

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E
MÓDULO DE ELASTICIDADE DE CONCRETOS COM AGREGADOS
DE RESÍDUOS**

Tawan Mundim de Oliveira

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos para a conclusão da graduação em Engenharia Civil

Orientadora: Profa. Dra Silvana De Nardin

São Carlos, 2021

Agradecimentos

À minha querida mãe *Gleiciane* por todo apoio, dedicação e amor por eu ter trilhado toda essa caminhada e ter chegado onde cheguei.

Aos meus padrinhos, *Elenice* e *Daniel* que me mostraram que sempre existe o caminho certo, às minhas avós *Maria* e *Marta*, aos tios *Ramontiele* e *Janara*.

À UFSCar, por ter me apresentado toda jornada de evolução pessoal, juntamente com seus alunos, funcionários e todos as pessoas envolvidas.

Aos Professores, responsáveis pelo meu desenvolvimento e conhecimento, e que foram meu apoio no aprendizado e inspiração na vida.

Ao técnico *José Roberto* por ter feito parte dessa jornada, com seu companheirismo e amizade, me passando grandes conhecimentos da vida.

À minha Professora e orientadora *Silvana* por ter tornado tudo isso possível, por ter acreditado em mim e estar me apoiando desde o terceiro ano da faculdade, com ensinamentos e aprendizagens.

À *Mirian*, amor e amiga, por estar do meu lado em todos os momentos, me mostrando que a vida é muito mais que obrigações e trabalho.

Aos meus companheiros e amigos de curso e vida, *Daniel*, *Leonardo*, *André*, *Théo*, *Renato* e *Wilton*, mostrando que a amizade é o caminho para toda conquista.

**A TODOS AQUELE QUE DE ALGUMA FORMA TRILHARAM MEU CAMINHO,
MEUS SINCEROS AGRADECIMENTOS!**

RESUMO

A construção civil é um importante indicador do desenvolvimento econômico e social de um país, mas também constitui uma atividade geradora de impactos ambientais e seus resíduos têm representado um grande problema para a sociedade. Parte dos resíduos gerados, sobretudo aqueles de concreto, pode ser transformado em agregados e substituir parte dos agregados naturais. O objetivo desse estudo foi avaliar os impactos da substituição do agregado gráúdo natural por agregado de resíduo de concreto nas propriedades mecânicas de concretos. O ponto de partida foi a confecção de um banco de dados formado com resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade disponíveis na literatura. Estes dados foram utilizados em análises estatísticas que tomaram como referência os resultados correspondentes a concretos com agregados naturais. A resistência à compressão nos concretos com ARC mostrou que a variação em relação ao concreto de referência aumenta conforme o teor de substituição aumenta, mesmo comportamento foi observado para o módulo de elasticidade. Os concretos com agregados recicláveis apresentaram grande heterogeneidade, com coeficiente de variação mínimo de 57% para resistência à compressão e 39% para o módulo de elasticidade.

Palavras-chave: agregado reciclado, agregado de resíduo de concreto (ARC), concreto com agregado de resíduo, resistência à compressão, módulo de elasticidade, análises estatísticas.

ABSTRACT

Civil construction is an important indicator of a country's economic and social development, but it is also an activity that generates environmental impacts and its residues have been a major problem for society. Part of the waste generated, especially that of concrete, can be transformed into aggregates and replace part of the natural aggregates. The objective of this study was to evaluate the impacts of substituting natural coarse aggregate for recycled concrete aggregate (RCA) on the mechanical properties of concrete. The starting point was the creation of a database formed with results of compressive strength and modulus of elasticity available in the literature. These data were used in statistical analyzes that took as a reference the results corresponding to concretes with natural aggregates. The compressive strength in RCA concretes showed that the variation in relation to the reference concrete increases as the substitution content increases, the same behavior was observed for the elastic modulus. The concretes with recyclable aggregates showed great heterogeneity, with a minimum variation coefficient of 57 for compressive strength and 39 for the modulus of elasticity.

Keywords: Recycled aggregate, recycled concrete aggregate (RCA), concrete with recycled aggregate, compressive strength, modulus of elasticity, statistical analysis.

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	6
1.1 Considerações iniciais.....	6
1.2 Objetivos	11
1.3 Justificativa.....	11
1.4 Metodologia.....	12
1.5 Organização do Trabalho de Conclusão de Curso	13
2. CONCRETOS COM AGREGADOS DE RESÍDUOS DE CONCRETO	15
3. AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DE DADOS DO CONCRETO COM ARC	23
3.1 Elaboração de Banco de Dados.....	23
3.2 Análises Estatísticas e Considerações	24
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
4.1 Banco de Dados.....	27
4.2 Análises Estatísticas e Considerações	29
4.3 Modelagem e Análises Comparativas.....	36
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
5.1 Conclusões.....	41
5.2 Sugestões Para Trabalhos Futuros.....	42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43

1. Introdução

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A indústria da construção civil é um importante indicador do desenvolvimento de um país, apesar de fortalecer e ser excelente para a economia, essa indústria é uma enorme geradora de resíduos, sendo esse um problema ambiental e administrativo que afeta todas as nações e que desperta a busca mundial por soluções.

Os impactos ambientais se iniciam na coleta da matéria prima, modificando de forma irreversível a paisagem e a biodiversidade local e regional. Embora a construção civil seja responsável por uma série de subprodutos oriundo da produção dos seus componentes, o foco do presente estudo reside em um subproduto específico. Nesse contexto, a ABNT NBR 15116 (2004) define resíduos como subprodutos de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil e aqueles resultantes da preparação e da escavação de terrenos. Alguns exemplos desse tipo de resíduo são: tijolos, blocos cerâmicos, concreto, solo, rocha, madeira, forros, argamassa, gesso, telha, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica *etc.* Tais resíduos são comumente denominados de entulhos de obras, caliça ou metralha e, mais adequadamente, resíduos de construção e demolição (RCD).

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe)¹, em 2019 no Brasil foram produzidas cerca de 45 milhões de toneladas de Resíduos de Construção e Demolição (RCD). Um cenário nada satisfatório corroborado pelo estudo de Teixeira *et al.* (2020), cujos resultados mostraram que em 2016 apenas 21% desses resíduos foram reciclados no Brasil; em contrapartida, em países como Holanda esse valor chega a 90%. Uma cena comum do descarte inadequado de resíduos é mostrada na Figura 1.

¹ <<https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>> Acesso em 03 de março de 2021.

Figura 1: Resíduos da Construção Civil



Fonte: ABRECON²

No Brasil, o baixo uso dos resíduos de construção e demolição se dá por diversas razões, destacando-se a não aceitação, a falta de normalização e o desconhecimento do potencial dos resíduos como material de construção civil. Assim, o uso dos resíduos de construção fica restrito a reparos, pavimentos e elementos sem função estrutural. Outro fator é a falta de incentivo governamental pois, das 310 usinas em atividade no Brasil em 2015, apenas 10% eram públicas. Esse fator encarece o manejo dos resíduos, sobretudo a etapa de separação e deixa menos atrativa a destinação desses resíduos para reciclagem (BOHNENBERGER *et al.*, 2018).

No sentido de melhorar o manejo dos resíduos em geral, incluindo as etapas de geração, transporte e depósito de resíduos, em 2002, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) publicou a Resolução nº448 que dispõe sobre a gestão dos resíduos sólidos no Brasil. Em tal resolução, a prioridade é a não geração de resíduos e, caso ocorra, deve haver redução, reutilização, reciclagem e destinação final adequada desses resíduos. A partir da publicação dessa resolução, os municípios brasileiros são responsáveis por estabelecer os procedimentos necessários ao manejo e à destinação ambientalmente adequados dos resíduos.

Atualmente, os resíduos são agrupados em classes sendo que aqueles da classe A são definidos como recicláveis e reutilizáveis. São exemplos de resíduos classe A: resíduos de tijolos, telhas, concretos e argamassas. Alguns desses podem ser triturados e se transformar em agregados que substituem o agregado natural utilizado no concreto (CONAMA, 2002). No Brasil, existem as normas citadas a seguir, publicadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), e que tratam de resíduos da construção civil:

² < <https://abrecon.org.br/residuos-da-construcao-e-demolicao-geracao-de-emprego-e-renda/> > Acesso em 03 de março de 2021.

- ABNT NBR 15112 (2004) – traz diretrizes para projeto, implantação e operação de áreas de transbordo e triagem para resíduos da construção civil e resíduos volumosos;
- ABNT NBR 15113 (2004) – reúne as diretrizes para projeto, implantação e operação de aterros para resíduos da construção civil e resíduos inertes;
- ABNT NBR 15114 (2004) – trata das diretrizes para projeto, implantação e operação de áreas de reciclagem de resíduos sólidos da construção civil;
- ABNT NBR 15115 (2004) – trata dos parâmetros para execução de camadas de pavimentação utilizando agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil;
- ABNT NBR 15116 (2004) – traz as condições para utilização de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil em pavimentos e do preparo de concretos sem função estrutural.

Como pode ser observado pela listagem, as normas ABNT NBR 15115 (2004) e ABNT NBR 15116 (2004) preveem a utilização dos agregados recicláveis apenas a pavimentação e utilização sem fins estruturais. Portanto, o Brasil não dispõe de recomendações normativas para a utilização do RCD em concretos com fins estruturais. Isso acontece devido a falta de padronização do RCD, é um material muito heterogêneo que requer uma grande triagem e assim isolar características como massa específica, absorção de água, granulometria *etc.*

No contexto dos resíduos de construção, o concreto com agregados de resíduos de construção e demolição (RCD) é caracterizado pela substituição total ou parcial dos agregados convencionais por agregados de RCD. Devido à grande variabilidade desses resíduos recomenda-se o uso de agregados reciclados oriundos exclusivamente de resíduos de concreto para produção de concretos estruturais. Assim sendo, o concreto de agregado reciclado é produzido utilizando agregados oriundos da reciclagem de concretos antigos, que substituem parte ou todo o agregado natural. Tais agregados de resíduos de concreto (ARC), a depender da granulometria, que podem ser miúdos ou graúdos, e resultam da britagem de elementos de concreto. Em países como China, Estados Unidos e Japão as construtoras são incentivadas a utilizar agregados de resíduos de concreto (ARC) na produção de novos concretos, com limite máximo de 20% de substituição (NILI; SASANIPOUR; ASLANI, 2019).

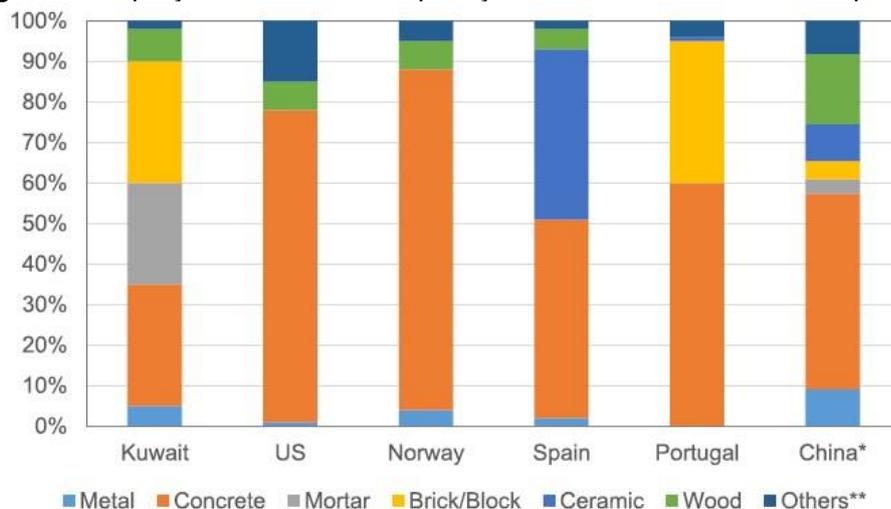
A utilização dos resíduos de construção como agregados em novas construções teve início logo após a Segunda Guerra Mundial devido à necessidade de reconstrução das cidades devastadas pela guerra (LEVY, 2001). A grave crise econômica causada pela guerra e o grande volume de resíduos a ser descartado fomentou pesquisas europeias voltadas ao aproveitamento dos resíduos de construção e demolição (RCD). Os estudos foram responsáveis por avanços consideráveis na logística do uso e reciclagem desse material.

O panorama brasileiro é muito diferente. Em 1999, enquanto no Brasil menos de 1% dos resíduos de construção eram reciclados, a Holanda reciclava cerca de 90% (LEVY, 2001).

Numa tentativa de mudar esse cenário, em 2012 o SindusCon/SP³ avaliou a existência de medidas de tratamento dos resíduos de construção civil (RCC) no Estado de São Paulo. Os resultados mostraram que em 51% dos municípios havia área de transbordo e triagem (ATT) e 18% dos municípios tinham aterros e áreas de reciclagem de RCD classe A, o que evidencia o efeito dos investimentos na área.

Em relação à produção média de resíduos de construção, uma construção padrão na China (residencial, industrial, comercial) tem, em média, 52,63% dos resíduos totais constituídos por resíduos de concreto (WANG *et al.*, 2019). Em países como Kuwait, Estados Unidos, Noruega, Portugal e Espanha, os resíduos de concreto também aparecem em maior proporção, com destaque para os Estados Unidos cujo percentual é superior a 75% (Figura 2). Esses resíduos são gerados, em grande parte, por desperdício e retrabalho (WANG *et al.*, 2019). Verifica-se que o volume de resíduos de concreto depende da região e do período avaliado contudo os resíduos de concreto estão sempre presentes entre os resíduos produzidos pela construção civil.

Figura 2: Proporção de materiais desperdiçados ou descartados em obra por país



Fonte: Wang *et al.* (2019)

No Brasil, Gomes *et al.* (2017) avaliaram que o desperdício de concreto em empresas de pré-moldados pode chegar a 10% do volume total, correspondendo a cerca de 200 m³/mês.

O investimento chinês na reciclagem de RCC envolveu sistemas de credenciamento, análise de dados computacionais (*Big data*), mapeamento dos focos de resíduos e tornou possível atingir 92% de reciclagem de resíduos de construção na cidade de Hong Kong (WU; YU; POON, 2019).

³ <http://arquivos.ambiente.sp.gov.br/municipioverdeazul/2012/08/residuos_construcao_civil_sp.pdf> Acesso em 03 de março de 2019.

No contexto da utilização dos resíduos da construção civil, em países europeus como Portugal, Espanha, Reino Unido e Alemanha é obrigatório o uso de agregados reciclados em pelo menos 20% dos concretos produzidos com fins estruturais, desde que o ARC atenda aos pré-requisitos das normas locais (ESTOLANO *et al.*, 2018).

A grande heterogeneidade dos RCD é um fator que instiga as pesquisas voltadas à reutilização de resíduos. No caso dos resíduos de concreto, as variáveis são diversas e de difícil quantificação quando os resíduos são coletados em locais diversos. Entre essas variáveis, merecem destaque características mecânicas e físicas como: resistência mecânica, módulo de elasticidade, porosidade, adição ou não de aditivos *etc.* Toda essa variabilidade deve ser levada em conta durante a caracterização dos concretos com RCD, pois podem gerar agregados que não atendem aos limites normativos e dificultar a produção de concretos para fins estruturais. Assim, concretos com agregados de resíduos requerem atenção especial.

Quando os resíduos de concreto são separados dos demais, o material resultante apresenta menor contaminação por vidro, borracha, madeira, cerâmica *etc.* (GONÇALVES, 2001). A separação desses resíduos em relação aos demais diminui também a variabilidade e permite que o ARC atinja índices satisfatórios. A grande variabilidade mostra que não são todos os RCD que podem ser utilizados na produção de concretos estruturais. Até o momento sabe-se que os resíduos de concreto são os mais indicados para a produção de concretos com fins estruturais. Xie; Gholampour; Ozbakkaloglu (2018) avaliaram 242 estudos realizados nas últimas 3 décadas e constataram padrões no uso de resíduos de construção e demolição (RCD); por exemplo, uso de agregados de resíduos de concreto (ARC) com menores quantidades de argamassa aderida ou maior densidade. O uso de ARC com maior densidade resulta em concretos com maior resistência à compressão, módulo elástico e resistência à flexão.

Além da contaminação por outros materiais Xie; Gholampour; Ozbakkaloglu (2018) verificaram outros fatores que influenciam as propriedades do concreto: relação água/cimento, teor de argamassa aderida ao RCD, tamanho dos agregados *etc.*; características essas que devem ser controladas e, caso isso não ocorra, o uso de agregados de resíduos pode ser inviável.

Uma forma de reduzir a variabilidade do ARC, os resíduos de construção e demolição podem ser coletados em centrais de dosagem. Tais resíduos são oriundos de sobras dos caminhões betoneira, mangueiras de bombeamento e lavagens das instalações. As fábricas de elementos pré-fabricados e de blocos de concreto também produzem resíduos de concreto resultantes de peças rejeitadas no controle de qualidade, finais de linhas de produção e sobras

de concreto fresco nos moldes das peças. Essas características transformam o material que seria descartado em um ótimo material para fabricação de novas peças.

Com o intuito de reutilizar os resíduos de concreto, alguns pesquisadores substituíram o agregado graúdo natural por agregados de resíduo de concreto oriundos de concreto usinado (produzido em central). Por exemplo, no estudo de Gonçalves (2011) os agregados foram produzidos pela britagem de concretos descartados por uma indústria de pré-fabricados; nesse caso, a britagem foi realizada após o endurecimento do concreto. De acordo com o estudo de Pacheco *et al.* (2019), agregados produzidos a partir de resíduos de concreto da indústria de pré-fabricados apresentaram coeficiente de variação dentro dos limites normativos, com coeficiente de variação inferior a 6%.

Visando contribuir para ampliação do uso dos resíduos de construção, o presente estudo tem como foco a aplicação dos resíduos de concreto na produção de concretos estruturais. De forma mais específica, é estudada a influência do teor de substituição do agregado graúdo por agregado de resíduo de concreto (ARC) nas seguintes propriedades do concreto endurecido: resistência à compressão axial e módulo de elasticidade.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal desse estudo teórico foi analisar a influência da substituição do agregado natural graúdo por agregado de resíduo de concreto em algumas propriedades mecânicas de concretos estruturais. A partir deste objetivo principal, foram definidos os objetivos específicos a seguir:

- a) A partir de resultados disponíveis em documentos científicos, elaborar um banco de dados com as seguintes informações: teor de substituição, relação água/cimento, resistência à compressão e módulo de elasticidade;

Analisar, por meio de testes estatísticos, a influência do uso de agregados de resíduo de concreto na resistência à compressão e módulo de elasticidade de concretos estruturais com ARC.

- b) Avaliar, dentre os teores de substituição avaliados, qual produz maior efeito sobre os valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto.

1.3 JUSTIFICATIVA

É de conhecimento mundial que a busca de soluções sustentáveis é uma grande preocupação quando se fala em desenvolvimento científico e tecnológico. Na construção civil,

a extração de agregados naturais e os resíduos gerados impactam de forma irreversível o cenário dos recursos naturais e fomenta a busca global por soluções.

Uma alternativa para reduzir tanto o volume extraído quanto descartado é a substituição do agregado graúdo natural por agregados oriundos de resíduos de construção. Dentre os componentes de resíduo, aqueles provenientes de argamassas e concretos são os mais indicados quando se pretende produzir concretos para fins estruturais.

No contexto do desenvolvimento e sustentabilidade, aumentar as opções na utilização de resíduos gerados em construção reduz o impacto ambiental de forma direta e indireta, seu uso pode reduzir desde a compra de matéria prima natural, até a utilização de máquinas pesadas para extração e transporte. A longo prazo também pode melhorar a economia local, empregando funcionários e atraindo mais colaboradores para esse ramo.

Nesse contexto, muitos pesquisadores investigaram os impactos da substituição do agregado graúdo por agregado de resíduo de concreto, levando em conta suas particularidades e avaliando fatores como origem dos agregados de resíduo, propriedades físicas, regiões com maior fragilidade, composição química *etc.* Apesar de haver um bom conjunto de estudos científicos, ainda não há um consenso quanto ao teor de substituição mais indicado quando os requisitos são resistência mecânica e módulo de elasticidade. Desse modo, é importante avaliar estatisticamente os resultados disponíveis com vistas a identificar os efeitos de cada teor de substituição. A análise estatística se mostra como uma alternativa interessante para identificar relações entre teores de substituição e efeitos causados no concreto endurecido.

Além disso, há uma carência de estudos nacionais no que se refere na aplicação desses concretos com ARC em elementos estruturais, além da falta de recomendações normativas quanto ao uso desses resíduos na produção de novos concretos. Assim sendo, esse estudo também pretende contribuir nesse sentido.

Portanto, no tocante aos concretos estruturais, é indispensável a quantificação e padronização de propriedades mecânicas como resistência à compressão e módulo de elasticidade longitudinal com vistas a fomentar o uso dos ARC nesse tipo de concreto.

1.4 METODOLOGIA

Inicialmente foram coletados dados na literatura de autores que realizaram ensaios substituindo o agregado graúdo natural por agregados de resíduo de concreto. Criado o banco de dados, essas amostras foram submetidas a análises estatísticas numéricas e gráficas, a fim de encontrar uma relação entre os concretos de referência e os com agregados de resíduo.

Esse estudo é essencialmente teórico, foi pautado em análises utilizando modelos estatísticos e sua execução foi dividida nas seguintes etapas:

- **Revisão bibliográfica:** nessa etapa foram identificados estudos sobre concretos com agregados de resíduos de concreto com destaque para os seguintes aspectos: teores de substituição, resistência à compressão e módulo de elasticidade.
- **Banco de dados:** na etapa anterior foram identificados os estudos mais relevantes tendo em vista o objetivo do presente estudo. Para cada autor, foram selecionadas as seguintes informações: teores de substituição, relação água/cimento, resistência à compressão e módulo de elasticidade. Tais informações foram organizadas em tabelas que constituíram o banco de dados.
- **Análises estatísticas:** foram realizadas análises numéricas com medidas de centralidade, análise de variância (ANOVA) e teste de diferença de médias (Tukey). Em seguida as análises gráficas com gráfico de dispersão box plot e regressão linear.
- **Análise de resultados e conclusões:** gráficos e tabelas foram utilizados para tentar estabelecer relações causa-efeito e relacionar os concretos de referência aos concretos com agregados recicláveis, nas variáveis de resistência à compressão e módulo de elasticidade.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Com a premissa do desenvolvimento deste trabalho, foram definidos os passos a seguir de forma a se situar no estudo da arte sobre agregados de resíduo de concreto e o desenvolvimento da presente pesquisa:

- **Introdução:** esse capítulo descreve aspectos gerais dos resíduos de concreto e dos agregados de resíduo de concreto e características do uso desse resíduo na confecção de novos concretos. Nele também constam objetivos e justificativas.
- **Revisão bibliográfica:** breve estado da arte sobre os seguintes assuntos: agregados de resíduo de concreto, concretos com agregados de resíduos e efeitos da substituição em propriedades como resistência à compressão e módulo de elasticidade. Essa etapa foi fundamental para identificar os estudos que disponibilizam dados para a posterior confecção do banco de dados.
- **Banco de dados e análises:** esse capítulo contém o banco de dados com resultados experimentais de resistência à compressão e módulo de elasticidade de concretos com ARC e com agregados naturais. Esse capítulo também contém os métodos estatísticos utilizados nas análises.

- **Resultados e discussões:** os resultados das análises estatísticas são apresentados e analisados nesse capítulo.
- **Considerações finais:** esse capítulo reúne as conclusões extraídas da análise de resultados bem como sugestões para trabalhos futuros.

2. Concretos com agregados de resíduos de concreto

Os resíduos de construção são um problema mundial e que tem gerado preocupação e pesquisas por parte da comunidade científica. Na União Europeia cerca de 531 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição (RCD) são gerados anualmente, representando um quarto dos resíduos gerados no mundo. Desse total, apenas 46% é reciclado (JUNAK; SICAKOVA, 2017).

Para que haja um aumento no volume de material reciclado, são necessárias pesquisas de forma a identificar as propriedades dos agregados de resíduo de concreto. As características físicas e mecânicas do ARC podem ser divididas em dois grupos: o agregado de resíduo de concreto e o concreto produzido com esse agregado.

Agregado de resíduo de concreto (ARC) é aquele resultante da trituração de resíduos de concreto oriundos de zonas de demolição, peças pré-moldadas rejeitadas por não atender aos padrões de qualidade, corpos de prova *etc.* E, o concreto com agregado de resíduo de concreto é produzido com a substituição parcial ou total dos agregados naturais por agregados de resíduos de concreto (ARC). Naturalmente, é de conhecimento do meio científico que a utilização do ARC em concretos altera propriedades em estado fresco e endurecido como, por exemplo, absorção de água, porosidade, massa específica, módulo de elasticidade e resistência mecânica.

A fim de facilitar a visualização dos estudos sobre concretos com agregados de resíduos, na Tabela 1 é apresentado um conjunto de documentos científicos e uma síntese muito breve do estudo em si.

Tabela 1: Síntese de estudos sobre concretos com agregados de resíduos de concreto

Autor	Desenvolvimento de pesquisa
Gonçalves (2001)	Uso direto do ARC em concretos estruturais
Poon <i>et al.</i> (2004)	Avaliaram o efeito da pré-molhagem no ARC
Angulo <i>et al.</i> (2004)	Verificaram métodos diferentes da separação dos resíduos
Tam; Gao; Tam (2005)	Desenvolveram o método TSMA de mistura
Tenório (2007)	Uso combinado de agregados graúdos e miúdos de RCD
Angulo; Mueller (2009)	Classificaram o ARC de acordo com características físicas
Kou; Poon (2012)	Estudaram o uso de cinzas volantes em concretos com ARC
Xiao <i>et al.</i> (2012)	Sintetizaram o estudo do ARC entre os anos de 1996 e 2011
Sheen <i>et al.</i> (2013)	Utilizaram ARC contaminado e avaliou propriedade mecânicas
Barbudo <i>et al.</i> (2013)	Avaliaram aditivo plastificantes em misturas com ARC

Tabela 1: Síntese de estudos sobre concretos com agregados de resíduos de concreto (continuação)

Folino; Xargay (2014)	Além dos ensaios mais comuns, realizou a compressão triaxial
Moretti (2014)	Aliviou concretos com ARC e cinzas do bagaço da cana
Andreu; Miren (2014)	Avaliaram ARC com concreto de origem de 40, 60 e 100 MPa
Kabir; Ahmed; Alam (2015)	Ponderaram o uso do cimento em concretos com ARC
Andal; Shehata; Zacarias (2016)	Estudaram ARC de diferentes qualidades
Fan <i>et al.</i> (2016)	Avaliaram agregados graúdos e miúdos de RCD
Junak; Sicakova (2017)	Tratou a superfície do ARC de diferentes formas
Gao; Zhang; Nokken (2017)	Produziram concretos de ARC com fibras de aço
Xie; Gholampour; Ozbakkaloglu (2018)	Sintetizou diversos estudos e criou equações de previsão
Thomas; Thaickavil; Wilson (2018)	Variaram relação água/cimento e quantidade de cimento
Fiol <i>et al.</i> (2018)	Estudaram concretos autoadensáveis utilizando ARC
Estolano <i>et al.</i> (2018)	Avaliaram concretos de consistência fluída e seca
Khoury <i>et al.</i> (2018)	Verificaram formas diferentes de pé-molha o ARC
Ozbakkaloglu; Gholampour; Xie (2018)	Avaliaram o ARC com diferentes tamanhos e composições
Dimitriou; Savva; Petrou (2018)	Estudaram métodos de redução da argamassa do ARC
Nili; Sasanipour; Aslani (2019)	Avaliaram o uso de finos em concretos com ARC
Kazmierczak <i>et al.</i> (2019)	Propuseram equações para estimar o módulo de elasticidade
Oliveira <i>et al.</i> (2020)	Verificaram a diferença entre dois lotes de ARC
Figueiredo <i>et al.</i> (2020)	Verificou influência do método de britagem do ARC
Guo <i>et al.</i> (2020)	Utilizaram concretos autoadensáveis com adição de finos

Fonte: Elaborada pelo autor

A origem diversa dos agregados de resíduo de concreto leva os autores a dividirem os agregados em dois grupos. O primeiro corresponde aos agregados de resíduo provenientes de demolições, obras, descartes de corpos de prova *etc.* Esses agregados requerem separação e triagem minuciosas pois contêm alto índice de contaminação por outros materiais como vidro, madeira, solo. Tais contaminações são mais frequentes nos resíduos recolhidos diretamente em demolições e reparos (DIMITRIOU; SAVVA; PETROU, 2018; JUNAK; SICAKOVA, 2017; SHEEN *et al.*, 2013; TENÓRIO, 2007). O segundo grupo corresponde à produção do agregado reciclado, seja triturando o próprio concreto de referência ou controlando características como resistência do concreto que deu origem ao ARC, tratamento da superfície dos agregados *etc.* Devido à origem, os agregados reciclados desse grupo contêm pequenas quantidades de contaminantes e menor variabilidade que aqueles coletados diretamente de demolições. Portanto, concretos confeccionados com agregados originados desse tipo específico de resíduo apresentam propriedades físicas e mecânicas superiores aos do grupo anterior (DIMITRIOU; SAVVA; PETROU, 2018; GONÇALVES, 2001).

Uma outra possibilidade é obter resíduos diretamente de empresas recicladoras que fazem a separação do agregado de resíduo de concreto com padrão de qualidade pré-determinado (KOU; POON, 2012).

Além da forma de obtenção do ARC, há diversos autores avaliaram como a forma de obtenção pode alterar as propriedades desses agregados, dentre eles Figueiredo *et al.* (2020) afirmam que o britador de mandíbula gera agregados de resíduo de concreto com baixo teor de pasta de cimento. Isso é importante pois reduz a absorção de água desses agregados, o que o torna mais apropriado para substituir o agregado natural.

O agregado graúdo formado a partir do resíduo de concreto (ARC) é um material muito heterogêneo pois contém componentes de três diferentes formatos: agregados graúdos naturais do concreto de origem; agregados graúdos naturais com argamassa aderida e fragmentos soltos de argamassa (Figura 3). Em função disso, para esses agregados são encontrados, na literatura, diversos métodos para sua obtenção, caracterização e padronização, não havendo normas ou métodos consolidados para tal finalidade. A presença de duas zonas de transição é visível na imagem, a primeira em vermelho e a segunda em azul (Figura 3).

Figura 3: Composição do ARC



-  Agregado natural
-  Argamassa residual aderida
-  Antiga zona de transição
-  Nova zona de transição

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

A heterogeneidade dos agregados de resíduos é uma barreira que inviabiliza seu uso e, para contornar isso, os pesquisadores buscam isolar o agregado de concreto a fim de encontrar algum padrão. Ao falar dos agregados de resíduos é indispensável conhecer como suas características são variáveis e afetam as características do novo concreto (NILI; SASANIPOUR; ASLANI, 2019; XIAO *et al.*, 2012; XIE; GHOLAMPOUR; OZBAKKALOGLU, 2018; ANGULO *et al.*, 2004).

Ao comparar os agregados de resíduos de concreto a agregados naturais há consenso quanto à menor densidade, maior absorção de água, menor resistência e alta porosidade se dos ARC. Porém, não há um padrão ou uma faixa que indique a densidade ou absorção de água do ARC, por exemplo. Em cada estudo são relatados valores relativamente distantes entre si mostrando o quão heterogêneo pode ser o agregado de resíduo de concreto. Enquanto Folino; Xargay (2014) encontraram valores de absorção de água e densidade respectivamente de 2,7% e 2,57 g/cm³, Oliveira *et al.* (2020) obteve absorção de 7,8% e densidade igual a 2,27 g/cm³. Ou seja, foram encontradas variações de 190% e 13% respectivamente para absorção e densidade, evidenciando a variabilidade de tais propriedades embora ambos tenham investigado agregados de resíduos de concreto.

Um outro fator importante em relação aos agregados de concreto é sua rugosidade superficial; agregados de resíduos apresentam maior rugosidade e isso, de forma geral, melhora as propriedades do concreto, pois um agregado mais rugoso reduz a fragilidade da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado graúdo. Apesar de melhorar as propriedades mecânicas, a maior rugosidade superficial do ARC reduz significativamente a trabalhabilidade do concreto (ANDAL; SHEHATA; ZACARIAS, 2016; FIGUEIREDO *et al.*, 2020; XIAO *et al.*, 2012; XIE; GHOLAMPOUR; OZBAKKALOGLU, 2018; ANGULO; MUELLER, 2009).

Até aqui foram sintetizadas as principais características dos agregados de resíduo de concreto. A seguir são destacadas as principais características dos concretos produzidos com esses agregados.

Devido à heterogeneidade e difícil caracterização, a maioria dos estudos está voltados à produção de concretos não estruturais ou, quando estruturais, consideram a adição de materiais mais finos como sílica, cinzas *etc.* A grande variabilidade dos agregados de resíduos de concreto se reflete nas propriedades dos concretos com ARC e dificulta a previsão das suas propriedades físicas e mecânicas. É fato que concretos com ARC são mais porosos, possuem maior absorção de água e maior índice de vazios do que concretos com agregados naturais. Essas características podem comprometer os concretos estruturais pois são responsáveis por elementos estruturais menos resistentes e mais deformáveis. A variabilidade das propriedades dos concretos com ARC decorre da variabilidade dos agregados de resíduos; assim, é difícil prever características como resistência à compressão e módulo de elasticidade. Exemplificando: ao investigar a substituição total do agregado graúdo natural por ARC, Thomas; Thaickavil; Wilson (2018) encontraram 6,2% de absorção de água do concreto; em estudos semelhante, Folino; Xargay (2014) encontraram absorção de 31%.

A incorporação do ARC ao concreto estrutural causa redução na trabalhabilidade e na massa específica. Devido às maiores porosidade e rugosidade, o agregado de resíduo de concreto absorve parte da água da mistura e faz com que haja redução significativa de

trabalhabilidade do concreto. Alguns autores sugerem a pré-molhagem dos agregados (KAZMIERCZAK *et al.*, 2019; VERIAN; ASHRAF; CAO, 2018; XIAO *et al.*, 2012), a utilização de traços mais fluidos (FERREIRA; DE BRITO; BARRA, 2011) ou adição de superplastificantes (GONÇALVES, 2001; LEITE, 2001; MORETTI, 2014).

A massa específica do concreto com ARC também apresenta redução devido, principalmente, à argamassa presente no ARC; a argamassa aderida possui alta porosidade e menor densidade que as rochas que compõem os agregados naturais. Assim como acontece com outras propriedades, é sabido que concretos com ARC tem menor massa específica, mas não é possível prever quão menor, pois isso depende das características do ARC. A ausência de correlações matemáticas que relacionem características do agregado de resíduo de concreto com características do concreto com ARC dificulta sua utilização. Nesse contexto, ao investigar a substituição, Fiol *et al.* (2018) obtiveram concreto com densidade de 2,35 g/cm³ ao passo que Estolano *et al.* (2018) encontraram 2,09 g/cm³.

Uma das maiores diferenças do concreto com ARC em relação ao concreto com agregados naturais é a presença de duas zonas de transição (ZT) (Figura 3). A zona de transição, também presente no concreto convencional, é a interface entre o agregado graúdo e a pasta de cimento; ela divide os dois componentes e pode representar o elo mais fraco do concreto pois é nela que a ruptura mecânica tende a acontecer. No concreto com agregado de resíduo existem duas zonas de transição: a primeira entre o agregado graúdo natural e a argamassa antiga e a segunda entre o ARC e a nova pasta de argamassa. A presença de uma nova ZT aumenta a fragilidade do concreto e gera um número maior de regiões em que as tensões são elevadas. Além disso, essa nova zona de transição (entre o agregado natural e a argamassa antiga) é mais porosa devido à fissuração mais intensa (KAZMIERCZAK *et al.*, 2019; KHOURY *et al.*, 2018; XIAO *et al.*, 2012; XIE; GHOLAMPOUR; OZBAKKALOGLU, 2018).

Dada sua importância, são comuns os estudos que buscam implementar técnicas para melhorar essa região mais frágil do concreto com ARC. Por exemplo, Tam; Gao; Tam (2005) desenvolveram o método de mistura TSMA (*two stage mixing approach*), que consiste na adição em duas etapas: na primeira etapa é utilizada metade da água para preencher os poros do agregado de resíduo de concreto; na segunda é adicionada a água necessária para as reações do cimento. Isso reduz a porosidade do agregado e, tornando um concreto mais denso, melhorando as propriedades mecânicas como resistência à compressão e módulo de elasticidade longitudinal (ANDAL; SHEHATA; ZACARIAS, 2016; TAM; GAO; TAM, 2005).

Mesmo melhorando as propriedades do concreto, métodos de mistura não impedem que o agregado de resíduo absorva parte da água que seria destinado à reação do cimento. Com isso, dosagens que possuem baixa relação água cimento (0,35 – 0,55) podem se tornar inviáveis sem a utilização de aditivos plastificantes ou reformulação do traço

(AFROUGHSABET; BIOLZI; OZBAKKALOGLU, 2017; ANDREU; MIREN, 2014). Para evitar a redução considerável de trabalhabilidade, alguns autores sugerem que seja feita a pré-molhagem quando for utilizado ARC na produção de concretos (KAZMIERCZAK *et al.*, 2019; VERIAN; ASHRAF; CAO, 2018; XIAO *et al.*, 2012). Há estudos que indicam a quantidade de água a se adicionar aos agregados ou, o que é mais comumente feito, é adicionado água até a condição saturado superfície seca (BARBUDO *et al.*, 2013; FAN *et al.*, 2016; GUO *et al.*, 2020). A adição de água ao agregado de resíduo reduz os efeitos da absorção na trabalhabilidade do concreto, ou seja, a molhagem prévia do ARC faz com que a trabalhabilidade do concreto se aproxime daquela do concreto de referência (POON *et al.*, 2004). No entanto, a pré-saturação do agregado impacta de forma negativa nas propriedades mecânicas do concreto e isso se deve a dois fatores principais. O primeiro é que a nova pasta de cimento não se liga de forma tão efetiva ao agregado saturado quanto se ligaria ao agregado seco. E o segundo motivo é que parte da água que saturou o agregado pode se desprender e fazer parte da reação do cimento, aumentando a relação água/cimento e diminuindo propriedades como resistência à compressão e módulo de elasticidade (KOU; POON, 2012; POON *et al.*, 2004).

Na literatura, há alguns teores de substituição do agregado graúdo por agregado de resíduo de concreto que são frequentemente avaliados. O teor de substituição de ARC é determinante para as propriedades do concreto. A substituição pode ser feita em massa ou volume. A substituição em volume tende a impactar menos na mistura, pois como o agregado de resíduo possui massa específica menor, a substituição em massa resulta em maior quantidade de agregado de resíduo se comparada ao agregado natural e isso pode trazer efeitos negativos (MORETTI, 2014).

Os estudos sobre concretos com agregados de resíduos de concreto sempre fazem a caracterização do concreto quanto à resistência à compressão, porém não são todos que estudam o módulo de elasticidade. Há diversos fatores que alteram a resistência à compressão quando se utiliza ARC substituindo o agregado natural. Dentre esses fatores estão a redução da relação água/cimento efetiva devido à alta absorção de água do ARC; com isso, a resistência à compressão aumenta (ANDAL; SHEHATA; ZACARIAS, 2016; FIGUEIREDO *et al.*, 2020; JUNAK; SICAKOVA, 2017). Outro fator é a quantidade de argamassa aderida aos agregados naturais antigos e os fragmentos soltos, que constituem regiões mais fissuradas e de menor resistência, diminuindo a resistência à compressão do concreto (ANDAL; SHEHATA; ZACARIAS, 2016). A combinação desses e outros fatores dificulta a previsão da resistência à compressão e módulo de elasticidade de concretos com ARC.

Tendo isso em consideração, Ozbakkaloglu; Gholampour; Xie (2018) verificaram pouca variação na resistência do concreto em função de variações no método de mistura e

nos teores de substituição (50% e 100%). Para os mesmos teores, o módulo de elasticidade sofre reduções de 3,9% e 7,7%, respectivamente. Isso mostra a potencialidade do concreto estrutural com agregados de resíduos de concreto.

Diferenças maiores foram encontradas por Junak e Sicakova (2017) ao investigar teores de 30% e 100% do agregado graúdo. Foram observadas reduções de 10% e 15% na resistência à compressão (teores de 30% e 100%, respectivamente).

E, diferenças mais significativas foram registradas por Kabir; Ahmed; Alam (2015) que variaram a relação água/cimento e o consumo de cimento (concretos convencionais e com maior adição de cimento). Considerando teores de 25%, 50%, 75% e 100% de substituição, foram registrados, respectivamente, aumentos de 34%, 57%, 45% e 50%, na resistência à compressão, devido principalmente à menor relação água/cimento efetiva. Tais variações mostram como as propriedades mecânicas dos concretos com ARC podem variar significativamente.

Uma gama de fatores pode interferir na resposta do concreto com ARC quanto ao módulo de elasticidade e resistência à compressão. Dentre elas citam-se a relação água/cimento, a saturação ou não dos agregados de resíduo, a origem do ARC, o teor de substituição e a composição do concreto. Em seu estudo, Barbudo *et al.* (2013) variaram a relação água/cimento e a utilização de aditivos plastificantes e superplastificantes. Ao substituir 100% do agregado natural ocorreram reduções de 8,2% e 18,2% na resistência à compressão entre os concretos convencional e com superplastificante. Os autores concluíram que quanto mais fluído o concreto com ARC, maior é o impacto na resistência mecânica. Para os mesmos teores e condições, o módulo de elasticidade sofreu redução de 24,2% e 28,9%.

De forma geral, o que se observa é que a resistência à compressão pode sofrer reduções ou aumentos em relação ao concreto de referência. Quanto ao módulo de elasticidade, os resultados disponíveis mostram que tende a ocorrer redução devido à menor massa específica do ARC. No entanto, Gao; Zhang; Nokken (2017) avaliaram concretos com fibras de aço e observaram que para substituições de 30%, 50% e 100% ocorreram aumentos de 1,6%; 5,4% e 4,8% no módulo de elasticidade.

Outro ponto relacionado à utilização do ARC é a precedência dos agregados; dependendo da resistência à compressão do concreto que deu origem ao ARC, as características do novo concreto podem ter respostas diversas. Andreu; Miren (2014) avaliaram o uso de ARC originado de concretos com 40 MPa, 60 MPa e 100 MPa. Para substituição total, reduções de 10,6% e 1,3% foram observadas em concretos com ARC de 40 MPa e 60 MPa, respectivamente. Por outro lado, o concreto confeccionado com ARC de 100 MPa apresentou aumento de 6,3% na resistência à compressão indicando que quanto maior a resistência do agregado melhores as características do novo concreto.

Além dessas características mais diretas, há outras de difícil avaliação e quantificação, mas que podem fazer diferença significativa no uso do ARC. Uma delas é a presença de partículas de cimento do concreto antigo que não reagiram e que podem reagir com a água de composição do novo concreto. Esse aspecto é positivo e vem sendo observado com frequência; a presença adicional de ligantes cimentícios pode melhorar características físicas e mecânicas do concreto com ARC (XIAO et al., 2012; XIE; GHOLAMPOUR; OZBAKKALOGLU, 2018). Outra propriedade é a quantidade de argamassa presente no ARC; quanto maior a quantidade de argamassa endurecida pior é a qualidade do ARC. Por meio do peso do ARC e sua comparação com o agregado natural é possível estimar a quantidade de argamassa. Contudo, esses ensaios são de difícil aplicação devido à dificuldade de conhecer o agregado de resíduo e os resultados são pouco precisos (DIMITRIOU; SAVVA; PETROU, 2018; FIGUEIREDO *et al.*, 2020).

Do material consultado, verifica-se que o concreto produzido a partir de agregados de resíduos de concreto possui um grande potencial para aplicações com finalidade estrutural desde que suas características não se distanciem dos concretos com agregado natural, o que atualmente é difícil controlar.

No próximo capítulo é apresentada a metodologia utilizada no presente estudo para avaliar estatisticamente os efeitos da substituição dos agregados graúdos naturais por agregados de resíduos de concreto na resistência à compressão e módulo de elasticidade.

3. Avaliação estatística de dados do concreto com ARC

A avaliação estatística de dados de resistência à compressão e módulo de elasticidade de concretos com substituições parciais e totais de agregado natural graúdo por ARC foi dividida em duas etapas: 1) coleta e elaboração de banco de dados e 2) análises estatísticas com os dados inseridos no banco de dados. Na etapa 2 são incluídas as seguintes análises: medidas de centralidade (média, desvio padrão, mediana, maior variação, menor variação, quartis), análise de variância (ANOVA) e teste de diferença entre médias (Teste de Tukey).

3.1 ELABORAÇÃO DE BANCO DE DADOS

O banco de dados foi elaborado a partir de dados disponíveis na literatura. Foram incluídos apenas dados experimentais cuja variável analisada foi a substituição parcial ou total do agregado graúdo por agregado de resíduo de concreto (ARC). Entende-se **dado** como mistura de concreto com agregado natural (referência) ou com teores diversos de agregados graúdos de resíduos de concreto.

Assim, para cada dado selecionado (mistura selecionada) foram incluídas as seguintes informações: número de ensaios, teor de substituição, relação água/cimento, resistência à compressão e módulo de elasticidade, esses últimos tanto dos concretos de referência, quanto para os concretos com ARC.

Para iniciar a elaboração do banco de dados foram selecionados 40 documentos científicos e, para inclusão de cada dado não houve distinção quanto ao tipo de concreto, seja em relação a sua classe de resistência, trabalhabilidade, teor de substituição, relação água/cimento *etc.* O único filtro aplicado foi excluir misturas com adição de finos como sílica ativa, cinzas volantes ou outro tipo de fino para substituição do cimento; essas misturas foram descartadas no presente estudo, pois o intuito foi verificar apenas a influência do agregado graúdo de resíduo de concreto.

Isso feito, cada teor de substituição foi associado à respectiva mistura de referência e, nessa etapa foi identificado que alguns autores fizeram uma única mistura controle enquanto outros fizeram várias. Cada dado (mistura) de concreto com ARC foi comparado à sua respectiva mistura de referência.

Após a análise dos 40 documentos e dos dados contidos em cada um deles, foram selecionados 309 dados (misturas) para composição do banco de dados. A partir desse banco de dados foram feitas as análises apresentadas a seguir.

3.2 ANÁLISES ESTATÍSTICAS E CONSIDERAÇÕES

As análises estatísticas levaram em conta a variação percentual entre os valores correspondentes aos teores de substituição e aqueles da mistura de referência (concreto com agregados naturais). Isso foi feito porque no banco de dados a resistência do concreto varia entre 20 MPa e 100 MPa; portanto, variação de 1 MPa no primeiro indicaria aumento ou redução de 5% enquanto que para o concreto com 100 MPa a mesma variação de 1 MPa representaria apenas 1%. Assim, em todas as análises foi considerada a variação percentual em relação ao concreto de referência.

Exemplificando: considere um concreto de referência com resistência à compressão igual a 50 MPa; a substituição total (100%) do agregado natural por ARC resultou em concreto com 45 MPa. Nesse caso, o valor utilizado nas análises estatísticas foi a diferença entre o concreto com substituição e o de referência ($45-50=-5$ MPa), ou seja, uma redução de 10%. Esse valor percentual foi utilizado nas análises estatísticas.

A análise de variância (ANOVA) foi realizada com o intuito de identificar se as médias de grupos diversos são diferentes ou não. Com essa análise foi possível identificar se a variação nos teores de substituição resultava em valores diferentes de resistência à compressão e módulo de elasticidade. Ou seja, com a variância foi possível identificar se, de fato, as diferenças percentuais encontradas consistiam em diferenças significativas.

Para ambas as variáveis analisadas, resistência à compressão e módulo de elasticidade, foram calculadas as seguintes medidas de centralidade: média, mediana, desvio padrão, maior variação, menor variação, quartil de 25% e quartil de 75%.

Isso feito, o passo seguinte foi dividir a análise de variância em duas etapas: 1) teste de hipótese pela análise de variância (ANOVA) e 2) teste para detectar quais variáveis possuem efeitos significativos (Teste de Tukey).

Na primeira etapa foi utilizado o teste da Análise de Variância (ANOVA) de um único fator, desbalanceada e com nível de significância de 5%. Para isso, o teor de substituição era variável e os demais fatores foram mantidos constantes. Isso foi feito para avaliar a influência do teor de substituição do agregado graúdo natural por ARC nos valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade. Para análise de variância foram considerados os parâmetros da Tabela 2, que auxiliaram na determinação do número F_0 ou número de *Fisher*. O número de Fisher foi utilizado para avaliar a relevância do teor de substituição.

Tabela 2: Teste ANOVA

Fonte de Variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F ₀
Entre grupos	SQA	k - 1	$QMA = \frac{SQA}{k-1}$	$\frac{QMA}{QME}$
Dentro dos grupos	SQE	N - k	$QME = \frac{SQE}{N - k}$	
Total	SQT	N - 1	-	

Fonte: Elaborada pelo autor

Na Tabela 2, SQA representa a Soma de Quadrados do Fator em análise, SQE a Soma de Quadrados do Erro e SQT a Soma de quadrados totais. Quanto aos graus de liberdade, o parâmetro k representa a quantidade de variáveis avaliadas e N é o número total de dados coletados.

Fixado o nível de significância em 5%, o fator F₀ é comparado a um valor disponível na Tabela F e correspondente ao nível de significância adotado (5%). Por meio da análise comparativa foi possível avaliar se houve diferença entre os dados de referência e a variável de estudo. No presente estudo, foram comparados resultados de concreto de referência (agregados naturais) e de concretos confeccionados com agregados de resíduos de concreto (CARC).

No entanto, a análise de variância não é suficiente para determinar qual variável possui efeito significativo. Por exemplo, a substituição de 30% do agregado gráudo natural pode não resultar em diferença significativa se comparada ao concreto com substituição de 50%; contudo, se a comparação for entre substituições de 30% e 100%, essa última pode ser bastante significativa.

Assim, a análise de variância foi complementada pela etapa seguinte que consistiu no Teste de Tukey. Nesse caso, foi utilizado o teste de Tukey desbalanceado, que consiste em calcular o parâmetro TSD (*Tukey Significant Difference*) para comparar as médias de duas medidas (Equação 1).

$$TSD = q \sqrt{\frac{QME}{2} \left(\frac{1}{n} + \frac{1}{n^*} \right)} \quad \text{Equação 1}$$

Na Equação 1, o valor do parâmetro “q” é encontrado na tabela Tukey com nível de significância de 5% e “n” corresponde ao número de dados por variável; por exemplo, o número de ensaios por teor de substituição. E, “n*” representa o número de dados da variável que se deseja comparar. Esse valor (TSD) é comparado ao módulo da diferença das médias de cada variável. Essa comparação indica se a variável é equivalente ou diferente daquela utilizada na comparação.

Com os testes descritos aqui foi possível avaliar se os teores de substituição foram relevantes entre si para os parâmetros resistência à compressão e módulo de elasticidade.

As análises descritas até aqui foram complementadas por gráficos box-plot. Nesses gráficos as variações percentuais foram inseridas a fim de verificar a dispersão dos dados e identificar a existência de “outliers” ou dados que se distanciam dos demais dados do conjunto.

E, por fim, a partir dos valores de resistência à compressão (em MPa) e módulo de elasticidade (GPa) foram feitas regressões lineares. Para tais regressões foram selecionados os teores de substituição com os maiores números de resultados experimentais. No eixo horizontal (X) foram dispostos os valores de referência (agregado natural) e no eixo vertical (Y) os valores dos concretos com ARC. Feitas as regressões lineares, também foi possível calcular o coeficiente de determinação R-Quadrado (R^2), que é uma medida estatística de quão próximos os dados estão em relação à linha de regressão ajustada. Portanto, o R-Quadrado mostra a dispersão dos dados.

No próximo capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos.

4. Resultados e Discussões

Os resultados da pesquisa aqui realizada foram divididos em três etapas, o banco de dados utilizado como conjunto de amostras, as análises numéricas desse conjunto e as análises gráficas, de forma que foi possível visualizar de vários ângulos o comportamento do uso do agregado graúdo de resíduo de concreto na confecção de novos concretos.

4.1 BANCO DE DADOS

O banco de dados aqui criado (Tabela 4), foi construído a partir de ensaios experimentais realizados por 40 pesquisadores, totalizando em 309 ensaios, incluindo os traços de referência e substituições de 10% a 100% do agregado graúdo natural por ARC.

Os 40 autores avaliados realizaram ensaio de resistência à compressão, já para o módulo de elasticidade, apenas 22. Mostrando que de forma geral, os pesquisadores tendem a se preocupar mais com a resistência à compressão quando o assunto é concreto. O estudo da deformabilidade requer uma análise mais profunda e não são todos os autores que se desempenham a realiza-lo. Tendo em vista essa diferença, as análises aqui seguiram como se fossem amostras diferentes, no presente estudo não houve tentativa numérica ou gráfica de encontrar alguma similaridade entre as duas variáveis, mas sim de encontrar um comportamento padrão no uso de agregado recicláveis e sua influência na resistência à compressão e módulo de elasticidade separadamente.

Outro ponto importante que foi considerado na pesquisa, foi da variação entre os traços de referência dos autores e os traços com substituição dos agregados graúdos. Principalmente na resistência à compressão, em uma mesma porcentagem de substituição houveram traços nos quais observou-se aumento na resistência e em outros, redução. Com isso a Tabela 3 mostra para cada porcentagem de substituição os valores que foram positivos, ou seja, aumento na resistência à compressão ou módulo de elasticidade e aqueles negativos, em que houve redução.

Optou-se, portanto, em utilizar como dados nas análises, apenas a variação, sem levar em conta se houve aumento ou redução. Assim, o número de amostras seria maior, acarretando em dados mais confiáveis, além disso os autores não conseguem prever se irá aumentar ou reduzir a resistência ou módulo antes de realizar o ensaio em si, portanto o objetivo foi tornar aleatório, sem levar em conta inicialmente o aumento ou redução das amostras.

Tabela 3: Variação dos ensaios em relação ao traço de referência

<i>% de Subs.</i>	<i>Positivas</i>	<i>Negativas</i>	<i>% de Subs.</i>	<i>Positivas</i>	<i>Negativas</i>
20	9	8	20	3	8
25	8	23	25	0	14
30	5	9	50	1	26
50	18	36	100	7	46
75	5	9	Total	11	94
100	22	65			
Total	67	150			

a) Variações da resistência à compressão

b) Variações do módulo de elasticidade

Fonte: Elaborada pelo autor

O conjunto de autores, o número de ensaios (resistência à compressão e módulo de elasticidade), a relação água/cimento e os teores avaliados estão na Tabela 4.

Tabela 4: Banco de dados com os autores utilizados nas análises estatísticas

Autor	nº	a/c	Teores de substituição
Adams <i>et al.</i> (2016)	5	0,40	25; 100
Afroughsabet, Biolzi, Ozbakkaloglu (2017)	5	0,30	50; 100
Amario, Pepe, Toledo Filho (2018)	5	0,53	25; 50
Andal, Shehata, Zacarias (2016)	5	0,45	30; 100
Andreu, Miren (2014)	10	0,29	20; 50; 100
Arora, Singh (2016)	2	0,60	100
Barbudo <i>et al.</i> (2013)	12	0,40 – 0,45	20; 50; 100
Bazuco (1999)	27	0,40 – 0,80	25; 50; 75; 100
Campos <i>et al.</i> (2018)	2	-	100
Dimitriou, Savva, Petrou (2018)	6	0,48	50; 100
Fiol <i>et al.</i> (2018)	12	0,35 – 0,45	20; 50; 100
Folino, Xargay (2014)	4	0,50	30; 60; 100
Fursule <i>et al.</i> (2017)	5	0,45	20; 30; 40; 50
Gao, Zhang, Nokken (2017)	4	0,37 – 0,40	30; 50; 100
Gerin (2020)	4	0,68	30; 50; 100
Gonçalves (2011)	8	0,42 – 0,60	50; 100
Guo <i>et al.</i> (2020)	5	0,35 – 0,45	50; 100
Hamad, Dawi (2017)	12	0,57	20; 40; 60; 80; 100
Junak, Sicakova (2017)	2	0,56	100
Junior (2018)	4	0,50	30; 50; 100
Kabir, Ahmed, Alam (2015)	30	0,41 – 0,50	25; 50; 75; 100
Katkhuda, Shatarat (2017)	3	0,66	20
Khodair, Luqman (2017)	4	0,40	25; 50; 75

Tabela 4: Banco de dados com os autores utilizados nas análises estatísticas (continuação)

Kim <i>et al.</i> (2015)	12	0,33 – 0,51	30; 60; 100
Kou, Poon (2012)	4	0,55	20; 50; 100
Kurad <i>et al.</i> (2017)	2	0,54	100
Kurda; Brito, Silvestre (2017)	4	0,54	100
Leite (2001)	10	0,40 – 0,80	100
Manzi, Mazzotti, Bignozzi (2017)	2	0,51	100
Moretti (2014)	4	0,50 – 0,55	30; 50; 100
Nirmaljeet, Vikram (2017)	9	0,50	50; 100
Ozbakkaloglu, Gholampour, Xie (2018)	10	0,36 – 0,60	25; 50; 100
Pedro, De Brito, Evangelista (2017)	2	0,39	100
Pepe <i>et al.</i> (2014)	3	0,53	100
Salesa <i>et al.</i> (2017)	4	0,50	100
Tam, Gao, Tam (2005)	12	0,45	15; 20; 25; 30
Tang <i>et al.</i> (2016)	5	0,35	25; 50; 75; 100
Tenório (2007)	9	0,40 – 0,67	100
Thomas, Thaickavil, Wilson (2018)	36	0,40 – 0,50	25; 50; 100
Xiao, Li, Zhang (2005)	5	0,43	30; 50; 70; 100

Fonte: Elaborada pelo autor

O conjunto compreende autores do ano de 1999 até 2020, o que apresenta uma faixa com mais de 20 anos do estudo de concretos feitos com agregados de resíduo. A presença da substituição total (100%) do agregado graúdo natural é notória.

4.2 ANÁLISES ESTATÍSTICAS E CONSIDERAÇÕES

Para as análises estatísticas foram selecionadas as substituições com pelo menos 10 amostras, ou seja, aquelas com menos que 10 foram isoladas, sendo utilizadas as substituições de 20%, 25%, 30%, 50%, 75% e 100% para resistência à compressão e 20%, 25%, 50% e 100% para o módulo de elasticidade.

A definição de dados aqui foi utilizar apenas a variação, sem levar em conta se houve aumento ou redução, ou seja, um valor em módulo da relação entre os resultados do concreto com ARC e do concreto de referência. Assim, o número de amostras seria maior, acarretando em dados mais confiáveis, além disso os autores não conseguem prever se irá aumentar ou reduzir a resistência ou módulo antes de realizar o ensaio em si, portanto o objetivo foi tornar aleatório, sem levar em conta inicialmente o aumento ou redução das amostras.

Em um primeiro momento foram calculadas as medidas de centralidade, a Tabela 5 mostra os valores referentes à resistência à compressão e seu respectivo Gráfico 1 mostrando a menor variação, maior e a média. Na Tabela 6 e Gráfico 2 são apresentados os resultados de módulo de elasticidade.

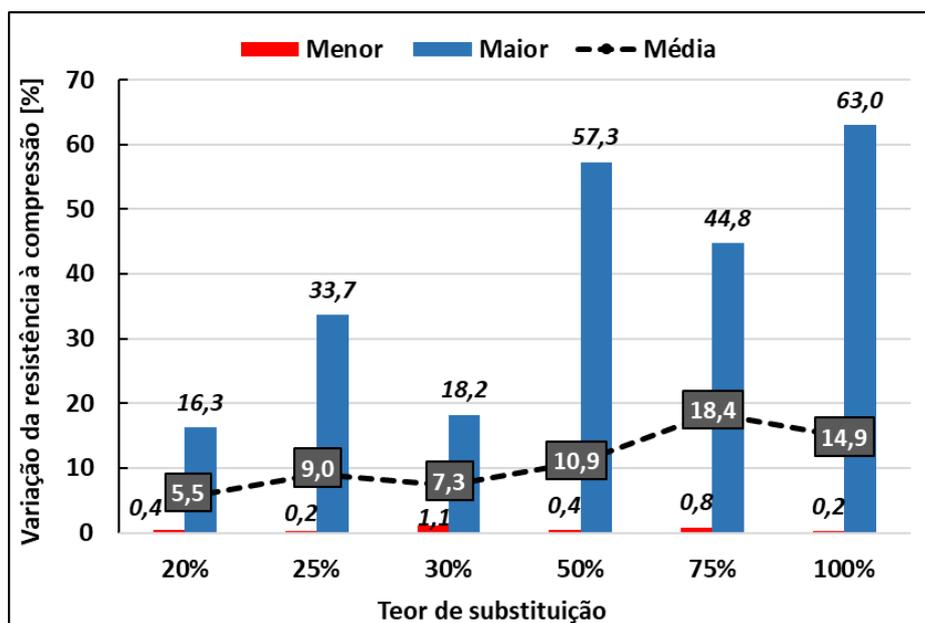
É perceptível que quanto maior o teor de substituição do agregado natural, maior a variação na resistência à compressão e módulo de elasticidade em relação ao concreto de referência. Esse comportamento foi observado por diversos autores; geralmente, quanto maior a substituição, menores a resistência à compressão e o módulo de elasticidade (FOLINO; XARGAY, 2014; GUO *et al.*, 2020; THOMAS; THAICKAVIL; WILSON, 2018; XIAO; LI; ZHANG, 2005).

Tabela 5: Medidas de centralidade na resistência à compressão

Variação [%]	Teor de substituição					
	20%	25%	30%	50%	75%	100%
Amostras [un]	17	31	14	54	14	87
Média	5,5	9,0	7,3	10,9	18,4	14,9
Mediana	4,1	6,1	6,9	7,9	19,3	13,7
Desvio padrão	4,2	8,3	4,6	10,6	13,2	8,4
Coef. de Variação	76	92	63	98	72	57
Maior variação	16,3	33,7	18,2	57,3	44,8	63,0
Quartil - 75%	8,2	11,2	10,2	13,2	27,2	19,1
Quartil - 25%	2,1	4,1	3,6	3,7	6,4	7,3
Menor variação	0,4	0,2	1,1	0,4	0,8	0,2

Fonte: Elaborada pelo autor

Gráfico 1: Variação da resistência à compressão (menor, maior e média)



Fonte: Elaborada pelo autor

As menores variações na resistência à compressão (0,2%, Tabela 5) foram registradas para os teores de 25% e 100%. Ao teor de 100% também corresponde a maior variação (63%). Não foi possível estabelecer relação direta entre o teor de substituição e a variação, mas percebe-se que para o menor teor (20%) foram registrados o menor desvio padrão e uma das menores variações (0,4%). Por outro lado, para substituição total ocorreu a maior variação (63%), mas esta não é muito diferente da observada para substituição de 50% (57,3%).

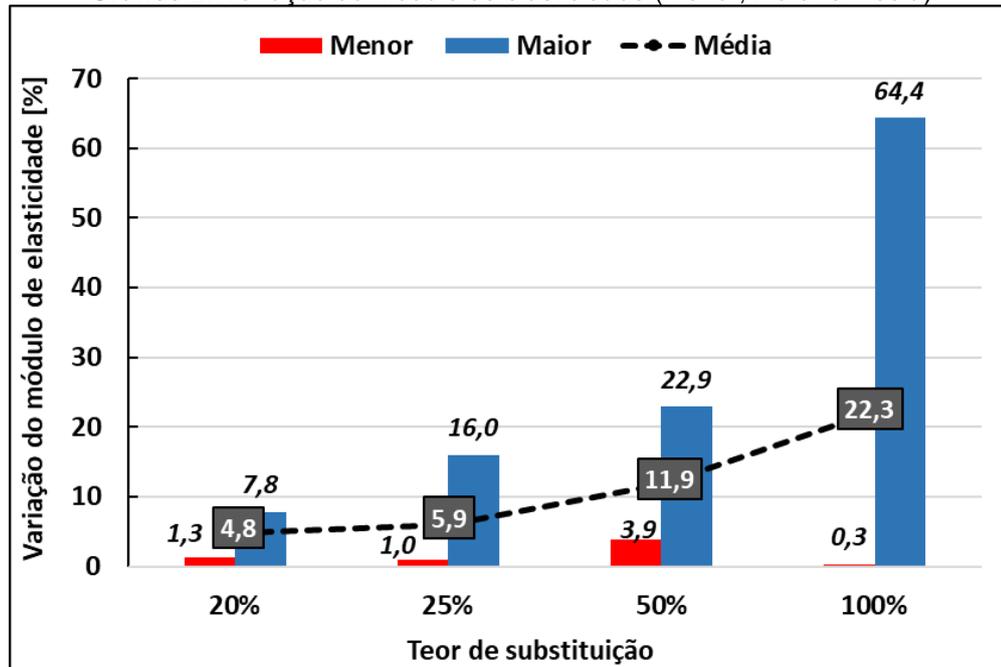
Outro dado que mostra isso é o coeficiente de variação (CV), dado pela porcentagem da relação entre o desvio padrão e a média; o menor valor de CV foi 57%, que é um valor considerado muito alto. Neste contexto é possível observar o quão heterogêneo pode ser o agregado de resíduo de concreto quando usado em novos concretos pois sua influência depende de muitos fatores como relação água/cimento, origem, preparação, tipo de mistura *etc.* cada uma dessas variáveis pode interferir no uso desse agregado reciclado (BARBUDO *et al.*, 2013; REVILLA-CUESTA *et al.*, 2020; VERIAN; ASHRAF; CAO, 2018; XIE; GHOLAMPOUR; OZBAKKALOGLU, 2018). Para o uso desse material reciclado em elementos estruturais, que requer um controle muito rigoroso, é importante definir valores ou faixas de valores para parâmetros como massa específica e absorção de água de forma a indicar os melhores agregados de resíduo para uso em novos concretos.

Para o módulo de elasticidade também foi observado comportamento semelhante ao encontrado na literatura, ou seja, quanto maior o teor de substituição, maior a variação (Tabela 6 e Gráfico 2). Nesse caso é possível falar de redução, pois dos 105 valores de módulo de elasticidade avaliados, 95 foram reduções decorrentes do maior teor de substituição (Tabela 3 – b). Além disso, foi observado desvio padrão considerável e o menor valor de CV foi 39% (Tabela 6). Uma vez que a resistência à compressão mostrou variações consideráveis era esperado que esse resultado se refletisse na deformabilidade, pois são variáveis que se relacionam entre si. Contudo, no caso do módulo de elasticidade os coeficientes de variação foram um pouco menores, mas, ainda assim, bem elevados. Coeficientes de variação iguais a 39% e 80% foram os valores mínimo e máximo observados, respectivamente. Assim, com base nesses valores confirma-se o quão heterogêneo é o concreto com agregados de resíduos de concreto e essa variabilidade não pode ser desconsiderada. No caso do módulo de elasticidade, quanto maior o teor de substituição, maiores os desvios-padrão.

Tabela 6: Medidas de centralidade no módulo de elasticidade

Variação [%]	Teor de substituição			
	20%	25%	50%	100%
Amostras [un]	11	14	27	53
Média	4,8	5,9	11,9	22,3
Mediana	4,2	4,5	11,6	16,2
Desvio padrão	1,9	4,6	6,2	17,9
Coef. de Variação	39	78	53	80
Maior variação	7,8	16,0	22,9	64,4
Quartil - 75%	6,0	5,2	16,9	30,9
Quartil - 25%	3,8	3,4	5,6	8,7
Menor variação	1,3	1,0	3,9	0,3

Fonte: Elaborada pelo autor

Gráfico 2: Variação do módulo de elasticidade (menor, maior e média)

Fonte: Elaborada pelo autor

Além das medidas de centralidade, também foi realizada a análise de variância (ANOVA) juntamente com o teste de Tukey; esse último foi utilizado para definir similaridades e diferenças entre as médias.

Toda análise de variância requer um teste de hipótese. Para a resistência à compressão tem-se H_0 quando $F < F_{crítico}$ todas as médias possuem similaridade entre si; e H_1 para $F \geq F_{crítico}$ caso haja pelo menos uma média diferente da outra. Assim:

$$H_0: \mu_{20\%} = \mu_{25\%} = \mu_{30\%} = \mu_{50\%} = \mu_{75\%} = \mu_{100\%}$$

$$H_1: \text{Pelo menos uma média diferente.}$$

A Tabela 7 mostra o teste ANOVA para a resistência à compressão. Antes mesmo de comparar valor F foi analisada a soma de quadrados (SQ) do erro (variação dentro dos grupos). O alto valor da soma de quadrados SQ (Tabela 7) indica o quão distante os dados estão da média, o que mostra que o erro experimental é grande, ou seja, é mais um dado que mostra como a variabilidade do ARC impacta aumentando a variabilidade da resistência do concreto.

Como $F > F_{crítico}$ (Tabela 7), a hipótese H_0 é rejeitada e aceita-se a hipótese H_1 ; portanto, há pelo menos uma média que difere entre elas.

Tabela 7: ANOVA de um fator desbalanceada para resistência à compressão

<i>Teor</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
20	17	93,0	5,5	17,2
25	31	279,7	9,0	68,5
30	14	102,4	7,3	21,0
50	54	587,4	10,9	112,8
75	14	257,4	18,4	173,4
100	87	1292,3	14,9	121,5

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	2654,7	5	530,95	5,2626	0,000141	2,2569
Dentro dos grupos	21288,1	211	100,89			
Total	23942,8	216				

Fonte: Elaborada pelo autor

Apenas pela análise de variância não é possível determinar quais médias são iguais ou diferentes entre si; para isso é utilizado o teste de Tukey. Como se trata de um teste desbalanceado, ou seja, com um número diferente de amostras por teor, é feito o cálculo do TSD (*Tukey Significant Difference*) para cada par de médias. A Tabela 8 mostra os resultados deste teste.

Tabela 8: Teste de Tukey desbalanceado para resistência à compressão

Tabela Tukey - Nível de significância: 5%; Tipo de amostras: 6; G.L. dentro dos grupos: 211								
q [5%; 6; 211]		4,03						
Relação entre teores	TSD	Diferença entre as médias						
		Teor/Teor	20	25	30	50	75	100
20-25	8,6	25	3,6	-	-	-	-	-
20-30	10,3	30	1,8	1,7	-	-	-	-
20-50	8,0	50	5,4	1,9	3,6	-	-	-
20-75	10,3	75	12,9	9,4	11,1	7,5	-	-
20-100	7,6	100	9,4	5,8	7,5	3,5	3,5	-
25-30	9,2	Resultado: Similaridade entre médias						
25-50	6,4	Teor	Média	Igualdade				
25-75	9,2	20	5,5	A				
25-100	6,0	25	9,0	AC				
30-50	8,6	30	7,3	AC				
30-75	10,8	50	10,9	ABC				
30-100	8,2	75	18,4	BC				
50-75	8,6	100	14,9	C				
50-100	5,0							
75-100	8,2							

Fonte: Elaborada pelo autor

Foi possível notar que a única diferença significativa ocorreu entre os teores mais baixos, 20% e 25% com os teores mais altos, 75% e 100%, ou seja, o Teste de Tukey indicou que há similaridade entre as médias dos teores de 20% a 50%, se diferenciando dos teores de 75% e 100%. Ainda nos resultados do teste, houve similaridade entre os teores de 25% a 100%, diferenciando apenas o teor de 20%. Na Tabela 8 é indicado essas igualdades e diferenças, quando se compara um teor que possui a mesma letra que outro, se tem uma similaridade, com ressalva que não há combinação de letras, elas devem ser observadas individualmente.

Visto que a diferença ocorre apenas nos teores extremos (20% e 100%), os teores centrais, 30% e 50% não estão totalmente definidos, sendo possíveis associá-los tanto com teores menores quanto maiores. Portanto, de acordo com o teste de Tukey não houve diferença significativa entre os teores de 20%, 25%, 30% e 50%. Esses resultados mostram dois fatores importantes: o primeiro é que o impacto da substituição sobre a resistência à compressão não está claro, ou seja, o teste indicou que quase todas as substituições são equivalentes e que apenas os extremos têm alguma significância. O segundo fator é que a substituição não apresenta uma variação proporcional; por exemplo, o teor de 30% indicou menor variação que o de 25%, o mesmo ocorre entre os teores de 100% e 75%. Vale destacar que talvez isso pudesse ser contornado ampliando o número de resultados. Gerin (2020)

encontrou maiores variações em concretos com menor teor de substituição, mostrando como a influência do ARC sobre os concretos não é uma tarefa de fácil análise.

Para o módulo de elasticidade foram definidas hipóteses de forma semelhante a resistência à compressão. Assim, tem-se H_0 para $F < F_{crítico}$ e que indica que todas as médias possuem similaridade entre si e H_1 para $F \geq F_{crítico}$ se houver pelo menos uma média diferente da outra.

$$H_0: \mu_{20\%} = \mu_{25\%} = \mu_{50\%} = \mu_{100\%}$$

H_1 : Pelo menos uma média diferente.

Os resultados da análise de variância foram semelhantes aos obtidos para a resistência à compressão. A soma de quadrados entre os grupos (Tabela 9) indicou que os dados estão muito dispersos em relação à média. Além disso, como $F > F_{crítico}$ (Tabela 9), é rejeitada a hipótese H_0 e aceita a hipótese H_1 , portanto há pelo menos uma média que difere entre elas.

Tabela 9: ANOVA de um fator desbalanceada para módulo de elasticidade

<i>Teor</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
20	11	52,8	4,8	3,6
25	14	83,1	5,9	21,3
50	27	320,0	11,9	39,0
100	53	1180,0	22,3	320,7

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	5325,6	3	1775,2	9,9575	8,27E-06	2,6946
Dentro dos grupos	18005,9	101	178,3			
Total	23331,5	104				

Fonte: Elaborada pelo autor

O teste de Tukey para o módulo de elasticidade mostrou que os teores de 20%, 25% e 50% são semelhantes entre si e apenas a substituição de 100% retorna um valor significativo em relação a esses teores menores. Isso mostra que as substituições de 25% e 50% geram efeitos semelhantes entre si, ou seja, a redução do módulo de elasticidade decorrente do uso de ARC baixa é pequena mesmo quando 50% do agregado graúdo natural é substituído.

Além disso, foi observado que a utilização de baixos teores (entre 20% e 50%) resulta em reduções de 5% a 10% no módulo de elasticidade, (ADAMS *et al.*, 2016; ANDREU; MIREN, 2014; BARBUDO *et al.*, 2013).

Tabela 10: Teste de Tukey desbalanceado para módulo de elasticidade

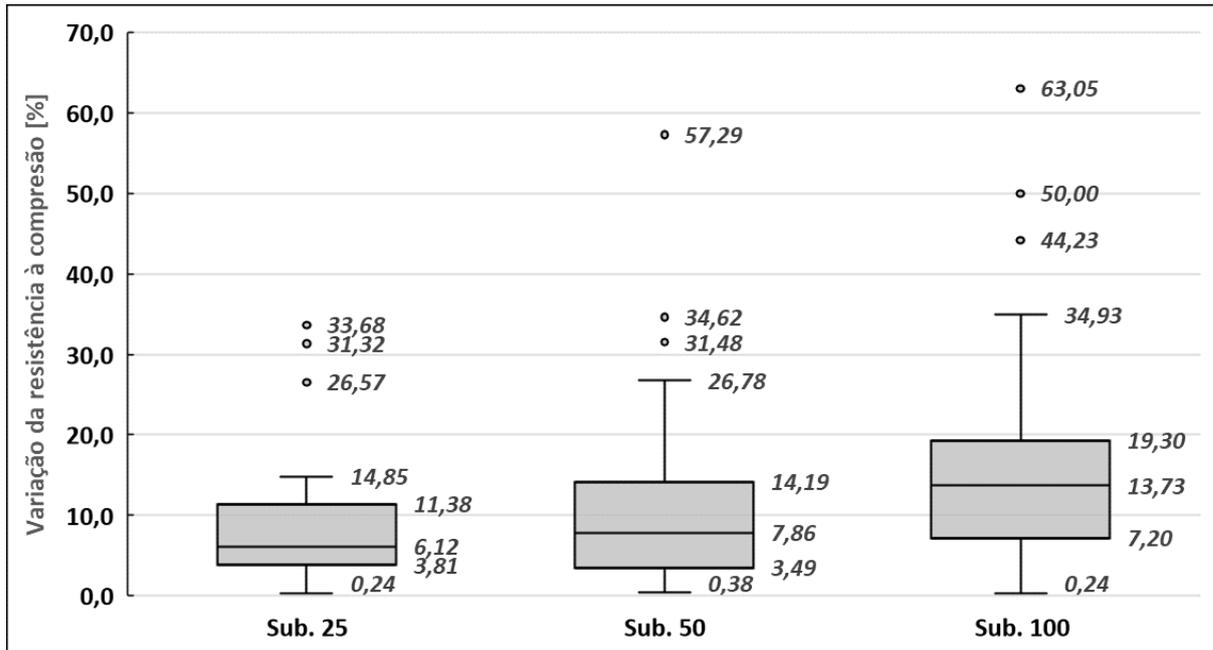
Tabela Tukey - Nível de significância: 5%; Tipo de amostras: 4; G. L. dentro dos grupos: 101						
q [5%; 4; 101]		3,99				
Relação entre teores	TSD	Diferença entre as médias				
		Teor/Teor	20	25	50	100
20-25	15,2	25	1,1	-	-	-
20-50	13,5	50	7,1	5,9	-	-
20-100	12,5	100	17,5	16,3	10,4	-
25-50	12,4	Resultado: Similaridade entre médias				
25-100	11,3	Teor	Média	Igualdade		
50-100	8,9	20	4,80	A		
		25	5,93	A		
		50	11,85	A		
		100	22,26	B		

Fonte: Elaborada pelo autor

4.3 MODELAGEM E ANÁLISES COMPARATIVAS

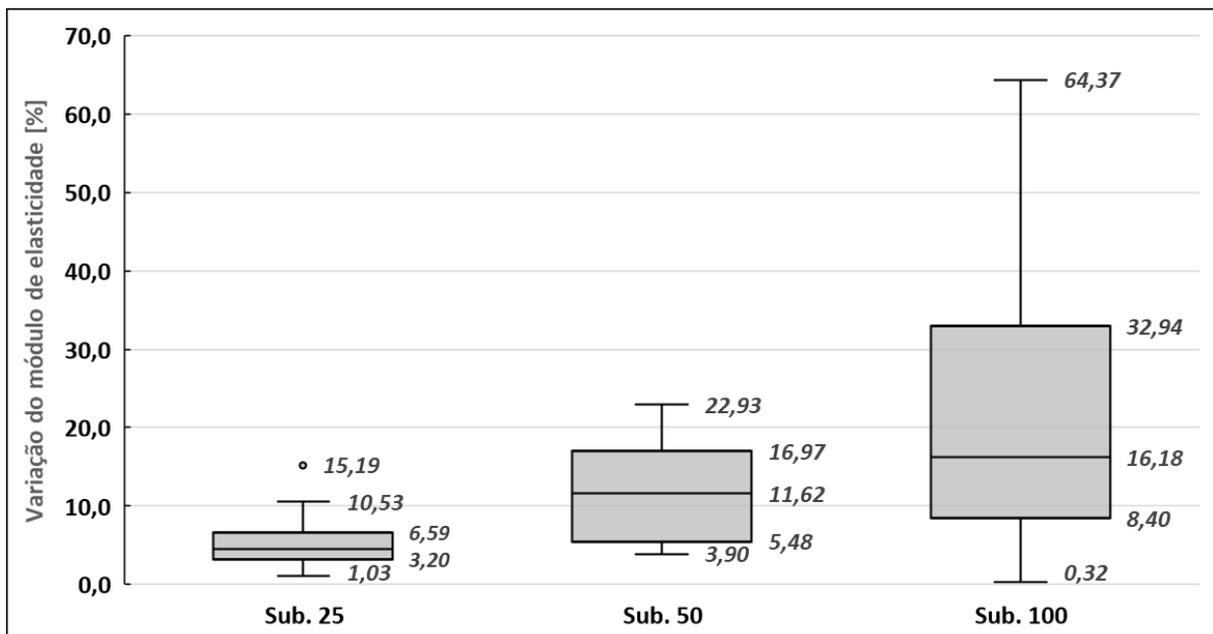
Além das análises numéricas apresentadas no item anterior, o uso de gráficos construídos a partir de resultados do banco de dados (Tabela 4) é bastante útil. Assim, foram construídos gráficos de dispersão (box plot) e regressões lineares. Porém, nessa análise deu-se prioridade aos teores com maior número de resultados e, portanto, não foram utilizados todos os teores analisados nos itens anteriores. Assim sendo, foram analisados os teores de 25%, 50% e 100%.

O primeiro gráfico analisado foi o box-plot da resistência à compressão (Gráfico 3). Foi possível visualizar a dispersão de dados, ou seja, a distância de cada valor em relação à média aumenta com o aumento do teor de substituição. Portanto, os valores de resistência ficam mais dispersos para teores maiores. Além disso, a presença de “outliers” em todos os teores mostra a grande variação dos dados de resistência.

Gráfico 3: Box-plot da variação da resistência à compressão

Fonte: Elaborada pelo autor

Para o módulo de elasticidade foi observado comportamento semelhante, ou seja, quanto maior o teor, maior a dispersão, porém há uma tendência mais exponencial, ou seja, há pouca variação entre os teores de 25% e 50%, porém para substituição total a variação chega a ser 4 vezes maior que para 25%. Outra observação importante é que há apenas um “outlier”, ou seja, embora a variação seja grande, os dados estão menos dispersos que aqueles de resistência à compressão (Gráfico 3).

Gráfico 4: Box-plot da variação do módulo de elasticidade

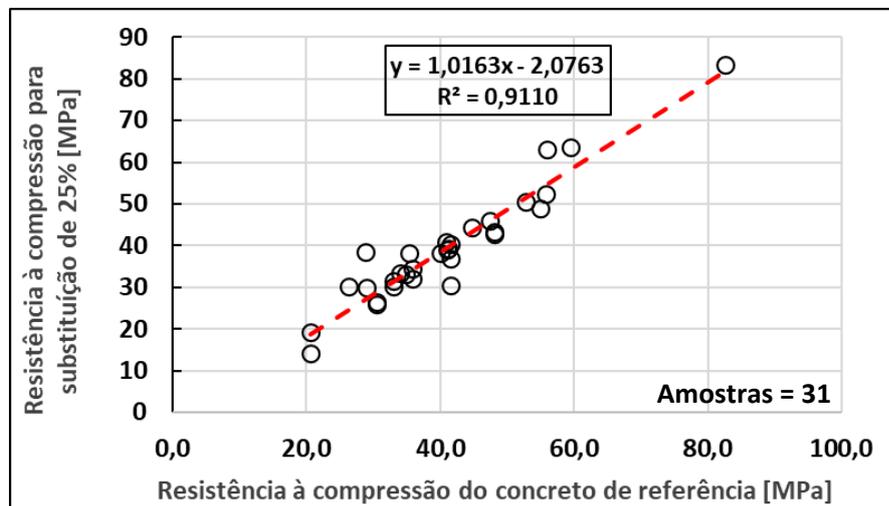
Fonte: Elaborada pelo autor

O passo seguinte na análise foi a definição de dois conjuntos de gráficos para os quais foram traçadas as retas médias por meio de regressão linear com os respectivos coeficientes de determinação (R^2): o primeiro para resistência à compressão e o segundo para o módulo de elasticidade (Gráfico 5 e Gráfico 6, respectivamente).

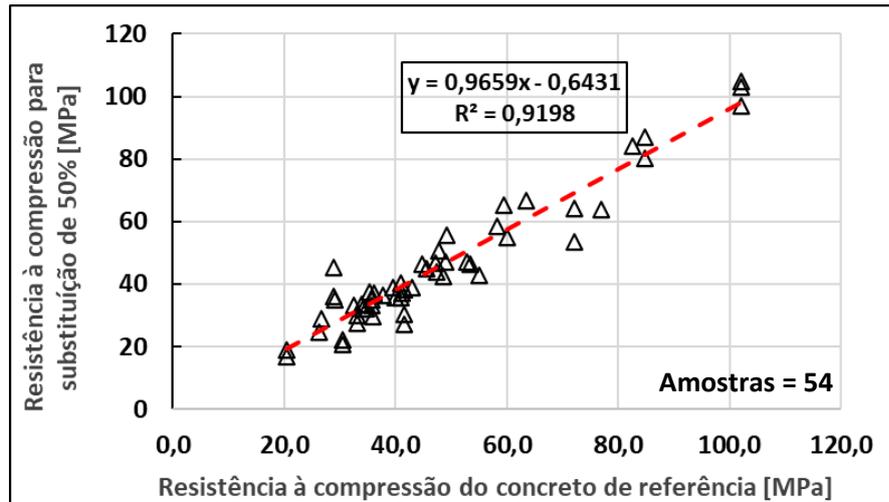
No caso da resistência à compressão (Gráfico 5) foram avaliados o coeficiente angular da reta e o valor de R^2 . O primeiro indica que quanto maior o coeficiente angular, mais a resistência do concreto com ARC se aproxima ou supera a resistência à compressão do concreto de referência. O valor do coeficiente diminui à medida que aumenta do teor de substituição (Gráfico 5a), b e c) e, portanto, a variação em relação ao concreto de referência aumenta com o aumento do teor de substituição.

Já o valor do coeficiente de determinação (R^2) indica o “erro” dos dados em relação à reta. Observando os resultados, foi possível constatar que os teores de 25% e 50% não trazem grandes diferenças entre si ($R^2=0,9110$ e $0,9198$). Além disso, os valores R^2 acima de 0,9 mostram excelente correlação entre os dados e a equação da reta, ou seja, a tal equação permite simular, com boa precisão, o valor da resistência à compressão com substituições fixas de 25% ou 50% do agregado natural por ARC. Para o teor de 100% o valor de R^2 foi menor, 0,85, ainda considerado um valor alto, porém nesse caso os valores previstos estão um pouco mais afastados dos valores reais da resistência à compressão.

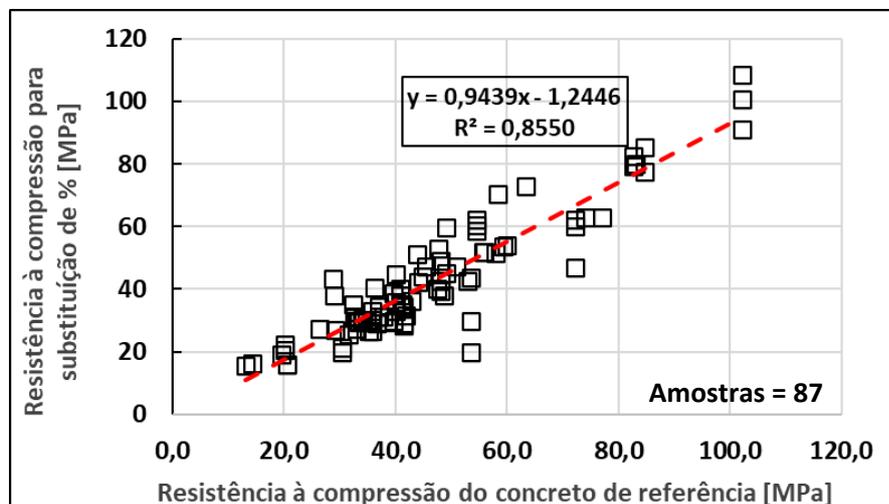
Gráfico 5: Regressão linear da resistência à compressão nos teores de 25%, 50% e 100%



a) Teor de substituição de 25%



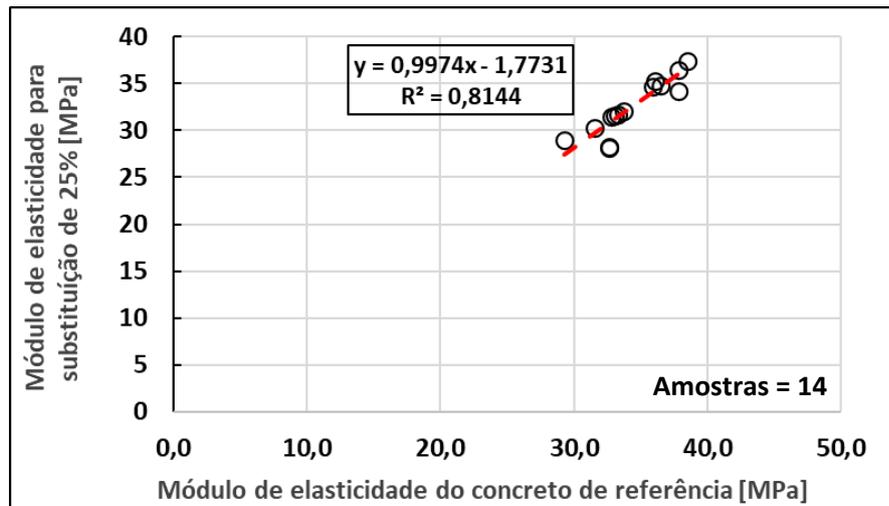
b) Teor de substituição de 50%



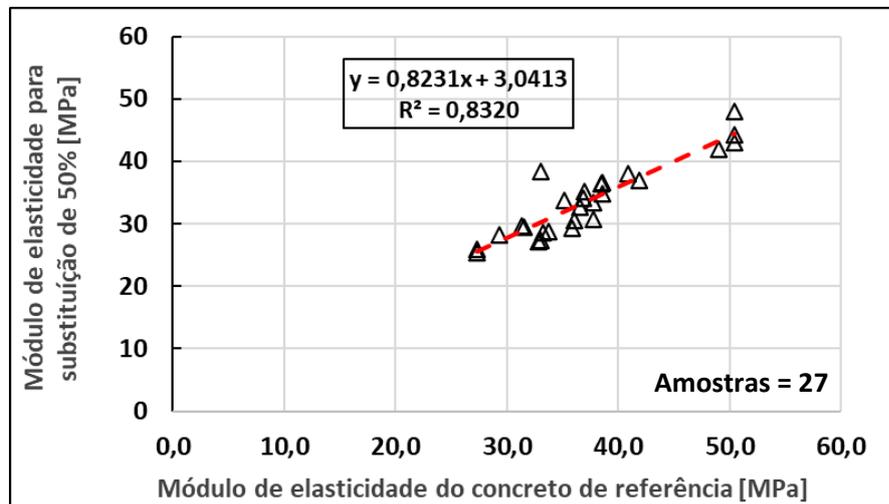
c) Teor de substituição de 100%

Fonte: Elaborada pelo autor

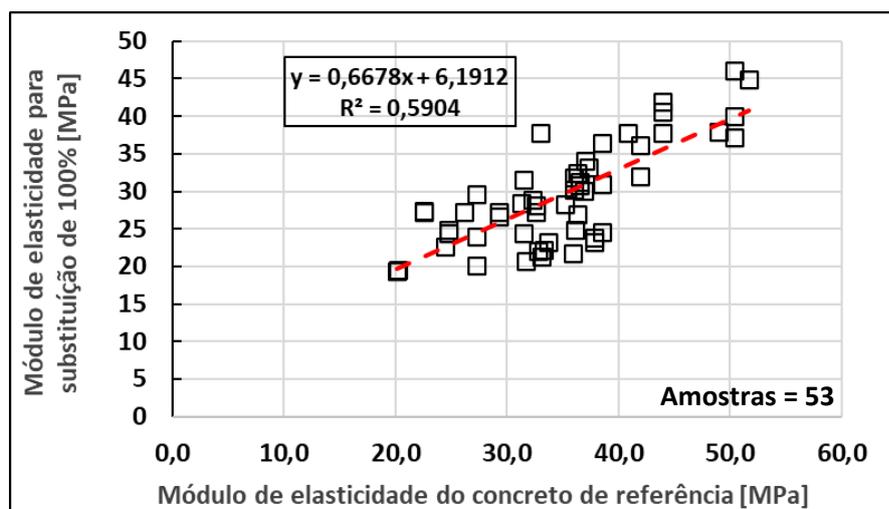
Análise semelhante foi realizada para os valores de módulo de elasticidade (Gráfico 6). Nesse caso, o número de dados disponíveis é bem menor se comparado à resistência à compressão. Apesar disso, os resultados se mostraram bem coerentes com o disponível na literatura. O coeficiente angular cai consideravelmente entre os teores de 25%, 50% e 100%, ou seja, o aumento do teor de substituição aumenta a variação do módulo de elasticidade e isso já foi relatado por outros pesquisadores (BARBUDO *et al.*, 2013; ESTOLANO *et al.*, 2018; VERIAN; ASHRAF; CAO, 2018; XIAO *et al.*, 2012).

Gráfico 6: Regressão linear do módulo de elasticidade no teor de 25%, 50% e 100%

a) Teor de substituição de 25%



b) Teor de substituição de 50%



c) Teor de substituição de 100%

Fonte: Elaborada pelo autor

Os valores de R^2 foram menores que os encontrados na análise da resistência à compressão. Isso indica que aplicar as equações resultantes da regressão linear para prever o valor do módulo de elasticidade de concretos com ARC leva a resultados que podem ser significativamente diferentes dos experimentais. Essa diferença é considerável sobretudo para substituição total onde é possível ver claramente como valores estão distantes da reta (Gráfico 6c).

5. Considerações Finais

5.1 CONCLUSÕES

Os estudos realizados até o momento permitem concluir que o agregado de resíduo de concreto (ARC) é um material com grande potencial para substituir o agregado graúdo natural na produção de concretos estruturais. Para isso é preciso que haja controle adequado das propriedades desses agregados com sua adequada caracterização. No presente estudo foi confeccionado um banco de dados constituído de resultados experimentais de outros pesquisadores. Foram inseridas informações como relação água/cimento, teor de substituição, resistência à compressão e módulo de elasticidade. As análises estatísticas se mostraram coerentes e indicaram alta heterogeneidade decorrente do uso de agregado de resíduo de concreto. Apesar disso, foi possível concluir alguns aspectos importantes que são destacados a seguir:

1) Os concretos produzidos com agregados de resíduos de concreto podem apresentar características semelhantes aos concretos com agregados naturais;

2) A variação da resistência à compressão em função do teor de substituição não apresenta comportamento claramente definido, podendo haver redução ou aumento com a utilização do ARC. Assim, estatisticamente, não foi possível estabelecer uma relação direta entre teor de substituição e resistência à compressão, pois foi identificado que há uma gama de outros fatores que também interferem nesse parâmetro;

3) A literatura mostra que o módulo de elasticidade sofre redução com o aumento do teor de substituição. No presente estudo, isso também foi observado, seja observando os dados individuais de cada autor ou nas análises gerais de dados.

4) Para baixos teores de substituição, as regressões lineares mostraram bom coeficiente de determinação, indicando que as equações, essas que buscam apresentar o valor das características do concreto com ARC em função do concreto de referência,

representam bem o conjunto de resultados experimentais. Para teores mais altos, não foram encontrados resultados que indiquem proximidade entre os concretos;

5) O concreto com ARC se mostrou bastante heterogêneo quando se avalia apenas o efeito do teor de substituição em propriedades de resistência à compressão e módulo de elasticidade. Os resultados aqui obtidos indicam que há outros parâmetros que também têm influência significativa. Assim sendo, não foi possível estabelecer clara relação entre os teores avaliados e essas propriedades mecânicas;

6) Por meio das análises feitas e apesar de possuir um erro estatístico grande devido a variabilidade dos dados, substituição de 25% se mostrou promissora uma vez que foram encontradas variações médias de 9,0% e 5,9% respectivamente para resistência à compressão e módulo de elasticidade;

7) Por fim, novos estudos são necessários para aprofundar o conhecimento sobre os agregados de resíduo de concreto e seus impactos na produção de concretos estruturais.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De maneira geral o uso do agregado de resíduo de concreto em concretos estruturais é uma excelente alternativa para redução dos impactos ambientais. Porém, a grande variabilidade dos agregados e, por consequência, dos concretos confeccionados com tais agregados dificulta a obtenção de relações matemáticas que relacionem teor de substituição e propriedades mecânicas como resistência à compressão e módulo de elasticidade. Há necessidade de ampliar as pesquisas para gerar mais dados e, com isso, melhorar a representatividade dos modelos matemáticos. Assim sendo recomendam-se as pesquisas futuras a seguir:

1) Incluir no bando de dados a massa específica e absorção de água do agregado e do concreto, bem como outras características do concreto com ARC;

2) Isolar, em um mesmo teor de substituição ou classe de resistência, concretos com mesma massa específica ou consumo de cimento para possibilitar a identificação de padrões já nas propriedades físicas dos concretos;

3) Aplicação de outros métodos estatísticos a fim de combinar informações como dosagem do concreto, densidade e teores de substituição a fim de identificar similaridades entre as variáveis.

4) Obter e utilizar outras equações para representar as relações entre os concretos de referência e os concretos com ARC; por exemplo, uso de regressões polinomiais.

Referências Bibliográfica

ADAMS, M. P. *et al.* Cracking susceptibility of concrete made with coarse recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 102, p. 802–810, 2016.

AFROUGHSABET, V.; BIOLZI, L.; OZBAKKALOGLU, T. Influence of double hooked-end steel fibers and slag on mechanical and durability properties of high performance recycled aggregate concrete. **Composite Structures**, v. 181, p. 273–284, 2017.

AMARIO, M.; PEPE, M.; TOLEDO FILHO, R. D. Influência de agregados reciclados de concreto na reologia do concreto. **V Congresso Ibero-americano sobre Betão Auto-compactável e Betões Especiais**. n. 1, p. 85–94, 2018.

ANDAL, J.; SHEHATA, M.; ZACARIAS, P. Properties of concrete containing recycled concrete aggregate of preserved quality. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 842–855, 2016.

ANDREU, G.; MIREN, E. Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 52, p. 227–235, 2014.

ANGULO, S. C. *et al.* **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados separados por líquidos densos**. I Conferência Latino-Americana De Construção Sustentável X Encontro Nacional De Tecnologia Do Ambiente Construído. São Paulo, 2004.

ANGULO, S. C.; MUELLER, A. Determination of construction and demolition recycled aggregates composition, in considering their heterogeneity. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 42, n. 6, p. 739–748, 2009.

ARORA, S.; SINGH, S. P. Analysis of flexural fatigue failure of concrete made with 100% Coarse Recycled Concrete Aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 102, p. 782–791, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15112**: Resíduos da construção civil e resíduos volumosos - Áreas de transbordo e triagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15113**: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes - Aterros - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15114**: Resíduos sólidos da construção civil - Áreas de reciclagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15115**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação - Procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15116**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

BARBUDO, A. *et al.* Influence of water-reducing admixtures on the mechanical performance

of recycled concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 59, p. 93–98, 2013.

BAZUCO, R. S. **Utilização de Agregados Reciclados de Concreto Para Produção De Novos Concretos**. 1999. 128p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

BOHNENBERGER, J. C. *et al.* Identificação de áreas para implantação de usina de reciclagem de resíduos da construção e demolição com uso de análise multicritério. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 1, p. 299–311, 2018.

CAMPOS, R. S. *et al.* Influência dos agregados reciclados nas propriedades reológicas e mecânicas do concreto autoadensável. **Revista Matéria**, v. vol.23, n. no.1, p. 20p, 2018.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Resolução Nº 307 – Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Conselho Nacional do Meio Ambiente: Brasília, DF, 2002. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>> Acesso 07 de abril de 2021.

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.

ESTOLANO, V. *et al.* Avaliação dos módulos de elasticidade estático e dinâmico de concretos produzidos com agregados reciclados oriundos de resíduos de pré-fabricados de concreto. **Revista Materia**, v. 23, n. 1, 2018.

FAN, C. C. *et al.* Properties of concrete incorporating fine recycled aggregates from crushed concrete wastes. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 708–715, 2016.

FERREIRA, L.; DE BRITO, J.; BARRA, M. Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties. **Magazine of Concrete Research**, v. 63, n. 8, p. 617–627, 2011.

FIGUEIREDO, P. O. *et al.* Influência dos métodos de britagem nas propriedades do agregado reciclado de concreto. **Ambiente Construído**, v. 20, p. 99–111, 2020.

FIOL, F. *et al.* The influence of recycled aggregates from precast elements on the mechanical properties of structural self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 182, p. 309–323, 2018.

FOLINO, P.; XARGAY, H. Recycled aggregate concrete - Mechanical behavior under uniaxial and triaxial compression. **Construction and Building Materials**, v. 56, p. 21–31, 2014.

FURSULE, A. A. *et al.* Experimental Study of Mechanical Properties of Concrete using Recycled Aggregate with Nano Silica. **International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)**, v. 4, n. 8, p. 950–953, 2017.

GAO, D.; ZHANG, L.; NOKKEN, M. Mechanical behavior of recycled coarse aggregate concrete reinforced with steel fibers under direct shear. **Cement and Concrete Composites**, v. 79, p. 1–8, 2017.

GERIN, M. T. **Comportamento de pilares mistos preenchidos com concreto de resíduos de concreto submetidos a compressão axial centrada: efeito do teor de substituição e da forma de aplicação da força**. 2020. 152p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal

de São Carlos, São Carlos, 2020.

GOMES, P. C. C. *et al.* Obtenção de blocos de concreto com utilização de resíduos reciclados da própria fabricação dos blocos. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 3, p. 267–280, 2017.

GONÇALVES, M. S. **Análise da viabilidade técnica de utilização de resíduos de concreto oriundos da pré-fabricação como agregado graúdo para a produção de novos concretos**. 2011. 118p. Dissertação (Mestrado), 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.

GUO, Z. *et al.* Mechanical and durability properties of sustainable self-compacting concrete with recycled concrete aggregate and fly ash, slag and silica fume. **Construction and Building Materials**, v. 231, p. 117115, 2020.

HAMAD, B. S.; DAWI, A. H. Sustainable normal and high strength recycled aggregate concretes using crushed tested cylinders as coarse aggregates. **Case Studies in Construction Materials**, v. 7, n. August 2017, p. 228–239, 2017.

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.

JUNAK, J.; SICAKOVA, A. Concrete Containing Recycled Concrete Aggregate with Modified Surface. **Procedia Engineering**, v. 180, p. 1284–1291, 2017.

JUNIOR, J. S. K. Avaliação da incorporação de agregado reciclado na composição de concretos autoadensáveis. p. 148, 2018.

KABIR, A.; AHMED, N. U.; ALAM, M. S. Effect of Cement Proportion on Strength of Recycled Aggregate Concrete. **International Journal of Structural and Civil Engineering Research**, v. 4, n. 4, 2015.

KATKHUDA, H.; SHATARAT, N. Improving the mechanical properties of recycled concrete aggregate using chopped basalt fibers and acid treatment. **Construction and Building Materials**, v. 140, p. 328–335, 2017.

KAZMIERCZAK, C. DE S. *et al.* Influence of the moisture content on the dynamic modulus of elasticity of concrete made with recycled aggregate. **Ambiente Construído**, v. 19, n. 2, p. 79–89, 2019.

KHODAIR, Y.; LUQMAN. Self-compacting concrete using recycled asphalt pavement and recycled concrete aggregate. **Journal of Building Engineering**, v. 12, n. May, p. 282–287, 2017.

KHOURY, E. *et al.* Heterogeneity of recycled concrete aggregates, an intrinsic variability. **Construction and Building Materials**, v. 175, p. 705–713, 2018.

KIM, S. W. *et al.* Bond strength prediction for deformed steel rebar embedded in recycled coarse aggregate concrete. **Materials and Design**, v. 83, p. 257–269, 2015.

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.

KURAD, R. *et al.* Effect of incorporation of high volume of recycled concrete aggregates and fly ash on the strength and global warming potential of concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 166, p. 485–502, 2017.

KURDA, R.; DE BRITO, J.; SILVESTRE, J. D. Influence of recycled aggregates and high contents of fly ash on concrete fresh properties. **Cement and Concrete Composites**, v. 84, n. 2017, p. 198–213, 2017.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 290p. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LEVY, S. L. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. Escola Politécnica. 2001. 208p. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

MANZI, S.; MAZZOTTI, C.; BIGNOZZI, M. C. Self-compacting concrete with recycled concrete aggregate: Study of the long-term properties. **Construction and Building Materials**, v. 157, n. 2017, p. 582–590, 2017.

MORETTI, J. P. **Estudo de viabilidade técnica da utilização da ACBC e do RCC na composição de concretos**. 2014. 166p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.

NILI, M.; SASANIPOUR, H.; ASLANI, F. The effect of fine and coarse recycled aggregates on fresh and mechanical properties of self-compacting concrete. **Materials**, v. 12, n. 7, 2019.

NIRMALJEET, E.; VIKRAM, E. Study of Optimization of Recycle Coarse Aggregate on Strength Characteristics of Different Grades of Structural Concrete. **Ijarccce**, v. 6, n. 5, p. 203–210, 2017.

OLIVEIRA, T. M. *et al.* Absorção de água e massa específica de agregados graúdos e miúdos de resíduos de concreto. **3º CONGRESSO SUL-AMERICANO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E SUSTENTABILIDADE**. Gramado – RS. Tema: Resíduos da Construção Civil e outros; p. 1–8, 2020.

OZBAKKALOGLU, T.; GHOLAMPOUR, A.; XIE, T. Mechanical and Durability Properties of Recycled Aggregate Concrete: Effect of Recycled Aggregate Properties and Content. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, n. 2, 2018.

PACHECO, J. *et al.* Experimental investigation on the variability of the main mechanical properties of concrete produced with coarse recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 201, p. 110–120, 2019.

PEDRO, D.; DE BRITO, J.; EVANGELISTA, L. Evaluation of high-performance concrete with recycled aggregates: Use of densified silica fume as cement replacement. **Construction and Building Materials**, v. 147, p. 803–814, 2017.

PEPE, M. *et al.* Alternative processing procedures for recycled aggregates in structural concrete. **Construction and Building Materials**, v. 69, p. 124–132, 2014.

POON, C. S. *et al.* Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 1,

p. 31–36, 2004.

REVILLA-CUESTA, V. *et al.* Self-compacting concrete manufactured with recycled concrete aggregate: An overview. **Journal of Cleaner Production**, v. 262, 2020.

SALESA, Á. *et al.* Physico-mechanical properties of multi-recycled self-compacting concrete prepared with precast concrete rejects. **Construction and Building Materials**, v. 153, p. 364–373, 2017.

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.

TAM, V. W. Y.; GAO, X. F.; TAM, C. M. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 6, p. 1195–1203, 2005.

TANG, W. C. *et al.* Properties of Self-Compacting Concrete with Recycled Coarse Aggregate. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2016, 2016.

TEIXEIRA, E. DA C. *et al.* Estudo De Concretos Preparados Com Rcd E Metacaulim. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 8, p. 63407–63414, 2020.

TENÓRIO, J. J. L. **Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição visando aplicações estruturais.** 2007. 157p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2007.

THOMAS, J.; THAICKAVIL, N. N.; WILSON, P. M. Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates. **Journal of Building Engineering**, v. 19, n. March, p. 349–365, 2018.

VERIAN, K. P.; ASHRAF, W.; CAO, Y. Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 133, n. October 2017, p. 30–49, 2018.

WANG, J. *et al.* Considering life-cycle environmental impacts and society's willingness for optimizing construction and demolition waste management fee: An empirical study of China. **Journal of Cleaner Production**, v. 206, p. 1004–1014, 2019.

WU, Z.; YU, A. T. W.; POON, C. S. An off-site snapshot methodology for estimating building construction waste composition - a case study of Hong Kong. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 77, n. February, p. 128–135, 2019.

XIAO, J. *et al.* An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996-2011). **Construction and Building Materials**, v. 31, p. 364–383, 2012.

XIAO, J.; LI, J.; ZHANG, C. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 6, p. 1187–1194, 2005.

XIE, T.; GHOLAMPOUR, A.; OZBAKKALOGLU, T. Toward the development of sustainable concretes with recycled concrete aggregates: Comprehensive review of studies on mechanical properties. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, n. 9, 2018.