e Sideris (2004) ressaltam que o módulo de elasticidade do concreto e da argamassa só atingem estabilidade quando a hidratação da pasta de cimento se aproxima do final, o que normalmente ocorre após os 28 dias.

Santos (2020, p.55) acrescenta que o aumento da relação água/cimento no concreto impacta de forma negativa a pasta de cimento, a zona de transição existente entre a pasta e o agregado, assim como a porosidade, resultando em uma redução tanto no módulo de elasticidade quanto na resistência à compressão.

Em contribuição a isso, Bauer, Pereira e Leal (2012) e Xie *et al.* (2015) afirmam que há uma relação inversa entre a proporção água/cimento e o módulo de elasticidade do concreto, uma vez que um aumento da relação água/cimento resulta em uma matriz cimentícia mais porosa e menos rígida. Assim sendo, se a quantidade de cimento no sistema permanecer constante e apenas a quantidade de água variar, os compostos resistentes não serão afetados, tendo em vista que a massa de cimento permanece a mesma. Entretanto, a quantidade de água livre levará a um aumento na porosidade capilar, o que resultará, então, em uma redução na rigidez do concreto.

2.2.3.1.3 Zona de transição

De acordo com Santos (2020, p.58), a composição macroscópica do concreto consiste em duas zonas distintas: os agregados e a pasta de cimento hidratada. Entretanto, em um nível microscópico, é possível identificar uma terceira zona, a qual é constituída pela pasta de cimento hidratada nas superfícies das partículas de agregado, sendo denominada, então, zona de transição. Tal zona atua como uma interface entre a pasta de cimento hidratada e as partículas de agregado. Em outras palavras, a zona de transição é considerada a terceira fase constituinte do concreto, juntamente com o agregado graúdo e a pasta de cimento hidratada.

Em adição a isso, Xie *et al.* (2015) comentam que a microestrutura da zona de transição no concreto apresenta características distintas da pasta de cimento, uma vez que apresenta maior porosidade, precipitação de cristais de portlandita grandes e achatados e um maior teor de etringita.

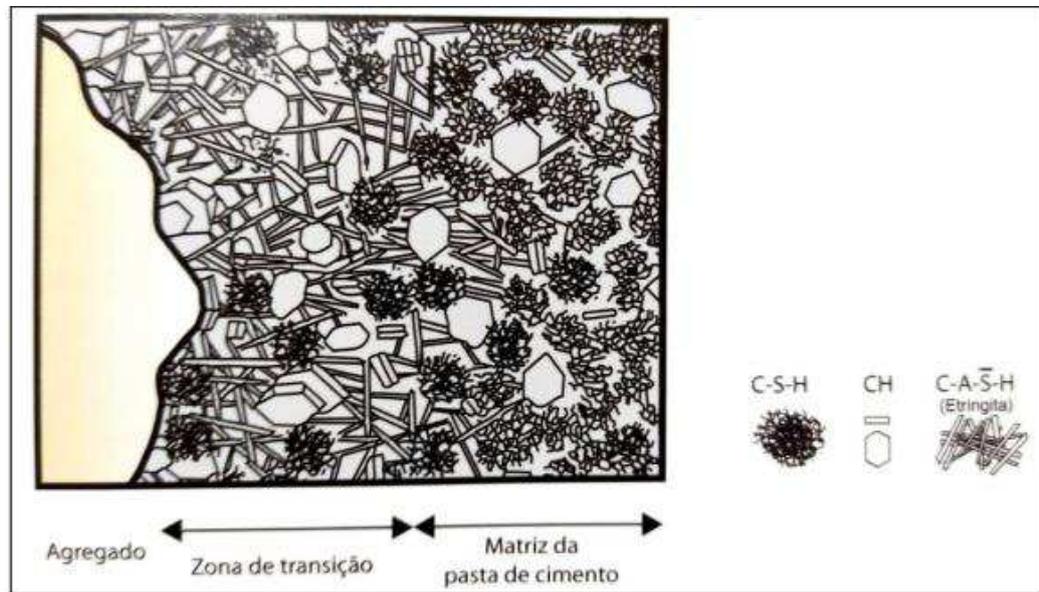
Nesse sentido, Celestino (2018, p.24) ressalta que, na zona de transição do concreto, é frequente encontrar espaços vazios, microfissuras e cristais orientados de hidróxido de cálcio, os quais exercem um papel relevante na definição das relações entre tensão e deformação no concreto. Paralelamente a isso, Mehta e Monteiro (2014, apud SANTOS, 2020, p.58), comentam que, em decorrência da presença de uma grande quantidade de vazios e fissuras na região, a interface entre agregados e pasta de cimento é amplamente conhecida como o “elo fraco” do concreto.

Celestino (2018, p.24-25) ressalta, ainda, que é possível observar que o tempo de cura não afeta igualmente a resistência e o módulo de elasticidade do concreto, em que estudos revelaram que o módulo de elasticidade aumenta em uma taxa maior em comparação com a resistência à compressão. Tal ocorrência pode ser explicada pela possibilidade de que uma interação química lenta entre a pasta de cimento alcalina e o agregado tenha um impacto mais significativo na relação tensão-deformação do concreto do que na sua resistência à compressão.

Mehta e Monteiro (2014), conforme citado por Cavaliere (2020, p.39), explicam que a formação de uma camada de água ao redor das partículas de agregado de maior tamanho resulta em uma relação água/cimento mais elevada na região próxima ao agregado, em contraste com áreas mais distantes do mesmo, sendo essa região conhecida como zona de transição. Em decorrência da alta relação água/cimento entre o agregado e a pasta, a presença dos produtos cristalinos etringita e hidróxido de cálcio é mais significativa nessa região do que no restante da pasta de cimento, o que leva a um aumento no volume e no tamanho dos vazios presentes na zona de transição, conferindo-lhe uma maior porosidade em relação à matriz da argamassa. Na

Figura 4, tem-se a representação da zona de transição, bem como da matriz da pasta de cimento no concreto.

Figura 4 – Representação esquemática da zona de transição e da matriz da pasta de cimento no concreto.



Fonte: Mehta e Monteiro (2014, apud CAVALIERE, 2020, p.40).

Ainda de acordo com os autores Mehta e Monteiro (2014, apud CAVALIERE, 2020, p.40), durante o processo de hidratação, uma segunda geração de cristais de etringita e hidróxido de cálcio, em tamanho reduzido, preenche os espaços vazios na zona de transição, contribuindo, assim, para o aumento da densidade e da resistência dessa zona de transição na interface.

Ademais, os mesmos autores supracitados destacam que a zona de transição desempenha o papel de realizar a conexão entre a pasta de cimento e as partículas de agregado graúdo. Dessa forma, embora os componentes individuais sejam rígidos, a rigidez do compósito é reduzida em decorrência da presença de zonas fragilizadas, tais como vazios e microfissuras, as quais impedem a transferência de tensão. Destarte, o volume de vazios e microfissuras presentes exercem uma influência significativa na rigidez ou no módulo de elasticidade do concreto.

Tendo em vista os fatores citados, a análise da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado é fundamental, uma vez que as diferenças nas características químicas das matérias-primas e nas propriedades superficiais dos agregados exercem influência direta nas ligações cristalinas estabelecidas entre a pasta e o agregado, conforme enfatizam Paulon e Kirchheim (2011).

2.2.4 Equações propostas pela NBR 6118:2014 para estimar o módulo de elasticidade

Segundo Cavaliere (2020, p.24), no Brasil, o módulo de elasticidade por ser calculado por meio das equações recomendadas pela NBR 6118: 2014, as quais relacionam diretamente o módulo de elasticidade com a resistência à compressão do concreto, bem como com a natureza do agregado graúdo empregado, o qual influencia bastante na propriedade do módulo de elasticidade e, por consequência, nas propriedades do concreto no qual esse agregado for empregado.

Em outras palavras, conforme o autor supracitado, a referida normativa brasileira propõe duas equações para a estimativa do valor do módulo de elasticidade tangente inicial obtido aos 28 dias de idade, quando não for possível realizar os ensaios necessários para a determinação dessa propriedade na fase de concepção do projeto. Assim, na situação mencionada, emprega-se a Equação 1, para a classe de resistência do grupo I (para f_{ck} de 20 MPa a 50 MPa), e a Equação 2, para a classe de resistência do grupo II (para f_{ck} de 55 MPa a 90 MPa), como mostrado abaixo:

$$E_{ci} = \alpha E * 5600 * \sqrt{f_{ck}} \quad (1)$$

$$E_{ci} = 21,5 * 10^3 * \alpha E * \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25\right)^{1/3} \quad (2)$$

Onde:

E_{ci} = módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial do concreto (MPa);

αE = parâmetro em função da natureza do agregado que influencia o módulo de elasticidade;

f_{ck} = resistência característica à compressão do concreto (MPa).

Ainda com base nas considerações de Cavaliere (2020, p.88), o parâmetro αE depende da natureza do agregado graúdo. Assim, considerando-se que a NBR 6118:2014 fornece valores para os agregados graúdos convencionais, no caso de o agregado ser o basalto ou o diabásio, o valor de E_{ci} aumenta em 20%; na hipótese de ser o granito ou o gnaisse, o valor permanece constante; no entanto, se o agregado for de natureza calcária, o módulo deve reduzir em 10%; no caso de o agregado empregado ser o arenito, a redução no módulo será de 30%. O autor supracitado melhor explica as informações apresentadas ao identificar que o parâmetro $\alpha E = 1,2$ representa agregado de basalto e diabásio, o $\alpha E = 1,0$ é empregado no caso de granito e gnaisse, o $\alpha E = 0,9$ é utilizado quando se considera agregado de calcário e o $\alpha E = 0,7$ quando

o arenito é o agregado utilizado.

É importante destacar que a NBR 6118:2014 também indica duas outras equações (Equações 3 e 4) para estimar o módulo de deformação secante, uma vez que o módulo obtido por meio de ensaios mecânicos é secante. Tais equações estão apresentadas a seguir:

$$E_{cs} = \alpha_i * E_{ci} \quad (3)$$

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 * \frac{f_{ck}}{80} \leq 1,0 \quad (4)$$

Onde:

E_{cs} = módulo de deformação secante do concreto (GPa);

α_i = coeficiente de minoração.

É importante ressaltar que, no caso da última versão da NBR 6118:2007, a mesma não considerava a influência da natureza do agregado graúdo no que tange ao valor do módulo de deformação. Além disso, não havia formulações distintas conforme a classe de resistência do concreto. No entanto, atualmente, após a referida norma ter passado por revisão, aliado ao fato de serem consideradas formulações propostas por normas estrangeiras, a NBR 6118:2014 apresenta mais particularidades que devem ser consideradas, tais como: a inserção do parâmetro αE , diferentes equações de acordo com a classe de resistência, assim como um coeficiente de conversão do módulo tangente inicial ao secante, sendo este também associado à resistência característica do concreto.

Levando-se em consideração o que comentam Kimura e Bueno (2015), como foi evidenciado por Cavaliere (2020, p.66), a finalidade de se introduzir o parâmetro αE na equação utilizada para calcular o módulo de elasticidade, é de orientar e alertar os projetistas estruturais acerca da relevância de levar em consideração a disponibilidade dos agregados nos locais de implantação. Por esse motivo, todas as normas estrangeiras e a atual norma brasileira levam em consideração o parâmetro em questão, evidenciando, então, a importância do estudo do agregado graúdo.

2.2.5 Uso de resíduos de construção civil como agregados graúdos alternativos no concreto

De acordo com Alhadad e Rodolpho (2008, apud SILVA, 2018, p.11), a preocupação mundial com os aspectos ambientais e voltados ao desenvolvimento sustentável tem exigido por parte da indústria da construção civil restrições quanto à utilização de materiais

não renováveis, como é o caso do agregado, por exemplo. Em razão disso, faz-se necessária a busca por materiais alternativos que possam ser empregados na produção do concreto.

Paralelamente a isso, Silva e Poletto (2017) comentam que a questão da geração de poluentes pela construção civil tem sido amplamente discutida, resultando em estudos que exploram a utilização de materiais previamente descartados no meio ambiente, os quais agora são utilizados como agregados em projetos de construção. No entanto, a implementação dessa prática de reutilização ainda é limitada, em decorrência dos custos adicionais envolvidos nessa iniciativa e da necessidade de mais pesquisas para desenvolver estruturas feitas com materiais reciclados.

Tal ocorrência se dá pelo fato de a indústria da construção civil, que apresenta grande potencial de desenvolvimento socioeconômico no Brasil e no mundo, consumir uma grande quantidade de recursos naturais, ao mesmo tempo em que produz um grande volume de resíduos provenientes do processo construtivo. Dessa forma, a realização de estudos voltados para o emprego de materiais alternativos em concretos favorece a elaboração de um material mais sustentável, conforme comenta Gallego (2019), como foi evidenciado por Andrade *et al.* (2022).

Vale ressaltar que, segundo Karpinski *et al.* (2009), os resíduos oriundos da construção civil são originados de materiais extraídos da natureza, os quais são processados posteriormente pelo ser humano para, então, suprir a demanda da indústria da construção, a qual desempenha um papel relevante na economia regional (apud TORRES; PENA, 2019, p.35).

Celestino (2018, p.6) ressalta que a investigação de novos materiais a serem utilizados no concreto contribuem com a construção civil quanto à substituição ou complementação de matérias-primas que estão escassas, como é o caso de agregados graúdos de natureza granítica em determinadas regiões do país.

O autor supracitado ainda acrescenta que, em decorrência da progressiva escassez de tais materiais e do intuito de diminuir a dependência a certos agregados e ainda proporcionar outras destinações que contribuam para a redução dos custos voltados à produção do concreto, sem que o desempenho do mesmo seja afetado, tem-se desenvolvido pesquisas com a finalidade de encontrar materiais alternativos, em especial o agregado graúdo, que sejam capazes de substituir os materiais convencionais, proporcionando, assim, um concreto sustentável com uma resistência mecânica satisfatória.

No entanto, é importante enfatizar que, no caso das equações apresentadas oriundas da NBR 6118:2014, as quais, como já visto, relacionam o módulo de elasticidade com a

resistência à compressão do concreto, assim como a natureza do agregado graúdo utilizado (αE), a mesma não apresenta parâmetros para agregados graúdos não convencionais, limitando-se apenas aos agregados graúdos comumente utilizados. Nesse sentido, Cavaliere (2020, p.68-69) reforça essa questão comentando que a NBR 6118:2014 somente apresenta valores de αE para agregados naturais, além do fato de as equações em questão não terem sido formuladas para estimar o módulo de elasticidade de concretos com agregados graúdos alternativos.

Nesse sentido, faz-se necessário identificar os materiais alternativos que podem ser utilizados no concreto em substituição ou complementação às matérias-primas que estão ficando cada vez mais escassas, para que seja possível, então, determinar também parâmetros para tais agregados. Assim sendo, é cabível destacar que, segundo Cavaliere (2020, p.41), existem diversas opções de materiais alternativos que podem ser empregados, tais como: a incorporação de escória de alto-forno na fabricação de cimento; a utilização de borracha de pneus veiculares na produção de concreto; a reutilização de resíduos de vidro na produção do concreto; o emprego de garrafas PETs na fabricação de vedações para alvenaria; o uso de agregados reciclados provenientes de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) na produção de concretos e pavimentos, entre outros.

2.2.5.1 Principais agregados graúdos alternativos empregados em concretos

Neste trabalho, será dado enfoque apenas ao Resíduo de Construção e Demolição (RCD), ao Resíduo de Concreto (RC) e ao Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV), em substituição ao agregado graúdo natural em concretos, os quais serão melhor abordados mais adiante. Vale ressaltar que foram selecionados apenas esses três tipos em razão de os mesmos serem os mais estudados na literatura e que, portanto, possuem maior quantidade de dados disponíveis acerca de suas propriedades.

2.2.5.1.1 Resíduo de Construção e Demolição (RCD)

Segundo Angulo (2000), Leite (2001) e Vieira (2003), o Resíduo de Construção e Demolição diz respeito a materiais oriundos de reformas, reparos e demolições, assim como a outros gerados durante as atividades de construção, incluindo obras de arte, solos, vegetação e limpeza de terrenos. Nesse sentido, ocorre a produção de tais resíduos em uma quantidade significativa em todas as fases da construção civil, os quais estão presentes desde o início até a conclusão da obra. Na Figura 5, tem-se a ilustração dos Resíduos de Construção e Demolição (RCD).

Figura 5 – Resíduos de Construção e Demolição (RCD).



Fonte: Angulo e Figueiredo (2011).

Em decorrência disso, a indústria da construção civil é responsável por uma significativa geração de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em âmbito nacional e global. Em conformidade ao exposto, a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2017) destaca que os municípios brasileiros coletaram, aproximadamente, 45 milhões de toneladas de RCD no ano de 2016, o que corresponde a 58% do volume total de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) gerados no mesmo período.

Diante disso, Cavaliere (2020, p.42) evidencia que, em razão da presença desse volume significativo de resíduos nos centros urbanos, foi estabelecida a Resolução N° 307, em 5 de julho de 2002, pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), com o objetivo de fornecer diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. De igual modo, foi aprovada a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei N° 12.305, em 2 de agosto de 2010), com a finalidade de promover a gestão integrada e o gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos. Além disso, apesar de o mercado atual de resíduos de construção ser limitado, o mesmo já está se estruturando com a fundação da Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição (ABRECON).

Nesse contexto, é cabível enfatizar que o CONAMA (2002), conforme a sua Resolução n° 307, em seu Art. 2º, estabelece que os resíduos de construção e demolição são:

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

É importante ressaltar que os Resíduos de Construção e Demolição (RCD) são categorizados em diferentes classes (A, B, C e D), de acordo com a Resolução n° 307/2002 do

CONAMA, em que, em seu Art. 3º, tem-se a definição dos materiais que compõem cada uma dessas classes, como pode ser observado no Quadro 1.

Quadro 1 – Classificação dos Resíduos de Construção e Demolição.

Classe	Descrição
A	Resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento, etc.), argamassa e concreto; de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios, etc.) produzidas nos canteiros de obras.
B	Resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e gesso.
C	Resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação.
D	Resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

Fonte: adaptado da Resolução nº 302 do CONAMA (2002).

Convém destacar que os autores costumam descrever os Resíduos de Construção e Demolição (RCD), como provenientes de todas as atividades de construção e dos restos de materiais de canteiro de obras, como já mencionado. No entanto, os mesmos não incluem os inertes de classe B apresentados na tabela anterior, tais como: metais, plásticos e vidros, assim como madeiras e resíduos orgânicos provenientes de serviços urbanos e industriais.

Ainda sobre o Quadro 1, pode-se destacar os RCD pertencentes à classe A, os quais, segundo Sousa (2011), podem ser utilizados como agregados na fabricação de concretos, independente de sua granulometria. Assim sendo, o quadro em questão, apresenta as classificações dos principais resíduos gerados pela indústria da construção civil e suas respectivas destinações para reutilização ou reciclagem.

No que concerne ao Agregado Reciclado (AR), o mesmo é definido pela NBR 15116 (2021) como sendo um material granular resultante do beneficiamento de resíduos de construção classe A, o qual possui propriedades técnicas adequadas para ser utilizado em obras de engenharia.

Em adição a isso, faz-se necessário evidenciar a colocação feita por Mota (2012), o qual enfatiza que a utilização de agregados reciclados provenientes de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) de classe A em concreto representa um dos principais desafios para o

processo de reciclagem, em virtude da variabilidade de sua composição. Isso se deve ao fato de que os agregados reciclados provenientes de RCD são mais leves, apresentam alta absorção em comparação aos agregados naturais e possuem uma porosidade elevada, constituindo fatores que podem afetar e comprometer as propriedades mecânicas do concreto tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

Em relação ao exposto, Leite (2001, apud AFRICANO. 2021, p.31) acrescenta que os fatores mencionados têm impacto direto nas propriedades mecânicas do concreto, especialmente nas resistências à compressão e à tração, sendo o módulo de deformação o mais prejudicado. Além disso, o autor em questão destaca que as formas granulométricas dos grãos dos agregados exercem uma influência significativa no desempenho final da concretagem.

Sob uma mesma perspectiva, Andreoli *et al.* (2014) apresentam considerações que corroboram com o exposto, ao destacar que o resíduo em questão apresenta uma variabilidade considerável em sua composição, assim como suas propriedades físicas e químicas podem diferir entre regiões ou mesmo em diferentes lotes. Tal diversidade pode representar um desafio para a utilização desse resíduo no processo de produção do concreto reciclado. Assim sendo, a seleção adequada dos materiais descartados na fonte geradora pode desempenhar um papel significativo no controle das características dos resíduos, facilitando sua utilização de forma mais eficiente.

Nesse contexto, autores como Rangel (2015), Frotté *et al.* (2017) e Nanya (2018) relatam que, em diversas pesquisas realizadas, há o consenso de que os concretos produzidos com agregados reciclados miúdo e agregados reciclados graúdos apresentam resistências à compressão inferiores devido aos níveis de porosidade presentes em ambos os materiais, quando comparados aos agregados convencionais, conforme citado por Africano (2021, p.38). Diante disso, cabe salientar que o aumento ou a redução da propriedade mencionada é diretamente afetada por diversos fatores, como a relação água/cimento, variações nos teores de substituição dos agregados naturais pelos reciclados e o tempo de cura durante a hidratação.

Leite (2001) acrescenta que a durabilidade dos concretos, tanto os produzidos com agregados naturais quanto com agregados reciclados, está intrinsecamente ligada à permeabilidade dos mesmos. E, ainda, que essa propriedade é influenciada pela porosidade, pela relação água/cimento e pelas taxas de absorção de água de cada material empregado. Em vista disso, conforme os estudos realizados por Rangel (2015), verificou-se que as propriedades do concreto são mais fortemente influenciadas pelas características dos agregados reciclados, como a massa específica, a composição granulométrica, a forma e a textura superficial, assim como a porosidade e a absorção de água desses materiais.

Vale mencionar que, de acordo com o estudo realizado por González-Fonteboa e Martínez-Abella (2008), foi produzido um concreto com substituição de 50% de agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado, resultando em valores de resistência à compressão menores em relação ao concreto convencional. No entanto, ao adicionar 8% de sílica ativa juntamente com o agregado graúdo reciclado, observou-se um aumento de 8,29% nos valores de resistência aos 28 dias em comparação ao concreto padrão.

Em contribuição a isso, Araújo *et al.* (2016), por meio de sua pesquisa, enfatizam que é viável substituir completamente, ou seja, até 100%, o agregado graúdo natural pelo agregado graúdo reciclado sem que ocorra uma redução significativa nas resistências à compressão em comparação ao concreto de referência. Assim, constata-se que é possível fazer uso do agregado graúdo proveniente de concreto reciclado e encontrar resultados praticamente idênticos aos obtidos com o uso de agregado graúdo natural.

Segundo Neville e Brooks (2010, apud AFRICANO, 2021, p.41), é crucial tomar precauções em relação aos agregados reciclados, em que os mesmos devem atender a critérios mais rigorosos no processo de fabricação do concreto. Nesse contexto, diversas conclusões foram encontradas em literatura referentes aos módulos de deformação dos concretos com agregados reciclados, os quais tendem a apresentar valores inferiores em comparação ao concreto convencional.

Dito isso, Cabral *et al.* (2012) apontam que a reciclagem dos Resíduos de Construção e Demolição (RCD) é considerada uma solução economicamente viável, uma vez que contribui para a redução dos custos de produção e minimiza a necessidade de extração de matéria-prima, resultando em menor impacto ambiental tanto para a população quanto para as indústrias da construção.

2.2.5.1.2 Resíduo de Concreto (RC)

Os Resíduos de Concreto (RC), ou Agregados Reciclados de Concreto (ARC), conforme Angulo e Figueiredo (2011), consistem, predominantemente, em material proveniente de demolições de estruturas de concreto, bem como de resíduos de usinas de concreto e fábricas de elementos pré-fabricados. Os autores supracitados destacam que, no Brasil, há exclusivamente concreto como resíduo, o que proporciona um conhecimento mais aprofundado de suas propriedades relevantes. Na Figura 6, tem-se a ilustração de Resíduos de Concreto (RC).

Figura 6 – Resíduos de Concreto (RC).



Fonte: Angulo e Figueiredo (2011).

Oliveira (2021, p.15) destaca que as propriedades físicas e mecânicas do agregado de resíduo de concreto podem ser categorizadas em dois grupos distintos: o próprio agregado proveniente do resíduo de concreto e o concreto produzido utilizando esse tipo de agregado. Nesse sentido, é importante ressaltar que o Agregado de Resíduo de Concreto (ARC) é obtido por meio da trituração de resíduos de concreto provenientes de áreas de demolição, peças pré-moldadas rejeitadas devido a não atenderem aos padrões de qualidade, corpos de prova, entre outros. Por outro lado, o concreto com agregado de resíduo de concreto é produzido ao substituir parcial ou totalmente os agregados naturais pelos Agregados de Resíduos de Concreto.

Além disso, o autor em questão evidencia que é amplamente reconhecido na comunidade científica que a incorporação de ARC em concretos provoca alterações nas propriedades tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, tais como absorção de água, porosidade, massa específica, módulo de elasticidade e resistência mecânica.

Assim como citado anteriormente, Sheen *et al.* (2013) e Tenório (2007) afirmam que a diversidade de origem dos Agregados de Resíduo de Concreto leva os estudiosos a estabelecer uma distinção em dois grupos. O primeiro grupo compreende os agregados de resíduo provenientes de demolições, obras e descartes de corpos de prova, por exemplo. Tais agregados exigem um processo cuidadoso de separação e triagem em razão do alto índice de contaminação por outros materiais, como vidro, madeira e solo. Essas contaminações são mais comuns nos resíduos coletados diretamente em demolições e reparos. Assim sendo, as considerações em questão destacam a importância de medidas adequadas de triagem e seleção para garantir a qualidade dos agregados reciclados empregados na produção do concreto.

Já no que concerne ao segundo grupo, Dimitriou, Savva e Petrou (2018) e Gonçalves (2001) comentam que o mesmo é constituído pelos agregados reciclados produzidos por meio da trituração do próprio concreto de referência ou por meio do controle de características como a resistência do concreto original e o tratamento da superfície dos agregados. Devido à sua origem controlada, esses agregados reciclados apresentam quantidades inferiores de contaminantes e uma menor variabilidade em comparação com aqueles coletados diretamente de demolições. Conseqüentemente, os concretos produzidos com esses agregados reciclados desse segundo grupo têm demonstrado propriedades físicas e mecânicas superiores.

Entretanto, é cabível frisar que a indústria de pré-moldados, em particular, tem demonstrado preocupação com a destinação adequada dos resíduos gerados. Porém, devido à falta de incentivos e apoio, esses resíduos acabam sendo direcionados para aterros, resultando na perda de oportunidades para a criação de novos produtos por meio da reciclagem, conforme as considerações feitas por Silva (2014). Tal situação está ilustrada na Figura 7, a qual evidencia o desperdício de resíduos pela indústria de pré-moldados.

Figura 7 – Resíduos de Concreto gerados pela indústria de pré-moldados.



Fonte: Central de Triagem e Reciclagem (2018).

Sobre o agregado graúdo proveniente de resíduo de concreto, Oliveira (2021, p.17) relata que o mesmo é um material de natureza altamente heterogênea, pois compreende componentes de três formatos distintos: agregados graúdos naturais da matriz de concreto original, agregados graúdos naturais com argamassa aderida e fragmentos soltos de argamassa. Dessa forma, a presença de duas zonas de transição pode ser claramente observada na Figura 8, identificadas pelas cores vermelha e azul.

Figura 8 – Composição do Resíduo de Concreto.



Fonte: Jayasuriya *et al.* (2021).

Levando-se em consideração o exposto pelo autor, é relevante enfatizar que essa complexidade requer a utilização de diversos métodos disponíveis na literatura para obtenção, caracterização e padronização desses agregados, pois não existem normas ou métodos consolidados para essa finalidade até o momento. Além disso, a variabilidade das características dos agregados de resíduos apresenta um desafio para sua utilização, o que tem levado os pesquisadores a buscar métodos de isolamento dos agregados de concreto, a fim de identificar padrões.

Paralelo a isso, Buttler (2003, apud BENETTI, 2012, p.22) destaca que diversas pesquisas realizadas sobre agregados reciclados corroboram a ampla aplicabilidade desse material, especialmente quando se trata do agregado graúdo reciclado, seja em aplicações estruturais ou não-estruturais. Gonçalves (2011), conforme citado pelo mesmo autor, acrescenta que a prática comum de reciclagem desse tipo de resíduo, quando este se encontra em estado endurecido, consiste na sua reutilização como agregados em novas misturas ou na construção de sub-bases e bases de rodovias. No entanto, a escassez de regulamentações normativas, como já mencionado, é uma das dificuldades enfrentadas para a utilização desses materiais.

Em adição a isso, Banthia e Chan (2000) destacam que as diferenças entre as propriedades dos concretos reciclados e convencionais são influenciadas por diversos fatores, tais como o teor de agregado natural substituído, as características dos agregados reciclados empregados e a quantidade de contaminantes presentes no agregado. Essas considerações indicam que a utilização de resíduo de concreto como agregado em novos concretos requer um

estudo detalhado de suas características para garantir o desempenho adequado do material reciclado. Sendo assim, é essencial realizar pesquisas para identificar as propriedades dos agregados provenientes de resíduos de concreto, a fim de promover um aumento no volume de materiais reciclados.

Benetti (2012, p.20) ressalta que os resíduos de concreto podem ter origem em diversas etapas, incluindo a produção de estruturas e elementos pré-fabricados, a produção e fornecimento de concreto pré-misturado, bem como a demolição de estruturas e pavimentos. Desse modo, a diversidade de processos resulta na geração de resíduos provenientes de diferentes fontes, o que evidencia a necessidade de considerar abordagens específicas para o gerenciamento e reciclagem desses materiais.

Complementando o que foi dito, diversas abordagens têm sido exploradas para a obtenção de resíduos de concreto, e uma alternativa viável é adquiri-los diretamente de empresas especializadas em reciclagem, que realizam a separação dos agregados com base em critérios de qualidade pré-estabelecidos, conforme destacam Kou e Poon (2012). Assim sendo, abordagem permite garantir a obtenção de resíduos de concreto com padrões de qualidade controlados, facilitando sua posterior utilização em processos de reciclagem e reutilização.

A indústria de concretagem, especialmente as centrais dosadoras de concreto (CDC) consistem em uma das principais fontes de resíduos de concreto. Em sintonia a isso, Benini, Repette e Cincotto (2007) ressaltam que esse setor enfrenta desafios significativos em relação ao impacto ambiental decorrente da grande quantidade de resíduos gerados. Os autores supracitados destacam, ainda, que as CDCs são responsáveis por três principais origens de resíduos: a lavagem interna do balão do caminhão betoneira ao final do dia de trabalho, a limpeza do pátio da central e a devolução de concretos frescos não utilizados nas obras. Caso esse concreto não seja reaproveitado em seu estado fresco, ocorre a geração de resíduos na forma de lodo resultante da limpeza e de concreto endurecido. Ademais, é importante considerar os resíduos gerados a partir dos corpos de prova utilizados no controle da produção.

É digno de menção o fato de que as características dos concretos produzidos com agregados graúdos reciclados apresentam variações significativas, e dependem de cada amostra de agregado empregada na mistura. Nesse sentido, Gonçalves (2001), conforme citado por Beneduzi (2020, p.24), destaca que a resistência do novo concreto está diretamente relacionada à resistência do concreto original que deu origem ao agregado reciclado. Assim sendo, quanto maior for a resistência do concreto que origina o agregado reciclado, maior será a resistência do concreto produzido com esse agregado reciclado. Portanto, torna-se essencial compreender o impacto dessas características variáveis dos agregados de resíduos nas propriedades do

concreto resultante.

Mediante isso, Soares *et al.* (2014) complementam que há uma incerteza na literatura em relação aos efeitos da incorporação do agregado reciclado de concreto no desempenho mecânico do concreto. Isso se deve aos baixos valores de massa específica, altos índices de absorção de água e presença de material pulverulento nos agregados reciclados. Reforçando a ideia anteriormente apresentada, Shi *et al.* (2016) destacam que a presença da pasta de cimento aderida à superfície dos agregados reciclados pode levar ao aumento da porosidade e à redução da resistência do ARC.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008, apud BENETTI, 2012, p.25), nos concretos convencionais, a resistência é geralmente determinada pela porosidade da matriz, uma vez que os agregados naturais são densos e resistentes. No entanto, nos concretos reciclados, os agregados oriundos de resíduos de concreto nem sempre apresentam resistência e, frequentemente, possuem uma porosidade maior em comparação aos agregados convencionais. Desse modo, a utilização de agregados reciclados na produção de concretos torna-se uma grande preocupação devido à influência dessas características.

Mediante isso, Etxeberria, Vázquez e Barra (2007) ressaltam que os agregados derivados de concreto reciclado são constituídos por agregados naturais e argamassa aderida, sendo que as propriedades físicas desses materiais são influenciadas tanto pela qualidade quanto pela quantidade dessa argamassa. Além disso, observa-se que a presença da argamassa, que é altamente porosa, contribui para a porosidade dos agregados reciclados, resultando em uma maior porosidade em comparação aos agregados convencionais.

De acordo as pesquisas realizadas por Leite (2001), a resistência à compressão do concreto é fortemente influenciada pela porosidade dos materiais constituintes e pela porosidade na zona de transição. Além disso, ao utilizar agregados reciclados nas misturas de concreto, a relação água/cimento e o teor de agregado graúdo reciclado são os principais fatores que determinam sua resistência. Werle (2010) destaca que o ponto crítico para o teor de substituição de agregado reciclado de concreto situa-se entre 50% e 75%, após o qual ocorre um rápido declínio nas propriedades mecânicas.

Em razão de o módulo de elasticidade dos concretos ser influenciado pelo teor de agregado graúdo e, conseqüentemente, pelo teor de argamassa, é essencial realizar investigações sobre essa propriedade ao substituir agregados convencionais por agregados reciclados ou de menor módulo de elasticidade. Nesse contexto, Domingo *et al.* (2010) ressaltam que as propriedades elásticas do concreto são afetadas pelo percentual de substituição dos agregados reciclados pelos convencionais, evidenciando a influência desse fator nas

características do material.

Conforme Oliveira (2021, p.18), a presença de agregados de resíduos de concreto resulta em uma grande variabilidade nas propriedades dos concretos, o que dificulta a previsão de suas propriedades físicas e mecânicas. Além disso, é observado que os concretos com ARC apresentam maior porosidade, absorção de água e índice de vazios em comparação aos concretos com agregados naturais. Tais características podem comprometer a resistência e a deformabilidade dos elementos estruturais dos concretos, tornando-os menos resistentes e mais deformáveis. E, ainda, a variabilidade das propriedades dos concretos com ARC é atribuída à variabilidade dos agregados de resíduos, o que torna difícil a previsão de características como resistência à compressão e módulo de elasticidade.

Segundo Torres e Burkhart (2016), em sua pesquisa comparativa entre concretos produzidos com agregado natural e com substituição total por agregado reciclado de concreto com diâmetros máximos de 25 mm, foi observada uma redução de, aproximadamente, 14% na resistência. Os autores também destacam que, quanto menor a relação água/cimento, maiores são as resistências obtidas.

De acordo com os estudos realizados por Benetti (2012), verificou-se uma redução no módulo de elasticidade de concretos produzidos com agregados de concreto reciclado, variando entre 43% e 50% em comparação com os concretos contendo agregados naturais. Observou-se, também, nesses estudos que essa redução do módulo de elasticidade é proporcional ao aumento dos teores de substituição dos agregados reciclados.

Conforme as pesquisas apontadas por Brito e Robles (2010), Silva *et al.* (2015) e Soares *et al.* (2014), foi demonstrado que não há uma relação linear entre a incorporação do Agregado Reciclado de Concreto (ARC) e a resistência à compressão. Esses estudos mostraram que, embora o módulo de elasticidade tenda a diminuir com a utilização do ARC, a resistência à compressão não é significativamente afetada.

Ademais, Gonçalves (2011) ressalta que é necessário beneficiar os resíduos de concreto para sua utilização, uma vez que os mesmos geralmente estão em dimensões grandes e apresentam características indesejáveis. Em adição a isso, Tam (2008), por meio de um estudo econômico, concluiu que embora haja custos envolvidos no processo de beneficiamento, a reciclagem de concreto para produção de novos concretos pode ser uma alternativa economicamente viável. Assim sendo, esse processo contribui para a geração de empregos e impulsiona a competitividade da economia.

2.2.5.1.3 Resíduo de cerâmica vermelha (RCV)

Bauer (2014) define o termo cerâmica como sendo a pedra artificial obtida por meio do processo de moldagem, secagem e cozadura de argilas, ou misturas que contenham argilas. O autor ainda explica que, nos materiais cerâmicos, a argila é unida a uma pequena quantidade de vidro, formado durante o processo de cozimento pelo calor agindo sobre os componentes da argila.

Paralelamente a isso, Braga, Dal Fabbro e Reis (2016), conforme citado por Torres e Pena (2019, p.19-20), consideram como cerâmica todos os materiais resultantes do processo de queima, compostos por elementos metálicos e não metálicos, empregados em revestimentos e estruturas na construção civil. Além disso, conforme esses autores, a cerâmica vermelha é um tipo específico de cerâmica que se assemelha a produtos com matérias-primas argilosas e apresentam coloração avermelhada como característica distintiva.

Nesse sentido, segundo Isaia (2010, apud SIRTOLI, 2022, p.21), a fabricação de cerâmicas envolve o processo de queima da argila, juntamente com impurezas como matéria orgânica e ferro, a altas temperaturas, variando de 900°C a 1100°C. Após esse processo, as cerâmicas adquirem sua coloração avermelhada característica devido à presença de ferro na composição da argila.

De acordo com a Associação Brasileira de Cerâmica (2016), a cerâmica vermelha abrange uma variedade de materiais que possuem coloração avermelhada, tais como tijolos, telhas, blocos, elementos vazados, tubos, argila expandida e utensílios domésticos. Pérez *et al.* (2010) acrescentam que esses materiais cerâmicos desempenham um papel fundamental na construção civil, sendo amplamente utilizados em várias etapas de uma obra.

Braga, Dal Fabbro e Reis (2016) destacam que os blocos cerâmicos ou tijolos são essenciais na construção civil, sendo bastante utilizados para a vedação e alvenaria. Esses materiais possuem excelente aderência à argamassa, alta resistência ao fogo e são eficientes no isolamento térmico e acústico.

Assim sendo, conforme abordado por Diniz *et al.* (2013), devido à ampla utilização dos blocos cerâmicos na indústria da construção civil, é fundamental adotar métodos eficientes para o controle de perdas desses blocos, visando a redução da geração de resíduos e minimização dos impactos ambientais associados a esses materiais. Na Figura 9, tem-se a aglomeração de material cerâmico vermelho a céu aberto.

Figura 9 – Depósito de resíduo cerâmico.



Fonte: Passos (2019).

Tendo em vista o exposto, Possa e Antunes (2016, apud PREGARDIER, 2020, p.20) destacam que, conforme uma pesquisa realizada pela Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC) em 2006, na cidade de Criciúma, é possível observar que ocorrem quebras significativas de tijolos tanto na fase de assentamento quanto na fase de instalação hidrossanitária em uma construção. Essas quebras são resultado de manuseio e transporte inadequados, alocação em locais inapropriados e corte sem procedimentos adequados.

Associação Nacional da Indústria Cerâmica (2020) destaca que os Resíduos de Cerâmica Vermelha correspondem a uma parcela significativa do total de resíduos de construção e demolição gerados no Brasil, representando um valor que vai de 5% a 20%. Esse valor pode variar dependendo do nível de controle tecnológico das indústrias. É importante ressaltar que a indústria de cerâmica vermelha no país é caracterizada por um processo ainda bastante artesanal e com baixo nível de tecnologia em comparação a outras categorias construtivas. Assim, por não possuir técnicas de controle de qualidade muito eficaz, ocorre uma maior geração de resíduos e uma atenção insuficiente quanto à destinação adequada dos mesmos.

Ainda de acordo com a Associação Nacional da Indústria Cerâmica (2020), o uso da cerâmica vermelha corresponde a, aproximadamente, 4,8% na indústria da construção civil no Brasil, gerando cerca de 70 milhões de toneladas de resíduos anualmente. Esses resíduos incluem segmentos de peças cerâmicas perdidas durante o processo de fabricação, transporte e

manuseio, além dos gerados na própria construção civil.

Alcantara (2012) ressalta que os Resíduos de Cerâmica Vermelha são classificados como resíduos de classe A, em conformidade com a Resolução n° 307/2002 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Tais resíduos têm potencial para serem reutilizados ou reciclados como agregados, tanto graúdo quanto miúdo, desde que sejam preparados corretamente para futura utilização ou reciclagem.

Dessa forma, a reutilização dos Resíduos de Cerâmica Vermelha não apenas contribui para a redução de impactos ambientais, mas também viabiliza a construção sustentável ao reduzir a extração de recursos naturais e evitar o acúmulo de resíduos em aterros, conforme ressaltado por Sirtoli (2022, p.23). Nessa perspectiva, Netto (2006) destaca que o uso de Resíduo de Cerâmica Vermelha na dosagem de concretos e argamassas resulta em ganhos significativos no desempenho desses materiais, melhorando suas propriedades mecânicas e durabilidade, tanto no estado fresco como endurecido.

Em adição ao que foi dito, Sirtoli (2022, p.13) enfatiza que é fundamental considerar a importância da reutilização de resíduos gerados pela indústria da construção civil, com a finalidade de garantir a remoção dos mesmos do meio ambiente e a possibilidade de utilizá-los como matéria-prima em outros matérias. Assim, há diversas possibilidades para a incorporação do RCV em materiais construtivos. Nesse cenário, de acordo com Medeiros *et al.* (2016), diversos estudos têm comprovado a eficiência da reutilização do Resíduo de Cerâmica Vermelha em aterros para pavimentação. E, ainda, pesquisas indicam que esse resíduo também pode ser incorporado em argamassas, concretos ou utilizado na fabricação de cimento.

Tendo em vista o exposto, nota-se que a substituição do agregado natural pelo resíduo cerâmico pode ser considerada uma opção viável na produção de concretos, inclusive para aplicações estruturais. No entanto, é essencial realizar um estudo minucioso das propriedades físicas, químicas e mecânicas do resíduo, além de verificar os níveis de substituição adequados.

Dito isso, cabe mencionar que, conforme Stroher *et al.* (2017) em seu estudo sobre a utilização da cerâmica de entulho como substituto do agregado graúdo no concreto, é observado que a presença de cerâmica no concreto resulta em um aumento na quantidade de água necessária. Isso significa que quanto maior a porcentagem de substituição do agregado graúdo natural pelo RCV, maior será a relação água/cimento, indicando que a cerâmica vermelha absorve mais água do que a pedra brita, resultando em uma redução da resistência do concreto.

Em conformidade com isso, Sirtoli (2022, p.57), com base em alguns resultados obtidos em seus estudos, observou que a resistência do concreto aumentou proporcionalmente com a idade, ou seja, quanto mais tempo transcorrido desde a sua preparação, maior foi a resistência obtida, independentemente das porcentagens de Resíduo de Cerâmica Vermelha utilizadas. No entanto, observou-se uma relação inversa entre a quantidade de RCV na mistura e a resistência do concreto, indicando que quanto maior a proporção de cerâmica vermelha, menor foi a resistência alcançada. Esse comportamento pode ser atribuído à alta absorção de água pela cerâmica vermelha, que resultou no aumento do volume de vazios do concreto, comprometendo sua resistência.

Cabral *et al.* (2009) acrescentam que estudos anteriores apontaram que, ao realizar a substituição parcial dos agregados graúdos por Resíduo de Cerâmica Vermelha na produção de concretos, é possível observar uma diminuição na resistência mecânica, bem como um aumento na retração e na porosidade do material.

Ainda conforme Stroher *et al.* (2017), ao realizar substituições de 50% do agregado graúdo pelo RCV em concretos, os resultados obtidos não foram favoráveis, com valores de resistência inferiores a 20 MPa, o mínimo exigido pela norma para concreto estrutural. Isso indica que esse tipo de concreto não é adequado para aplicações que requerem alta resistência à compressão, porém, ainda pode ser utilizado em obras que não exigem essa característica, como a execução de calçadas, por exemplo.

Em contrapartida, conforme as pesquisas realizadas por Oliveira *et al.* (2019), testes em laboratórios demonstraram que a substituição dos agregados graúdos e miúdos pelos de Resíduo de Cerâmica Vermelha, com teores de 20% e 40%, resultou em uma melhoria significativa na trabalhabilidade e no ganho de resistência aos 28 dias. Além disso, estudos conduzidos por Figueiredo e Vargas (2016) indicam que a substituição parcial dos agregados graúdos pelos Resíduos de Cerâmica Vermelha pode contribuir para uma melhor cura interna do concreto, uma vez que a cerâmica vermelha tem uma maior capacidade de retenção de água devido à sua elevada capacidade de absorção, fornecendo gradualmente água para as reações de hidratação.

Em conjunto a isso, segundo Passos (2019, p.22-23), outros autores realizaram a substituição total do agregado miúdo por resíduo cerâmico em uma mistura, e a substituição total do agregado graúdo por resíduo cerâmico em outra mistura. Os resultados obtidos demonstraram que a substituição dos agregados naturais pelo resíduo cerâmico é uma opção viável, uma vez que não houve perda de resistência mecânica e apresentou indicadores favoráveis em termos de durabilidade.

Pregardier (2020, p.62-63) destaca, com base em alguns estudos realizados, que a análise dos resultados indicou que o módulo de elasticidade das misturas contendo Resíduo de Cerâmica Vermelha aproximou-se do valor obtido pelo concreto de referência. Isso sugere um aumento na capacidade de deformação elástica em comparação às misturas compostas apenas por resíduo de concreto, que se mostraram um pouco mais rígidas. Portanto, considerando a semelhança das tensões de compressão, é possível inferir que tanto as misturas com RCV quanto a mistura de referência experimentaram um discreto incremento na capacidade de deformação elástica do concreto, resultando em uma redução do módulo de elasticidade.

Mediante o exposto, Passos, Moreno Junior e Gomes (2020) enfatizam que a utilização de resíduos provenientes de cerâmica vermelha na produção de concretos para fins estruturais pode desempenhar um papel importante na mitigação dos impactos ambientais e no aumento das práticas sustentáveis na indústria da construção civil. Isso é especialmente relevante considerando a possibilidade de escassez de agregados naturais em áreas urbanas densamente povoadas. Por outro lado, é importante destacar que existem regiões que enfrentam o desafio de lidar com grandes volumes de resíduos gerados pela construção civil, sendo que seu descarte inadequado em aterros compromete a qualidade de vida local.

3 METODOLOGIA

Nesta seção, serão apresentados todos os aspectos metodológicos da pesquisa realizada, descrevendo-se os procedimentos necessários e relevantes para a determinação dos parâmetros αE para agregados alternativos utilizados como substitutos ao agregado graúdo convencional em concretos. Vale ressaltar que tais procedimentos serão realizados com base nas equações propostas pela NBR 6118:2014, visando estipular coeficientes αE para cada tipo de resíduo de construção empregado como agregado graúdo alternativo no concreto abordado neste trabalho, os quais são: Resíduo de Construção e Demolição (RCD), Resíduo de Concreto (RC) ou Agregado Reciclado de Concreto (ARC) e Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV). Vale lembrar que esse enfoque busca ampliar a disponibilidade desses coeficientes presentes na norma mencionada, na qual só há tais parâmetros para agregados graúdos convencionais.

O presente trabalho apresenta uma pesquisa de natureza aplicada, uma vez que utiliza conhecimento da pesquisa básica para solucionar problemas específicos ou melhorar práticas existentes, ou seja, no caso da determinação de parâmetros αE para agregados graúdos alternativos, o objetivo é aplicar o conhecimento existente, o qual corresponde às equações da NBR 6118:2014 para agregados convencionais, para que seja possível, então, melhorar as diretrizes contidas na norma em questão, visando a sua eficácia e adequação às necessidades

atuais, no que tange, principalmente, à questão ambiental, tendo em vista a geração exacerbada de resíduos provenientes da construção civil, já que tais resíduos, na maioria das vezes, são descartados de forma inapropriada e que poderiam ser empregados nesse setor como agregados graúdos em concretos, por exemplo.

Para alcançar os objetivos propostos e melhor apreciação deste trabalho, foi utilizada uma abordagem quali-qualitativa, já que objetiva ampliar a quantidade de coeficientes para agregados alternativos utilizando as equações da norma existente. Além disso, a pesquisa envolve a coleta e análise de dados quantitativos com base nas equações da norma em estudo para determinar os coeficientes para os agregados alternativos. Ao mesmo tempo, também foi necessário realizar uma análise qualitativa para compreender a aplicabilidade e as implicações desses coeficientes na melhoria da norma.

Vale destacar que esta pesquisa, quanto aos objetivos metodológicos, apesar de também envolver uma abordagem descritiva, uma vez que discorre sobre os resíduos de construção que podem ser empregados como agregados graúdos alternativos e visa determinar os coeficientes para esses agregados, o estudo tem como ênfase principal a exploração do tema e a busca por informações complementares para aprimorar a norma, consistindo, principalmente, em uma pesquisa exploratória, visto que se refere a uma investigação de uma abordagem pouco explorada e com escassez de informações, em que foi necessário realizar estudos preliminares, revisão bibliográfica sobre alguns conceitos acerca do concreto e análise de dados existentes na literatura para compreender melhor o tema e identificar os coeficientes apropriados.

Para obtenção dos dados necessários a serem analisados, inicialmente, foi realizada uma revisão de literatura com o levantamento de estudos bibliográficos, por meio da qual foi possível selecionar artigos científicos, monografias, normas, teses e dissertações pertinentes ao assunto e, para tanto, foram empregadas, como base de dados, as plataformas Google Acadêmico, SciELO, Oasis, Biblioteca Brasileira de Teses e Dissertações e Repositórios Institucionais de Universidades Federais. Tais estudos bibliográficos, constituídos por regulamentações normativas e pesquisas científicas de relevância nos últimos 5 anos, no que se refere à temática proposta, foram contundentes para a montagem da fundamentação teórica que compõe este trabalho.

Desse modo, este estudo está embasado em literaturas que apresentam ensaios relacionados à substituição do agregado graúdo natural por agregados graúdos alternativos. Assim sendo, dentre essas diferentes pesquisas, foi selecionada apenas uma para cada tipo de resíduo empregado como agregado graúdo alternativo em concretos, os quais foram o Resíduo

de Construção e Demolição (RCD), o Resíduo de Concreto (RC) e o Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV). Nesse sentido, por meio do estudo, foi possível reunir, para cada tipo de resíduo estudado, dados acerca dos ensaios mecânicos relacionados ao módulo de elasticidade e à resistência à compressão. Logo, por meio dessa coleta de dados, determinou-se os parâmetros αE para os agregados alternativos, com base na NBR 6118:2014, a qual fornece equações empíricas que relacionam os parâmetros mencionados, como já apresentado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, apresentam-se os dados coletados da revisão de literatura que envolveu três tipos de resíduos da construção civil como agregados alternativos em concretos. Dessa forma, foram analisadas a resistência à compressão e o módulo de elasticidade, relacionados a cada tipo de resíduo: Resíduo de Construção e Demolição (RCD), Resíduo de Concreto (RC) e Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV).

Considerando os critérios mencionados, um estudo foi selecionado para cada tipo de agregado graúdo alternativo, a partir dos pesquisados, para compor a revisão de literatura empregada neste trabalho. No Quadro 2, tem-se uma síntese dos artigos incluídos na presente revisão.

Quadro 2 – Apresentação da síntese dos artigos incluídos na revisão de literatura.

Título do artigo	Autores	Objetivo do estudo	Agregado graúdo alternativo	Valores de resistência à compressão (fck) e módulo de elasticidade (Eci) aos 28 dias
Avaliação mecânica de concretos com agregado graúdo proveniente de resíduos de construção civil pela técnica de dopagem.	ANDRADE, Daniel Minucelli <i>et al.</i> (2022)	Este estudo teve como objetivo avaliar as características mecânicas de concretos produzidos com agregados graúdos provenientes de RCC otimizados pela técnica de dopagem. A análise da eficiência se deu pela comparação das misturas com agregado dopado e misturas controle (elaboradas com agregados não dopados), mediante ensaios de compressão axial, tração por compressão diametral, absorção de água e determinação do módulo de elasticidade.	Resíduo de Construção Civil (RCC).	fck = 17,5 MPa; Eci = 22 Gpa.
Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com agregado graúdo de resíduo de construção e demolição.	BENEDUZI, Anna Laura Dalmolin (2020)	Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência de agregados reciclados de concreto nas propriedades físicas e mecânicas de novos concretos. A partir da curva de dosagem, definiu-se dois traços para resistências características de 25 MPa e 30 MPa, e para cada uma delas foram desenvolvidos traço sem substituição (TRRF), com 50% de substituição (TR50) e 100% de substituição (TR100) do AGN pelo agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC), totalizando seis traços.	Resíduo de Concreto (RC).	fck = 28,52 MPa; Eci = 21,52 Gpa.
Durabilidade de concretos produzidos com agregado graúdo proveniente de resíduo de cerâmica vermelha.	PASSOS, Luciano; MORENO JUNIOR, Armando Lopes; GOMES, Carlos Eduardo Marmorato (2020)	Este trabalho avalia a durabilidade dos concretos produzidos com agregados provenientes de resíduos de cerâmica vermelha visando seu emprego na produção de elementos estruturais em concreto armado. Para tanto, foram produzidos traços com substituição do agregado graúdo natural pelo resíduo de cerâmica vermelha nos teores de 40 e 100% de substituição, em volume.	Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV).	fck = 19,04 MPa; Eci = 11,30 Gpa.

Fonte: Autor (2023).

4.1 Análise dos dados obtidos

Levando-se em consideração as informações apresentadas no quadro anterior acerca do primeiro estudo, o qual aborda sobre o Resíduo de Construção Civil (RCC) empregado no concreto em questão, em que foram analisadas as propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados graúdos provenientes de RCC otimizados por meio da técnica de dopagem, é importante destacar que foram feitas comparações entre as misturas com agregado dopado e as misturas controle, sendo que estas últimas foram elaboradas com agregados não dopados.

É cabível ressaltar que, segundo os autores do estudo em questão, a dopagem, processo realizado nos agregados oriundos de RCC antes da produção dos concretos, nesse contexto, consiste na utilização de uma calda (composta por cimento, sílica ativa e aditivo superplastificante), para impregnar o agregado com a finalidade de se obter um bom desempenho do concreto. Assim sendo, essa calda tem o propósito de modificar a textura dos

grãos do agregado e formar uma ponte de ligação com os demais aglomerantes presentes na mistura de cimento. Nesse sentido, com a finalidade de investigar a eficácia da técnica de dopagem em diferentes composições de concreto, considerando diferentes teores de cimento, foram elaborados traços ricos, médios e pobres.

Além disso, para avaliar o desempenho da dopagem no agregado graúdo, também foram produzidas misturas controle utilizando o agregado graúdo reciclado sem nenhum tratamento adicional. Assim sendo, as misturas foram denominadas da seguinte forma: concreto controle com traço 1:3,5 (CC35), concreto dopado com traço 1:3,5 (CD35), concreto controle com traço 1:5,0 (CC50), concreto dopado com traço 1:5,0 (CD50), concreto controle com traço 1:6,5 (CC65) e concreto dopado com traço 1:6,5 (CD65).

Desse modo, foram realizados ensaios de compressão axial, tração por compressão diametral, absorção de água e determinação do módulo de elasticidade nas idades de 7 e 28 dias, sendo que, no presente trabalho, foi considerada apenas a amostra cujo ensaio foi realizado na idade de 28 dias. Em razão dos diferentes valores de resistência e módulo de elasticidade obtidos nesse estudo do Resíduo de Construção Civil, o critério de escolha de tais valores foi a consideração do traço que apresentou o maior grau de substituição do agregado graúdo natural pelo agregado de RCC e que fosse destituído da técnica de dopagem, o que possibilita a obtenção de um resultado mais contundente. Nesse sentido, selecionou-se os dados de resistência à compressão e módulos de elasticidade correspondentes ao traço CC65, o qual diz respeito a um concreto controle e que possui maior constituição de RCC (918,47 kg/m³).

Logo, os valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade foram, respectivamente, cerca de 17,5 Mpa e 22 GPa, como mostrado no Quadro 2.

No que tange ao segundo estudo, referente ao Resíduo de Concreto (RC), cujos dados coletados também constam no quadro anterior, o mesmo teve como finalidade investigar o impacto dos agregados reciclados de concreto nas propriedades físicas e mecânicas de novos concretos. Para tanto, estabeleceu-se uma curva de dosagem com três traços de referência, os quais foram um rico (1:3,5), um intermediário (1:5,0) e um pobre (1:6,5).

Com base nessa curva de dosagem, foram definidos dois traços para resistências características de 25 MPa e 30 MPa. Além disso, para cada uma dessas resistências, foram desenvolvidos, também, três traços: um sem substituição (TRRF), um com 50% de substituição (TR50) e um com 100% de substituição (TR100) do agregado graúdo natural pelo agregado graúdo reciclado de concreto, totalizando, então, seis traços, realizados aos 7, 28 e 63 dias, sendo considerado, nesta pesquisa, apenas o valor referente aos 28 dias.

Ademais, foram realizados ensaios de módulo de elasticidade também para os

concretos de classe de resistência de 25Mpa e 30Mpa, aos 28 dias. Assim sendo, em razão dos valores distintos de resistência e módulo de elasticidade analisados no caso do Resíduo de Concreto, a seleção dos valores a serem coletados levou em consideração a maior classe de resistência, a qual diz respeito à C30, e o traço que apresentou o maior teor de substituição do agregado gráúdo natural pelo agregado de Resíduo de Roncreto (RC). Assim, foram escolhidos os dados de resistência à compressão e módulo de elasticidade correspondentes ao traço TR100, o qual corresponde ao traço de referência com 100% de substituição do agregado gráúdo natural pelo agregado reciclado de concreto.

Com base nisso, coletou-se o valor 28,52 Mpa para a resistência à compressão e 21,52 GPa para o módulo de elasticidade, como consta no Quadro 2.

O terceiro estudo, por sua vez, referente ao Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV), teve como finalidade analisar a durabilidade dos concretos produzidos com agregados oriundos de Resíduos de Cerâmica Vermelha para a sua aplicação em elementos estruturais de concreto armado. Nesse sentido, foram elaborados traços distintos com a substituição do agregado gráúdo convencional pelo RCV em volumes de 40 e 100%. No referido estudo, foram realizadas diversas análises em relação à durabilidade, assim como a avaliação das propriedades mecânicas desses concretos, tais como módulo de elasticidade e resistência à compressão axial, por exemplo, com foco nesta última.

Tendo em vista os dois teores de substituição, obteve-se valores distintos de resistência à compressão e módulo de elasticidade, aos 7 e 28 dias. Dessa forma, a coleta dos valores consistiu na escolha do traço que apresentou maior teor de substituição do agregado gráúdo convencional pelo agregado gráúdo proveniente de cerâmica vermelha. Logo, dentre os apresentados, selecionou-se o traço S100 (correspondente à substituição total do agregado gráúdo natural pelo agregado gráúdo oriundo de cerâmica vermelha) e seus respectivos valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade aos 28 dias.

Em vista disso, obteve-se o valor de 19,04 Mpa para a resistência à compressão, e 11,30 GPa para o módulo de elasticidade, conforme o Quadro 2.

4.2 Determinação de parâmetros αE para os agregados gráúdos alternativos em estudo

Tendo em vista os valores coletados de resistência à compressão e módulo de elasticidade oriundos da substituição do agregado gráúdo convencional pelos resíduos considerados como os principais encontrados na construção civil, os quais podem ser empregados como agregados gráúdos em concretos, é possível, agora, determinar os parâmetros

αE para cada um desses resíduos.

Isto posto, serão empregadas as equações propostas pela NBR 6118:2014 para estimar o módulo de elasticidade, cujas considerações já foram abordadas de forma detalhada neste trabalho. Assim, para os três tipos de resíduos da indústria da construção civil estudados, será empregada a Equação 1, referente à classe de resistência do grupo I, para f_{ck} de 20 Mpa a 50 Mpa, visto que, conforme os resultados coletados do estudo, todas as resistências características à compressão estão abaixo de 50 Mpa.

No entanto, dois dos resultados coletados na literatura ficaram abaixo do valor mínimo do intervalo considerado pela norma, ou seja, inferiores a 20 Mpa, os quais foram 17,5 Mpa e 19,04 Mpa, para o Resíduo de Construção Civil (RCC) e Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV), respectivamente.

É importante mencionar que os dados dos resíduos supracitados que apresentaram resistência inferior ao intervalo da classe de resistência pertencente ao grupo I estabelecido pela NBR 6118:2014 foram selecionados para compor o banco de dados do presente trabalho em razão de enquadrarem-se no critério empregado neste trabalho, o qual diz respeito à substituição total do agregado graúdo natural por agregado graúdo alternativo, que no caso desta pesquisa, corresponde a resíduos da indústria da construção civil. Além disso, outros estudos apresentaram valores de resistência à compressão satisfatórios no que tange ao intervalo (f_{ck} de 20 Mpa a 50 Mpa) da classe de resistência pertencente ao grupo I, no entanto, correspondiam a frações pequenas de substituição do agregado graúdo convencional, ou ainda, em conjunto com o agregado miúdo, não atendendo, portanto, aos objetivos deste trabalho.

É importante enfatizar que a resistência à compressão coletada do concreto produzido com agregado graúdo proveniente de Resíduo de Construção Civil ou Demolição foi baixa em razão da composição desse agregado alternativo, a qual é bastante variável. Além disso, um dos fatores que contribuem para tal ocorrência é a porosidade elevada que o mesmo apresenta. Assim, os teores de substituição também influenciam, em que, no caso do resíduo em questão foi feita a substituição do agregado graúdo convencional em sua totalidade pelo agregado proveniente de Resíduo de Construção Civil ou Demolição.

As mesmas considerações valem para a resistência do concreto produzido com Resíduo de Cerâmica Vermelha, pois quanto maior o teor de cerâmica vermelha na composição, menor poderá ser a resistência alcançada, uma vez que esse resíduo absorve grande quantidade de água, o que contribui para o aumento da quantidade de vazios no concreto, reduzindo, então, a sua resistência. No entanto, pode-se trabalhar com tais resistências à compressão, já que esses fatores específicos são característicos dos tipos de resíduos mencionados e, portanto,

representativos dos mesmos.

No caso da resistência à compressão proveniente do concreto produzido com Resíduo de Concreto (RC), esta foi superior ao limite definido pela norma devido à sua menor variabilidade, se comparado ao resíduo proveniente de demolições ou mesmo aos de cerâmica vermelha, que apresentam alta heterogeneidade. Ademais, a resistência do concreto produzido com agregado proveniente de concreto está diretamente relacionada à resistência do concreto que deu origem a esse agregado.

Seguindo a metodologia empregada neste trabalho, será determinado o parâmetro αE para o Resíduo de Construção Civil (RCC), conforme denominado na literatura encontrada, ou Resíduo de Construção e Demolição (RCD), como já vinha sendo nomeado trabalho, por meio da Equação 1 já apresentada neste estudo, e utilizando os dados de resistência à compressão e módulo de elasticidade do resíduo em questão fornecidas no Quadro 2. A seguir, está apresentado o cálculo do αE .

$$E_{ci} = \alpha E * 5600 * \sqrt{f_{ck}} \quad (1)$$

$$22000 = \alpha E * 5600 * \sqrt{17,5}$$

$$\alpha E = 0,94$$

Obs.: $E_{ci} = 22 \text{ GPa} = 22000 \text{ MPa}$

No que concerne ao Resíduo de Concreto (RC), o valor coletado de resistência à compressão enquadra-se no intervalo da classe de resistência do grupo I, uma vez que o dado referente à sua resistência à compressão foi de 28,52 MPa. A seguir, será realizado o cálculo para a determinação do αE para o resíduo em questão, empregando-se, novamente, a Equação 1 e os dados de resistência à compressão e módulo de elasticidade do Resíduo de Concreto presentes também no Quadro 2.

$$E_{ci} = \alpha E * 5600 * \sqrt{f_{ck}} \quad (1)$$

$$21520 = \alpha E * 5600 * \sqrt{28,52}$$

$$\alpha E = 0,72$$

Obs.: $E_{ci} = 21,52 \text{ GPa} = 21520 \text{ MPa}$

De igual modo, o valor do αE para o Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV) será determinado por meio da mesma metodologia, adotando-se, ainda, a Equação 1, como nos casos anteriores, e aplicando os dados de resistência à compressão e módulo de elasticidade do resíduo que também constam no Quadro 2. O cálculo para a determinação do valor de αE está apresentado a seguir.

$$E_{ci} = \alpha E * 5600 * \sqrt{f_{ck}} \quad (1)$$

$$11300 = \alpha E * 5600 * \sqrt{19,04}$$

$$\alpha E = 0,46$$

Obs.: $E_{ci} = 11,30 \text{ GPa} = 11300 \text{ MPa}$

Tendo em vista os dados obtidos para o αE para cada tipo de resíduo da indústria da construção civil empregado como agregado graúdo alternativo, observa-se que o parâmetro obtido para o Resíduo de Construção Civil ou Resíduo de Construção e Demolição ($\alpha E = 0,94$) mostrou-se muito próximo do valor do coeficiente do calcário ($\alpha E = 0,9$), agregado convencional, cujo parâmetro está presente na NBR 6118:2014.

Da mesma forma, o parâmetro αE determinado para o Resíduo de Concreto, o qual foi 0,72, assemelha-se ao do arenito, o qual, na norma em estudo, apresenta um αE igual a 0,7. No entanto, no caso do αE obtido para o Resíduo de Cerâmica Vermelha, o qual foi de 0,46, o mesmo não se aproxima de nenhum valor de αE dos agregados graúdos convencionais presentes na 6118:2014.

Por outro lado, no que tange apenas aos valores de αE dos agregados graúdos alternativos, verifica-se que o valor encontrado de αE para o Resíduo de Construção Civil ou Resíduo de Construção e Demolição, o qual foi de 0,94, como já mencionado, aproxima-se um pouco do determinado para o Resíduo de Concreto, cujo αE foi igual a 0,72, em comparação ao obtido para o Resíduo de Cerâmica Vermelha, que apresenta um parâmetro igual a 0,46.

No Quadro 3, estão apresentados todos os valores de αE para agregados graúdos, tanto para os já existentes na NBR 6118:2014 quanto para os obtidos nesta pesquisa para os resíduos em estudo.

Quadro 3 – Parâmetros αE de agregados graúdos convencionais e de agregados graúdos alternativos obtidos nesta pesquisa.

Agregados graúdos	αE
Basalto e diabásio	1,2
Granito e gnaisse	1,0
Calcário	0,9
Arenito	0,7
RCD	0,94
RC (ARC)	0,72
RCV	0,46

Fonte: Autor (2023).

5 CONCLUSÃO

A pesquisa desenvolvida neste trabalho teve como objetivo contribuir com a ampliação de dados existentes na NBR 6118:2014 no que se refere ao parâmetro αE presente na mesma para agregados graúdos convencionais, tendo em vista que a norma em questão não considera tais parâmetros para agregados graúdos alternativos. Para tanto, foi realizado um levantamento acerca dos principais agregados graúdos alternativos existentes na literatura, em que foram selecionados os seguintes resíduos provenientes da indústria da construção civil: Resíduo de Construção e Demolição (RCD), Resíduo de Concreto (RC) e Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV).

Com os dados coletados, fez-se uso de uma das equações que relacionam a resistência à compressão, o módulo de elasticidade e o parâmetro αE , determinando, então, este último para cada um dos agregados graúdos alternativos investigados, e a partir de então, obteve-se três valores de αE , sendo que dois destes foram obtidos por meio da utilização de resistências à compressão abaixo de 20 MPa, sendo este o valor mínimo do intervalo da classe de resistência pertencente ao grupo I, para ser possível, então, utilizar a equação respectiva para tal grupo.

Embora tenha ocorrido tal interveniência, foi possível determinar os parâmetros empregando-se a metodologia desta pesquisa. Deve-se apenas levantar uma ressalva quanto ao fato de que os valores de resistência à compressão referentes aos concretos produzidos com agregados graúdos provenientes de Resíduos de Construção e Demolição e Resíduo de Cerâmica Vermelha, que apresentaram valores abaixo do requerido pela norma em estudo, correspondem apenas a uma particularidade dos respectivos agregados utilizados, cuja resistência é afetada pelas características de tais agregados, as quais os representa, e foram selecionadas na pesquisa, pois o critério metodológico adotado consistiu na escolha de um traço de concreto produzido com substituição total do agregado graúdo convencional por cada um desses resíduos que funcionam como material alternativos a esses agregados, de forma isolada.

Assim, pode-se dizer que os objetivos propostos pelo estudo foram alcançados, visto que foi possível selecionar os resíduos da indústria da construção civil a serem utilizados como agregados graúdos alternativos, levando-se em consideração os que mais são estudados na literatura, a revisão de diversas pesquisas sobre um mesmo tipo de agregado graúdo alternativo em concretos, em que foram analisados estudos específicos que forneceram as informações necessárias para o desenvolvimento deste trabalho e a verificação e comparação dos valores experimentais de resistência característica à compressão e módulo de elasticidade

dos concretos, obtidos por meio dos ensaios mecânicos realizados em cada uma das pesquisas escolhidas.

Além disso, conseguiu-se utilizar os valores de resistência característica à compressão e módulo de elasticidade, obtidos nas pesquisas realizadas para aplicá-los na equação da NBR 6118:2014, e a própria determinação do valor do parâmetro αE para os agregados graúdos alternativos em estudo, os quais são provenientes de resíduos da indústria da construção civil e utilizados como substitutos do agregado graúdo convencional em concretos.

Assim, conclui-se, que este estudo contribui para um futuro aprimoramento da norma, permitindo, então, a possibilidade de incorporação de parâmetros αE para agregados graúdos alternativos e, ao mesmo tempo, incentivando a utilização de diferentes opções de materiais disponíveis na indústria da construção, e não apenas os convencionais. Tal iniciativa, quanto a essa normativa, poderá proporcionar benefícios tanto ao setor da construção civil, uma vez que permitirá o emprego de materiais mais sustentáveis, oriundos do aproveitamento de resíduos da construção, quanto ao meio ambiente, já que minimizará a geração de resíduos e promoverá a reciclagem na indústria, reduzindo, conseqüentemente, os impactos ambientais.

No entanto, é importante ressaltar que o presente trabalho aborda apenas sobre os agregados alternativos provenientes dos resíduos estudados, sendo necessário, então, a realização de novas pesquisas que explorem outras opções acerca dessa temática, para que seja ampliada a quantidade de parâmetros presentes na normativa empregada neste estudo. Assim, faz-se necessária a continuação desse tipo de investigação, a qual contribui para o enriquecimento do conhecimento na área da engenharia civil, proporcionando subsídios para o avanço tecnológico e a aplicação de práticas mais sustentáveis na construção de estruturas de concreto.

Pode-se mencionar, então, a investigação de diferentes tipos de agregados graúdos alternativos em substituição ao agregado graúdo convencional em concretos, o que proporcionar uma expansão deste estudo e proporcionará, assim, uma análise mais ampla e dados adicionais para aprimorar a norma em questão no que tange a diversas possibilidades de materiais alternativos.

Além disso, outra sugestão é avaliar outras propriedades do concreto, uma vez que, além da resistência à compressão e módulo de elasticidade, faz-se necessário levar em consideração outras propriedades do concreto, tais como durabilidade, permeabilidade, retração, entre outras. Destarte, investigar tais propriedades para agregados graúdos alternativos possibilitará uma maior compreensão a respeito de seu desempenho e proporcionará aprimoramentos nas normas relacionadas ao objeto de estudo.

REFERÊNCIAS

- AFRICANO, Nelson de Almeida. **Concreto com agregado graúdo reciclado de resíduo da construção e demolição para fins estruturais**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2021.
- ALCANTARA, Paloma Santos Xavier de. **Desenvolvimento de argamassas com adição de cerâmica vermelha para aplicação no cotidiano de obras**. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2012.
- ALEXANDER, M. G.; MINDESS, S. *Aggregates in concrete*. London; New York: **Taylor & Francis**, 2008.
- AMBROZEWICZ, Paulo Henrique Laporte. **Materiais de Construção: Normas, Especificações, Aplicação e Ensaio de Laboratório**. São Paulo: PINI, 2012.
- ANDRADE, Daniel Minucelli *et al.* Avaliação mecânica de concretos com agregado graúdo proveniente de resíduos de construção civil otimizados pela técnica de dopagem. **Concilium**, v. 22, n. 6, p. 626-638, 2022.
- ANDREOLI, Cleverton Vitorio *et al.* **Resíduos sólidos: origem, classificação e soluções para destinação final adequada**. Complexidade: Redes e Conexões do Ser Sustentável. 1. ed., Programa Coleção Agrinho, p. 531-552, 2014.
- ANGULO, S. C; FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com agregados reciclados**. ISAIA, GC Concreto: ciência e tecnologia. São Paulo: Arte Interativa. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. Livro concreto: ciência e tecnologia, 2011.
- ANGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.
- ANICER. **Associação Nacional da Indústria Cerâmica: dados oficiais**. 2020. Disponível em: <https://www.anicer.com.br/anicer/setor/>. Acesso em: 26 maio 2023.
- ARAÚJO, Daniel de Lima *et al.* Influência de agregados reciclados de resíduos de construção em propriedades mecânicas do concreto. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 11, n. 1, Goiânia, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. **Informações técnicas - definição e classificação**. São Paulo, 2016. Disponível em: <http://abceram.org.br/definicao-e-classificacao/>. Acesso em 23 maio 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil**. São Paulo, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116: Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensaios**. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas**

de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9935**: Agregados - Terminologia. Rio de Janeiro, 2011.

BANTHIA, N.; CHAN, C. Use of recycled aggregate in plain and fiber-reinforced shotcrete. **Concrete International**, 2000, v. 22, n. 6. p. 41-45.

BAUER, E.; PEREIRA, C. H. A. F.; LEAL, A. C. F. S. Valores do módulo de elasticidade de concretos comercial da região do Distrito Federal. **XIV ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. Juiz de Fora, 2012.

BAUER, L.A. F. **Materiais de construção civil**. v.1. 5. ed. Revisada. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

BENEDUZI, Anna Laura Dalmolin. **Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com agregado graúdo de resíduo de construção e demolição**. 2020. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Taquari - Univates, Lajeado, 2020.

BENETTI, Joana Kirchner. **Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico de concreto produzido com agregado graúdo reciclado de concreto**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos - Unisinos, São Leopoldo, 2012.

BENINI, H.; REPETTE, W.; CINCOTTO, M.A. Reaproveitamento de concreto fresco dosado em central com o uso de aditivo estabilizador de hidratação. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**, 2007. 17 p.

BRAGA, C.; DAL FABBRO, T.; REIS, E. A. P. **Cerâmica Vermelha**: definição e aplicação. Encontro de Iniciação Científica, ISSN, 2016.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Resolução nº 307**, 5 de julho de 2002.

BRITO, J.; ROBLES, R. Recycled aggregate concrete methodology for estimate its long term properties. **Indian Journal of Engineering & Materials Sciences**, v.17, n.6, p.449-462, 2010.

CABRAL, Antonio Eduardo Bezerra *et al.* Desempenho de concretos com agregados reciclados de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 55, n. 336, p. 448-460, 2009.

CABRAL, Antonio Eduardo Bezerra *et al.* Performance estimation for concretes made with recycled aggregates of construction and demolition waste of some Brazilian cities. **Materials Research**, v. 15, p. 1037–1046, 2012.

CAVALIERE, Ivanny Soares Gomes. **O estudo comparativo do módulo de elasticidade de concretos convencionais e concretos com materiais alternativos**. 2020. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) - Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2020.

CELESTINO, Mateus Araújo de Souza. **Análise da curva tensão versus deformação do concreto laterítico**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

CENTRAL DE TRIAGEM E RECICLAGEM. **Recebemos – Pré-moldados**. 2018. Disponível em: http://ctrsp.com.br/materiais_recebidos/pre-moldado. Acesso em: 15 maio 2023.

COSTA, José Yter Alcantara *et al.* Agregado reciclado de resíduos de construção e demolição: influência nas propriedades do concreto no estado endurecido. *In: 2º WORKSHOP DE TECNOLOGIA DE PROCESSOS E SISTEMAS CONSTRUTIVOS*. 2019. p. 1-6.

DIMITRIOU, G.; SAVVA, P.; PETROU, M. F. Enhancing mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 158, p. 228–235, 2018.

DINIZ, Fábio William Correia *et al.* **Quantificação de perdas na construção civil através de indicador de eficácia Morant para blocos cerâmicos**. Estudo de caso em obra. XIII JORDANA DE ENSINO. Recife, 2013.

DOMINGO, Alberto *et al.* Long term deformations by creep and shrinkage in recycled aggregate concrete. **Materials and Structures**, 2010, v. 43. p. 1147-1160.

ETXEBERRIA, M.; VÁZQUEZ, E.; BARRA, M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Reseach**, 2007, v. 37. p. 735-742.

FIGUEIREDO, Nathália.; VARGAS, Alexandre. **Análise da influência do uso de agregados reciclados da região de Criciúma/SC nas propriedades mecânicas**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2016.

GOBBE, Denise Cristina; VANDERLEI, Romel Dias. Concreto sustentável com resíduos da construção e demolição: revisão sistemática. Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais e de Saneamento. **Anais - 5º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade**, 2022.

GONÇALVES, M.S. **Análise da viabilidade técnica da utilização de resíduos de concreto oriundos de pré-fabricação como agregado graúdo para a produção de novos concretos**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2011.

GONÇALVES, R. D. C. C. **Agregados Reciclados De Resíduos De Concreto - Um Novo Material Para Dosagens Estruturais**. 2001. 148p. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

GONZÁLEZ-FONTEBOA, B.; MARTÍNEZ-ABELLA, F. Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. Materials and mechanical properties. **Building and Environment**, Elsevier, v. 43, n. 4, p. 429–437, 2008. Department of Civil Engineering, La Coruña University, Spain, 2008.

JACINTHO, Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Avila. Módulo de elasticidade de concretos com agregados reciclados. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 2, p. 1-3, 2019.

JAYASURIYA, A. *et al.* Development and statistical database analysis of hardened concrete properties made with recycled concrete aggregates. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 164, n. April 2020, p. 105121, 2021.

KOU, S. C.; POON, C. S. Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 69–76, 2012.

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

MEDEIROS, Gabriela Silva de. **Estudo da resistência à compressão e módulo de elasticidade em concretos com adição de cinza e fibra de bagaço de cana-de-açúcar**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Anápolis, 2022.

MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de. *et al.* Resíduo de cerâmica vermelha e fíler calcário em compósito de cimento Portland: efeito no ataque por sulfatos e na reação álcali-silica. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v.21, n.2, p.282-300, 2016.

MOTA, T. M. **Modelagem numérica da flexão de vigas de concreto reciclado armado**. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Estadual de Feira de Santana, 2012.

NETTO, R. M. **Materiais pozolânicos**. Monografia (Especialização em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

OLIVEIRA, Elen Machado de *et al.* Análise da resistência à compressão de argamassa com adição de resíduo de cerâmica vermelha. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v.24, n. 02, p. 282-200, 2019.

OLIVEIRA, Tawan Mundim de. **Análise Estatística da resistência à compressão e módulo de elasticidade de concretos com agregados de resíduos**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021.

PACHECO, R, F, R. **Análise do Módulo de elasticidade e resistência à compressão de concretos produzidos em Centrais na Grande Vitória**. Experimentais e estatística. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santos, Vitória, 2006.

PAIVA, Laura Ribeiro; BATISTA, Vanêssa Cabral de Almeida; FARIAS, Carolina Fonseca. **Utilização de RCD (Resíduos da Construção e Demolição) como agregado graúdo para confecção de um concreto sustentável.** Rede de Ensino Doctum. 2021.

PASSOS, Luciano. **Desempenho do concreto leve com agregado cerâmico reciclado em substituição ao agregado natural na execução de elementos estruturais.** 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil, na área de Arquitetura e Construção) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2019.

PASSOS, Luciano; MORENO JUNIOR, Armando Lopes; GOMES, Carlos Eduardo Marmorato. Durabilidade de concretos produzidos com agregado graúdo proveniente de resíduo de cerâmica vermelha. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 2, 2020.

PAULON, V.; KIRCHHEIM, A.P. **Nanoestrutura e Microestrutura do Concreto Endurecido.** In: ISAlA, Geraldo Cechella (Org.). *Concreto: Ciência e Tecnologia*. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011, cap. 16, p. 585-614.

PÉREZ, C. A. *et al.* **Caracterização de Massas Cerâmicas Utilizadas na Indústria de Cerâmica Vermelha em São Domingos do Sul - RS.** Cerâmica Industrial. ABCERAM: São Paulo, 2010.

PESQUISA E EXTENSÃO. **JEPEX 2013** - EFRPE: Recife, 2013. Disponível em: <http://www.eventosufrpe.com.br/2013/cd/resumos/R1683-2.pdf>. Acesso em: 17 maio 2023.

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

RANGEL, C. S. **Influência de agregados graúdos reciclados nas propriedades estruturais de concretos de resistência normal e de alto desempenho.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

SANTOS, Cristiane Carine dos. **Proposta de modelo de previsão do módulo de elasticidade estático do concreto de cimento Portland.** 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

SARTORTI, Artur Lenz *et al.* Módulo de elasticidade estático e dinâmico para concretos leves. **Revista de Engenharia Civil IMED**, Passo Fundo, v. 5, n. 1, p. 32-51, 2018.

SCHIMELFENIG, Beatriz *et al.* Influência do uso de resíduos de concreto como agregado graúdo nas propriedades mecânicas de concretos convencionais. Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões. **Perspectiva**, Erechim, v. 42, n.158, p. 43- 54, 2018.

SCRIVENER, K. L.; CRUMBIE, A. K.; LAUGESSEN, P. The Interfacial Transition Zone (ITZ) Between Cement Paste and Aggregate in Concrete. **Interface Science**, v. 12, n. 4, p. 411- 421, 2004.

SHEEN, Y. N. *et al.* Assessment on the engineering properties of ready-mixed concrete using recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 45, p. 298–305, 2013.

SHI, Caijun *et al.* Performance enhancement of recycled concrete aggregate - A review. **Journal of Cleaner Production**, v.112, n.1, p.466-472, 2016.

- SIDERIS, K.K.; MANITA, K.; SIDERIS, K. Estimation of ultimate modulus of elasticity and Poisson ratio of normal concrete. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v.26, p.623-631, 2004.
- SILVA, J. A. Reciclagem de resíduos produzidos pela indústria de pré-moldados em concreto na região de Chapecó-SC. **Revista online IPOG Especialize**, Goiânia, v.1, n.9, 2014.
- SILVA, Keila Camila da; POLETO, Cristiano. **Drenagem urbana sustentável: aspectos hidrológicos, influência dos sedimentos e o reequilíbrio dos ciclos naturais**. 2017.
- SILVA, Lucas Augusto. **Análise da influência do agregado graúdo arenito no módulo de elasticidade e resistência à compressão do concreto**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2018.
- SILVA, Luzilene Souza. **Concreto alternativo com utilização de resíduos de borracha de recauchutagem de pneus para elementos e componentes pré-fabricados**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Pará, Belém, 2018.
- SILVA, Natalia Vieira da. **Método de determinação de resistência à tração e módulo de elasticidade de partículas de agregados graúdos naturais**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.
- SILVA, R.V. *et al.* Design of reinforced recycled aggregate concrete elements in conformity with Eurocode 2. **Construction and Building Materials**, v.105, p.144-156, 2015.
- SIRTOLI, Juliane dos Santos. **Análise de desempenho do concreto com a substituição parcial do agregado graúdo por resíduo de cerâmica vermelha**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, 2022.
- SOARES, D. *et al.* Use of coarse recycled aggregates from precast concrete rejects: Mechanical and durability performance. **Construction and Building Materials**, v.71, p.237-245, 2014.
- SOUSA, W. F. **Estudo sobre a aplicação de agregado reciclado de concreto em construção de pavimento**. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011.
- STROHER, Ana Paula *et al.* **Utilização da Cerâmica de Entulho na Substituição de Agregado Graúdo do Concreto**. 2017. Cerâmica Industrial. São Paulo, 2017.
- TAM, V.W.Y. Economic comparison of concrete recycling: A case study approach. **Resources, Conservation and Recycling**, 2008, v. 53. p. 821-828.
- TENÓRIO, J. J. L. **Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição visando aplicações estruturais**. 2007. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2007.

TORRES, A.; BURKHART, A. Developing Sustainable High Strength Concrete Mixtures Using Local Materials and Recycled Concrete. **Materials Sciences and Applications**. San Marcos, TX, USA, 7, 128-137, 2016.

TORRES, Larissa Carvalho Soares; PENA, Samira Ferreira. **Incorporação de agregado reciclado (cerâmica vermelha) na confecção de concreto permeável**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Faculdades Doctum de Caratinga, Caratinga, 2019.

VIEIRA, G. L. **Estudo do processo de corrosão sob ação de íons cloreto em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Dissertação (Mestrado em Engenharia na Modalidade Acadêmica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

WERLE, A. P. **Estudo da influência do agregado reciclado de concreto na carbonatação de concretos**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2010.

XIE, Yuetao *et al.* Experimental study of the interfacial transition zone (ITZ) of model rock - filled concrete (RFC). **Cement & Concrete Composites**, 2015.