

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
NÍVEL MESTRADO**

FERNANDO HENRIQUE FERNANDES SOUSA

**AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE OS MÓDULOS DE ELASTICIDADE
ESTÁTICO E DINÂMICO DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADOS
GRAÚDOS RECICLADOS EM SUBSTITUIÇÃO AOS AGREGADOS GRAÚDOS
NATURAIS**

São Leopoldo

2018

FERNANDO HENRIQUE FERNANDES SOUSA

**AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE OS MÓDULOS DE ELASTICIDADE
ESTÁTICO E DINÂMICO DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADOS
GRAÚDOS RECICLADOS EM SUBSTITUIÇÃO AOS AGREGADOS GRAÚDOS
NATURAIS**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak

Coorientador: Prof. Dr. Uziel Cavalcanti de Medeiros Quinino

São Leopoldo

2018

S719a Sousa, Fernando Henrique Fernandes
Avaliação da relação entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados em substituição aos agregados graúdos naturais / por Fernando Henrique Fernandes Sousa. – 2018.
148 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (Mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, São Leopoldo, RS, 2018.

Orientador: Dr. Claudio de Souza Kazmierczak.
Coorientador: Dr. Uziel Cavalcanti de Medeiros Quinino.

1. Módulo de elasticidade estático. 2. Módulo de elasticidade dinâmico. 3. Concreto. 4. Agregado reciclado de concreto. 5. Agregado reciclado de cerâmica vermelha. I. Título.

CDU: 666.972

Aos meus pais, Fernando Souza e Elizabeth Fernandes, e
à minha avó materna Maria (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo zelo e talentos a mim confiados nestes dois anos de mestrado. Sem dúvida alguma, o cuidado e a sabedoria, vinda da parte de Deus, tornaram possível a conclusão desta dissertação. Toda honra e gloria a Jáh que está no controle e no comando de TODAS as coisas.

À toda minha família, em especial aos meus pais, Fernando Souza e Elizabeth Fernandes. Toda a educação e os estudos proporcionados por eles me conduziram durante a trajetória acadêmica. Eles nunca mediram esforços. Só foi possível chegar até aqui mediante a paciência, o carinho, o incentivo, as orações, a amizade, o afeto, os conselhos, em mim depositadas por ambos.

À minha colega de mestrado e companheira Ana Júlia, pois a partir de suas convicções e virtudes, incentivou-me nos meus momentos de ansiedade e de incertezas, conduzindo-me a ter esperança de que no final as coisas dariam certo, mesmo quando as possibilidades me levavam a crer que não dariam.

À Luzia dos Reis e a Luma Rebecca, pelo incentivo e cuidado ao longo desses dois anos, auxiliando no que puderam, o que sem dúvidas, foi valoroso.

Ao professor e orientador Professor Dr. Claudio de Souza Kazmierczak, por seus ensinamentos, orientações e sobretudo insistência por uma dissertação de excelência. Sem dúvidas esta dissertação não seria a mesma sem as suas orientações. Ao longo dos dois anos de mestrado, as disciplinas ministradas por ele e estágio de docência contribuíram no meu desenvolvimento profissional e no meu conhecimento como futuro docente.

Ao professor Uziel Cavalcanti de Medeiros Quinino (coorientador) por seus apontamentos e por suas contribuições para a revisão textual da dissertação.

Aos bolsistas de iniciação científica, Igor Wiskow e Monique Lunardi, pelo auxílio dado no decorrer do desenvolvimento do programa experimental. A presença de ambos tornou a experiência muito melhor.

Ao laboratório de materiais de construção da Unisinos, nas pessoas de: Thiago, Ingrid, Julio, André e David, pelo auxílio prestado, sobretudo no período de adaptação às rotinas laboratoriais. Ao ITT Performance da Unisinos, nas pessoas de: Pedro e Nataly, no auxílio prestado para a realização dos ensaios mecânicos.

Enfim, a todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

O módulo de elasticidade é um parâmetro que mensura a rigidez do concreto, sendo uma das propriedades que é levada em consideração na verificação da segurança estrutural, pois expressa as condições dos estados limites último e de serviço. Quando é avaliada - a influência da substituição de agregados graúdos naturais por agregados graúdos reciclados - o comportamento elástico do concreto torna-se imprescindível, uma vez que não é similar ao comportamento de resistência à compressão, que por sua vez pode alcançar resistências superiores ao concreto produzido inteiramente com agregados graúdos naturais. Nesse sentido, o uso da resistência à compressão como parâmetro único, para se estimar o módulo de elasticidade do concreto produzido com agregados graúdos reciclados, tem sido cada vez mais questionável. Tratando-se da influência do uso de agregado graúdo reciclado no módulo de elasticidade do concreto, poucos são os estudos que apresentam os valores de módulo de elasticidade estático e módulo de elasticidade dinâmico. Diante disso, o objetivo desta pesquisa é avaliar a relação entre o módulo de elasticidade estático e o módulo de elasticidade dinâmico de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados em substituição aos agregados graúdos naturais, com o intuito de relacionar o tipo de agregado graúdo ao módulo de elasticidade. Para tal, foram utilizados agregados graúdos reciclados de concreto e agregados graúdos reciclados de cerâmica vermelha em taxa de substituição de 30% em relação ao agregado graúdo natural. Os concretos foram produzidos em três traços experimentais, sendo eles: traço pobre (maior relação a/c), traço intermediário e traço rico (menor relação a/c). As propriedades dos concretos foram avaliadas aos 28 dias, sendo elas: massa específica do concreto no estado fresco e endurecido; porosidade; resistência à compressão; módulos de elasticidade estático e dinâmico. Como principais resultados, verificou-se que o tipo de agregado graúdo reciclado de modo geral influenciou negativamente o módulo de elasticidade, sendo essa influência mais pronunciada no módulo de elasticidade dinâmico; não foi possível obter uma relação entre o módulo de elasticidade estático e dinâmico dos concretos produzidos com agregados graúdos reciclados; o módulo de elasticidade estático dos concretos produzidos com agregados graúdos reciclados é mais fortemente relacionado à resistência e à compressão; o módulo de elasticidade dinâmico possui maior relação com a porosidade dos concretos produzidos com

agregados graúdos reciclados; os módulos de elasticidade estimados por equações algébricas apresentam elevada variabilidade.

Palavras-chave: Módulo de elasticidade estático. Módulo de elasticidade dinâmico. Concreto. Agregado reciclado de concreto. Agregado reciclado de cerâmica vermelha.

ABSTRACT

Modulus of elasticity is a parameter that measures the stiffness of the concrete, being one of the properties taken into account in the structural safety check, since it expresses the conditions of the ultimate and service boundary state. When the influence of the replacement of natural aggregates by recycled aggregates is evaluated, the elastic behavior of the concrete becomes essential, since it cannot be compared to the behavior of compressive strength, usually lower than the concrete produced with natural aggregates. The use of compressive strength as a single parameter to estimate the modulus of elasticity of concrete produced with recycled aggregates has been increasingly questioned. Considering the influence of the use of recycled aggregate on the modulus of elasticity of concrete, only a few studies have compared the values of static elastic modulus and dynamic modulus. This research aims to evaluate the relationship between the static elastic modulus and the dynamic elastic modulus of concrete produced with recycled aggregates in replacement of natural aggregates, in order to correlate the type of aggregate to the modulus of elasticity, verifying the relationship between the two procedure of determination of elasticity modulus. Aggregates made of recycled concrete and of ceramic bricks were used in a replacement rate of 30% to the natural aggregate. The concretes were produced in three experimental proportions (lower w/c ratio, intermediate w/c ratio and higher w/c ratio). The properties evaluated at 28 days are: bulk concrete mass; porosity; compressive strength; static and dynamic modulus of elasticity. The main conclusions are: the recycled aggregate decrease the modulus of elasticity, mainly the dynamic modulus; there are no relationship between the static and dynamic modulus of elasticity of concrete produced with recycled aggregates; the static modulus of concrete produced with recycled aggregates has a higher relationship to the compressive strength; the dynamic modulus of elasticity is higher related to the porosity of concrete produced with recycled aggregates; the moduli of elasticity estimated by algebraic equations present high variability.

Key-words: Static modulus of elasticity. Dynamic modulus of elasticity. Concrete. Recycled aggregate concrete. Recycled ceramic aggregate.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estágios típicos do concreto sob compressão uniaxial	37
Figura 2 - Principais fatores que afetam o módulo de elasticidade do concreto	38
Figura 3 - Clip gages (a) posicionados no CP (b) para a determinação do E_e	51
Figura 4 - Diagrama esquemático da propagação das ondas ultrassônicas.....	54
Figura 5 - Agregado graúdo reciclado de cerâmica vermelha dentro da argamassa	65
Figura 6 - Aparência do AGRC com camada de argamassa aderida ao grão	66
Figura 7 - Esquema de representação do AGRC dentro da nova argamassa.....	66
Figura 8 - Organograma das atividades desenvolvidas	70
Figura 9 - Ordem de inserção dos materiais na betoneira.....	82

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Diagrama tensão-deformação do agregado da pasta e do concreto	36
Gráfico 2 - Módulo de elasticidade dinâmico em função da umidade interna dos CP's	39
Gráfico 3 -Tensão-deformação em função da velocidade de carregamento	40
Gráfico 4 - Proposta de metodologia para determinação do Ee	41
Gráfico 5 - Módulo de elasticidade dinâmico e estático em função do tipo de cura..	43
Gráfico 6 - Ed (a) e Ee (b) em função da temperatura em cura.....	43
Gráfico 7 - Influência do tipo de agregado graúdo no módulo de elasticidade	45
Gráfico 8 - Ec de concretos com AG britados (a) e AG arredondados (b).....	46
Gráfico 9 - Efeito do tamanho máximo do agregado no Ec do concreto.....	47
Gráfico 10 - Influência da dimensão máxima do agregado graúdo no Ec da ZT	49
Gráfico 11 - Tipos de representação do módulo de elasticidade	52
Gráfico 12 - Métodos para determinação dos módulos de elasticidade estático	52
Gráfico 13 - Ee e Ec's estimados em função de normas	58
Gráfico 14 - Ee e Ec's estimados em função de autores da literatura	60
Gráfico 15 - Influência resumida do AGR nas propriedades do concreto	62
Gráfico 16 - Módulo de elasticidade por taxa de substituição de AGN por AGRCV .	64
Gráfico 17 - Evolução do Ec em função da porosidade aberta do concreto	67
Gráfico 18 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo	75
Gráfico 19 - Distribuição granulométrica comum aos agregados graúdos.....	76
Gráfico 20 - Absorção do AG por imersão nos 10 minutos iniciais	84
Gráfico 21 - Absorção do AG por imersão ao longo do ensaio.....	84
Gráfico 22 - Carregamento utilizado para determinação do Ee	87
Gráfico 23 - Massa específica do concreto no estado fresco	91
Gráfico 24 - Resistência à compressão	93
Gráfico 25 - Módulo de elasticidade dinâmico	95
Gráfico 26 - Módulo de elasticidade estático	98
Gráfico 27 - Massa específica do concreto saturado	101
Gráfico 28 - Porosidade do concreto	104
Gráfico 29 - Módulos de elasticidade em função da resistência à compressão.....	107
Gráfico 30 - Módulos de elasticidade em função da porosidade	111
Gráfico 31 - Módulos de elasticidade em função da massa específica do concreto	114

Gráfico 32 - Relação entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico.....	117
Gráfico 33 - Ee experimental e Ec estimado a partir de normas	119
Gráfico 34 - Ee e Ec estimado a partir da literatura.....	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ee variando a dimensão do CP e o tipo de medidor de deformação	41
Tabela 2 - Ee em função de rochas usuais como fonte de agregados graúdos.....	47
Tabela 3 - Estimativa do Ee a partir de equações algébricas normalizadas	57
Tabela 4 - Estimativa do Ec a partir de equações algébricas de autores (literatura).	59
Tabela 5 - Módulo de elasticidade estático de concretos produzidos com AGRC	68
Tabela 6 - Total de amostras empregadas por ensaio e ao todo	72
Tabela 7 - Características químicas do cimento Portland CPV-ARI.....	73
Tabela 8 - Características físicas e mecânicas do cimento Portland CPV-ARI	73
Tabela 9 - Propriedades físicas dos agregados miúdos.....	74
Tabela 10 - Análise granulométrica do agregado miúdo	74
Tabela 11 - Curva granulométrica em comum para os agregados graúdos.....	76
Tabela 12 - Propriedades físicas do agregado gráúdo natural.....	77
Tabela 13 - Propriedades físicas do AGRC20 e AGRC40	78
Tabela 14 - Percentual de argamassa aderida aos grãos.....	78
Tabela 15 - Propriedades físicas do AGRCV	79
Tabela 16 - Propriedades físico-químicas do aditivo superplastificante	80
Tabela 17 - Proporções de mistura para as betonadas experimentais	81
Tabela 18 - Quantidade de agregado gráúdo utilizado por abertura de peneira	81
Tabela 19 - Forma de identificação dos concretos.....	83
Tabela 20 - Principais propriedades dos agregados graúdos em valores médios	90
Tabela 21 - Teor de aditivo utilizado e abatimento de tronco de cone do concreto...	91
Tabela 22 - Principais propriedades dos concretos no estado endurecido:	92
Tabela 23 - Anova da resistência à compressão.....	94
Tabela 24 - Anova do módulo de elasticidade dinâmico	96
Tabela 25 - Teste Tukey do módulo de elasticidade dinâmico.....	97
Tabela 26 - Anova do módulo de elasticidade estático	99
Tabela 27 - Teste Tukey do módulo de elasticidade estático.....	99
Tabela 28 - Anova da massa específica do concreto saturado	102
Tabela 29 - Test Tukey da massa específica do concreto saturado	102
Tabela 30 - Anova da porosidade do concreto.....	104
Tabela 31 - Regressão linear simples entre os módulos de elasticidade e o fcm ...	106

Tabela 32 - Regressão linear simples entre os módulos de elasticidade e porosidade	110
Tabela 33 - Regressão linear entre os módulos de elasticidade e a ρ do concreto	112
Tabela 34 - Regressão linear entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico	116
Tabela 35 - Variação entre o E_c 's dos concretos reciclados e concreto REF.....	118

LISTA DE SIGLAS

a/c	Relação água/cimento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
AGN	Agregado Graúdo Natural
AGRC	Agregado Graúdo Reciclado de Concreto
AGRC20	Agregado Graúdo Reciclado de Concreto de classe de 20 MPa
AGRC40	Agregado Graúdo Reciclado de Concreto de classe de 40 MPa
AGRCV	Agregado Graúdo Reciclado de Cerâmica Vermelha
AM	Agregado Miúdo
AN	Agregado Natural
ANOVA	Análise de Variância
AR	Agregado Reciclado
ARC	Agregado Reciclado de Concreto
ARC20	Agregado Reciclado de Concreto de classe de 20 MPa
ARC40	Agregado Reciclado de Concreto de classe de 40 MPa
ASTM	American Society for Testing and Materials
CEB-FIP	Comité Euro-International du Béton - Fédération Internationale de la Précontrainte
CP	corpo-de-prova
CPV-ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
CV	Coeficiente de Variação
E_c	Módulo de Elasticidade
E_d	Módulo de Elasticidade Dinâmico
E_e	Módulo de Elasticidade Estático
ES	Efeito significativo
f_c	Resistência à compressão
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
GL	Grau de liberdade
GMAT	Grupo de Pesquisa em Materiais de Construção e Reciclagem
IBRACON	Instituto Brasileiro do Concreto
IPT-EPUSP	Instituto de Pesquisas Tecnológicas – Escola Politécnica da

	Universidade de São Paulo
ITT Performance	Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil
LCM	Laboratório de Materiais de Construção da Unisinos
MQ	Média quadrada
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
NM	Norma Mercosul
PPGEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
PUNDIT	Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicator Tester
R ²	Coeficiente de determinação
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
RCV	Resíduo de Cerâmica Vermelha
REF	Referência
RILEM	Reunião Internacional de Laboratórios de Estruturas e Materiais
RS	Rio Grande do Sul
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SQ	Soma quadrada
TRUP	Tensão de ruptura no ensaio de módulo de elasticidade estático
UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos
UR	Umidade relativa
ZT	Zona de Transição

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	27
1.1 JUSTIFICATIVA	30
1.2 OBJETIVOS	31
1.2.1 Objetivo Geral	31
1.2.2 Objetivos Específicos	32
1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA	32
1.4 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO	33
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	35
2.1 MÓDULO DE ELASTICIDADE	35
2.1.1 Módulo de elasticidade em concreto	36
2.1.2 Fatores intervenientes ao módulo de elasticidade do concreto	38
2.1.2.1 Parâmetros de ensaio	39
2.1.2.1.1 <i>Estado de umidade interna dos corpos de prova</i>	39
2.1.2.1.2 <i>Condições de carregamento</i>	40
2.1.2.1.3 <i>Dimensões do CP e tipos de medidores de deformação</i>	41
2.1.2.2 Matriz na pasta de cimento	42
2.1.2.3 Agregado	44
2.1.2.4 Zona de transição na interface	48
2.1.3 Formas de determinação do módulo de elasticidade do concreto	50
2.1.3.1 Formas experimentais de determinação do módulo de elasticidade	50
2.1.3.1.1 <i>Módulo de elasticidade estático</i>	50
2.1.3.1.2 <i>Módulo de elasticidade dinâmico</i>	54
2.1.3.2 Formas não experimentais de estimação do módulo de elasticidade	57
2.1.3.2.1 <i>Módulo de elasticidade estimado por modelos de previsão normalizados</i>	57
2.1.3.2.2 <i>Módulo de elasticidade estimado por modelos de previsão da literatura</i> ...	59
2.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE EM CONCRETOS COM AGR	61
2.2.1 Módulo de elasticidade em concretos com AGRCV	63
2.2.2 Módulo de elasticidade em concretos com AGRC	65
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	70
3.1 PLANEJAMENTO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL	70
3.1.1 Fatores de controle	71
3.1.2 Variáveis de resposta	71

3.1.3 Projeto de experimentos	72
3.1.4 Tratamento de dados e análises estatísticas	72
3.2 MATERIAIS	73
3.2.1 Cimento	73
3.2.2 Agregado miúdo	74
3.2.3 Agregado graúdo natural	75
3.2.4 Agregado graúdo reciclado de concreto	77
3.2.5 Agregado graúdo reciclado de resíduo cerâmica vermelha (AGRCV)	79
3.2.6 Água	79
3.2.7 Aditivo Superplastificante	79
3.3 DOSAGEM, PRODUÇÃO, MOLDAGEM, CURA E IDENTIFICAÇÃO	80
3.3.1 Dosagem	80
3.3.2 Produção	81
3.3.3 Moldagem	82
3.3.4 Procedimento de cura	82
3.3.5 Identificação dos corpos de prova	83
3.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO DOS AGREGADOS GRAÚDOS	83
3.5 PROPRIEDADES AVALIADAS DOS CONCRETOS	85
3.5.1 Ensaio no estado fresco	85
3.5.1.1 Abatimento de tronco de cone	85
3.5.1.2 Massa específica no estado fresco.....	85
3.5.2 Ensaio no estado endurecido	85
3.5.2.1 Porosidade	85
3.5.2.2 Resistência à compressão	86
3.5.2.3 Módulo de elasticidade dinâmico.....	86
3.5.2.4 Módulo de elasticidade estático	87
3.5.2.5 Massa específica.....	88
4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	90
4.1 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO.....	90
4.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO.....	92
4.2.1 Resistência à compressão	93
4.2.2 Módulo de elasticidade dinâmico.....	95
4.2.3 Módulo de elasticidade estático	98
4.2.4 Massa específica no estado endurecido	101

4.2.5 Porosidade do concreto	104
4.3 ANÁLISE POR REGRESSÃO LINEAR SIMPLES	105
4.3.1 Módulos de elasticidade em função da resistência à compressão	105
4.3.2 Módulos de elasticidade em função da porosidade do concreto	110
4.3.3 Módulos de elasticidade em função da massa específica do concreto ..	112
4.3.4 Relação entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico	116
4.3.5 Módulos de elasticidade estático e E_c estimado a partir de normas	119
4.3.6 Módulos de elasticidade estático e E_c estimado a partir da literatura	121
5 CONCLUSÃO	123
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	123
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	124
REFERÊNCIAS.....	127
APÊNDICE A - VALORES INDIVIDUAIS DOS CONCRETOS PRODUZIDOS	138
APÊNDICE B - VALORES DOS CONCRETOS PRODUZIDOS PARA DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE.....	142
APÊNDICE C - DESVIO PADRÃO E CV DOS CONCRETOS.....	144
APÊNDICE D - MÓDULOS DE ELASTICIDADE ESTÁTICOS ESTIMADOS	145
APÊNDICE E - DADOS ESPECÍFICOS DOS AGREGADOS GRAÚDOS	146
APÊNDICE F - DADOS ESPECÍFICOS DO AGREGADO MIÚDO.....	147
APÊNDICE G - ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO DOS AG'S	148

1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material de construção mais empregado no mundo, ultrapassando 25 bilhões de toneladas anuais (WBCSD), consumindo anualmente, em seu processo de fabricação, mais de 18 bilhões de toneladas de areia e rochas (britas). De modo geral, o concreto possui vantagens em relação a outros materiais de construção, tais como: a disponibilidade de fontes de extração das matérias-primas, a facilidade de acesso aos locais de extração e vantagens econômicas, a partir das quais é possível justificar o alavancar do seu uso no decorrer das últimas décadas.

Com o passar dos anos, em função do crescimento populacional, houve um aumento no consumo dos recursos naturais. De Brito e Alves (2010), Kanema et al. (2016) e Andal et al. (2016) citam que as consequências desse aumento no consumo de recursos naturais afetam regiões de vários países, sendo que algumas já apresentam dificuldades para extração das matérias-primas necessárias para a produção de concreto. Outros países encontram como entrave o esgotamento das fontes naturais, e, em outros, há uma forte preocupação ocasionada pelos problemas de logística, elevando o valor final do concreto.

O setor da construção civil é, atualmente, o maior gerador de resíduos, produzido, todos os anos, milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição (RCD's) (DE BRITO; ALVES, 2010; SEARA-PAZ et al., 2016; KISKU et al., 2017). Gomes et al. (2014) citam que os RCD's, representam entre 20 e 30% de todos os resíduos sólidos urbanos (RSU's) que são produzidos anualmente. Omary et al. (2016) e Kanema et al. (2016) citam que, se dispostos irregularmente, os RCD's causam danos consideráveis ao meio ambiente, sendo os principais citados por Cabral et al. (2010): enchentes, danos a paisagem, obstruções de vias públicas e aumento de doenças. Esses danos ambientais pressionam o setor da construção civil na busca por alternativas como reutilização e/ou reciclagem dos resíduos gerados, de modo a minimizar os impactos negativos de sua disposição irregular.

Uma das formas corretas de disposição dos RCD's é o uso destes como agregados na produção de concretos. O primeiro relato documentado do uso de resíduos de demolição como agregados, para a fabricação de concretos estruturais, ocorreu logo após o bombardeio aéreo de cidades na Segunda Guerra Mundial. Esse fato gerou um elevado volume de resíduos, utilizados posteriormente na

reedificação de países, como no caso da Alemanha e dos países da Grã-Bretanha (NIXON, 1976). Desde então, o uso de agregados reciclados (AR's) na produção de concretos tem sido cada vez mais elevado. Autores como Ho et al. (2013), Bravo et al. (2015), Leite e Monteiro (2016), Golafshani e Behnood (2018) afirmam que o uso de AR's em substituição a agregados naturais para a fabricação de concreto é uma alternativa que visa o desenvolvimento sustentável, além de impactos socioeconômicos positivos.

Sendo assim, o uso dos agregados reciclados em concretos geram impactos ambientais positivos, a exemplo: diminuição da demanda de recursos naturais não renováveis (HANSEN, 1986; RAHAL, 2007; CORINALDESI; 2010). Ajdukiewicz e Kliszczewicz (2002), adicionalmente, citam a redução dos custos com o transporte e com áreas que seriam usadas para o armazenamento destes, como outros impactos ambientais positivos. Adams et al. (2016), por sua vez, corroboram com todos esses impactos citados, indicando que o mercado de agregados reciclados para fabricação de concretos é uma alternativa factível aos tempos atuais, e a demanda por estes agregados tendem a aumentar, visto que os AR's produzidos podem ser utilizados nos próprios municípios geradores. Porém, para Laserna e Montero (2016) a utilização desses materiais na produção de concretos é insuficiente, pois as taxas de substituições dos AR's por agregados convencionais, se somadas mundialmente, são muito baixas.

Em relação ao Brasil, um dos entraves para o uso dos agregados reciclados é relacionado à escassez de orientações normativas para a sua utilização na produção de concretos estruturais (SILVA, 2011). A NBR 15116 (Normas Brasileiras de Regulação) (ABNT, 2004) (Associação Brasileira de Normas Técnicas) lida com requisitos dos agregados reciclados, para utilização em pavimentação e concreto sem função estrutural, enquanto a NBR 7211 (ABNT, 2009) lida com requisitos para a utilização de agregados convencionais para fabricação de concreto estrutural. Países participantes do RILEM (Reunião Internacional de Laboratórios de Estruturas e Materiais) utilizam a norma TC 121-DRG (RILEM, 1994), que fornece os requisitos necessários para a fabricação de concretos estruturais, utilizando agregados reciclados em conformidade com o EN 2 (EUROCODE, 1992).

Partindo do pressuposto que os agregados influenciam, diretamente, as propriedades finais do concreto, é preciso que se tenha o devido aprofundamento acerca dos conhecimentos das especificidades de cada um dos agregados que são

empregados na constituição do concreto, tendo em vista a necessidade de obtenção de concretos cada vez mais duráveis e de resistências cada vez mais elevadas (LEITE, 2001). Na medida em que há o interesse em adotar os AR's na produção de concretos com níveis superiores de desempenho, a preocupação se intensifica, pois não se tem domínio sobre as suas propriedades – haja vista a origem dos constituintes desse material – e, mesmo sob condições ideais para determinação desses parâmetros, é comum se deparar com uma excessiva variabilidade nos resultados. Dentre as inúmeras propriedades inerentes aos AR's, a sua elevada porosidade e capacidade de absorção de água merecem destaque, pois estas interferem, fortemente, nas propriedades do concreto no seu estado fresco, bem como no estado endurecido. Para tal, algumas pesquisas nas últimas décadas têm colaborado com o entendimento de como o uso de agregados reciclados influenciam no desempenho dos concretos produzidos (SILVA et al., 2015; KISKU et al., 2017).

Como supracitado, a influência dos agregados reciclados, diante das propriedades dos concretos com eles produzidos, é, inicialmente, percebida na consistência do concreto, uma vez que o uso de AR's tende a comprometer a trabalhabilidade da mistura (MEFTEH et al., 2013). As propriedades finais do concreto também são afetadas – há pesquisas que apontam a redução da resistência à compressão do concreto, a diminuição da massa específica, bem como o decréscimo no módulo de elasticidade (E_c) quando comparados com o concreto produzido inteiramente com agregados naturais. O aumento da porosidade e a elevação da absorção de água também são efeitos ocasionados a partir do emprego de AR's na confecção de concretos (GONÇALVES, 2001; TENÓRIO, 2007).

Leite (2001) afirma que as características dos AR's precisam ser levadas em consideração para a produção do concreto, pois a utilização destes na produção do concreto depende da compreensão do seu desempenho estrutural.

Choubey et al. (2016), Lye et al. (2016), e Corominas et al. (2016), corroboram com Leite (2001) ao afirmarem que o uso de agregados reciclados deve ser feito levando em consideração investigações experimentais nesses agregados, método de dosagem apropriado, além da correta escolha da taxa de substituição do agregado natural (AN) por agregado reciclado, em função das investigações, de modo que os concretos produzidos com agregados reciclados possuam propriedades no estado fresco e endurecido aceitáveis e características de durabilidade compatíveis com os requisitos estruturais. Alguns estudos utilizando os

agregados reciclados conduzem a valores aceitáveis das propriedades do concreto no estado fresco e no estado endurecido, como exemplo a resistência à compressão. Contudo, apenas a compatibilização de propriedades como consistência, massa específica e resistência à compressão do concreto, não são suficientes para validar o uso dos agregados reciclados em estruturas, isso porque as propriedades de deformação dos constituintes a serem empregados representam, de maneira mais realista, o comportamento estrutural, pois expressam as condições dos estados limites útil e de serviço, sendo o módulo de elasticidade o principal parâmetro de entrada para as análises estruturais (YILDIRIM; SENGUL, 2011; GUJEL, 2014).

Sideris et al. (2004); Lee e Park (2008) corroboram ao citar que o módulo de elasticidade do concreto é um parâmetro fundamental para o dimensionamento estrutural, auxiliando na determinação das distribuições das deformações e deslocamentos estruturais, sendo possível, segundo Belabdelouahab et al. (2016), estimar o comportamento elástico da estrutura sob a ação de cargas.

O módulo de elasticidade experimental pode ser obtido a partir de métodos estáticos e dinâmicos. Os distintos procedimentos de determinação do módulo de elasticidade conduzem a diferenças nos valores. Em dosagens que utilizam AR as diferenças entre os valores aumentam, tema pouco estudado e objeto de investigação nesse trabalho.

1.1 JUSTIFICATIVA

O comportamento elástico do concreto é proporcional as suas fases constituintes, sendo o agregado, em especial o gráudo, um dos principais fatores intervenientes no módulo de elasticidade.

Inúmeros fatores interferem na obtenção do módulo de elasticidade, a porosidade e a densidade do agregado merecem destaque, e no caso dos agregados reciclados tais propriedades são mais evidentes. Logo, é relevante entender o quanto o agregado gráudo reciclado (AGR) influencia o módulo de elasticidade do concreto.

Ao longo das últimas décadas, alguns autores observam que ao substituir agregados naturais por agregados reciclados os concretos, produzidos com AR, apresentam uma redução entre 5 e 35% no valor do módulo de elasticidade

(HANSEN, 1986; RAHAL, 2007; GOMES; DE BRITO, 2009; CABRAL ET AL, 2010; SILVA, 2011; BENETTI, 2012; CORDEIRO, 2013; GUJEL, 2014; CHOUBEY et al., 2016; COROMINAS et al.,2016; GHORBEL; WARDEH, 2017).

Com o uso de agregados reciclados, o módulo de elasticidade estático (E_e) e módulo de elasticidade dinâmico (E_d) não apresentam a mesma relação linear apresentada quando os concretos são produzidos inteiramente com agregados naturais. Philleo (1955) apud Lee et al (2017) explica que as diferenças entre os módulos de elasticidade estáticos e dinâmicos se baseiam no fato de que as características não homogêneas do concreto afetam os dois módulos de diferentes maneiras. Quando se tratam de concretos produzidos com agregados reciclados, essas diferenças entre os módulos são acentuadas, não apresentando uma relação direta entre o módulo de elasticidade estático e módulo de elasticidade dinâmico.

Ao propor a avaliação da relação entre os módulos de elasticidade estático e do módulo dinâmico do concreto produzido com agregados graúdos reciclados, este trabalho enquadra-se à linha de pesquisa que vem sendo desenvolvida, desde o ano de 2012, pelo Grupo de Pesquisa em Materiais de Construção e Reciclagem (GMAT) do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos). Para tanto, a pesquisa fundamenta-se pelos estudos de Benetti (2012) sobre o módulo de elasticidade dinâmico de concreto produzido com agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC) e por Gujel (2014) sobre o comportamento elástico de concretos produzidos com agregados graúdos naturais e reciclados.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa consiste em avaliar a relação entre o módulo de elasticidade estático e o módulo de elasticidade dinâmico de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados em substituição parcial aos agregados graúdos naturais.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a) avaliar, a relação entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico dos concretos com a massa específica dos concretos;
- b) avaliar, a relação entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico dos concretos com a porosidade dos concretos;
- c) avaliar, a relação entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico dos concretos com a resistência à compressão dos concretos;
- d) avaliar, a relação entre o módulo de elasticidade estático e o módulo de elasticidade estático estimado a partir de equações algébricas.

1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

Este trabalho é estruturado em cinco capítulos. O capítulo 1 compreende a introdução, a justificativa, os objetivos e a delimitação do trabalho.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, abordando os fundamentos, nomenclaturas, considerações destacadas por outros pesquisadores, bem como resultados inerentes à obtenção do módulo de elasticidade de concretos confeccionados com agregados reciclados.

O capítulo 3, com a proposição do programa experimental, descreve o planejamento da pesquisa, em termos de materiais e métodos, especificando as variáveis de controle e os níveis de estudo; os fatores fixos; as variáveis de resposta; os procedimentos e as especificações utilizados para caracterizar os materiais; o procedimento de produção dos corpos-de-prova (CP's) e as propriedades avaliadas.

O capítulo 4 contempla a apresentação, a análise e a discussão dos resultados.

Por fim, o capítulo 5 consiste na conclusão da pesquisa, tecendo considerações finais, além de sugestões para trabalhos futuros.

1.4 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

Tendo em vista o escopo da pesquisa, torna-se necessário delimitar alguns itens para cumprimento do programa experimental, sendo eles:

- a) três tipos de agregados graúdos reciclados de porosidades distintas: RCV, ARC20 e ARC40. A justificativa é avaliar a influência dessas porosidades no módulo de elasticidade do concreto;
- b) teor de substituição de agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado de: 30% em massa, percentual definido a partir de Cabral et al. (2010); Gomes et al (2014); Corominas et al (2016); Anderson et al (2016).;
- c) tipo de cimento utilizado: CPV-ARI escolhido por possuir um elevado índice de hidratação aos 28 dias, idade esta escolhida para a realização dos procedimentos experimentais dos concretos no estado endurecido;
- d) módulo de elasticidade dinâmico determinado a partir da propagação de ondas de ultrassom, utilizando o equipamento PUNDIT;
- e) tipo de medidor de deformação para o ensaio de módulo de elasticidade estático, sendo este o medidor do tipo clip gage.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são abordados os temas da pesquisa, sendo eles: módulo de elasticidade em concretos, tipos de módulos de elasticidade em concretos e módulo de elasticidade em concretos com agregado graúdo reciclado de concreto e agregado graúdo reciclado de resíduo de cerâmica vermelha (AGRCV).

2.1 MÓDULO DE ELASTICIDADE

O módulo de elasticidade é um parâmetro mecânico que mede a rigidez de certo material, ou seja, é a medida da tensão necessária para deformar o material (SILVA, 2011; MCNEIL; KANG, 2013; SINGH et al., 2016).

Estudos apontam que a engenharia utiliza - há anos - o módulo de elasticidade como principal parâmetro para melhorar o comportamento elástico dos materiais, contribuindo para um melhor desempenho mecânico. Outerbridge (1905); Hopkinson e Rogers (1905) citam o setor da metalurgia que, anterior ao ano de 1905, estudava o comportamento elástico dos materiais, principalmente de ferros e aços, investigando o comportamento destes em altas temperaturas, realizando testes experimentais com o intuito de melhorar as suas características. Carrington (1922) apud Taylor (1922) realizou uma pesquisa em aeronaves com intuito de melhorar as propriedades elásticas das asas, de modo a garantir melhores desempenhos. Esses estudos foram realizados no primórdio da aviação, quando estas eram de madeira.

Cabe destacar que os experimentos realizados por Hooke, físico inglês do século XVII (1635-1703) foram feitos em materiais homogêneos entre os anos de 1670 e 1680 (LANDAU; LIFSHITZ, 1959). A partir da lei de Hooke, foi possível sistematizar o diagrama tensão-deformação, sendo essa a relação entre tensões e deformações geradas nos materiais homogêneos, fornecendo, diretamente, o módulo de elasticidade (CALLISTER, 2000). A Equação 1 apresenta a Lei de Hooke:

$$\sigma = E.\varepsilon \quad (1)$$

Onde:

σ = tensão;

E = módulo de elasticidade;

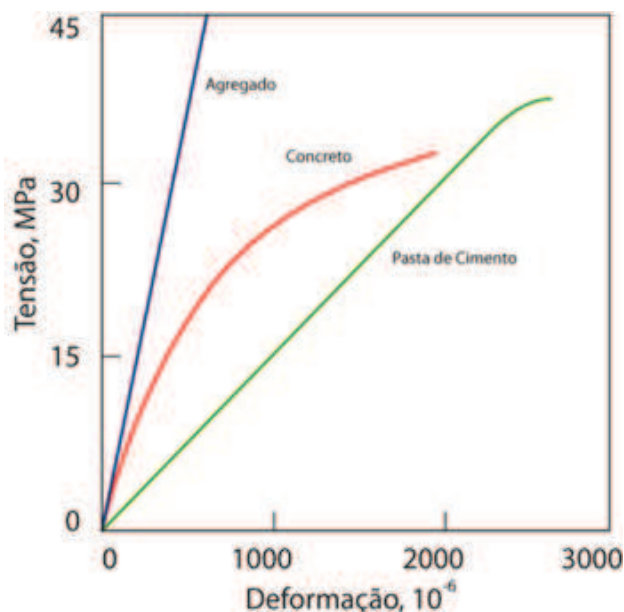
ε = deformação específica ($\varepsilon = \Delta L / L_i$).

2.1.1 Módulo de elasticidade em concreto

O concreto é um material compósito, trifásico, anisotrópico e frágil, cujo comportamento varia de acordo com a carga aplicada. Payan et al. (2010) citam que o concreto é um material heterogêneo que apresenta comportamento linear em pequeno intervalo se comparado a outros materiais. Sendo assim, o módulo de elasticidade do concreto é obtido dentro de um limite proporcional presumido (intervalo elástico-linear do concreto), por meio da aplicação de carregamento (tensão), observando as deformações causadas por esse carregamento controlado (MALEŠEV et al., 2014). Autores como Chavhan e Vyawahare (2015) citam que o concreto se comporta como um material elástico entre 10 e 15% da resistência do concreto, cujo os gráficos de tensão são lineares.

Mehta e Monteiro (2014) apresentam as tensões e as deformações genéricas do agregado, pasta de cimento e concreto formulado com os mesmos constituintes. A partir dessa generalização é possível observar que pasta de cimento e agregado apresentam comportamentos lineares quase que em toda a extensão das aplicações dos carregamentos, enquanto o concreto apresenta comportamento não linear logo após a aplicação das cargas iniciais e continua assim com os acréscimos de tensões. O Gráfico 1, de Mehta e Monteiro (2014), ilustra a relação tensão-deformação da pasta de cimento, agregado e concreto submetidos a carregamento.

Gráfico 1 - Diagrama tensão-deformação do agregado da pasta e do concreto

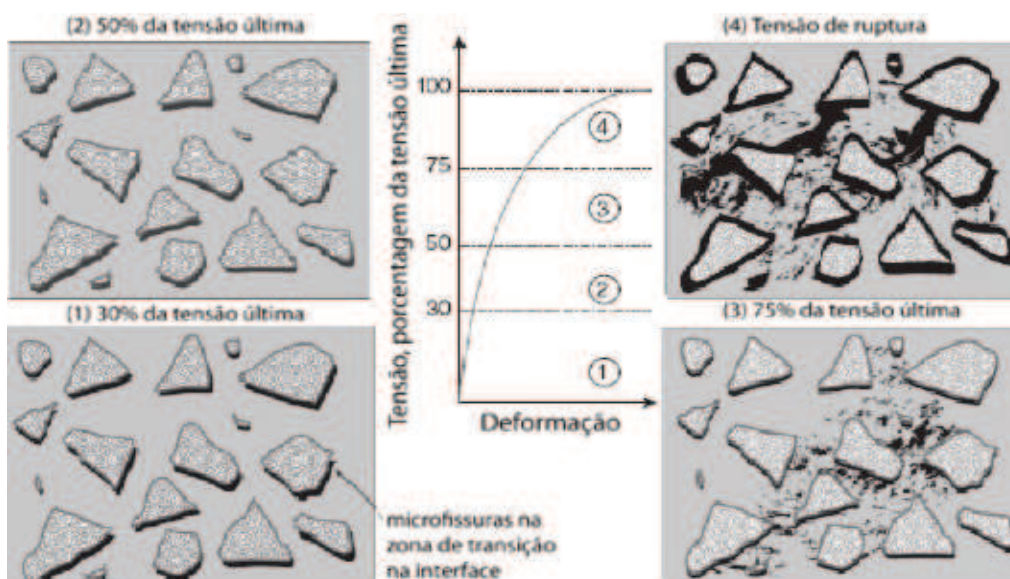


Fonte: Mehta e Monteiro (2014).

Rao et al. (1974) citam que, a partir desse entendimento, o módulo de elasticidade do concreto é considerado o comportamento médio das diferentes fases do material. Simeonov e Ahmad (1995) corroboram com esse raciocínio, sustentando a ideia de que o comportamento de deformação do concreto pode ser considerado bifásico se analisado apenas macroscopicamente. Todavia, modelos bifásicos não são capazes de prever os resultados obtidos experimentalmente. Sobretudo, com os avanços tecnológicos e teóricos foi possível identificar microscopicamente uma terceira fase do concreto, sendo esta a zona de transição (ZT). Autores como Hadley (1972); Monteiro e Mehta (1986) apresentam resultados consistentes nessa área, apontando a zona de transição como um dos principais fatores que afetam o módulo de elasticidade do concreto, uma vez que essa fase é considerada como a mais fraca do concreto. Neville e Brooks (2010) citam que a importância da zona de transição em relação ao módulo de elasticidade do concreto deve-se às microfissurações progressivas que ocorrem nela sob carregamento. Fonteboa et al. (2011) destacam que essas deformações são geradas por alguns fatores, tais como composição e taxas de carregamentos, entre outros.

A Figura 1, dos autores Mehta e Monteiro (2014), ilustra os quatro estágios comumente observados em concretos sob tensão, variando entre 30% da tensão última até a tensão de ruptura, além do comportamento típico do diagrama tensão-deformação do concreto sob compressão.

Figura 1 - Estágios típicos do concreto sob compressão uniaxial



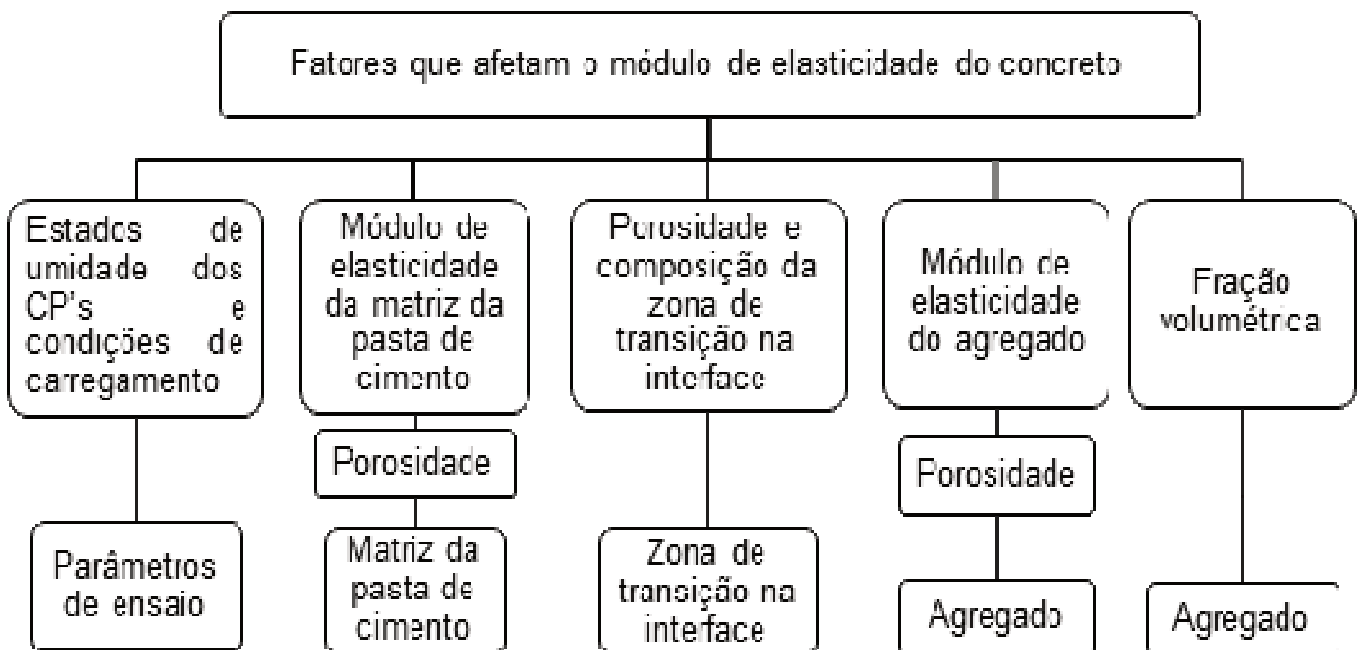
Fonte: Mehta e Monteiro (2014).

Segundo os autores, quando submetidos à aplicação de até 30% da tensão última, o concreto apresenta comportamento elástico-linear com pequenas e poucas microfissurações na ZT; quando submetidos à aplicação entre 30 e 50% da tensão última as fissuras aumentam em quantidade e em tamanho; quando submetidos à aplicação entre 50 e 75% da tensão última as fissuras crescem na matriz; a partir de 75% inicia-se o processo de crescimento espontâneo das fissuras sob tensão constante e o material se deforma até romper (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Outros fatores também afetam o desempenho do concreto em relação ao módulo de elasticidade. Devido à importância destes, optou-se por apresentá-los individualmente, sendo apresentados a seguir na seção 2.1.2.

2.1.2 Fatores intervenientes ao módulo de elasticidade do concreto

Há um conjunto de aspectos, segundo Mehta e Monteiro (2014), que influenciam no módulo de elasticidade do concreto, sendo os principais apresentados na Figura 2.

Figura 2 - Principais fatores que afetam o módulo de elasticidade do concreto



Fonte: Mehta e Monteiro (2014).

Os principais fatores que afetam o módulo de elasticidade do concreto, são: os parâmetros de ensaio; a matriz da pasta de cimento; os agregados; além da zona de transição na interface.

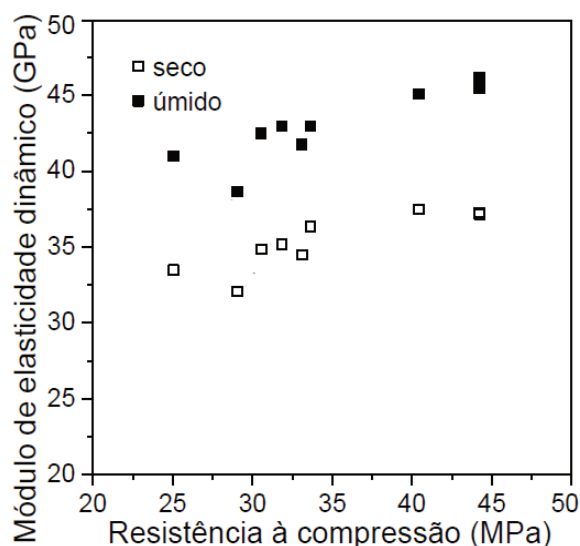
2.1.2.1 Parâmetros de ensaio

Devido à importância dos parâmetros de ensaio frente ao módulo de elasticidade do concreto, alguns itens serão expostos, individualmente, a saber: estado de umidade interna dos corpos de prova, condições de carregamento, dimensões dos corpos de prova e tipos de medidores de deformação.

2.1.2.1.1 Estado de umidade interna dos corpos de prova

Em relação ao estado de umidade dos corpos de prova, Mehta e Monteiro (2014) citam que, independentemente das proporções da mistura e da idade de cura, quando submetidos a ensaios de módulo de elasticidade em CP's parcialmente secos, os valores são até 15% inferiores aos resultados obtidos em CP's em condições saturadas. O Gráfico 2 apresenta resultados de módulo de elasticidade dinâmico em diferentes condições de umidades internas, obtidos por Benetti (2012).

Gráfico 2 - Módulo de elasticidade dinâmico em função da umidade interna dos CP's



Fonte: Adaptado de Benetti (2012).

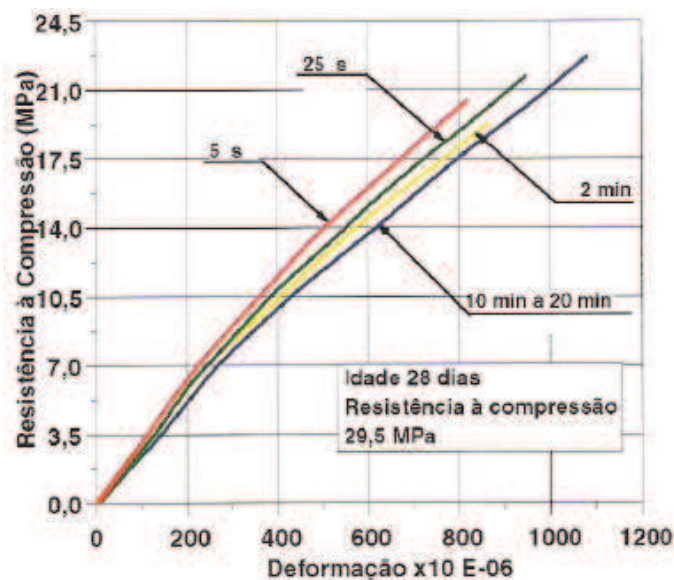
Os resultados são compatíveis com os resultados de Wang e Li (2007) em que os CP's úmidos alcançam E_d entre 10 e 25% maiores que os CP's secos. Qixian e Bungey (1996) creditam isso a velocidade de propagação de ondas ser maior em meios líquidos devido à presença de umidade que permite a passagem mais rápida em comparação ao concreto seco. Esse fato também foi verificado em E_e , em pesquisa de Liu et al. (2014), cujo autores creditam ao desenvolvimento de

microfissuras na zona de transição durante a secagem como fator determinante. Para Neville (2011) o preenchimento dos vazios, que seriam ocupados com ar (fluido flexível) ao serem ocupados por água, torna a matriz mais rígida e aumenta a rigidez do concreto, influenciando os valores obtidos de módulo de elasticidade.

2.1.2.1.2 Condições de carregamento

Para Neville (2011), a velocidade de aplicação da carga é um dos fatores relacionados às condições de carregamento, que influenciam o módulo de elasticidade do concreto. O Gráfico 3, elaborado por Andrade (1997), apresenta a deformação do concreto em diferentes velocidades de aplicação de carregamento.

Gráfico 3 -Tensão-deformação em função da velocidade de carregamento



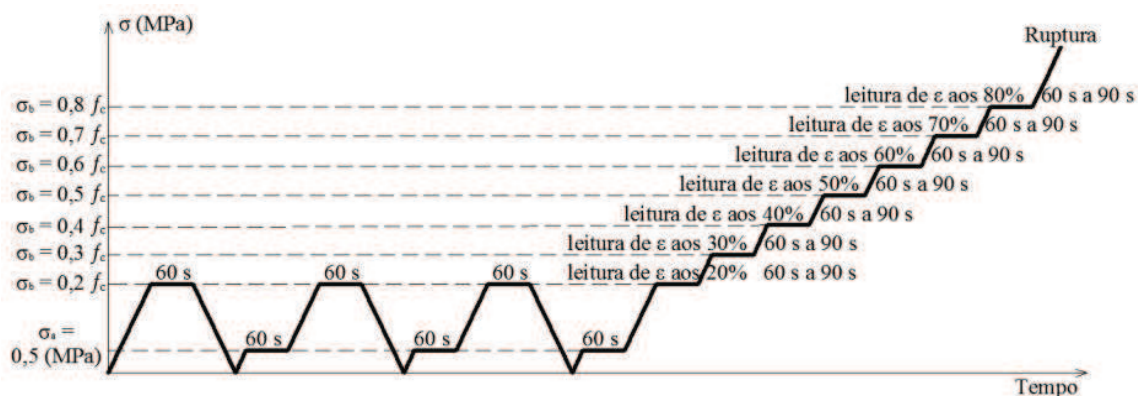
Fonte: Andrade (1997).

Andrade (1997) cita que as deformações são inversamente proporcionais à velocidade de aplicação da carga, ou seja, velocidades de aplicação mais lentas geram maiores capacidades de propagação das fissuras e menores valores de módulo de elasticidade.

A outra característica relacionada às condições de carregamento é o percentual de carga correspondente à carga última do concreto, além do tempo de duração das cargas entre os patamares utilizados. Em uma pesquisa realizada por Gujel (2014) foi proposto uma adaptação, no que a época era o modo normalizado pela NBR 8522 (ABNT, 2008). Na adaptação proposta a primeira modificação

consiste em alterar o primeiro patamar de tensão, em função da carga última, de 30% para 20%. Outra adaptação proposta é realizar medições em outros patamares em função da carga última para a determinação do comportamento (diagrama) tensão x deformação. O Gráfico 4 apresenta a adaptação proposta por Gujel (2014).

Gráfico 4 - Proposta de metodologia para determinação do Ee



Fonte: Gujel (2014).

2.1.2.1.3 Dimensões do CP e tipos de medidores de deformação

Araújo et al. (2012), em pesquisa, avaliam a influência de fatores como: dimensão dos CP's; classe de resistência à compressão do concreto; e tipo de medidor de deformação avaliado, sendo eles, o compressômetro mecânico, o extensômetro elétrico de colagem superficial e de fixação externa, além do transdutor diferencial de variação linear (sigla em inglês-LVDT). Os resultados obtidos por Araújo et al. (2012) são apresentados, a seguir, na Tabela 1.

Tabela 1 - Ee variando a dimensão do CP e o tipo de medidor de deformação

Dimensão (mm)	Classe de resistência	Tipo de medidor de deformação	Ee (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	CV (%)
100X200	C30	Compressômetro	24,1	3,9	16,1
150X300	C30	Compressômetro	26,9	1,0	3,8
100X200	C30	de Colagem Superficial	24,6	3,2	13,2
150X300	C30	de Colagem Superficial	26,6	0,7	2,6
100X200	C30	de Fixação Externa	22,0	0,9	4,0
150X300	C30	de Fixação Externa	23,5	1,0	4,1
100X200	C30	LVDT	14,9	2,0	13,5

150X300	C30	LVDT	20,6	0,29	1,4
100X200	C60	Compressômetro	31,6	5,6	17,7
150X300	C60	Compressômetro	27,9	2,1	7,6
100X200	C60	de Colagem Superficial	30,6	0,6	1,9
150X300	C60	de Colagem Superficial	29,8	1,2	4,0
100X200	C60	de Fixação Externa	29,8	0,7	2,5
150X300	C60	de Fixação Externa	30,1	0,5	1,5
100X200	C60	LVDT	20,3	1,6	7,9
150X300	C60	LVDT	23,2	2,9	12,6

Fonte: Araújo et al. (2012).

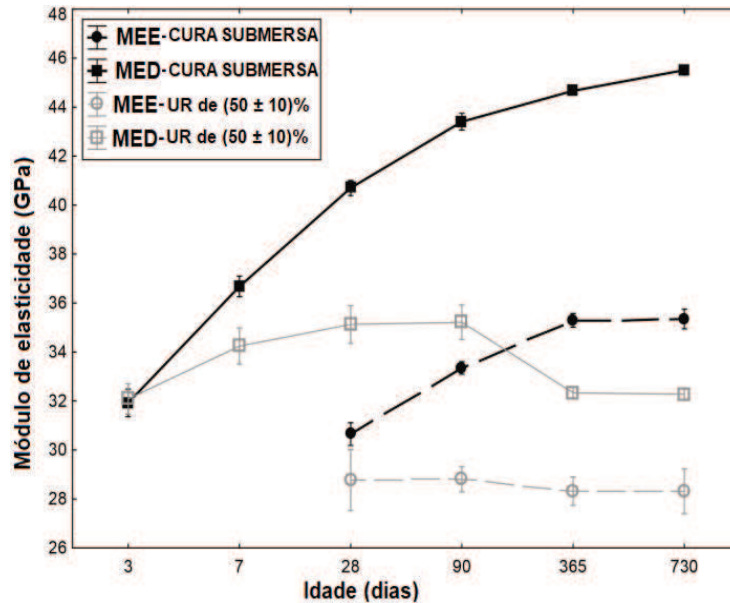
Os autores constataam que as dimensões dos CP's, classes de resistência e diferentes tipos de medidores de deformação, apresentam influência significativa nos valores de Ee. Mediante a esse estudo, foi constatado que o medidor LVDT é o menos indicado para ser usado em concreto com essas características, uma vez que os valores de Ee, obtidos em função das dimensões dos CP's, apresentam as mais elevadas diferenças em ambas as resistências à compressão avaliadas. Já os outros tipos de medidores apresentam valores mais próximos de módulo de elasticidade estático, destacando o extensômetro elétrico de fixação externa que de modo geral alcançou baixos coeficientes de variação (CV), não ultrapassando 5%.

Esses aspectos evidenciam a necessidade de um bom ajuste dos parâmetros de ensaio, para que estes não afetem os resultados de módulo de elasticidade.

2.1.2.2 Matriz na pasta de cimento

A matriz na pasta de cimento tem fundamental importância no módulo de elasticidade do concreto devido ao processo de hidratação do cimento, uma vez que o módulo de elasticidade também é influenciado pela idade do concreto que, nada mais é, resultado do endurecimento da pasta de cimento ao longo do tempo (SILVA et al., 2016). O processo de hidratação, por sua vez, está relacionado com a condição de cura e temperatura do ambiente nesse período (COSMES-LÓPEZ et al., 2017). O Gráfico 5 apresenta os resultados obtidos por Kocab et al. (2017) de concreto em cura à umidade relativa (UR) em $50 \pm 10\%$ e em cura submersa.

Gráfico 5 - Módulo de elasticidade dinâmico e estático em função do tipo de cura

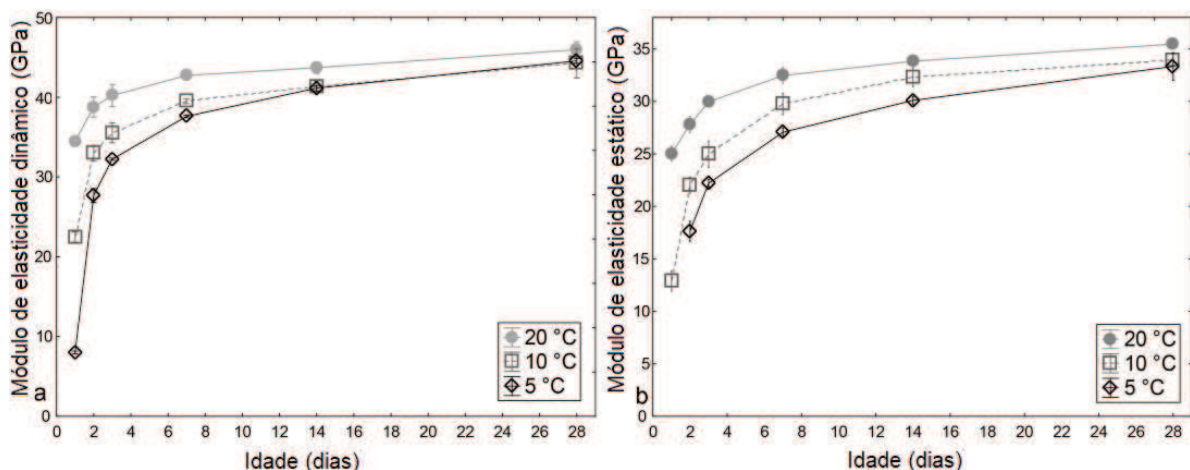


Fonte: Kocab et al. (2017).

É possível observar que o concreto em cura submersa obteve o maior valor de módulo de elasticidade. Ao longo do tempo, houve um aumento nas diferenças entre os valores de módulo entre os dois tipos de cura.

No que se refere à temperatura do ambiente no período de cura, estudos indicam que a temperaturas menores que 20 °C a hidratação do cimento é mais lenta, o que resulta em módulos de elasticidade inferiores. O Gráfico 6 apresenta resultados obtidos por Kocab et al. (2017) de concretos em cura em ambientes às temperaturas de 5, 10 e 20 °C, respectivamente.

Gráfico 6 - Ed (a) e Ee (b) em função da temperatura em cura



Fonte: Kocab et al. (2017).

É possível observar que, para todas as idades, os concretos em cura à 20 °C obtiveram os maiores valores de módulo de elasticidade. Outro fator que se pode observar é que nas primeiras idades as diferenças são maiores que nas avançadas.

Outro fator que contribui para uma melhor matriz na pasta de cimento é a relação a/c da dosagem, uma vez que menores relações acarretam em melhor desempenho mecânico. Topçu e Uğurlu (2007) citam que a porosidade da pasta de cimento desempenha um papel importante no módulo de elasticidade do concreto.

Devido ao módulo de elasticidade ter relação direta com a relação a/c (porosidade da mistura), ou seja, em concretos produzidos com mesmos constituintes, em diferentes relações a/c, resultam em concretos com diferentes E_c . Para Mehta e Monteiro (2014), além desses fatores mencionados, outros como: teor de ar, adições minerais e grau de hidratação do cimento, são fatores que controlam a porosidade da matriz da pasta de cimento.

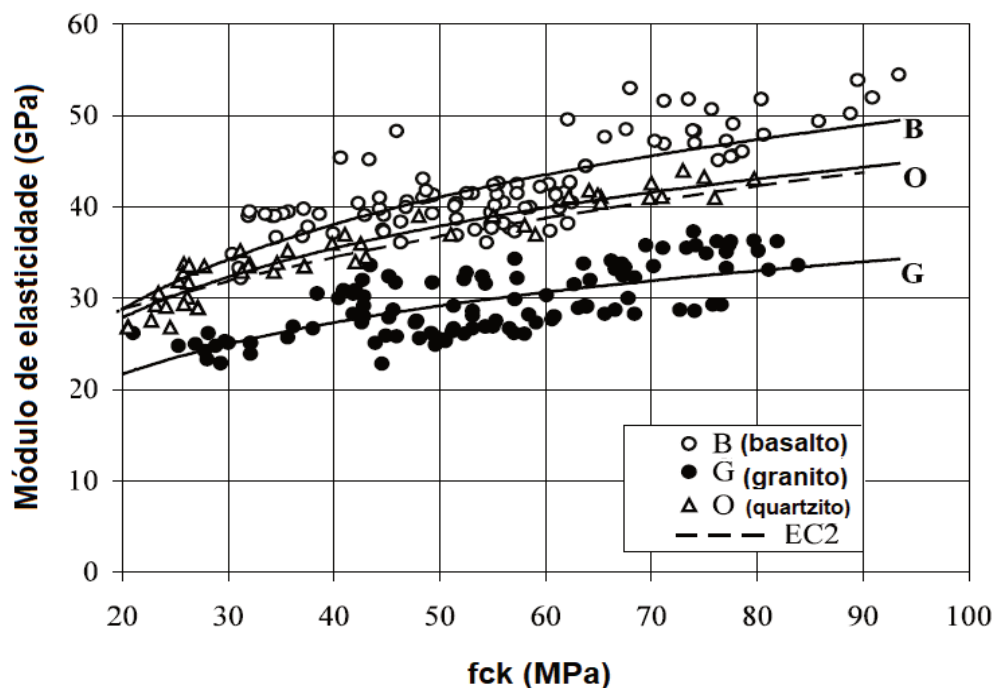
Esses estudos evidenciam que é fundamental conhecer a qualidade da pasta de cimento (a partir da determinação do módulo de elasticidade), uma vez que ela tem seu próprio módulo de elasticidade e, por sua vez, apresenta relação com o módulo de elasticidade do próprio concreto, já que o comportamento elástico (deformação) do concreto é resultante, também, das deformações impostas às fases que o constituem.

2.1.2.3 Agregado

Para Tenório (2007) e Neville (2011) a porosidade do agregado é um dos principais fatores que afetam o módulo de elasticidade do concreto, isso porque, de modo geral, a porosidade do agregado é inversamente proporcional à massa específica, enquanto que a massa específica é diretamente proporcional ao módulo de elasticidade. Malešev et al. (2014) corroboram informando que o tipo de agregado utilizado é determinante para o módulo de elasticidade. Já para Tiwari et al. (2016) o agregado torna-se fundamental em relação ao módulo de elasticidade, também por seu volume total no concreto, que é de aproximadamente 70%. Uma proposta de Neville e Brooks (2010), para se obter elevados valores de módulo de elasticidade de concretos em função do agregado utilizado, trata-se em aumentar a quantidade de agregado de elevado valor de módulo de elasticidade, fato esse que pode ser observado no Gráfico 7, no qual Kliszczewicz e Ajdukiewicz (2002)

estudaram o módulo de elasticidade de concretos com agregados graúdos provenientes de rochas distintas, gerando, assim, módulos de elasticidade distintos em função do módulo de elasticidade dos AG utilizados.

Gráfico 7 - Influência do tipo de agregado graúdo no módulo de elasticidade



Fonte: Kliszczewicz e Ajdukiewicz (2002).

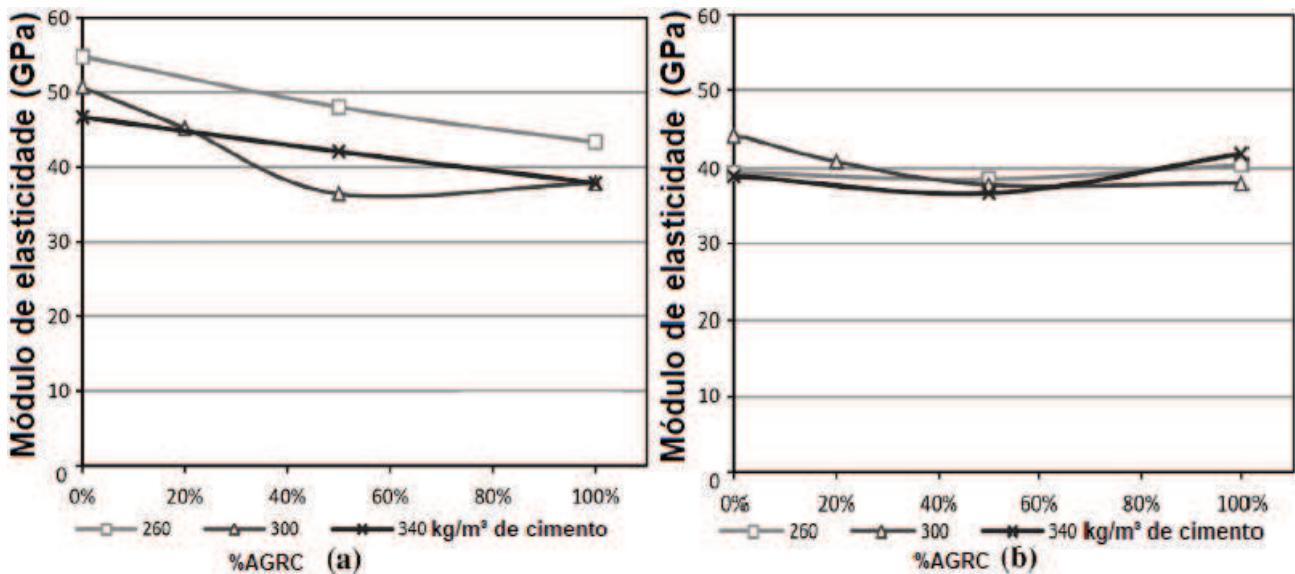
A partir do Gráfico 7 é possível observar que mesmas resistências à compressão implicam módulos de elasticidade distintos. De modo geral, a variação dos valores obtidos de módulo de elasticidade foi de 28 a 36%, o que indica que o uso de agregado graúdo, proveniente de rochas distintas, resultam em concretos de módulos de elasticidade distintos. Provavelmente, isso tem relação com o módulo de elasticidade desses agregados.

Jurowski e Grzeszczyk (2015) concordam com Kliszczewicz e Ajdukiewicz (2002) ao verificarem a influência de agregados graúdos de duas fontes. Os concretos produzidos alcançaram resistência à compressão aos 28 dias de 57 MPa, em que, apesar de concretos de mesmas resistências à compressão, os módulos de elasticidade dos concretos apresentam valores distintos, sendo o E_d de 46,7 e 42,1 GPa e E_e de 43,7 e 37,3 GPa, respectivamente.

Cordeiro (2013) cita que outros fatores referentes aos agregados também afetam o módulo de elasticidade do concreto, sendo eles: dimensão máxima

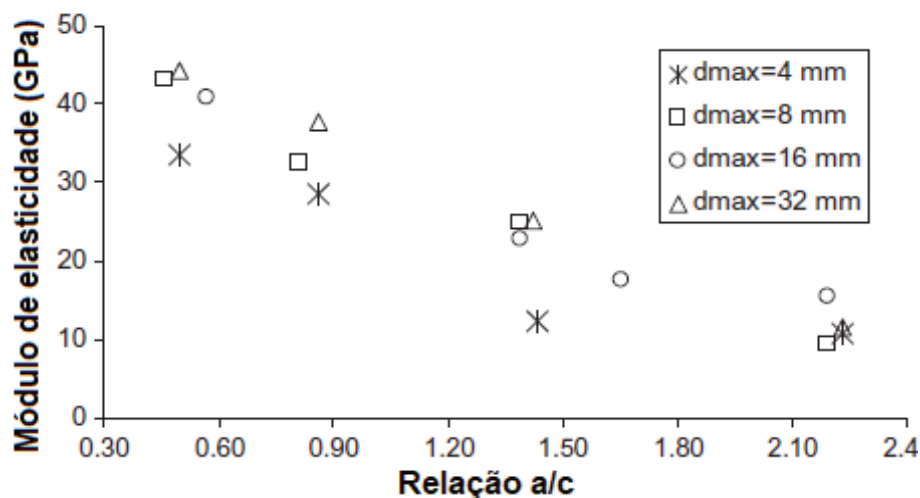
característica; forma dos grãos e textura superficial. O Gráfico 8 apresenta uma pesquisa de Laserna e Montero (2016), na qual foi avaliada a influência da forma do agregado graúdo (AG) no módulo de elasticidade do concreto, sendo (a) em concretos produzidos com agregados graúdos britados e (b) em concretos produzidos com agregados graúdos arredondados.

Gráfico 8 - E_c de concretos com AG britados (a) e AG arredondados (b)



Fonte: Laserna e Montero (2016).

A partir do Gráfico 8 é possível constatar que o processo de arredondamento em detrimento ao processo de britagem dos grãos de agregados graúdos produzem concretos com módulo de elasticidade inferiores. Segundo Lenz (2016); Li et al. (2017); e Pradhan et al. (2017), o módulo de elasticidade apresenta tendência para o aumento da densidade de empacotamento da mistura de concreto, isso porque um aumento na densidade de empacotamento pode melhorar a microestrutura e, portanto, o desempenho mecânico do concreto. Outro fator interveniente ao módulo de elasticidade do concreto é a dimensão máxima característica do agregado. O Gráfico 9 apresenta os resultados de Yildirim e Sengul (2011), que avaliaram a influência da dimensão máxima característica do agregado em função do módulo de elasticidade do concreto.

Gráfico 9 - Efeito do tamanho máximo do agregado no E_c do concreto

Fonte: Yildirim e Sengul (2011).

A partir do Gráfico 7, Gráfico 8 e Gráfico 9 é possível constatar que concretos de mesma relação a/c , mesma resistência à compressão (ou bem próximas), não necessariamente resultam em módulo de elasticidade iguais, isso porque basta produzir concretos com agregados graúdos de módulos de elasticidade distintos que estes resultarão em concretos de módulos de elasticidade distintos (PACHECO, 2006). Sbrighi Neto (2005) cita valores gerais do módulo de elasticidade de alguns tipos de rochas usuais como fonte de agregados utilizados para a fabricação de concreto, corroborando com os fatores já citados nesta seção. Os valores obtidos por Sbrighi Neto (2005) são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - E_e em função de rochas usuais como fonte de agregados graúdos

Tipo de Rocha	Massa Específica (kg/m ³)	E_e (GPa)
Basalto	2750 - 2950	60 - 100
Quartzito	2550 - 2700	50 - 100
Gnaisse	2550 - 2700	40 - 70
Granito	2600 - 2700	40 - 70
Calcário	2600 - 2800	30 - 50
Xisto	2300 - 2500	25 - 40
Arenito	2200 - 2400	20 - 40

Fonte: Adaptado de Sbrighi Neto (2011).

Como já citado, os agregados obtidos a partir de rochas distintas possuem módulos de elasticidade distintos, resultando em concretos de módulos também distintos. A partir da Tabela 2 é possível constatar que agregados com maior massa específica resultam, de modo geral, nos maiores valores de módulo de elasticidade e, conseqüentemente, irão gerar concretos com maior módulo de elasticidade. Topçu e Uğurlu (2007) citam que o módulo de elasticidade do concreto só é diretamente proporcional ao módulo de elasticidade dos agregados, desde que o módulo de elasticidade da pasta de cimento seja inferior ao módulo de elasticidade dos agregados, conforme já apresentado no Gráfico 1. A interação entre os agregados e a pasta de cimento conduzem a formação da zona de transição, sendo a influência da zona de transição no módulo de elasticidade do concreto discutida a seguir.

2.1.2.4 Zona de transição na interface

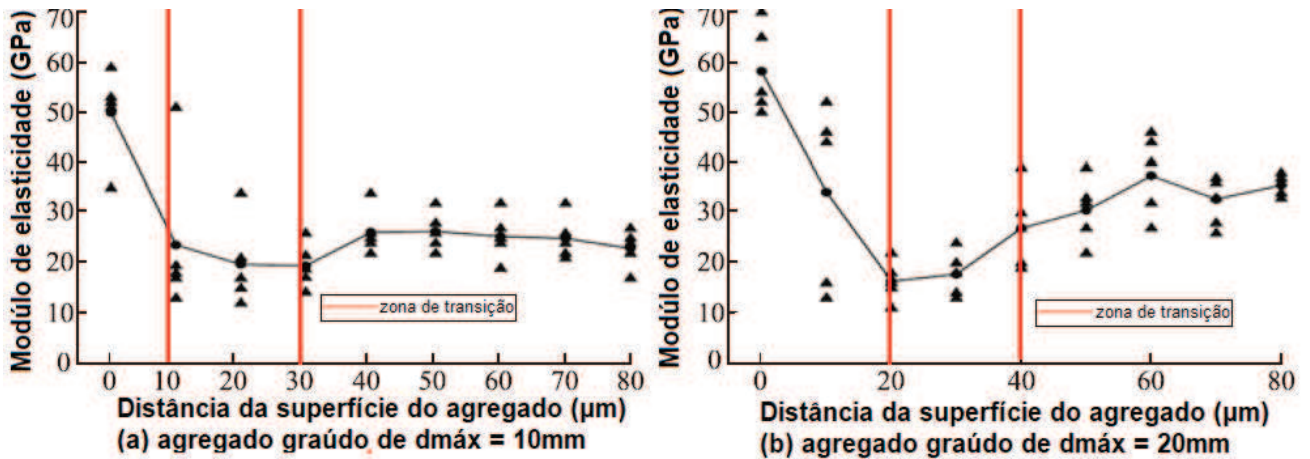
Na zona de transição são dissipadas as cargas das outras fases, afetando todo o material. Esse comportamento deve-se ao fato de que ela é uma região entre as outras duas fases e seu grau de rigidez afeta todo o sistema. As microfissuras iniciais e as altas concentrações de tensão ao redor da zona de transição são geradas pelas diferenças de módulo de elasticidade dos constituintes do concreto, o que, por sua vez, tem relação direta com a baixa resistência da zona de transição, sendo esta um local de propagação de fissuras (FONTEBOA et al., 2011).

Para Mehta e Monteiro (2014) a zona de transição exerce papel fundamental na determinação das propriedades elásticas do concreto, isso porque vazios capilares, microfissuras, além de cristais de hidróxido de cálcio, são mais comuns nela do que na matriz. Os autores citam que a melhoria da densidade da ZT, resultante da interação química lenta entre a pasta de cimento e o agregado, pode ser mais benéfica ao E_c do concreto do que a resistência à compressão. Para Silva et al. (2016), especificamente a natureza da zona de transição, sua ligação química e arranjo molecular são alguns dos fatores que afetam o E_c da zona de transição.

Em estudo experimental de JIA et al. (2017), foi avaliado o módulo de elasticidade da zona de transição, variando fatores com o intuito de verificar a influência dessas variações no módulo de elasticidade da zona de transição. O Gráfico 10 apresenta a pesquisa de Jia et al. (2017), na qual foi avaliada a influência

da zona de transição no módulo de elasticidade do concreto obtido a partir de nanoindentação. Foi fixado parâmetros para se viabilizar a comparação, sendo estes: relação a/c 0,35, tempo de cura 28 dias, e dimensão do AG em 10 e 20 mm.

Gráfico 10 - Influência da dimensão máxima do agregado graúdo no E_c da ZT



Fonte: Adaptado de Jia et al. (2017).

Ao final do estudo os autores obtiveram as seguintes conclusões:

- a) a dimensão máxima característica do agregado apresenta influência significativa na microestrutura da zona de transição;
- b) o módulo de elasticidade da zona de transição em relação a/c 0,35 na idade de 7 dias de idade é de cerca de 18 GPa, sendo menor que o valor de 27-30 GPa do módulo de elasticidade na matriz;
- c) a espessura da zona de transição aumentou com o aumento da relação a/c, em contrapartida diminuiu em função de maiores idades em cura.

Dito isso, os autores citam a importância de atentar-se ao efeito da zona de transição nas propriedades relacionadas ao módulo de elasticidade do concreto, especialmente em idades de cura menores que 28 dias. A importância do módulo de elasticidade da zona de transição é evidente, uma vez que é possível estimar o módulo de elasticidade do concreto a partir deste, obtendo valores bastantes similares, variando 3,4% entre o módulo de elasticidade do concreto obtido a partir de equações que o relacionam o módulo de elasticidade da zona de transição ao módulo de elasticidade estático do concreto obtido experimentalmente.

Taqa et al. (2015) e Bosque et al. (2017) citam que o módulo de elasticidade da zona de transição varia com a distância da superfície do agregado, além da

própria distribuição heterogênea das fases constituintes. A elevada porosidade da zona de transição e fatores como partículas não-hidratadas de cimento e areia na matriz são fatores que contribuem para uma maior heterogeneidade da zona de transição e, conseqüente, menor módulo de elasticidade. Os autores observaram que o módulo de elasticidade apresenta valor elevado próximo à superfície do agregado, reduzindo quando se aproxima da pasta. Por fim, aumenta quando chega na pasta, tendendo a hipótese de que o módulo de elasticidade na zona de transição de modo geral é menor que o módulo de elasticidade da pasta de cimento.

2.1.3 Formas de determinação do módulo de elasticidade do concreto

Para o dimensionamento de estruturas de concreto, o módulo de elasticidade pode ser obtido a partir de métodos experimentais e métodos não experimentais. A seguir serão apresentadas as maneiras mais usuais de cada uma respectivamente.

2.1.3.1 Formas experimentais de determinação do módulo de elasticidade

Existem duas formas experimentais para a determinação do módulo de elasticidade do concreto, sendo elas: o método estático e a outra o método dinâmico. Os próximos itens 2.1.3.1.1 e 2.1.3.1.2 tratam-se da especificação de cada uma dessas técnicas respectivamente.

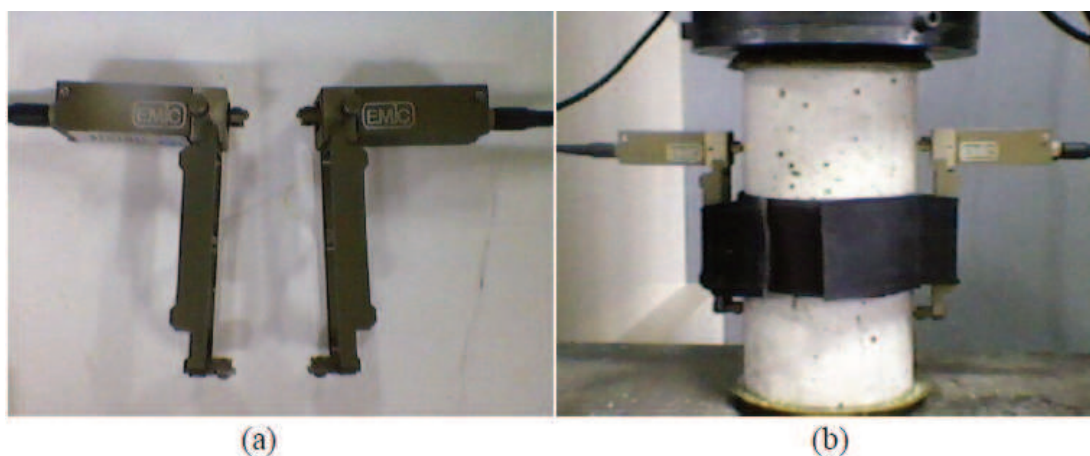
2.1.3.1.1 Módulo de elasticidade estático

Segundo a NBR 8522 (ABNT, 2017), o módulo de elasticidade estático é uma propriedade cujo valor é o coeficiente angular da reta secante (entre dois pontos da curva) ou tangente (a qualquer ponto da curva) em função das deformações geradas devido às tensões induzidas. Para o dicionário de terminologia do concreto ACI (American Concrete Institute) CT-18, módulo de elasticidade estático é aquele que usa critérios arbitrários para medição das relações entre as tensões impostas e deformações resultantes dessas tensões, derivadas de cargas não dinâmicas. O princípio do módulo de elasticidade estático, também é conhecido por módulo de elasticidade instantâneo, uma vez que este baseia-se na instantaneidade da aplicação de carregamento a um corpo de prova de concreto (LU et al., 2013).

Como o concreto sob carregamento uniaxial não é linear, a obtenção do módulo de elasticidade a partir de métodos estáticos é dada pela declividade da curva em função do diagrama tensão-deformação do concreto (DE ALMEIDA, 2012). Sendo assim, a determinação do módulo de elasticidade estático ocorre submetendo um CP a um ensaio de compressão uniaxial fazendo a medição das deformações geradas por esse carregamento fazendo uso de algum aparato medidor de deformações. Em outras palavras, mede-se a deformação do CP, enquanto esse é submetido a acréscimos de cargas progressivas, até a ruptura do concreto, ou seja, esse método de determinação do E_c é destrutivo (CHAVHAN; VYAWAHARE, 2015).

Conforme exposto no item 2.1.2.1.3 (Tabela 1), o extensômetro elétrico de ancoragem tipo clip gage apresenta pouca variabilidade nos resultados obtidos, resultando em erros percentuais inferiores a alguns outros medidores de deformação. A Figura 3 apresenta captura obtida por Arruda (2013) dos clip gages (a) e o posicionamento usual deles em corpos de prova cilíndricos para a execução do ensaio de módulo de elasticidade estático.

Figura 3 - Clip gages (a) posicionados no CP (b) para a determinação do E_e

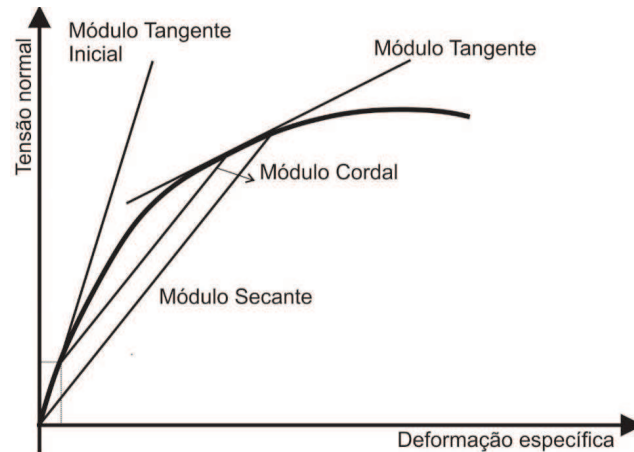


Fonte: Arruda (2013).

Cada norma lida com velocidades de aplicação da carga e patamares de tensão distintos, uma vez que não existe uma única forma de determinar o módulo de elasticidade estático. De forma geral aplica-se carga em velocidade constante, até aproximadamente 0,3 vezes (0,3 fcm) a tensão média de ruptura do concreto, mantendo a aplicação do carregamento por tempo pré-determinado que geralmente é de 60 segundos; passado o tempo, é reduzida a tensão na mesma velocidade do processo de carregamento até um nível de tensão de 0,5 MPa. Realiza-se esse processo dependendo da norma entre 2 e 5 vezes. Ao fim do último ciclo é feito o

carregamento até o rompimento do CP. O Gráfico 11 apresenta três formas distintas de calcular o módulo de elasticidade estático de acordo com Neville e Brooks (2010).

Gráfico 11 - Tipos de representação do módulo de elasticidade

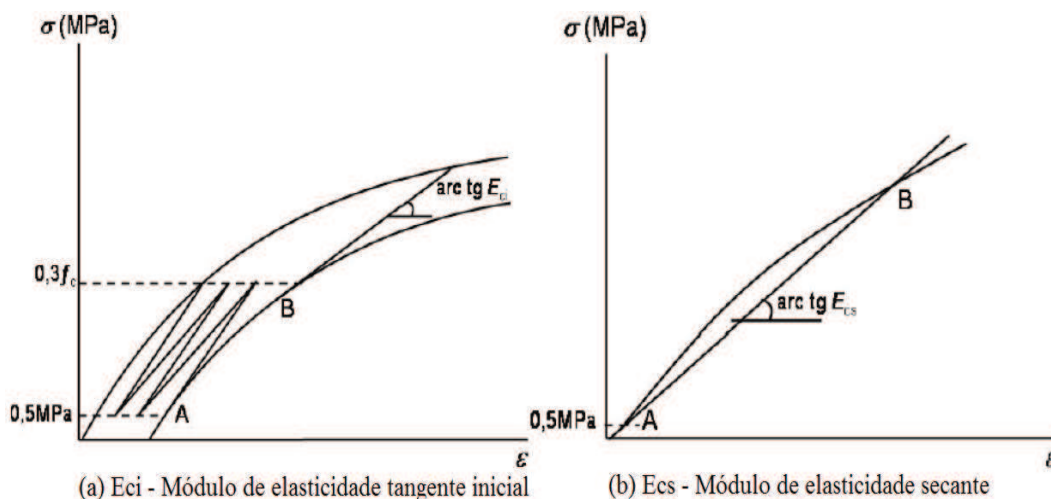


Fonte: Neville e Brooks (2010).

Para Petrucci (1998), o módulo tangente é mais indicado quando ocorre modificação no carregamento de uma estrutura; o módulo secante quando se trata da determinação de uma flecha (deformação final); o módulo tangente inicial pode ser empregado na avaliação da carga crítica de flambagem e o módulo cordal, comparado ao módulo secante, inicia-se em um ponto com afastamento de $50 \mu\text{m}$ e $0,5 \text{ MPa}$ de tensão, a fim de se corrigir uma concavidade do início da curva.

A NBR 8522 (ABNT, 2017) estabelece as duas formas para determinação do módulo de elasticidade estático do concreto, de, ilustradas no Gráfico 12.

Gráfico 12 - Métodos para determinação dos módulos de elasticidade estático



Fonte: NBR 8522 (ABNT, 2017).

O módulo tangente inicial é obtido a partir da inclinação de uma linha traçada na curva tensão-deformação, sendo traçada a linha de um ponto até ponto a 30% da carga última; e o módulo secante é obtido a partir de uma linha traçada saindo da origem até ponto correspondente à tensão de 50% da carga de ruptura, além disso, o último ponto da curva tensão-deformação é determinado usando um ponto cuja tensão seja 70% da carga de ruptura (DE ALMEIDA, 2012; DILBAS et al., 2016).

Chavhan e Vyawahare (2015) citam que a relação tensão-deformação do concreto exhibe complexidade devido ao comportamento da estrutura de gel e à maneira como a água é mantida dentro do concreto endurecido. Os autores, nesse sentido, criticam as atuais formas de obtenção do E_e , pois, segundo eles, essa forma de obtenção não representa verdadeiramente o comportamento elástico do concreto, isso porque o valor do módulo de elasticidade é descoberto pelo carregamento real do concreto, levando em consideração carregamentos reais e efeitos devido ao fenômeno de fluência. Devido o fenômeno de fluência, o E_e será afetado, gerando maior deformação conforme o efeito de fluência é mais acentuado.

Para Lu et al. (2013), diferente do que informa Chavhan e Vyawahare (2015), sob carregamento estático normalizado as condições de carregamentos impostas geram microfissurações dentro dos agregados e na zona de transição do concreto, de modo que essas microfissurações, ao se desenvolverem, aumentam a deformação, assim os valores de módulo de elasticidade estático, segundo eles, são proporcionais a qualidade dos agregados, nas quais os agregados de baixas resistências podem resultar em deformações maiores, resultando em módulo de elasticidade menor. Os autores acreditam que os métodos usuais para determinação do E_e devido a esses aspectos mencionados são confiáveis, uma vez que as diferenças nos valores dos módulos de elasticidade estático são decorrentes dos fatores citados na Figura 2. Ainda segundo Lu et al (2013), por mais que o E_e seja um parâmetro confiável, é importante determinar, também, o módulo de elasticidade sob carregamento dinâmico, isso porque devido as elevadas taxas de deformação aplicadas no carregamento dinâmico não existirá tempo suficiente para que as microfissuras se desenvolvam por completo, diminuindo, assim, a influência dos agregados sobre o valor de módulo de elasticidade em comparação ao método estático. Lu et al. (2013) corrobora com os autores ao informar que é necessário testar o módulo de elasticidade dinâmico do concreto, principalmente quando o valor de módulo de elasticidade estático é baixo devido à utilização de agregado de baixa

resistência (LU ET AL, 2013). A seguir serão apresentadas as técnicas atualmente empregadas para obtenção do módulo de elasticidade dinâmico do concreto.

2.1.3.1.2 Módulo de elasticidade dinâmico

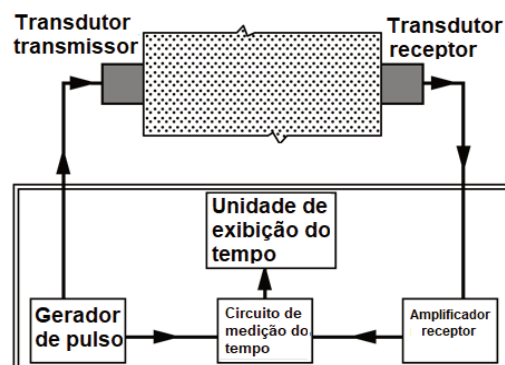
Módulo de elasticidade dinâmico segundo ACI CT-18 é aquele obtido a partir de relações entre geometria, tamanho, peso e frequência fundamental de vibração e/ou velocidade de pulso ultrassônico de uma amostra de concreto.

Geralmente o módulo de elasticidade dinâmico é utilizado para avaliar o concreto em testes de durabilidade das estruturas, principalmente quando o uso do concreto será em estruturas submetidas a carregamentos dinâmicos.

Existem duas técnicas empregadas para obtenção do módulo de elasticidade dinâmico, sendo uma a partir da velocidade de propagação de ondas de ultrassom e a outra a partir da frequência natural de vibração (QIXIAN; BUNGEY, 1996; HASSAN; JONES, 2012). Em ambas as formas o ensaio é não-destrutivo.

O princípio de funcionamento da técnica de velocidade de propagação de ondas de ultrassom é a criação de um pulso que é mantido em contato com a superfície do concreto no momento do teste. Esses pulsos mecânicos podem ser aplicados a partir de três tipos diferentes de ondas, sendo elas: ondas longitudinais que viajam cerca de duas vezes mais rápidas que as demais; ondas de cisalhamento ou transversais que são mais lentas que as ondas de longitudinais; e ondas de superfície que são as mais lentas entre elas (CHAVHAN; VYAWAHARE, 2015). Na Figura 4 é apresentado o diagrama esquemático da propagação de ondas ultrassônicas longitudinais em corpo de prova de concreto a partir da norma ASTM (American Society for Testing and Materials) C597 (ASTM, 2016).

Figura 4 - Diagrama esquemático da propagação das ondas ultrassônicas



Fonte: C597 (ASTM, 2016).

Após passar através do concreto em percurso conhecido, o pulso é convertido em sinal elétrico, e o tempo de duração desse percurso é registrado no circuito medidor, possibilitando a aplicação desses dois dados em uma equação, para obter a velocidade de propagação das ondas de ultrassom apresentada na Equação 2 (JONES; FAÇAOARU, 1969; MALHOTRA; CARINO, 2004).

$$v = \frac{L}{T} \quad (2)$$

Onde:

v = velocidade de propagação das ondas de ultrassom;

L = comprimento do percurso;

T = tempo de duração do percurso (propagação).

Neville (2011) cita que a velocidade de propagação das ondas de ultrassom tem relação direta com o módulo de elasticidade dos agregados, além do teor de agregado da mistura, ou seja, o agregado influencia diretamente na velocidade.

O módulo de elasticidade dinâmico do concreto é determinado a partir da Equação 3 do CEB-FIP (Comité Euro-International du Béton - Fédération Internationale de la Précontrainte) Model Code 1990:

$$E = \frac{(1 + \delta) \cdot (1 - 2\delta)}{(1 - \delta)} \cdot \rho v^2 \quad (3)$$

Onde:

E = módulo de elasticidade dinâmico;

δ = coeficiente de Poisson;

v = velocidade ultrassônica;

ρ = massa específica do concreto.

Em relação à essa técnica, uma vantagem é a possibilidade de obter o valor do módulo de elasticidade para estruturas já existentes (YILDIRIM; SENGUL, 2011).

A técnica de frequência ressonante, de acordo com De Almeida (2012), é baseada no princípio de que a distância percorrida pela onda sonora é inversamente proporcional a frequência de ressonância. Para ocorrer a ressonância, é necessário que a frequência de excitação externa seja a mesma da frequência de vibração natural do corpo. O módulo de elasticidade dinâmico obtido a partir da frequência de ressonância vem sendo utilizado nos últimos 55 anos e é determinado a partir da medição da frequência natural de vibração das barras e das relações algébricas existentes entre as barras e o concreto ensaiado (MALHOTRA; CARINO, 2004).

Para determinar o módulo de elasticidade dinâmico do concreto a partir do método de frequência ressonante, é necessário a aplicação de uma carga (bem pequena, por isso não é suficiente para tornar destrutivo o método) a amostra através de um excitador eletromagnético, sendo o movimento físico gerado por essa força convertido em um sinal elétrico utilizando um transdutor (MARTINČEK, 1965).

A equação designada para se determinar o módulo de elasticidade dinâmico a partir da frequência ressonante longitudinal é apresentada a seguir na Equação 4:

$$E = 4L^2 \cdot dN^2 \quad (4)$$

Onde:

E = módulo de elasticidade dinâmico;

d = densidade do concreto;

L = comprimento do corpo de prova;

N = frequência fundamental longitudinal.

Cada forma de determinar o módulo de elasticidade tem sua importância, nesse sentido, a norma britânica BS 8110-2 (1985) propõe uma relação direta entre o módulo de elasticidade estático e o módulo de elasticidade dinâmico, uma vez que nem sempre é possível realizar os ensaios estáticos devido a aparelhagem (prensa hidráulica) ter um custo elevado e os aparelhos são bem maiores em comparação aos equipamentos usualmente empregados para determinar o módulo de elasticidade dinâmico. Sendo assim, é vantagem ter uma equação algébrica que relacione as duas formas de determinar o módulo de elasticidade. A equação proposta por BS 8110-2 (1985) é apresentada a seguir na Equação 5.

$$E_e = 1,25 E_d - 19 \quad (5)$$

Onde:

E_e = módulo de elasticidade estático (GPa);

E_d = módulo de elasticidade dinâmico (GPa);

19 = constante de proporcionalidade.

Borin *et. al.* (2012) e Mcneil e Kang (2013) citam que outra forma para obtenção do módulo de elasticidade do concreto dá-se a partir de equações algébricas obtidas com base em regressões ou outras formas estatísticas, que associam o módulo de elasticidade a parâmetros de controle tecnológico do concreto, tais como: resistência a compressão; massa específica do concreto; massa específica dos agregados graúdos presentes na mistura, entre outros

parâmetros. A partir dessas equações algébricas, apresentadas no item 2.1.3.2, é possível estimar o valor do módulo de elasticidade de concretos sem a necessidade de realizar o ensaio. De certa forma é comum no setor da construção civil apenas se estimar o valor de módulo de elasticidade, uma vez que cada vez mais se exige edificações finalizadas em um tempo inferior aos praticados em décadas passadas.

2.1.3.2 Formas não experimentais de estimação do módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade estimado é a maneira mais rápida de se estimar o valor quando não há a possibilidade de utilização de alguma forma experimental. Para Topçu e Uğurlu (2007), o módulo de elasticidade estimado não representa o valor real do módulo de elasticidade do concreto, uma vez que vários fatores intervenientes ao módulo de elasticidade do concreto, na maioria das vezes, não são levados em consideração, já que não existe uma única equação algébrica capaz de considerar todos esses fatores. Essa afirmação consiste no fato de que muitas dessas equações não levam em conta fatores tais como: idade do concreto; diâmetro máximo do agregado; relação a/c; entre outros. Sendo assim, itens mais complexos que esses, por consequência, também são desconsiderados.

Na próxima sessão, serão apresentados os modelos de previsão do módulo de elasticidade em função de normas (item 2.1.3.2.1) e em função da literatura (item 2.1.3.2.2).

2.1.3.2.1 Módulo de elasticidade estimado por modelos de previsão normalizados

A Tabela 3 apresenta o título da norma/autor (ano), a equação proposta para estimação do módulo de elasticidade estático, além de algumas observações necessárias.

Tabela 3 - Estimativa do E_e a partir de equações algébricas normalizadas

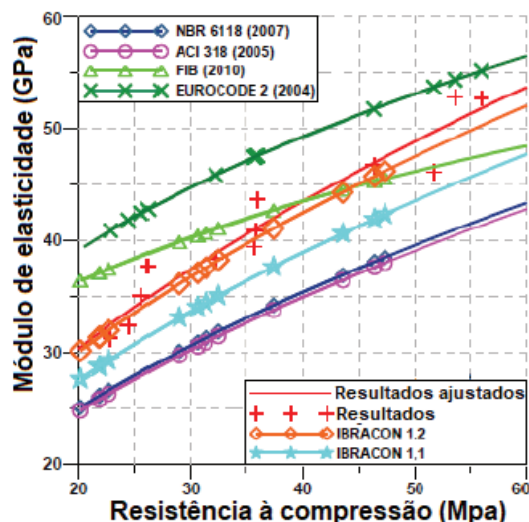
Autor	Módulo de elasticidade estimado	Observações
CEB-FIP (1990)	$E = 2,15 \times 10^4 (f_c/10)^{3/4}$	
ACI 209 (1997)	$E = 0,043 \cdot \rho^3 (f_c)$	ρ = densidade do concreto em kg/m ³
Eurocode 2-04	$E = 22(f_{cm}/10)^{0,3}$	α = coeficiente em função da rocha de origem
CSA A23.3-04	$E = 4,5 \sqrt{f_c'}$	$f_c' = f_{cm} - 8$ MPa (Eurocode 2)

NZS 3101:2006	$E = 3,32(\sqrt{fc'}) + 6,9$	
JSCE15-07	$E = 4,7 \sqrt{fc'}$	
JCI-08	$E = 6,3 fc'^{0,45}$	
AS 3600-09	$E = 4,3 \cdot 10^{-5}(\rho)^{1,5}\sqrt{fcm}$	$fcm \leq 40 \text{ MPa}$
	$E = (2,4 (\rho)^{1,5}\sqrt{fcm} + 12) \cdot 10^{-5}$	$40 < fcm \leq 100 \text{ MPa}$
ACI 318-11	$E_c = 4,73 \sqrt{fc'}$	$fc' = fcm - 8 \text{ MPa}$ (Eurocode 2)
NBR 6118 (2014)	$E = \alpha \cdot 5600 \sqrt{fck}$	$20 < fcm \leq 50 \text{ MPa}$
	$E = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha \cdot (fck/10 + 1,25)^{1/3}$	$55 < fcm \leq 90 \text{ MPa}$

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da Tabela 3 é possível identificar que essas equações variam basicamente em função de apenas duas propriedades do concreto, sendo a resistência a compressão o fator, presente em todas elas. Entretanto, sabe-se que apenas a resistência à compressão não é um parâmetro suficiente para estimar o módulo de elasticidade real do concreto, uma vez que concretos com mesmas resistências à compressão podem variar, significativamente, os valores de módulo de elasticidade, a depender de outros fatores. Logo, algumas das normas usam a massa específica do concreto e outras usam coeficientes de correção dos valores em função das rochas de origem dos agregados graúdos. O Gráfico 13 apresenta resultados de uma pesquisa realizada por Dos Santos et al. (2017), na qual foi realizado procedimento experimental para obter o módulo de elasticidade estático do concreto, comparando com o módulo de elasticidade estimado a partir de normas.

Gráfico 13 - Ee e Ec's estimados em função de normas



Fonte: Dos Santos et al (2017).

A partir do gráfico, é possível perceber que algumas dessas equações se ajustam melhor aos resultados experimentais em resistências à compressão usuais (entre 20 e 40 MPa) se comparados a resistências mais elevadas, nas quais as discrepâncias se evidenciam. A equação do Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON) 1.2 foi a que melhor se ajustou aos valores experimentais, tendo sua curva de tendência praticamente coincidente a curva dos valores experimentais. O provável motivo para o melhor ajuste da equação do IBRACON é pelo fato de ser uma equação formulada utilizando agregados do mesmo país que os autores Dos Santos et al. (2017) realizaram o experimento, conduzindo a valores bem próximos comparados às demais normas apresentadas.

2.1.3.2.2 Módulo de elasticidade estimado por modelos de previsão da literatura

A literatura apresenta diversos modelos de previsão, que estimam o módulo de elasticidade do concreto a partir de regressões com outras propriedades obtidas e/ou parâmetros experimentais do concreto, assim como no item 2.1.3.3.1.

Na Tabela 4 são apresentados modelos de previsão obtidos em pesquisa bibliográfica. Cabe ressaltar que alguns dos modelos expostos na Tabela 4 foram feitos a partir do uso de agregados reciclados para compatibilizar também previsões em concretos produzidos com agregados reciclados, e isso é fundamental, uma vez que o AR, é um dos fatores intervenientes ao módulo de elasticidade do concreto.

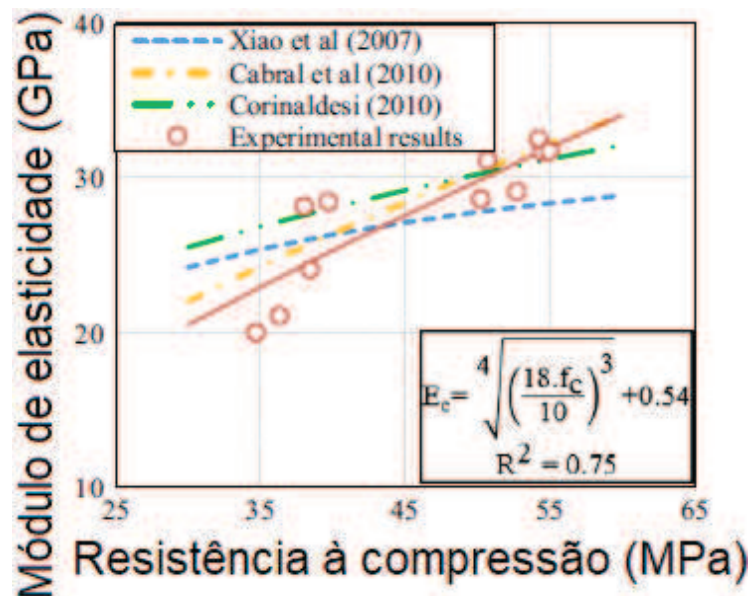
Tabela 4 - Estimativa do E_c a partir de equações algébricas de autores (literatura)

Autor	Módulo de elasticidade estimado	Observações
Neville (1995)	$E = 0,83 E_d$	
Zilch e Roos (2001)	$E = 9100 \times (f_c + 8)^{1/3} \times (\rho_h/2400)^2$	
Kheder e Al-Windawi (2005)	$E = 4993 \times f_c^{0,422}$	
Rahal (2007)	$E = \rho^{1,5} \times 0,043 \times \sqrt{f_{ck}}$	ρ = densidade do concreto
Corinaldesi (2010)	$E = 18800 \times \rho^3 \times \sqrt{0,083 f_{ck}}$	ρ em kg/m^3
Dilbas et al. (2016)	$E = 72 \times (f_{cm}^{1/2}) \times (\rho^{1/2}) - 12000 \text{ (MPa)}$	f_{cm} em MPa
Asef e Farrokhrouz (2017)	$E = 0,88 E_d (1 - \varphi) - 3,7$	φ = porosidade do material
Gholampour et al. (2017)	$E = 0,016 \times (6,1 - 0,015 \text{AR}\%) \times (5,3 - 1,7 \text{ a/c})^{3,9}$	Prevê o E_c do concreto com AR em até 50 GPa
Bui et al (2018)	$E = \sqrt[4]{(1,8 \times f_c)^3 + 0,54}$	

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da Tabela 4 é possível verificar que as equações algébricas variam não somente em função da resistência à compressão e da massa específica do concreto, já que estes são insuficientes para prever comportamentos de concretos que utilizam agregados reciclados, mas de fatores como: relação a/c; percentual de substituição de agregados reciclados por agregados naturais; porosidade dos agregados utilizados; entre outros. O Gráfico 14, elaborado por Bui et al. (2018), apresenta os valores de módulos de elasticidade estático experimentais e módulos de elasticidade obtidos a partir de equações algébricas de autores:

Gráfico 14 - Ee e Ec's estimados em função de autores da literatura



Fonte: Bui et al. (2018).

A partir do gráfico, percebe-se que em resistências entre 25 e 45 MPa, os valores experimentais resultam em módulos de elasticidade inferiores aos valores de equações da literatura. A partir da resistência à compressão de aproximadamente 45 MPa, os valores experimentais conduzem a valores semelhantes aos das literaturas comparadas, enquanto, a partir de 50 a 60 MPa os valores experimentais evoluíram a ponto de serem superiores aos valores estimados a partir das equações algébricas. Esse comportamento observado, a partir dessas equações, comparando aos resultados experimentais, evidencia que esses modelos de estimação, por não lidarem com os fatores intervenientes do E_c do concreto, são insuficientes para prever o real comportamento elástico do concreto. Nesse sentido, os módulos de elasticidade estimados não devem ganhar espaço em relação aos testes

experimentais, sobretudo quando os concretos são produzidos com agregados reciclados. Muitos parâmetros influenciam o módulo de elasticidade do concreto, dito isso, a opção mais conservadora dentre as apresentadas no item 2.1.3, é a determinação do módulo a partir de experimentos (TOPÇU; UĞURLU, 2007).

2.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE EM CONCRETOS COM AGR

Quando se trata de concretos produzidos com agregados reciclados, as diferenças nos valores dos módulos de elasticidade obtidos por diferentes métodos experimentais em comparação aos concretos produzidos com agregados naturais são acentuadas (MCNEIL; KANG, 2013).

O módulo de elasticidade do concreto é relacionado a porosidade das fases constituintes do concreto, sendo assim, a deformação que ocorre em agregados é devido a porosidade dos mesmos agregados, afetando o módulo de elasticidade dos concretos (MEHTA E MONTEIRO, 2014). Esse fato é intensificado quando se trata de agregados reciclados, já que eles têm maior absorção de água, menor densidade, além de elevada porosidade em comparação a agregados naturais (CORDEIRO, 2013; CHOUBEY ET AL, 2016; LEITE; MONTEIRO, 2016). A preocupação com a elevada porosidade de agregados reciclados é pela relação inversa entre a porosidade e as propriedades mecânicas finais do concreto, o que é mais acentuada já que o concreto é um material trifásico, isto é, a alta absorção de água nas diferentes fases tem consequências no produto final (GONÇALVES, 2001). Zhou et al. (1995) indica que a porosidade do agregado influencia a resistência à compressão e o módulo de elasticidade de semelhante modo. O autor concluiu, com base em pesquisa, que agregados menos porosos tornam o concreto com eles fabricados menos deformáveis, ou seja, com maiores módulos de elasticidade, e à medida que se utiliza agregados mais porosos os módulos de elasticidade decrescem. Para Etxeberria et al. (2007); Silva et al. (2015); Andal et al. (2016), os agregados reciclados têm uma maior tendência à deformação em comparação a agregados naturais. Logo, o E_c de concretos fabricados com AR tem uma tendência de serem menores que o módulo de elasticidade de concretos fabricados com AN.

Hansen (1992); Carrijo (2005); Tenório (2007); Silva et al. (2016) constataram que os módulos de elasticidade de concretos produzidos com agregados reciclados são menores à medida que os níveis de substituição dos agregados aumentam,

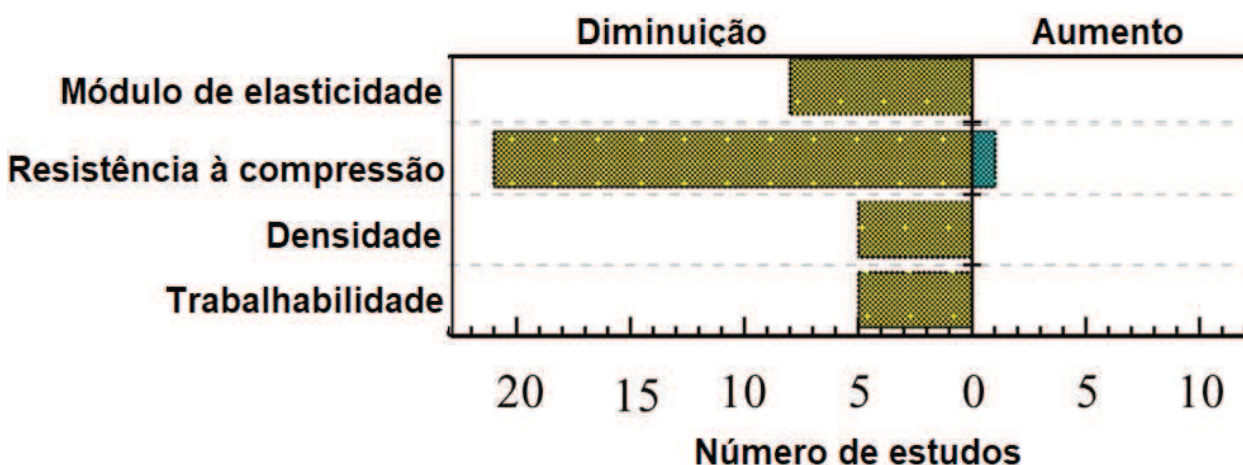
desde que os outros parâmetros relacionados a dosagem dos concretos sejam fixos. A absorção de água e a porosidade aumentam, enquanto a resistência à compressão, desde que os níveis de substituição de agregados convencionais por agregados reciclados não ultrapassem 50% e não decresçam consideravelmente.

Para Silva et al. (2016), outros fatores, tais como: taxas de substituição de agregados convencionais por agregados reciclados, dimensão e qualidade dos agregados, além do processo de mistura, condições de cura, uso ou não de aditivos, entre outros, podem ser determinantes para a qualidade do concreto fabricado. Dito isso, espera-se que agregados reciclados de tipos e fontes distintas produzam concretos com diferentes módulos de elasticidade, além disso, via de regra, o módulo de elasticidade diminui com o aumento do teor de substituição.

Com base nisso, conforme citado no item 2.1.1, um fator determinante para a redução do módulo de elasticidade de concretos produzidos com agregados reciclados é o módulo de elasticidade dos agregados reciclados (MCNEIL; KANG, 2013; CHOUBEY et al., 2016; SILVA et al., 2016). Estudos no decorrer das últimas décadas têm buscado soluções para minimizar as reduções nos valores de módulos de elasticidade de concretos produzidos com agregados reciclados.

O Gráfico 15, adaptado de Verian et al. (2018), apresenta um resumo em função do número de estudos que obtiveram decréscimos ou acréscimos de valores de algumas propriedades devido ao uso de agregado graúdo reciclado, sendo elas: módulo de elasticidade; resistência à compressão; densidade e trabalhabilidade.

Gráfico 15 - Influência resumida do AGR nas propriedades do concreto



Fonte: Adaptado de Verian et al. (2018).

A partir do gráfico, é possível perceber que o módulo de elasticidade, a densidade e a trabalhabilidade diminuem. Todavia, a resistência à compressão, excepcionalmente, pode aumentar em função do uso de agregados graúdos reciclados. A seguir, são apresentados, o módulo de elasticidade de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de RCV (2.2.1) e de ARC (2.2.2).

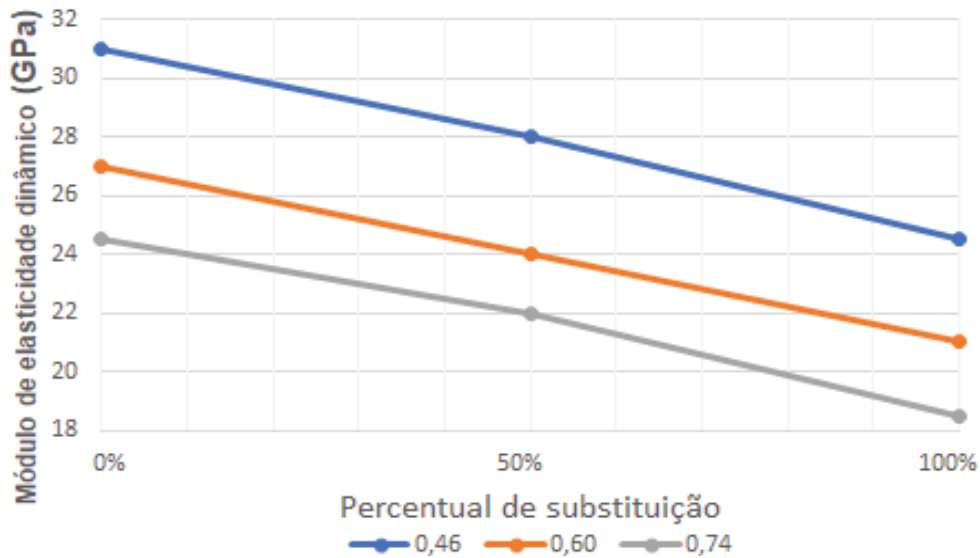
2.2.1 Módulo de elasticidade em concretos com AGRCV

O conhecimento das propriedades dos resíduos de cerâmica vermelha (RCV), além do conhecimento do efeito destes sobre as propriedades do concreto é fundamental para sua utilização, implicando, assim, que as propriedades físicas, mecânicas e de deformação devem ser similares as dos concretos produzidos com agregados naturais. No entanto, segundo Chen et al. (2003), os efeitos do RCV sobre as propriedades do concreto são menos explorados que do ARC.

Os efeitos negativos causados pelo uso do agregado cerâmico na produção do concreto, de acordo com Liu et al. (2015), são decorrentes da forma dos grãos e morfologia da superfície. Além disso, os autores citam que para o seu uso em concreto, a dimensão máxima do agregado graúdo cerâmico não deve ultrapassar 10 mm. Além desses fatores, a elevada porosidade, a baixa densidade e a maior absorção de água dos agregados graúdos cerâmicos afetam o concreto no estado fresco e no estado endurecido, além de comprometerem a durabilidade da estrutura (CABRAL et al., 2010; GOMES et al., 2014; ANDERSON et al., 2016; COROMINAS et al., 2016).

Em experimento de Cabral et al. (2010) foram realizados traços utilizando agregado reciclado de RCV em percentuais de substituição de 0, 50 e 100%, além de relações a/c 0,46, 0,60 e 0,74, com o intuito de avaliar a influência desses fatores no módulo de elasticidade do concreto. O Gráfico 16 apresenta os valores obtidos por Cabral et al. (2010), relacionando o módulo de elasticidade com essas variáveis.

Gráfico 16 - Módulo de elasticidade por taxa de substituição de AGN por AGRCV



Fonte: Adaptado de Cabral et al. (2010).

A partir do Gráfico 16, pode-se observar que os valores do módulo de elasticidade decrescem com o aumento das taxas de substituição. Outros estudos obtiveram valores semelhantes, a exemplo, Chen et al. (2003), em estudo, conduziram vários percentuais de substituição de agregado graúdo reciclado de RCV por agregado graúdo natural. Os resultados obtidos pelos autores são compatíveis com os de Cabral et al (2010), em que atingiram decréscimos de até 25% no valor de módulo de elasticidade do concreto em substituições de até 50%.

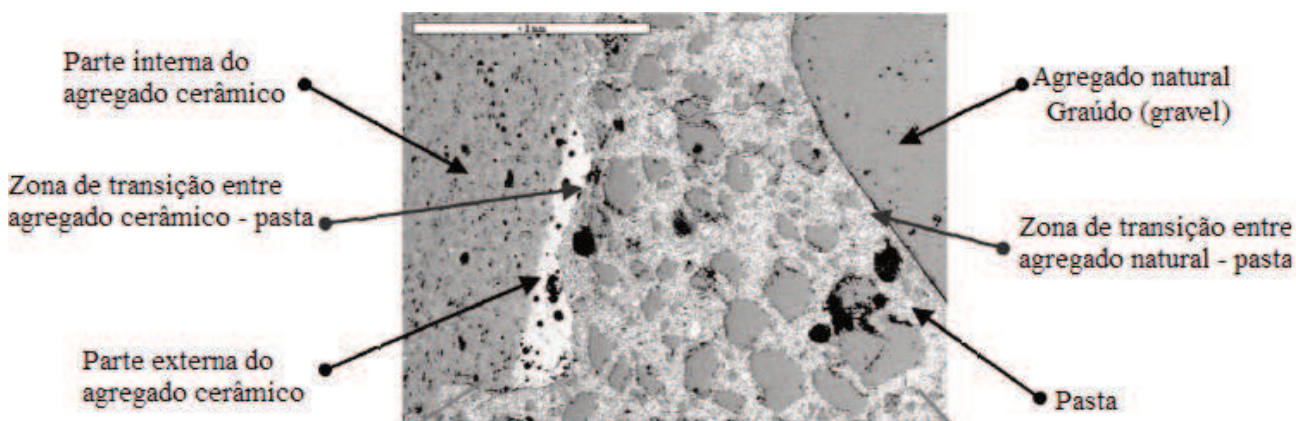
Cabral et al. (2010) não realizaram avaliação microestrutural do concreto, entretanto outros autores como Medina et al. (2012) citam que a zona de transição do concreto produzido com agregados graúdos reciclados de resíduos de cerâmica vermelha é fundamental no comportamento elástico do concreto, sendo relacionada sua influência nos resultados do módulo de elasticidade do concreto.

O decréscimo de módulo de elasticidade ainda não é consensual por autores da literatura, Anderson et al. (2016), a exemplo, encontram valor de módulo de elasticidade superior em média 4,2%, ao usar AGRCV em taxas de substituição de até 50%. Outros autores encontraram valores divergentes, sendo em pesquisa de Gomes et al. (2014), produziram concreto com resíduos provenientes de tijolos cerâmicos para substituição de 25% os módulos diminuíram 16%, isso evidencia que esse campo de estudo ainda carece de pesquisas e dependem de fatores referentes ao programa experimental, tais como: procedimento de britagem dos resíduos para

obtenção do AGRCV; arredondamento dos grãos; entre os outros fatores já citados, que conduzem a melhores valores de módulo de elasticidade do concreto.

Para Medina et al. (2012), o uso de agregado graúdo reciclado de resíduos de cerâmica vermelha em proporções adequadas pode promover uma melhoria na zona de transição do concreto. Tal melhoria, segundo os autores, deve-se ao fato da zona de transição entre a pasta e o agregado graúdo reciclado ser mais compacta, mais estreita e menos porosa do que entre a do agregado natural e a pasta. Além disso, os autores constataram que a resistência à compressão dos concretos reciclados melhoraram à medida que o percentual de agregado graúdo natural substituído pelo agregado graúdo cerâmico reciclado aumentou. Entretanto, esses autores afirmam que é fundamental um correto tratamento desses agregados reciclados antes do uso em concreto. A Figura 5 ilustra a análise por micrografia, realizada por Medina et al. (2012) do concreto produzido com agregados graúdos reciclados de RCV em substituição aos agregados graúdos naturais.

Figura 5 - Agregado graúdo reciclado de cerâmica vermelha dentro da argamassa



Fonte: Medina et al. (2012).

2.2.2 Módulo de elasticidade em concretos com AGRC

Pesquisas desenvolvidas nas últimas décadas constataram que algumas particularidades nos concretos produzidos com agregados reciclados de concreto (ARC), em comparação aos concretos produzidos com agregados naturais, são ocasionadas por a camada de argamassa aderida ao agregado reciclado em torno do grão do agregado graúdo natural (GUO ET AL., 2018). Na Figura 6 é apresentada a de captura de Hentges (2018) de um agregado graúdo reciclado de concreto com a camada de argamassa aderida ao grão bem visível.

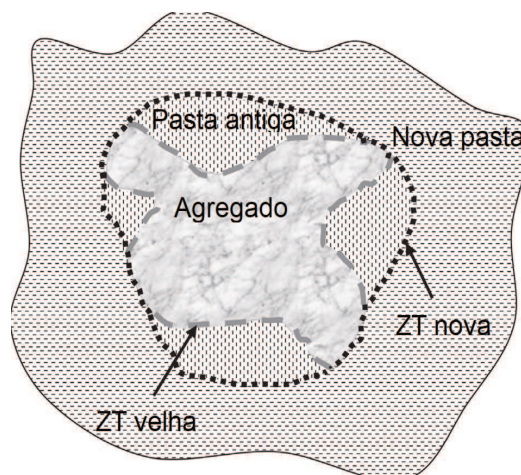
Figura 6 - Aparência do AGRC com camada de argamassa aderida ao grão



Fonte: Adaptado de Hentges (2018).

Uma consequência da camada de argamassa aderida em torno do grão é o fato desse agregado tornar-se mais poroso em comparação ao agregado que o originou, carecendo de maior quantidade de água (maior absorção) de modo geral, em função da quantidade de camada de argamassa aderida, resultando em um concreto com características inferiores ao que seria se produzido, apenas, com agregados naturais (HANSEN, 1992; GONÇALVES, 2001; PADOVAN, 2013; ANDAL et al., 2016). Outra consequência dessa camada de argamassa é a presença de uma zona de transição em que na fabricação do concreto pode juntar-se à outra zona de transição, totalizando duas zonas de transição no mesmo concreto. A Figura 7 ilustra a representação elaborada por Kisku et al. (2017) do AGRC dentro da nova camada argamassa e a interação entre as fases do concreto.

Figura 7 - Esquema de representação do AGRC dentro da nova argamassa

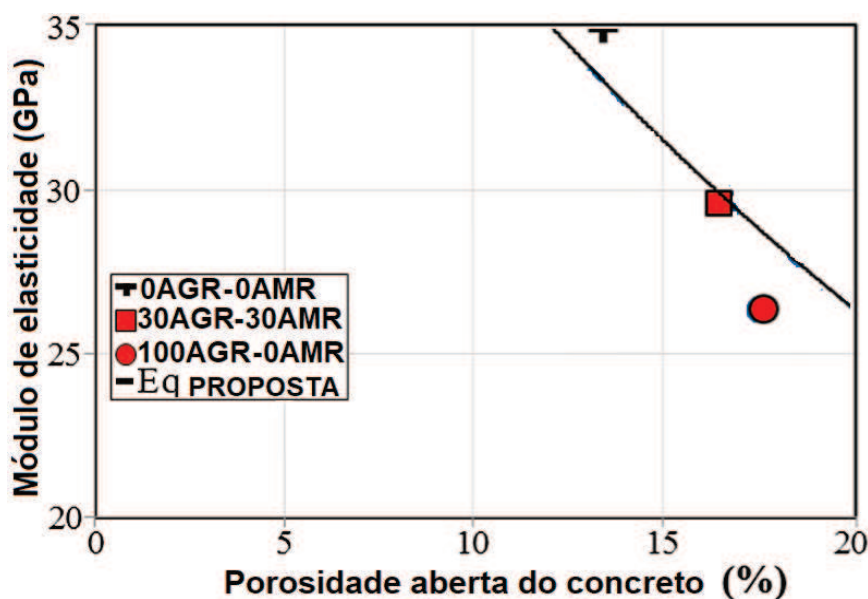


Fonte: Kisku et al. (2017).

Para Adams et al. (2016) quanto maior o volume de argamassa aderida aos grãos do ARC menores serão os módulos de elasticidade dos concretos produzidos. Silva et al. (2016) citam que a diminuição do E_c em concretos produzidos com ARC, em comparação a concretos produzidos com AN, é correspondente a menor rigidez da zona de transição devido à presença da camada de argamassa aderida ao grão, conseqüentemente, o concreto produzido com níveis crescentes de substituição de ARC, em teores de argamassa elevados, resultam em módulos de elasticidade decrescentes. Além disso, os autores citam que os processos de reciclagem utilizados e a resistência dos materiais originais podem resultar em quantidade e qualidade da argamassa velha.

O Gráfico 17, elaborado por Omary et al. (2016), apresenta o efeito da porosidade aberta no módulo de elasticidade de concretos produzidos com AGRC.

Gráfico 17 - Evolução do E_c em função da porosidade aberta do concreto



Fonte: Omary et al. (2016).

É possível notar que maiores percentuais de agregados reciclados de concreto conduzem a maiores porosidades do concreto, ao passo que reduzem os valores dos módulos de elasticidade. Os valores obtidos por Omary et al. (2016) corroboram com Andreu e Miren (2014) e Silva et al. (2016). Várias outras pesquisas foram desenvolvidas com o objetivo de analisar o uso de agregados graúdos reciclados de concreto no concreto e sua influência no módulo de elasticidade estático, sendo estas apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Módulo de elasticidade estático de concretos produzidos com AGRC

Fonte	Fonte do AG	(% de subs.	a/c	Absorção de água (%)		ρ do C (g/cm ³)	f_c (MPa)	Ee (GPa)	ΔEe (%)
				AG	Concreto				
ETXEB ERRIA et al. (2007)	NAT	-	0,55	-	-	2,42	29	32,6	-
	ARC	25		-	-	2,40	28	31,3	-3,9
CORINALDESI (2010)	NAT	-	0,40	3,0	-	-	58,6	37,3	-
	ARC	30		6,8	-	-	46,1	32,7	-12,3
	NAT	-	0,45	3,0	-	-	56,1	36,9	-
	ARC	30		6,8	-	-	45,8	33,3	-9,8
	NAT	-	0,50	3,0	-	-	51,2	35,6	-
	ARC	30		6,8	-	-	39,9	27,7	-22,2
	NAT	-	0,60	3,0	-	-	43,9	33,9	-
	ARC	30		6,8	-	-	34,7	22,9	-32,4
FONTEBOA et al. (2011)	NAT	-	0,50	2,54	6,26	2,36	44,81	33,9	-
	ARC	20		5,01	5,89	2,33	43,74	32,6	-3,8
	NAT	-	0,65	2,54	7,24	2,34	31,92	29,6	-
	ARC	20		5,01	7,36	2,32	31,71	28,2	-4,7
ANDREU E MIREN (2014)	NAT	-	0,285	2,13	1,39	2,51	102,1	50,4	-
	ARC100	20		3,74	1,24	2,50	108,0	48,5	-3,7
	ARC60	20		4,90	1,76	2,44	102,5	47,8	-5,2
	ARC40	20		5,91	2,08	2,47	104,3	48,3	-4,2
ADAMS et al. (2016)	NAT	-	0,40	2,61	-	-	48,1	32,6	-
	FLD	25		4,34	-	-	42,8	28,1	-13,8
	ARC20	25		5,71	-	-	43,4	28,3	-13,2
CHOUB EY et al. (2016)	NAT	0	-	-	-	-	35,0	31,2	-
	ARC	30	-	-	-	-	32,3	24,7	-20,8
SEARA-PAZ et al. (2016)	NAT	-	0,50	2,20	1,38	2,32	60,7	36,3	-
	ARC30/40	20		5,40	1,81	2,30	53,5	32,9	-9,4
	NAT	-	0,65	2,20	2,63	2,31	46,9	35,3	-
	ARC30/40	20		5,40	2,95	2,26	46,7	32,5	-7,9
MEDJIG BODO et al. (2018)	NAT	-	0,67	0,54			31,4	43,8	-
	ARC	30		5,10			28,5	38,3	-12,6

Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir da Tabela 5 é possível notar que, a partir da substituição de agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado de concreto, os valores de resistência à compressão de forma geral são similares. Vale destacar que, a partir da revisão realizada, o módulo de elasticidade do concreto tende a decrescer entre 4% e 32% em concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto, além de que em concretos produzidos com AGRC com massa específica e/ou absorção de água muito distintas em comparação aos concretos produzidos com AGN conduzem a valores de módulo de elasticidade com decréscimos ainda maiores.

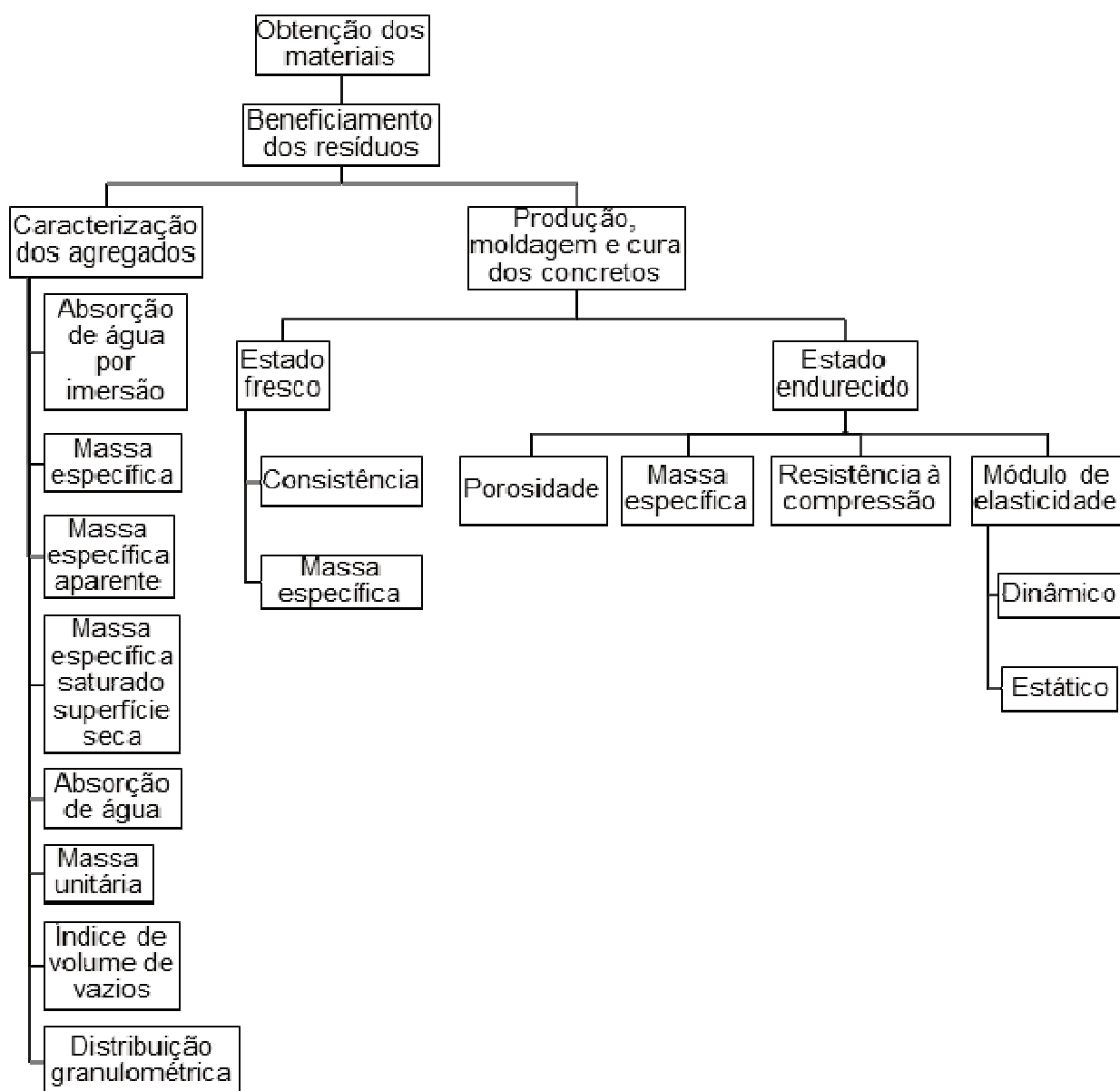
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para alcançar os objetivos propostos nesta pesquisa é desenvolvido o programa experimental, sendo composto por: planejamento; caracterização dos materiais; descrição do método de dosagem empregado na produção, moldagem e cura dos corpos de prova; além das especificações das propriedades avaliadas.

3.1 PLANEJAMENTO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

A Figura 8 ilustra o organograma das atividades desenvolvidas.

Figura 8 - Organograma das atividades desenvolvidas



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.1 Fatores de controle

Foram estipulados como fatores de controle: a relação água/cimento em três níveis variáveis, sendo estes de 0,405 (traço rico), 0,540 (traço intermediário) e 0,675 (traço pobre); além destes os tipos de agregados graúdos utilizados apresentam quatro níveis variáveis, sendo eles: o agregado graúdo reciclado de resíduo de cerâmica vermelha; o agregado graúdo reciclado de concreto de 20 MPa de resistência à compressão; o agregado graúdo reciclado de concreto de 40 MPa de resistência à compressão, além do o agregado graúdo natural.

Os fatores de controle com níveis fixos de estudo são:

- a) tipo de cimento - CPV-ARI;
- b) abatimento de tronco de cone - 100 ± 20 mm;
- c) corpos de prova saturados, para a realização dos ensaios dos concretos produzidos, no estado endurecido;
- d) teor de substituição de agregado graúdo reciclado por agregado graúdo natural¹ de 30% em massa;
- e) mesma distribuição granulométrica dos agregados para as dosagens;
- f) CP's mantidos em sala com temperatura e umidade controladas para cura.

A umidade e a temperatura do ambiente durante a moldagem não foram possíveis de serem controlados. Entretanto, teve-se o cuidado para não proceder dosagem em umidade relativa ambiente menor que 60%.

3.1.2 Variáveis de resposta

Foram estipuladas as seguintes variáveis de resposta:

- a) porosidade dos concretos;
- b) massa específica dos concretos;
- c) resistência à compressão do concreto;
- d) módulo de elasticidade estático estimado a partir de normas;
- e) módulo de elasticidade estático estimado a partir da literatura;
- f) módulo de elasticidade dinâmico do concreto;
- g) módulo de elasticidade estático do concreto.

¹ Usualmente se faz uma compensação de quantidade de agregado graúdo reciclado em função do volume absoluto do material, que considera as diferenças, de modo a manter a proporção volumétrica entre os materiais, o que não foi realizado neste trabalho.

3.1.3 Projeto de experimentos

Na Tabela 6 são apresentadas as quantidades de amostras e de traços experimentais para cada ensaio realizado do concreto no estado endurecido:

Tabela 6 - Total de amostras empregadas por ensaio e ao todo

Ensaio	Número de amostras	Número de traços	Total de amostras
Resistência à compressão	5	12	60
Porosidade	1	12	12
Módulo de elasticidade dinâmico	5	12	60
Módulo de elasticidade estático			
Total de amostras			132

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.4 Tratamento de dados e análises estatísticas

Para o tratamento dos dados, foram realizadas análises descritivas para obtenção de média, desvio padrão e coeficiente de variação. Para as análises estatísticas, foram realizadas análises de variância (ANOVA) adotando-se um nível de confiabilidade de 95%. A análise de variância compara, estatisticamente, a influência do fator de controle sobre a variável de resposta. Nos casos em que os efeitos são significativos, é realizada uma segunda análise estatística (Teste Tukey).

O teste Tukey compara os componentes dentro dos grupos, de modo a verificar qual o fator que gera efeito significativo (ES) sobre a variável de resposta. Por fim, foram realizadas análises de regressão linear simples entre as variáveis de resposta (eixo-x nos gráficos), de modo a verificar a influência das propriedades do concreto em função de uma variável dependente (E_d e E_e). Em relação aos valores de coeficiente de determinação (R^2), os mesmos são considerados aceitáveis em valores superiores a 0,60. Considera-se que valores menores que 0,60 são baixos e, portanto, não representam adequadamente o comportamento do fenômeno estudado, sendo estes grifados em vermelho nos Gráficos decorrentes do item 4.3.2. Além disso os valores de equações das retas representam os valores experimentais obtidos por meio desta pesquisa e não devem ser generalizados em hipótese alguma, uma vez que se limitam ao escopo desta.

3.2 MATERIAIS

Os materiais utilizados para a realização do programa experimental foram adquiridos na região metropolitana de Porto Alegre, no Rio Grande do Sul, sendo as especificações dos mesmos expostos a seguir.

3.2.1 Cimento

O cimento utilizado é o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV-ARI). A escolha desse material foi feita, pois permite um rápido e elevado grau de hidratação do concreto na idade de 28 dias, idade esta escolhida para a realização dos ensaios laboratoriais. O cimento para a pesquisa foi obtido de um único lote.

Os parâmetros químicos são expostos na Tabela 7 e os parâmetros físicos e mecânicos são expostos na Tabela 8, ambos obtidos junto ao fornecedor.

Tabela 7 - Características químicas do cimento Portland CPV-ARI

Componente	Teor (%)	Limites da NBR 5733 (ABNT, 1992)
MgO	2,7	≤ 6,50
SO ₃	3,1	Não aplicável
Perda ao fogo (PF)	3,5	≤ 4,50
Resíduo insolúvel (RI)	-	Não aplicável

Fonte: Fabricante (2017).

Tabela 8 - Características físicas e mecânicas do cimento Portland CPV-ARI

Características avaliadas	Teor	Limites da NBR 5733 (ABNT, 1992)
Blaine (cm ² /g)	4720	≥ 3000
Finura #200 (%)	0,2	≤ 6,0
Finura #325 (%)	1,4	Não aplicável
Início de pega (minutos)	286	≥ 60
Fim de pega (minutos)	355	≤ 600
Resistência à compressão (MPa) 1 dia	20,6	≥ 11,0
Resistência à compressão (MPa) 3 dias	37,0	≥ 24,0
Resistência à compressão (MPa) 7 dias	41,8	≥ 34,0
Resistência à compressão (MPa) 28 dias	47,9	Não aplicável

Fonte: Fabricante (2017).

A partir da Tabela 7 e Tabela 8 é possível verificar que o cimento utilizado na pesquisa, segundo dados obtidos juntos ao fornecedor, está dentro dos intervalos (limites) regulamentados pelas respectivas normas.

3.2.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo (AM) utilizado na pesquisa é uma areia proveniente do Rio Jacuí, previamente seca em estufa a $100 \pm 5^\circ\text{C}$ durante 48 horas. O material foi armazenado em tonéis plásticos, evitando qualquer tipo de contaminação, sendo estes caracterizados no Laboratório de Materiais de Construção (LMC) da Unisinos.

Foram determinados os seguintes parâmetros: massa específica; massa específica aparente e massa específica do agregado saturado superfície seca a partir de recomendações da NBR Norma Mercosul (NM) 52 (ABNT, 2009); massa unitária e índice de volume de vazios a partir da NBR NM 45 (ABNT, 2006), absorção de água NBR NM 30 (ABNT, 2001). A Tabela 9 apresenta os valores obtidos a partir destes procedimentos normativos.

Tabela 9 - Propriedades físicas dos agregados miúdos

Propriedades avaliadas	Agregado miúdo
Massa específica (g/cm^3)	2,59
Massa específica aparente (g/cm^3)	2,56
Massa específica saturado superfície seca (ρ_{SSS}) (g/cm^3)	2,57
Absorção de água (%)	0,51
Massa unitária (g/cm^3)	1,57
Índice de volume de vazios (%)	39,56

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 10 apresenta os valores obtidos na determinação a partir da análise granulométrica da areia e o Gráfico 18 ilustra a distribuição granulométrica, ambos determinados a partir de recomendações da NBR NM 248 (ABNT, 2003):

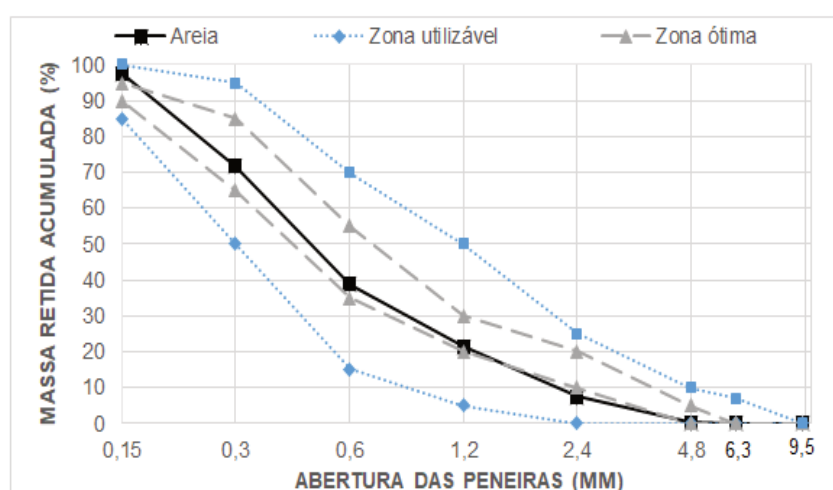
Tabela 10 - Análise granulométrica do agregado miúdo

Abertura de peneira #	% Retida	% Acumulada
4,8 mm	0	0
2,4 mm	7	7

1,2 mm	14	21
0,6 mm	18	39
0,3 mm	33	72
0,15 mm	26	98
0,075 mm	2	100
<0,075 (Fundo)	0	100
Dimensão máxima característica (mm)		4,8
Módulo de finura		2,34

Fonte: Elaborada pelo autor.

Gráfico 18 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Elaborada pelo autor.

Foi utilizada a mesma distribuição granulométrica em todas as dosagens experimentais, apresentada no Gráfico 18, uma vez que nesta pesquisa não foi avaliada a influência do agregado miúdo nos resultados dos módulos de elasticidade do concreto, sendo o agregado miúdo, como já citado, um fator fixo. Os resultados obtidos para o agregado miúdo estão especificados no APÊNDICE F.

3.2.3 Agregado graúdo natural

O agregado graúdo natural utilizado na pesquisa é de origem de rochas basálticas composto por brita 0 e brita 1, previamente lavados para retirar impurezas aderidas aos grãos, em seguida seco ao ar e a temperatura ambiente em local fechado, cobertos com lonas plásticas até a constatação visual de que a superfície se encontrava seca, sendo a secagem finalizada em estufa à $100 \pm 5^\circ\text{C}$.

Após o procedimento de secagem, os agregados passaram por um processo de peneiramento em agitador de peneiras, durante 15 minutos, utilizando-se para o trabalho o material passante na # 19 mm e retido na peneira # 4,8 mm. O armazenamento do material já peneirado deu-se em tonéis plásticos, evitando qualquer tipo de contaminação.

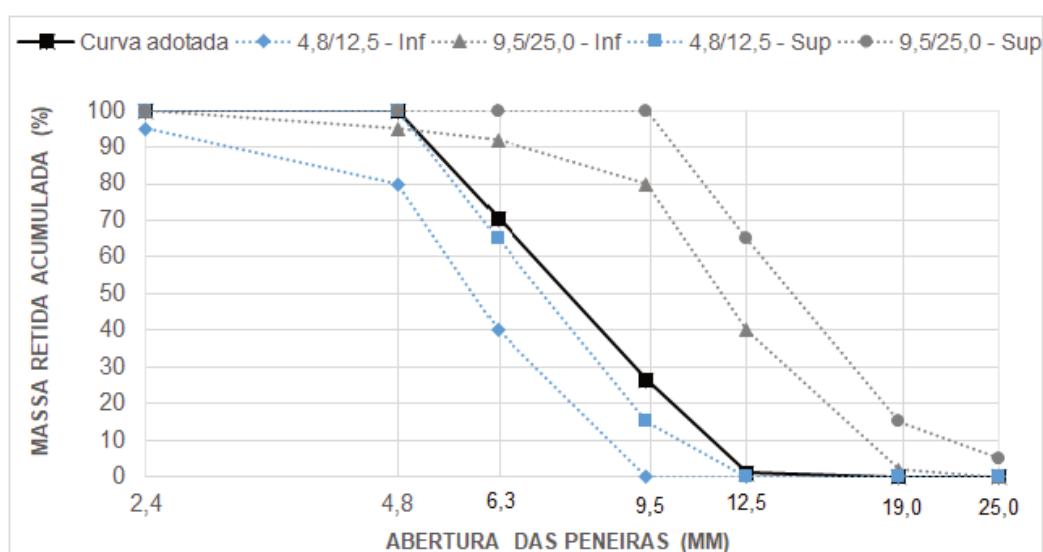
Para isolar o efeito da diferença da distribuição granulométrica dos agregados graúdos, foi adotado uma curva em comum para todas as misturas, dentro dos limites aceitáveis especificados pela NBR NM 248 (ABNT, 2003) e especificados na Tabela 11 e Gráfico 19 com a representação da curva granulométrica.

Tabela 11 - Curva granulométrica em comum para os agregados graúdos

Abertura de peneira #	% Retido	% Acumulado
19 mm	1	1
12,5 mm	44	45
9,5 mm	18	63
6,3 mm	22	85
4,8 mm	15	100
Dimensão máxima característica (mm)		19
Módulo de finura		6,64

Fonte: Elaborada pelo autor.

Gráfico 19 - Distribuição granulométrica comum aos agregados graúdos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Além da distribuição granulométrica, foram determinadas as propriedades: massa específica; massa específica aparente; massa específica do agregado saturado superfície seca e absorção de água a partir de recomendações da NBR NM 53 (ABNT, 2009); massa unitária e índice de volume de vazios pela NBR NM 45 (ABNT, 2006), sendo os resultados obtidos apresentados na Tabela 12. Esses mesmos procedimentos foram realizados nos agregados graúdos reciclados. Além disso, os dados dos agregados graúdos são apresentados no APÊNDICE E.

Tabela 12 - Propriedades físicas do agregado graúdo natural

Propriedades avaliadas	Agregado graúdo natural
Massa específica (g/cm ³)	2,88
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,75
Massa específica saturado superfície seca (g/cm ³)	2,80
Absorção de água (%)	1,63
Massa unitária (g/cm ³)	1,69
Índice de volume de vazios (%)	41,43

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2.4 Agregado graúdo reciclado de concreto

Os agregados graúdos reciclados de concreto utilizados nesta pesquisa foram provenientes de corpos de prova com resistências à compressão de 20 e 40 MPa, cedidos por uma usina de concreto localizada na cidade de Novo Hamburgo, no Rio Grande do Sul.

Os corpos de prova foram britados em britador de mandíbulas e secos em estufa à $100 \pm 5^\circ\text{C}$. Após a secagem, os AGRC's passaram por processos de peneiramento, em agitador de peneiras, durante 15 minutos. Posterior à separação em frações, os agregados foram armazenados em tonéis plásticos, e posteriormente misturados de forma a atingir a mesma distribuição granulométrica dos agregados naturais.

Os materiais foram caracterizados no Laboratório de Materiais de Construção (LMC) da Unisinos. Foram obtidos os mesmos parâmetros a partir dos mesmos procedimentos metodológicos, citados no item 3.2.3. A Tabela 13 apresenta os resultados obtidos para os agregados graúdos reciclados de concreto de 20 MPa (AGRC20) e agregados graúdos reciclados de concreto de 40 MPa (AGRC40).

Tabela 13 - Propriedades físicas do AGRC20 e AGRC40

Propriedades avaliadas	AGRC20	AGRC40
Massa específica (g/cm ³)	2,71	2,70
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,26	2,27
Massa específica saturado superfície seca (g/cm ³)	2,42	2,43
Absorção de água (%)	7,33	7,01
Massa unitária (g/cm ³)	1,27	1,24
Índice de volume de vazios (%)	53,19	54,09

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a quantificação do percentual de argamassa aderida aos grãos dos AGRC's, foi utilizado método referenciado por Padovan (2013). Para a realização do ensaio foram separados 1 kg de material na curva granulométrica exposta na Tabela 12, de modo a realizar o procedimento na mesma curva granulométrica definida para a produção dos concretos.

A Tabela 14 apresenta os valores obtidos de argamassa aderida aos grãos a partir do ensaio de choque térmico e ataque químico nos AGRC's, além da soma total entre os procedimentos:

Tabela 14 - Percentual de argamassa aderida aos grãos

Material	AGRC20	AGRC40
Choque térmico		
Massa inicial (g)	1000	1000
Massa final (g)	779,6	763,2
Massa aderida (%)	22,04	23,68
Ataque químico		
Massa inicial (g)	779,6	763,2
Massa final (g)	454,5	507,2
Massa aderida (%)	41,70	33,54
Argamassa aderida		
Total (%)	55	49

Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir dos resultados obtidos, é possível observar que para o AGRC20 aproximadamente 55% é composto por argamassa aderida aos grãos, enquanto

para o AGRC40 é 49%, o que significa que 45% da composição do AGRC20, são de agregados naturais e 51 % da composição do AGRC40 são AGN. Os teores de argamassa tem a mesma ordem de grandeza dos encontrados por Gholampour e Ozbakkaloglu (2018).

3.2.5 Agregado gráúdo reciclado de resíduo cerâmica vermelha (AGRCV)

Os resíduos de blocos/telhas cerâmicos utilizados na pesquisa, como AGRCV, foram obtidos em olaria localizada na região metropolitana de Porto Alegre/RS.

Foi utilizado o mesmo processo, de britagem, secagem e armazenamento citado no item 3.2.4, assim como foram obtidos os mesmos parâmetros a partir dos mesmos métodos citados no item 3.2.4. A Tabela 15 apresenta os resultados obtidos para os agregados gráúdos reciclados de resíduos da cerâmica vermelha.

Tabela 15 - Propriedades físicas do AGRCV

Propriedades avaliadas	AGRCV
Massa específica (g/cm ³)	2,47
Massa específica aparente (g/cm ³)	1,96
Massa específica saturado superfície seca (g/cm ³)	2,47
Absorção de água (%)	10,61
Massa unitária (g/cm ³)	1,02
Índice de volume de vazios (%)	58,70

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2.6 Água

A água utilizada para produção dos concretos foi proveniente da rede pública de abastecimento do município de São Leopoldo, sendo esta potável.

3.2.7 Aditivo Superplastificante

O aditivo químico utilizado nas dosagens é um superplastificante, tipo SP Glenium 51, da marca Basf. Na Tabela 16 são apresentadas as características

físico-químicas obtidas juntas ao fornecedor. Além disso, o uso do aditivo limitou-se ao intervalo entre 0,1 e 1%, seguindo as recomendações do fabricante.

Tabela 16 - Propriedades físico-químicas do aditivo superplastificante

Propriedades físico-químicas	
Função	Superplastificante de 3 geração
Base química	Éter policarboxílico
Aspecto	Líquido
Cor	Branco turvo
Ação secundária	Redutor de água
Solubilidade em água	Total
Aparência	Líquido branco turvo
pH	5 - 7
Densidade	1,067 - 1,107 g/cm ³
Sólidos	28,5 - 31,5 %
Viscosidade	< 150 centipoises

Fonte: Fabricante (2017).

3.3 DOSAGEM, PRODUÇÃO, MOLDAGEM, CURA E IDENTIFICAÇÃO

Neste item serão descritos o procedimento escolhido para a dosagem, produção, moldagem, processo de cura e identificação dos corpos de prova.

3.3.1 Dosagem

Para esta pesquisa, foi utilizado o procedimento de dosagem de Helene e Terzian (IPT/EPUSP, 1992), no qual são formulados três traços experimentais sendo estes, traço pobre (a/c de 0,675), traço intermediário (a/c de 0,540) e traço rico (a/c de 0,405).

No procedimento experimental de dosagem, optou-se por determinar o teor de argamassa com os agregados graúdos de piores características geométricas dentre os que compunham a pesquisa, que ocorre na mistura entre AGN e AGRCV. Esse traço experimental apresentou um teor de argamassa (α) para a relação a/c 0,540 de 57%.

O percentual de água da mistura foi ajustado em função do concreto referência, sendo este de 9%. A escolha de determinar o percentual de água da

mistura, em função do concreto produzido inteiramente com agregados graúdos naturais e utilizar o mesmo valor aos demais, deu-se ao fato que o ajuste do abatimento às misturas com agregados graúdos reciclados acarretam em concreto referência (REF).

Na Tabela 17 são apresentadas as proporções de mistura para uma betonada de 25 kg de agregado graúdo, para os traços especificados.

Tabela 17 - Proporções de mistura para as betonadas experimentais

Traço unitário				a/c	Areia (kg)	Cimento (kg)	Água (kg)	Total (kg)	% Agregados totais
Traço	c	a	p		Total	Total	Total		
POBRE	1	3,28	3,23	0,675	25,39	7,75	5,23	63,37	79,5
INT	1	2,42	2,58	0,540	23,45	9,69	5,23		76,4
RICO	1	1,57	1,94	0,405	20,22	12,92	5,23		71,4

Fonte: Elaborada pelo autor.

Foram realizadas as dosagens em concretos com teor de substituição de 30% de AGR por AGN.

São apresentados na Tabela 18 os valores das respectivas frações utilizadas em concretos produzidos com AGR e/ou AGN:

Tabela 18 - Quantidade de agregado graúdo utilizado por abertura de peneira

Abertura de peneira #	AGN (REF)	AGN + AGR	
	Brita (kg)	Brita (kg)	Resíduo (kg)
19 mm	0,25	0,175	0,075
12,5 mm	11,0	7,70	3,30
9,5 mm	4,50	3,15	1,35
6,3 mm	5,50	3,85	1,65
4,8 mm	3,75	2,62	1,13

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.2 Produção

A ordem de colocação dos materiais na betoneira foi realizada conforme procedimento adaptado de Padovan (2013) e ilustrado na Figura 9.

Figura 9 - Ordem de inserção dos materiais na betoneira



Fonte: Adaptado de Padovan (2013).

Optou-se por não utilizar métodos de compensação de água nos agregados graúdos reciclados com o intuito de não mascarar (inibir) as diferenças no módulo de elasticidade dos concretos, promovidas devido às condições originais (reais) dos agregados graúdos reciclados. Silva et al (2016), a partir de pesquisa, demonstram que a escolha e o uso de método de compensação de água produzem concreto com menores perdas no módulo de elasticidade do concreto.

3.3.3 Moldagem

Os concretos foram moldados em corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10x20 cm, utilizando procedimentos da NBR 5738 (ABNT, 2015), após moldagem os corpos de prova foram cobertos com placa de vidro, de modo a evitar a perda de água rápida para o ambiente. Os corpos de prova permaneceram nos moldes à temperatura de 20 ± 2 °C e umidade relativa à $60 \pm 6\%$, nas 24 horas iniciais.

3.3.4 Procedimento de cura

Passadas 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e submetidos a um procedimento de cura, de acordo com os procedimentos especificados na NBR 5738 (ABNT, 2015), em tanques com solução de água e cal, em sala com temperatura à 23 ± 2 °C e umidade relativa 100%. Aos 27 dias de idade os corpos de prova tiveram topo e base retificados, para prosseguimento com os ensaios aos 28 dias.

3.3.5 Identificação dos corpos de prova

Os corpos de prova foram identificados conforme Tabela 19.

Tabela 19 - Forma de identificação dos concretos

Tipo de concreto	Pobre	Intermediário	Rico
RCV	RCV-POBRE	RCV-INT	RCV-RICO
ARC20	ARC20-POBRE	ARC20-INT	ARC20-RICO
ARC40	ARC40-POBRE	ARC40-INT	ARC40-RICO
REF = sem resíduo	REF-POBRE	REF-INT	REF-RICO

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO DOS AGREGADOS GRAÚDOS

Foi avaliado essa propriedade, uma vez que a absorção de água dos agregados graúdos reciclados tem influência direta nas propriedades do concreto, auxiliando no entendimento dos resultados obtidos. O ensaio de absorção de água dos agregados foi realizado de acordo com o método proposto por Werle (2010), sendo este realizado no LCVmat. O método é dividido em duas etapas: a etapa 1 consiste em registrar a absorção de água no primeiro minuto. A etapa 2 consiste em registrar a absorção de água ao longo do tempo. A Equação 6 apresenta a fórmula referente à taxa de absorção de água pelo material.

$$A_{sub} = \frac{M_{subf} - M_{subi}}{M_{subi}} \cdot 100 \quad (6)$$

Na qual:

A_{sub} = água absorvida pelo material submerso em porcentagem;

M_{subf} = massa do material submerso no instante final em gramas;

M_{subi} = massa do material submerso no instante inicial em gramas.

A Equação 7, a seguir, apresenta a expressão referente ao cálculo da taxa de absorção de água porcentual em um dado instante (n) e ao longo do tempo.

$$A_{sub} = \frac{M_n}{M_f} \cdot 100 \quad (7)$$

Na qual:

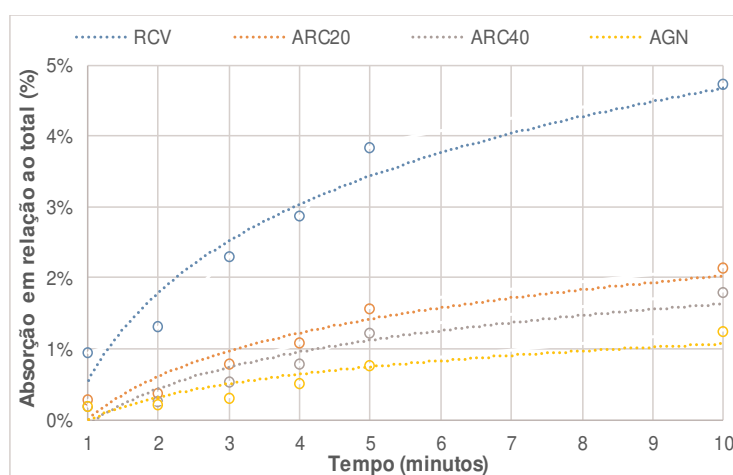
A_n = absorção de água em um instante n em porcentagem;

M_n = massa de água absorvida em um instante n ;

M_f = massa de água absorvida ao final do ensaio;

Para Bendimerad et al. (2015), desde o instante em que o material é submerso até dois minutos, são gerados erros nas leituras devido à acomodação do material ao meio. Esses pequenos erros não comprometem os resultados, uma vez que todos os agregados graúdos são submetidos ao mesmo procedimento. O Gráfico 20 apresenta os resultados de absorção por imersão nos 10 minutos iniciais.

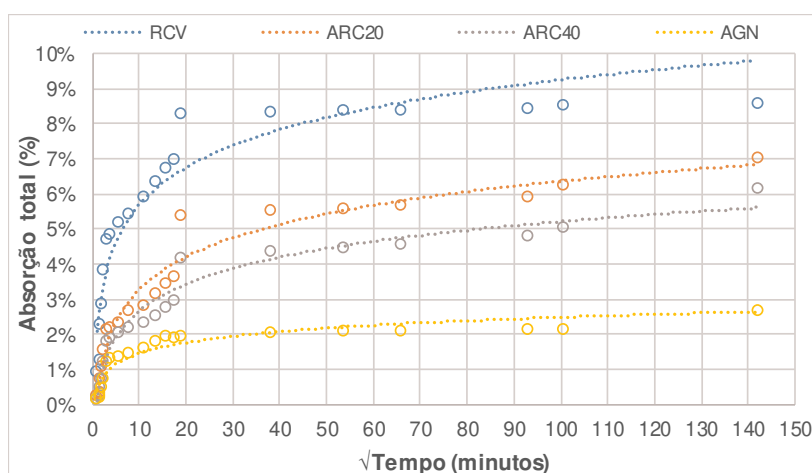
Gráfico 20 - Absorção do AG por imersão nos 10 minutos iniciais



Fonte: Registrada pelo autor.

Nos primeiros 10 minutos o AGN, ARC20/40 e RCV absorveram 1, 2 e 5%, respectivamente. Esses valores são consistentes com pesquisa de Bendimerad et al (2015). Os resultados obtidos ao longo do tempo de ensaio constituem o Gráfico 21:

Gráfico 21 - Absorção do AG por imersão ao longo do ensaio



Fonte: Registrada pelo autor.

Ao longo do tempo, o AGN absorveu menos que 3%, o ARC40 6%, o ARC20 7% e o RCV quase 9%, sendo esses valores compatíveis a autores como Anderson et al, (2016); Cabral et al, (2010); para o RCV e Corominas et al. (2014); LI et al. (2017) para os ARC's Os valores de absorção são especificados no Apêndice G.

3.5 PROPRIEDADES AVALIADAS DOS CONCRETOS

As propriedades dos concretos foram avaliadas no estado fresco e no estado endurecido, sendo a seguir descritas (especificações dos métodos).

3.5.1 Ensaio no estado fresco

A seguir, serão descritos os procedimentos metodológicos escolhidos para a caracterização dos concretos no estado fresco.

3.5.1.1 Abatimento de tronco de cone

Para a determinação do abatimento de tronco de cone foi realizado procedimento conforme especificações da NBR NM 67 (ABNT, 1998), efetuando a correção da consistência com a utilização de aditivo superplastificante (item 3.2.7).

3.5.1.2 Massa específica no estado fresco

Para a determinação da massa específica foi utilizado procedimento conforme especificações da NBR 9833 (ABNT, 2008), em 1 molde por cada traço.

3.5.2 Ensaio no estado endurecido

A seguir, serão descritos os procedimentos metodológicos (normas ou literatura) escolhidos para a caracterização dos concretos no estado endurecido.

3.5.2.1 Porosidade

A porosidade foi medida de forma indireta pela determinação do volume de poros permeáveis, moldados 1 CP cilíndrico 10x20 cm, para cada tipo de concreto

em cada traço experimental, descartando 2,5 cm das extremidades, os outros 15 cm foram divididos em 3. As massas das 3 fatias foram aferidas saturadas aos 28 dias de cura e aferidas posteriormente secas em estufa à 100 ± 5 °C, até constância de massa entre duas determinações (24h), além disso o volume dos CP's foram determinados a partir de suas dimensões. A porosidade foi determinada a partir da Equação 8 de Alam e Haselbach (2014), sendo considerado a média entre as 3 fatias como a porosidade.

$$P = \left(1 - \frac{Cp\ sec\ o - Cpsat}{\frac{pw}{vCP}}\right) \quad (8)$$

Na qual:

P = porosidade (%);

CP seco = massa do CP seco em gramas;

CP sat = massa do CP saturado em gramas;

ρ_w = densidade da água em g/cm³ à 20 C = 0,998g/cm³;

v_{CP} = volume do corpo de prova em cm³.

3.5.2.2 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão ocorreu a partir das recomendações da NBR 5739 (ABNT, 2007), executado em corpos de prova saturados, em prensa hidráulica modelo 23/300 da marca EMIC em equipamento Estrutura de chão de coluna dupla 23/300 com velocidade de aplicação de 0,45 MPa/s, no Laboratório de Segurança Estrutural (LaSE) do Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil (ITT Performance) da Unisinos.

3.5.2.3 Módulo de elasticidade dinâmico

O ensaio de módulo de elasticidade dinâmico ocorreu a partir de especificações técnicas da NBR 8802 (ABNT, 2013) e C597 (ASTM, 2016).

O ensaio para determinação da velocidade de propagação das ondas foi executado em CP's saturados, realizado com o equipamento PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester), que possui frequência de 20 a 500 kHz. O equipamento foi utilizado a uma frequência de 54 kHz, sendo esta também utilizada por Chavhan e Vyawahare, (2015); Jones e Faççoaru, (1969).

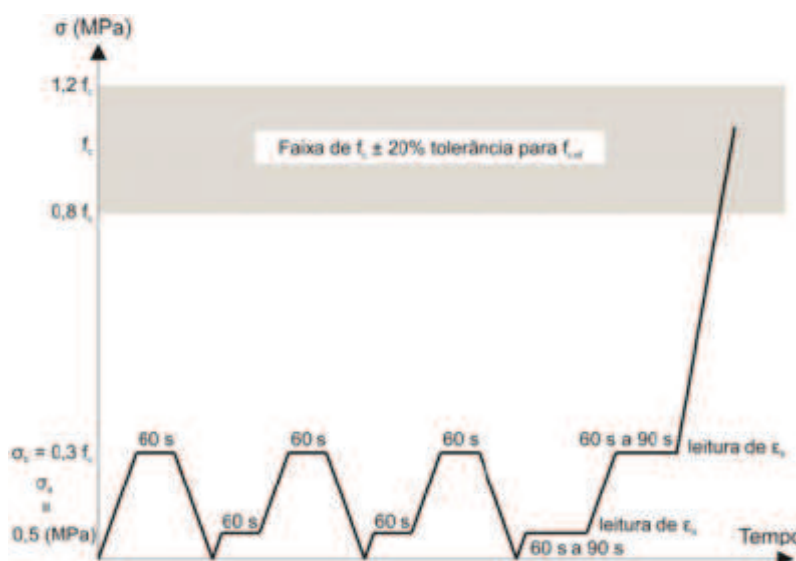
O ensaio foi realizado com o equipamento posicionado no modo de transmissão direta e o mesmo foi calibrado utilizando o cilindro padrão do equipamento a cada 5 corpos de prova ensaiados. Este ensaio foi realizado no LMC.

Após a retirada da câmara de cura, cada exemplar foi submetido a um processo de escoamento do excesso de água da superfície, utilizando panos úmidos por dois minutos. Após, foi aplicado uma camada de vaselina no emissor e no receptor do equipamento de modo a permitir o acoplamento para a passagem da onda ultrassônica entre o corpo de prova, registrando a velocidade de propagação da onda, conforme a Equação 2, enquanto o módulo de elasticidade dinâmico foi calculado a partir da Equação 3.

3.5.2.4 Módulo de elasticidade estático

Para a realização deste ensaio, foi utilizada a mesma prensa citada no ensaio de resistência à compressão e em mesma velocidade de aplicação de carga. Foram utilizados clip gages como medidores de deformação, conforme ilustrado na Figura 3. O ensaio de módulo de elasticidade estático ocorreu com base na NBR 8522 (ABNT, 2017), metodologia A. Para o ensaio de módulo de elasticidade estático um parâmetro de entrada é a resistência à compressão do concreto. Foram utilizados os valores médios de três exemplares, optando-se por eliminar o valor mais elevado e menor. O Gráfico 22 ilustra a metodologia A da NBR 8522 (ABNT, 2017):

Gráfico 22 - Carregamento utilizado para determinação do E_e



Fonte: NBR 8522 (ABNT, 2017).

A partir da execução do procedimento especificado no Gráfico 24, obtém-se parâmetros como: tensão maior; deformação específica sob a tensão maior e tensão básica. O módulo de elasticidade do concreto é obtido a partir da Equação 9, relacionando estes parâmetros obtidos.

$$E_{ci} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\epsilon_b - \epsilon_a} \quad (9)$$

Na qual:

E_{ci} = módulo de elasticidade estático;

σ_b = é a tensão maior, dada em MPa; ($\sigma_b = 0,3 f_{cm}$);

ϵ_b = é a deformação específica média, dos CP's sob a tensão maior;

ϵ_a = é a deformação específica média, dos CP's sob a tensão básica;

0,5 = é o valor da tensão básica, expresso em MPa;

3.5.2.5 Massa específica

Para a determinação da massa específica, foram aferidas as massas e volumes dos corpos de prova (saturados) designados para o ensaio de módulo de elasticidade dinâmico instantes antes do ensaio. A Equação 10 apresenta a forma de cálculo:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (10)$$

Na qual:

ρ = massa específica em (g/cm³);

m = massa do cp saturado em gramas;

v = volume do cp em centímetros cúbicos.

4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados, analisados e discutidos os resultados.

A Tabela 20 apresenta um resumo das principais propriedades dos agregados graúdos utilizados nesta pesquisa, uma vez que algumas dessas propriedades refletem no comportamento inicial e mecânico dos concretos produzidos.

Tabela 20 - Principais propriedades dos agregados graúdos em valores médios

Agregado graúdo	ρ^1 (g/cm³)	ρ^2 aparente (g/cm³)	ρ SSS³ (g/cm³)	Massa unitária (g/cm³)	Absorção de água (%)
RCV	2,47	1,96	2,47	1,02	10,61
ARC20	2,71	2,26	2,42	1,27	7,33
ARC40	2,70	2,27	2,43	1,24	7,01
AGN	2,88	2,75	2,80	1,69	1,63

¹ ρ = massa específica; ² ρ aparente = massa específica aparente; ³ ρ SSS = massa específica do agregado na condição saturado superfície seca.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir da Tabela 20, é possível observar que as absorções de água dos agregados graúdos são diretamente influenciadas pelo tipo de agregado graúdo utilizado; decorrente da maior porosidade interna (poros interligados existentes nos agregados), estimadas a partir da absorção de água, enquanto nas demais propriedades, o agregado graúdo natural apresenta valor maior que dos agregados graúdos reciclados, influenciando as propriedades finais do concreto. Os valores obtidos e apresentados na Tabela 20 estão em conformidade com autores citados na fundamentação teórica desta dissertação, tais como, Chen et al. (2003); Cabral et al. (2010); Hoffmann et al. (2012); Gomes et al. (2014); Bendimerad et al. (2015); Lofti et al. (2015); Anderson et al. (2016); Gholampour e Ozbakkaloglu, (2018).

4.1 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

Foram avaliadas duas propriedades no estado fresco, sendo: consistência da mistura por abatimento do tronco de cone e massa específica. Os resultados obtidos para o ensaio de abatimento por tronco de cone são expostos na Tabela 21 e encontram-se dentro dos limites especificados, de 100 ± 20 mm.

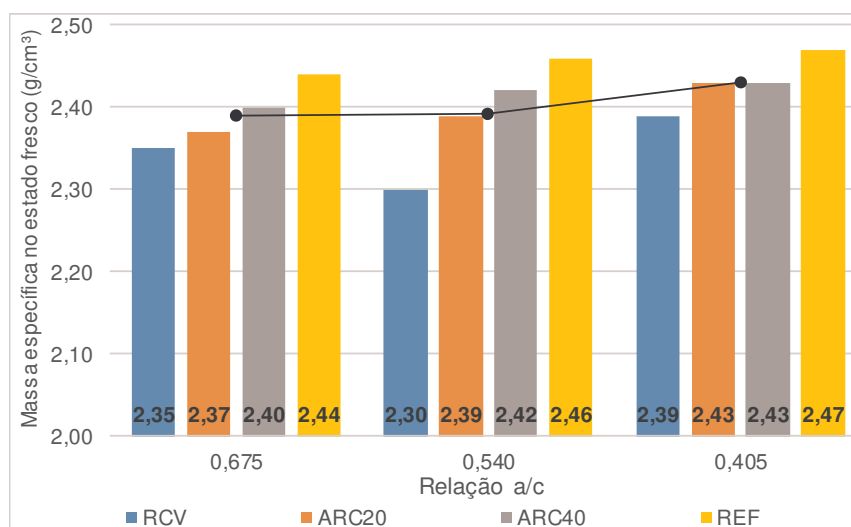
Tabela 21 - Teor de aditivo utilizado e abatimento de tronco de cone do concreto

Concreto	Teor de aditivo (%)	Abatimento (mm)
RCV-POBRE	0,30	110
ARC20-POBRE	0,20	90
ARC40-POBRE	0,20	90
REF-POBRE	-	100
RCV-INT	0,30	120
ARC20-INT	0,20	100
ARC40-INT	0,15	110
REF-INT	-	90
RCV-RICO	0,20	80
ARC20-RICO	0,20	120
ARC40-RICO	0,20	90
REF-RICO	0,10	90

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os traços produzidos com agregados graúdos reciclados de RCV necessitam dos maiores teores de aditivo, algo esperado, já que esse agregado absorve maior quantidade de água da mistura, sendo esse comportamento também observado por Gomes et al. (2014). Os resultados de massa específica no estado fresco estão descritos no Gráfico 23, em função das relações a/c / tipo de concreto.

Gráfico 23 - Massa específica do concreto no estado fresco



Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando os concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de resíduos de cerâmica vermelha, é possível observar que os mesmos apresentam valores inferiores aos demais em cada relação a/c, sendo que esses valores refletem o comportamento das propriedades físicas desses agregados. Os AGRC's (AGRC20 e AGRC40) produziram concretos com massas específicas em todas as relações a/c, bem próximas entre si, o que, por sua vez, era esperado, uma vez que eles possuem massas específicas quase iguais. O concreto produzido inteiramente com agregados naturais (REF), apresenta valores superiores. Os valores obtidos, de forma geral, indicam que as massas específicas dos concretos no estado fresco são proporcionais às massas específicas dos agregados graúdos, estando de acordo com autores como Hoffmann et al. (2012); Seara-Paz et al. (2016); Gholampour e Ozbakkaloglu, (2018); Corominas et al. (2016) e Lotfi et al. (2015).

4.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

As propriedades avaliadas no estado endurecido estão descritas na Tabela 22. Os valores individuais dos CP's são apresentados nos APÊNDICES A e B, além de que os desvios padrão e coeficientes de variação no APÊNDICE C.

Tabela 22 - Principais propriedades dos concretos no estado endurecido:

Relação a/c	Concreto	fcm ¹ (MPa)	Ed ² (GPa)	Ee ³ (GPa)	ρ sat ⁴ (g/cm ³)	Porosidade (%)
0,675	RCV	32,0	44,6	32,6	2,41	6,40
	ARC20	30,4	45,5	37,4	2,42	6,23
	ARC40	31,6	45,5	38,3	2,44	6,34
	REF	33,4	58,0	36,5	2,55	5,99
0,540	RCV	43,6	46,7	33,5	2,45	5,79
	ARC20	42,3	50,2	38,0	2,46	5,95
	ARC40	41,8	50,8	38,3	2,51	6,03
	REF	40,4	62,2	40,1	2,59	5,79
0,405	RCV	52,7	47,2	37,2	2,49	5,72
	ARC20	46,2	50,6	42,2	2,47	5,69
	ARC40	47,2	49,9	41,3	2,47	5,45
	REF	46,6	65,0	43,5	2,60	5,55

¹fcm= resistência à compressão; ² Ed = módulo de elasticidade dinâmico; ³Ee = módulo de

elasticidade estático; ⁴ ρ_{sat} = massa específica do concreto.

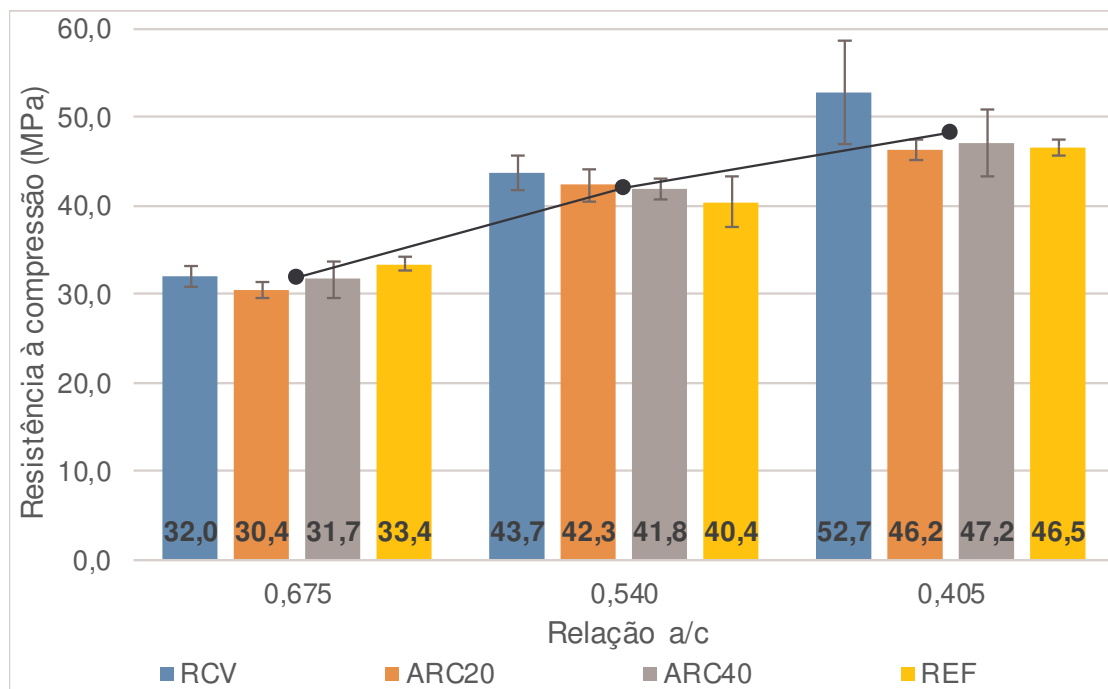
Fonte: Elaborada pelo autor.

As características dos agregados graúdos reciclados apresentadas na Tabela 20 influenciam os resultados das propriedades dos concretos, descritos na Tabela 22 e no item 4.1. Devido à importância de cada uma das propriedades do concreto no estado endurecido, elas são apresentadas, analisadas e discutidas individualmente a seguir nos subitens da seção 4.2. Além disso, serão apresentadas as análises por regressão linear simples em função do módulo de elasticidade dinâmico e do módulo de elasticidade estático nos subitens da seção 4.3.

4.2.1 Resistência à compressão

No Gráfico 24, a seguir, é visualizada a influência do tipo de agregado graúdo na resistência à compressão do concreto nas três relações água/cimento definidas no programa experimental.

Gráfico 24 - Resistência à compressão



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir do Gráfico 24, observa-se uma tendência de acréscimo nos valores de resistência à compressão com a diminuição da relação a/c.

A Tabela 23 descreve a análise de variância (ANOVA) da resistência à compressão para as distintas relações a/c, de modo a verificar se os conjuntos de dados apresentam diferenças, estatisticamente, significativas.

Tabela 23 - Anova da resistência à compressão

Relação a/c	Fonte da variação	gl ¹	SQ ²	MQ ³	F valor ⁴	ANOVA ⁵
0,675	Modelo	3	16,9	5,6	2,8	0,076
	Erro	14	27,8	2,0		
	Total	17	44,7			
0,540	Modelo	3	21,4	7,1	2,0	0,154
	Erro	14	48,7	3,5		
	Total	17	70,0			
0,405	Modelo	3	137,0	45,7	3,2	0,056
	Erro	14	199,0	14,2		
	Total	17	336,0			

¹gl = grau de liberdade; ²SQ = soma quadrada; ³MQ = média quadrada; ⁴F valor; ⁵ANOVA = análise de variância.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Mesmo com os resultados de ANOVA, indicando que não existem diferenças significativas entre os concretos produzidos dentro de cada grupo, pode-se observar algumas tendências de comportamento, tais como: o concreto produzido com AGRCV apresentou valores de resistência à compressão superior aos outros concretos, algo observado também por Awoyera et al. (2016); Gomes et al. (2014); Anderson et al. (2016). Uma hipótese que ajuda a explicar esse comportamento consiste na possível redução da granulometria do AGRCV. De forma empírica, notou-se que durante a mistura do concreto os agregados graúdos cerâmicos eram esmagados devido à sua baixa resistência. Dessa forma, as menores dimensões do agregado graúdo cerâmico podem ter promovido melhora no concreto devido a uma melhora na curva granulométrica do agregado, além disso o fato de não ter sido utilizado um método de compensação de absorção de água nos agregados reciclados pode ter ocasionado na absorção de uma parte da água da argamassa, reduzindo, assim, a relação a/c.

Uma outra constatação feita é que o agregado graúdo natural, utilizado no concreto REF, não resultou em concretos com maior resistência em relação aos

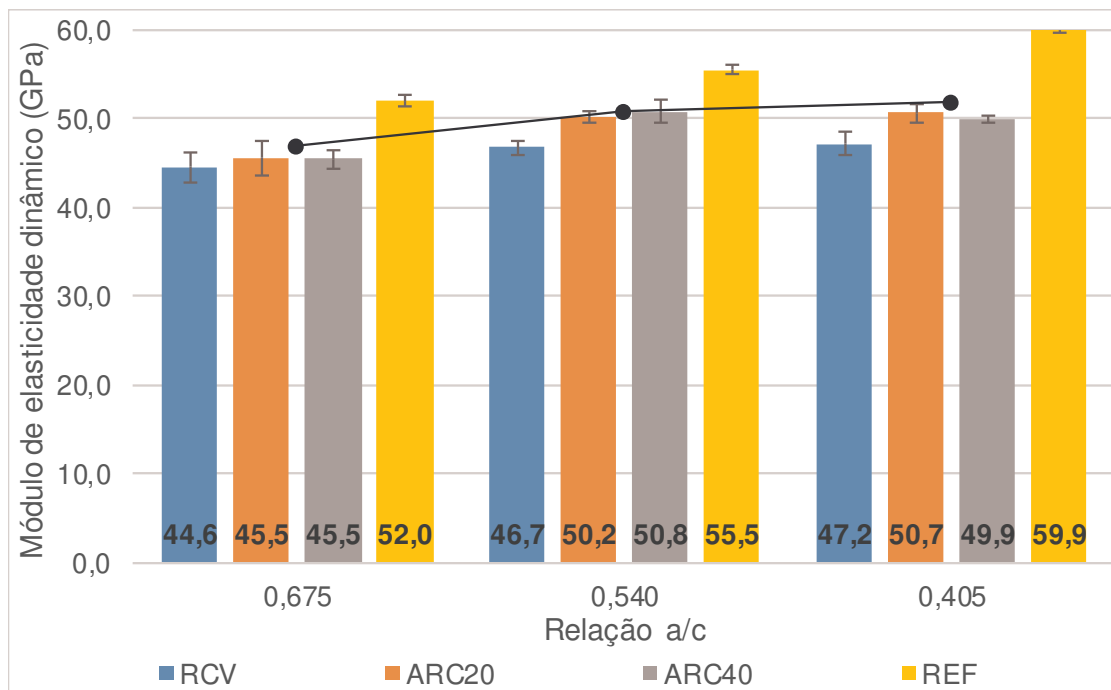
demais. O concreto com RCV apresentou resistência superior com acréscimo variando entre 0,9% (na maior relação a/c, comparado ao ARC40) e 12,3% comparado ao ARC20 na relação a/c 0,405, apesar desse comportamento não ter refletido no módulo de elasticidade do concreto, que posteriormente é discutido.

Ademais, é importante destacar que os concretos produzidos com AGRC alcançaram resistências muito próximas nas três relações a/c. Autores como Andreu e Miren, (2014) e Adams et al. (2016) também alcançaram comportamento similar. Isso pode ser explicado a partir da Tabela 20 na qual todas as propriedades avaliadas desses AGRC apresentaram valores similares, tendo uma diferença de no máximo 1% entre eles, resultando em concretos de comportamento semelhante.

4.2.2 Módulo de elasticidade dinâmico

No Gráfico 25, a seguir, é visualizada a influência do tipo de agregado graúdo no módulo de elasticidade dinâmico do concreto nas três relações água/cimento definidas no programa experimental.

Gráfico 25 - Módulo de elasticidade dinâmico



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir do Gráfico 25, observa-se uma pequena tendência de acréscimo nos valores de módulo de elasticidade dinâmico em função da redução da relação a/c.

Em uma mesma relação a/c, é possível notar valores similares entre os concretos produzidos com agregados reciclados, enquanto o concreto referência apresenta, sempre, módulo de elasticidade dinâmico superior aos demais. Esse comportamento já era esperado e também foi observado em estudo de Omary et al. (2016), no qual o uso de agregados graúdos reciclados promoveu decréscimos nos valores. O concreto produzido com AGRCV apresentou módulo de elasticidade dinâmico inferior aos demais, enquanto o concreto referência apresentou módulo de elasticidade dinâmico superior, com acréscimo entre 8,46% em relação a/c 0,540, comparado ao ARC40 e 21,3% comparado ao RCV, em relação a/c 0,405. Este comportamento também foi observado por Gujel (2014), onde a autora obteve decréscimos nos valores de módulo de elasticidade dinâmico, dos concretos produzidos com agregados graúdos reciclados.

A Tabela 24 apresenta a análise de variância (ANOVA) do módulo de elasticidade dinâmico para as distintas relações a/c, de modo a verificar se os conjuntos de dados apresentam diferenças, estatisticamente, significativas.

Tabela 24 - Anova do módulo de elasticidade dinâmico

Relação a/c	Fonte da variação	gl ¹	SQ ²	MQ ³	F valor ⁴	ANOVA ⁵
0,675	Modelo	3	117,6	39,2	18,3	
	Erro	14	30,0	2,1		0,00004
	Total	17	147,6			
0,540	Modelo	3	145,8	48,6	61,8	
	Erro	14	11,0	0,8		2,56E-8
	Total	17	156,8			
0,405	Modelo	3	319,8	106,6	128,2	
	Erro	14	11,6	0,8		2,04E-10
	Total	17	331,4			

¹gl = grau de liberdade; ²SQ = soma quadrada; ³MQ = média quadrada; ⁴F valor; ⁵ANOVA = análise de variância.

Fonte: Elaborada pelo autor.

É possível constatar que existem diferenças expressivas em todas as relações a/c. Uma vez que as diferenças são significativas, procede-se com o teste Tukey, de modo a indicar em quais concretos essas diferenças são significativas, sendo apresentadas na Tabela 25.

Tabela 25 - Teste Tukey do módulo de elasticidade dinâmico

Relação a/c	Concreto comparado	Diferença entre médias	Probabilidade de ocorrência	≠ significativas?
0,675	REF VS RCV	7,38	3,84977E-5	Sim
	REF VS ARC20	6,45	1,60071E-4	Sim
	REF VS ARC40	6,50	1,48939E-4	Sim
	ARC20 VS RCV	0,93	0,75	Não
	ARC40 VS RCV	0,78	0,78	Não
	ARC40 VS ARC20	-0,04	0,99996	Não
0,540	REF VS RCV	8,76	0	Sim
	REF VS ARC20	5,30	5,74234E-6	Sim
	REF VS ARC40	4,69	2,26139E-5	Sim
	ARC20 VS RCV	3,46	1,27225E-4	Sim
	ARC40 VS RCV	4,07	2,24164E-5	Sim
	ARC40 VS ARC20	0,60	0,73	Não
0,405	REF VS RCV	12,76	0	Sim
	REF VS ARC20	9,31	0	Sim
	REF VS ARC40	10,08	0	Sim
	ARC20 VS RCV	3,44	0,00017	Sim
	ARC40 VS RCV	2,68	0,0019	Sim
	ARC40 VS ARC20	-0,76	0,56	Não

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na relação a/c 0,675, os concretos produzidos com agregados graúdos reciclados não apresentam diferenças significativas entre si. Comparando o concreto referência aos demais, verifica-se que estes apresentam diferenças significativas, o que já era esperado, uma vez que os agregados graúdos reciclados possuem menores massas específicas e maiores índices de absorção de água, influenciando os valores de módulo de elasticidade dinâmico.

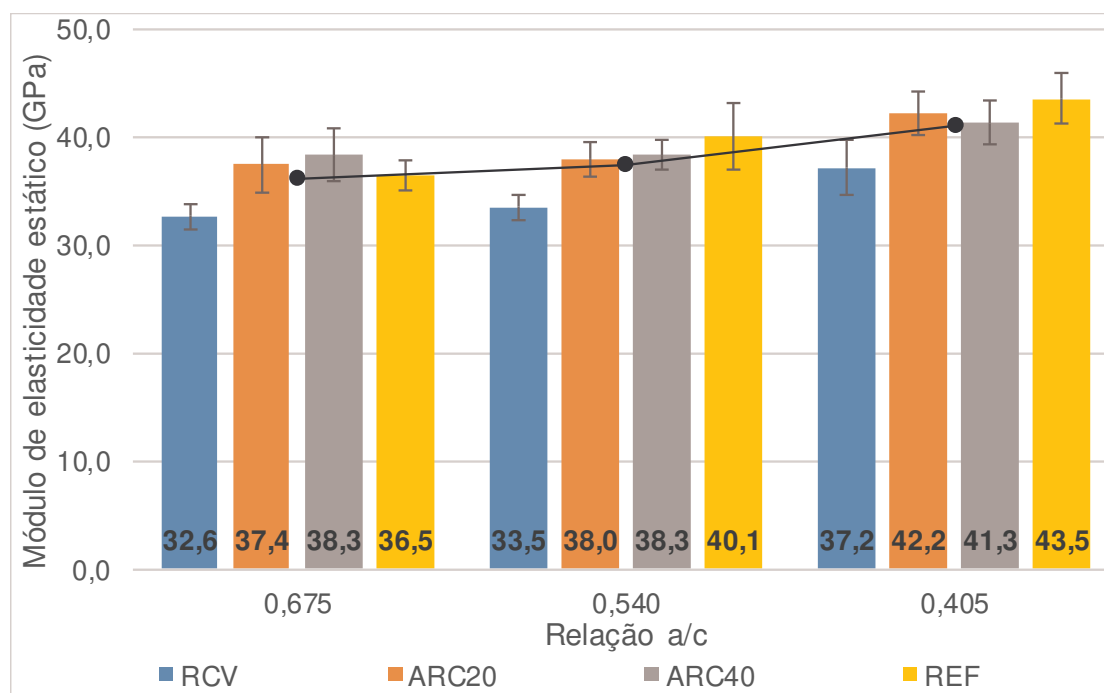
No traço intermediário, os concretos ARC20 e ARC40 não apresentam diferenças significativas entre si, enquanto todos os demais são, estatisticamente, diferentes entre si. Na relação a/c 0,405, assim como no traço intermediário, apenas nos casos das misturas ARC20 e ARC40, pode-se perceber que não existem diferenças significativas entre si.

Todos os concretos produzidos com agregados graúdos reciclados apresentam consideráveis diferenças em relação ao concreto referência, indicando que o uso de agregados graúdos reciclados influenciou, significativamente, no módulo de elasticidade dinâmico dos concretos produzidos.

4.2.3 Módulo de elasticidade estático

No Gráfico 26, a seguir, é visualizada a influência do tipo de agregado graúdo no módulo de elasticidade estático do concreto, nas três relações água/cimento definidas no programa experimental e explicitadas na Tabela 22

Gráfico 26 - Módulo de elasticidade estático



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir do Gráfico 26, observa-se uma pequena tendência de acréscimo nos valores de módulo de elasticidade estático em função da redução da relação a/c.

De modo geral, o concreto RCV apresenta módulo de elasticidade estático inferior quando comparado ao concreto referência, variando entre 10,7 e 16,5% na relação a/c 0,675 e 0,540 respectivamente. Esse comportamento foi obtido por autores como Chen et al. (2003) e Gomes et al. (2014). Os concretos ARC20 e ARC40 apresentaram bastante similaridade entre si, enquanto o concreto REF possui módulo de elasticidade estático superior aos demais nas relações a/c 0,54 e

0,405, enquanto, excepcionalmente na relação 0,675, apresentou valor inferior aos concretos ARC20 e ARC40.

A Tabela 26 apresenta a análise de variância (ANOVA) do módulo de elasticidade estático para as distintas relações a/c, de modo a verificar se os conjuntos de dados apresentam diferenças, estatisticamente, significativas.

Tabela 26 - Anova do módulo de elasticidade estático

Relação a/c	Fonte da variação	gl ¹	SQ ²	MQ ³	F valor ⁴	ANOVA ⁵
0,675	Modelo	3	92,95	30,98	7,26	
	Erro	14	59,74	4,27		0,00357
	Total	17	152,69			
0,540	Modelo	3	102,44	34,14	11,24	
	Erro	14	42,54	3,04		0,00051
	Total	17	144,97			
0,405	Modelo	3	109,49	36,50	7,23	
	Erro	14	70,64	5,05		0,00363
	Total	17	180,13			

¹gl = grau de liberdade; ²SQ = soma quadrada; ³MQ = média quadrada; ⁴F valor; ⁵ANOVA = análise de variância.

Fonte: Elaborada pelo autor.

É possível constatar que existem diferenças significativas em todas as relações a/c. Uma vez que as diferenças são significativas, procede-se com o teste Tukey, de modo a indicar entre quais concretos essas diferenças são significativas, sendo estas apresentadas na Tabela 27.

Tabela 27 - Teste Tukey do módulo de elasticidade estático

Relação a/c	Concreto comparado	Diferença entre médias	Probabilidade de ocorrência	≠ significativas?
0,675	REF VS RCV	3,85	0,09457	Não
	REF VS ARC20	-0,93	0,92526	Não
	REF VS ARC40	-1,80	0,63869	Não
	ARC20 VS RCV	4,78	0,01222	Sim
	ARC40 VS RCV	5,65	0,00343	Sim
	ARC40 VS ARC20	0,88	0,90646	Não
0,540	REF VS RCV	6,58	0,00073	Sim

	REF VS ARC20	2,10	0,38503	Não
	REF VS ARC40	1,77	0,52291	Não
	ARC20 VS RCV	4,48	0,00565	Sim
	ARC40 VS RCV	4,80	0,00324	Sim
	ARC40 VS ARC20	0,32	0,99077	Não
	REF VS RCV	6,95	0,00408	Sim
	REF VS ARC20	1,94	0,64872	Não
0,405	REF VS ARC40	2,86	0,33786	Não
	ARC20 VS RCV	5,01	0,01559	Sim
	ARC40 VS RCV	4,08	0,05301	Não
	ARC40 VS ARC20	-0,93	0,91218	Não

Fonte: Elaborada pelo autor.

No traço pobre, o concreto referência não apresenta diferenças significativas para os concretos produzidos com agregados graúdos reciclados, sendo este comportamento visualizado nos resultados obtidos por Adams et al. (2016). Nos traços intermediário e rico, os concretos apresentaram diferenças significativas ao concreto produzido com agregados graúdos reciclados de resíduos de cerâmica vermelha, algo similar aos estudos dos autores Andreu e Miren, (2014); Fonteboa et al. (2011); Seara-paz et al. (2016). Comparando os concretos ARC20 e ARC40 ao concreto RCV, é possível notar que existem diferenças significativas.

Em relação ao traço intermediário, os concretos REF; ARC20 e ARC40 não apresentam diferenças significativas, entre si. Comparando o concreto RCV com os demais existem.

No traço rico, assim como no traço intermediário, REF; ARC20 e ARC40 não apresentam diferenças significativas entre si, entretanto comparando o concreto produzido com RCV com o concreto REF e ARC20 é possível notar que eles apresentam diferenças significativas.

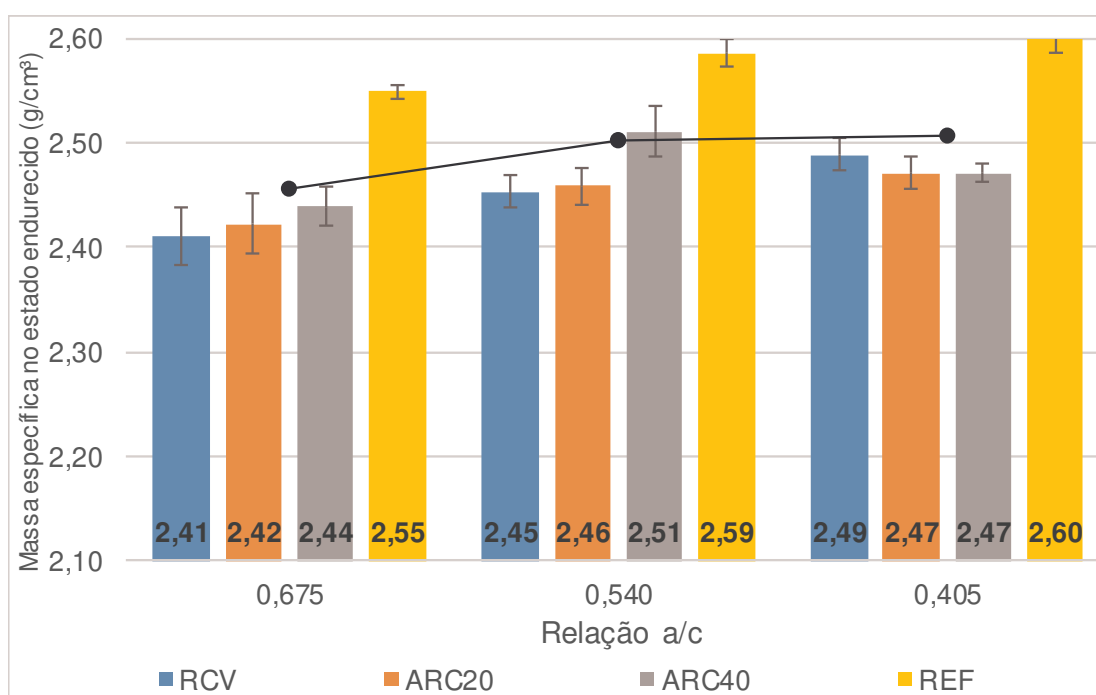
De modo geral é possível perceber que o uso de agregado graúdo reciclado de cerâmica vermelha mesmo em taxa de substituição de 30%, foi o suficiente para conduzir a decréscimos nos valores de módulo de elasticidade estático, comparando-os ao concreto referência, sendo estes valores fortemente relacionados às propriedades dos agregados graúdos reciclados, apresentadas na Tabela 20, indicando que o uso de agregados graúdos reciclados de resíduos cerâmicos influenciou, significativamente, no módulo de elasticidade dinâmico dos concretos

produzidos, excepcionalmente a maior relação a/c não teve decréscimos expressivos.

4.2.4 Massa específica no estado endurecido

No Gráfico 27, a seguir, é visualizada a influência do tipo de agregado graúdo na massa específica do concreto (saturado) no estado endurecido nas três relações água/cimento definidas no programa experimental e explicitadas na Tabela 22.

Gráfico 27 - Massa específica do concreto saturado



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir do Gráfico 27, observa-se que os valores entre as relações a/c 0,540 e 0,405 praticamente não tiveram acréscimos, comportamento não esperado, uma vez que se espera que menores relações a/c se alcancem os maiores valores de massa específica.

Os concretos produzidos inteiramente com agregados graúdos naturais apresentam valores de massas específicas no estado endurecido, superiores aos demais em aproximadamente 6%. O comportamento nas três relações a/c, de modo geral, está de acordo com autores, tais como: Rahal (2007); Etxeberria et al, (2007); Fonteboa et al, (2011); Thomas et al. (2013); Andreu e Miren (2014); Gomes et al.,

(2014); Dilbas et al, (2016); Leite e Monteiro, (2016); Seara-Paz et al, (2016); Corominas et al, (2016); Gholampour e Ozbakkaloglu, (2018).

A Tabela 28 apresenta a análise de variância (ANOVA) da massa específica do concreto no estado endurecido para as distintas relações a/c, de modo a verificar se os conjuntos de dados apresentam diferenças, estatisticamente, significativas.

Tabela 28 - Anova da massa específica do concreto saturado

Relação a/c	Fonte da variação	gl ¹	SQ ²	MQ ³	F valor ⁴	ANOVA ⁵
0,675	Modelo	3	0,041	0,014	25,52	
	Erro	14	0,007	0,0005		6,15752E-6
	Total	17	0,049			
0,540	Modelo	3	0,042	0,014	39,17	
	Erro	14	0,005	0,0004		4,63636E-7
	Total	17	0,046			
0,405	Modelo	3	0,031	0,0104	59,12	
	Erro	14	0,002	0,0002		3,40578E-8
	Total	17	0,034			

¹gl = grau de liberdade; ²SQ = soma quadrada; ³MQ = média quadrada; ⁴F valor;

⁵ANOVA = análise de variância.

Fonte: Elaborada pelo autor.

É possível constatar que existem diferenças significativas em todas as relações a/c. Uma vez que as diferenças são significativas, procede-se com o teste Tukey, de modo a indicar entre quais concretos essas diferenças são significativas, sendo estas apresentadas na Tabela 29.

Tabela 29 - Test Tukey da massa específica do concreto saturado

Relação a/c	Concreto comparado	Diferença entre médias	Probabilidade	≠ significativas
0,675	REF VS RCV	0,14	5,64137E-6	Sim
	REF VS ARC20	0,13	1,56736E-5	Sim
	REF VS ARC40	0,11	8,34947E-5	Sim
	ARC20 VS RCV	0,01	0,845822	Não
	ARC40 VS RCV	0,03	0,220065	Não
	ARC40 VS ARC20	0,02	0,62237	Não

	REF VS RCV	0,13	7,57601E-7	Sim
	REF VS ARC20	0,13	2,92027E-6	Sim
	REF VS ARC40	0,08	3,79754E-4	Sim
0,540	ARC20 VS RCV	0,00	0,97398	Não
	ARC40 VS RCV	0,06	0,00143	Sim
	ARC40 VS ARC20	0,05	0,00313	Sim
	REF VS RCV	0,10	3,04619E-7	Sim
	REF VS ARC20	0,12	2,37393E-8	Sim
	REF VS ARC40	0,12	2,37393E-8	Sim
0,405	ARC20 VS RCV	0,02	0,2669	Não
	ARC40 VS RCV	0,02	0,2669	Não
	ARC40 VS ARC20	0,00	1	Não

Fonte: Elaborada pelo autor.

De modo geral é possível perceber, a partir do teste Tukey, que os concretos produzidos inteiramente com agregados graúdos naturais apresentam diferenças significativas de massa específica no estado endurecido, em relação aos concretos produzidos com agregados graúdos reciclados, mesmo em taxa de substituição, de agregados graúdos reciclados por agregados graúdos naturais, de 30%.

Alguns apontamentos podem ser destacados, tais como: na relação a/c 0,540, o concreto referência apresenta diferenças significativas para os concretos produzidos com agregados graúdos reciclados, enquanto os concretos ARC20 e RCV não possuem diferenças, significativas, entre si. Cabe destacar que excepcionalmente nessa relação a/c os concretos ARC20 e ARC40 apresentam diferenças significativas, algo que não foi presente em outras propriedades do concreto, muito provavelmente o valor dentre esses concretos que apresentou comportamento inesperado foi o ARC40, uma vez que no traço rico eles dois alcançaram o mesmo valor de massa específica. Contudo o ARC40 decresce em comparação ao valor obtido no traço intermediário, ocasionando esse comportamento inesperado.

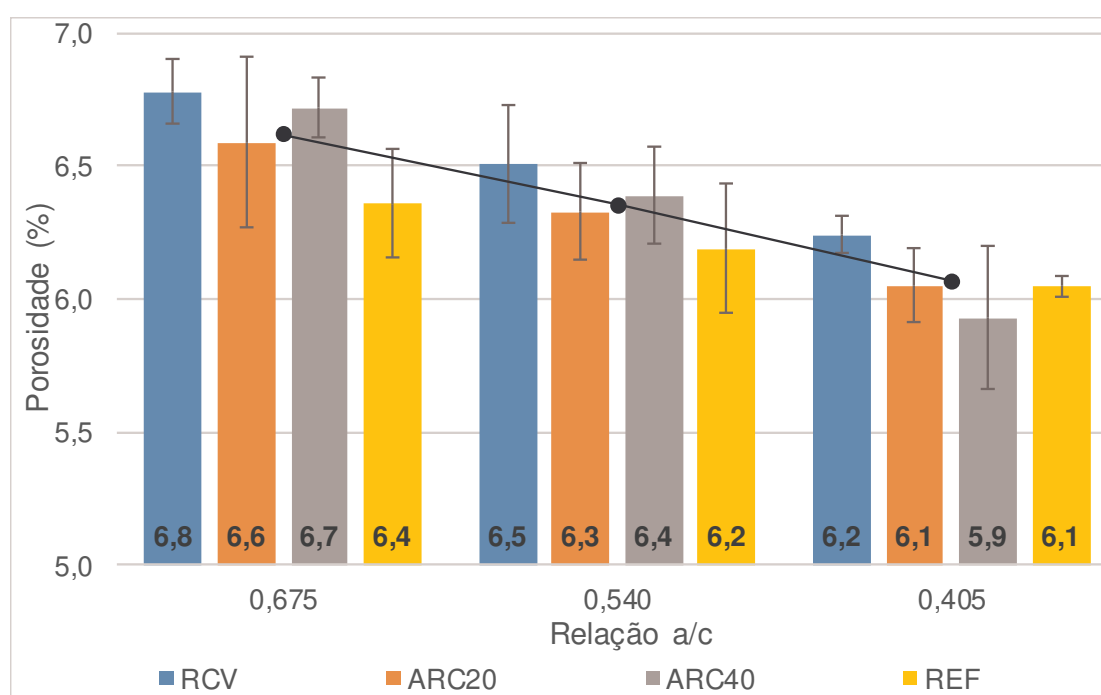
Nas relações a/c 0,405 e 0,675, os concretos produzidos com ARC20, ARC40 e RCV não apresentam diferenças significativas entre si, o que por sua vez indica

que para essas relações a/c o tipo de agregado graúdo reciclado utilizado para a produção de concreto não influencia os valores de massa específica.

4.2.5 Porosidade do concreto

No Gráfico 28, a seguir, é visualizada a influência do tipo de agregado graúdo na porosidade do concreto, nas três relações água/cimento definidas no programa experimental e explicitadas na Tabela 22.

Gráfico 28 - Porosidade do concreto



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir do Gráfico 28, observa-se uma tendência de decréscimo nos valores das porosidades em função da redução da relação a/c.

A Tabela 30 apresenta ANOVA para as diferentes relações a/c em função da porosidade, para verificar se os dados apresentam diferenças significativas.

Tabela 30 - Anova da porosidade do concreto

Relação a/c	Fonte da variação	gl ¹	SQ ²	MQ ³	F valor ⁴	ANOVA ⁵
0,675	Modelo	3	0,312	0,104	2,42	0,14119
	Erro	8	0,344	0,043		
	Total	11	0,656			

	Modelo	3	0,160	0,053	1,23	
0,540	Erro	8	0,347	0,043		0,35951
	Total	11	0,507			
	Modelo	3	0,157	0,052	2,06	
0,405	Erro	8	0,203	0,025		0,18348
	Total	11	0,360			

¹gl = grau de liberdade; ²SQ = soma quadrada; ³MQ = média quadrada; ⁴F valor; ⁵ANOVA = análise de variância.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se que apesar de existirem diferenças numéricas entre as porosidades nas relações a/c , conforme apresentado no Gráfico 28, a análise de variância não identifica diferenças significativas entre os valores. Entretanto, deve ser destacado que o comportamento (levando em consideração as tendências) geral dos concretos, mesmo com porosidades inferiores às esperadas, estão similares com estudos de Andre e Miren (2014); Silva et al. (2016); Thomas et al. (2013). Os valores de porosidade estão descritos no APÊNDICE B deste trabalho.

4.3 ANÁLISE POR REGRESSÃO LINEAR SIMPLES

Nesse item são apresentadas as análises por regressão linear simples com os módulos de elasticidade como variáveis dependentes e as demais propriedades citadas no item 4.2 como variáveis de resposta; a análise por regressão linear simples entre o módulo de elasticidade estático como variável dependente e módulo de elasticidade dinâmico como variável de resposta; além da análise por regressão linear simples entre módulo de elasticidade estático, como variável dependente, e das equações algébricas (variáveis de resposta) obtidas a partir das normas e equações algébricas obtidas a partir de estudos da literatura, apresentadas nas Tabela 3 e Tabela 4, respectivamente.

4.3.1 Módulos de elasticidade em função da resistência à compressão

Com o intuito de relacionar os módulos de elasticidade e a resistência à compressão, foi realizada a análise por regressão linear simples, sendo os valores obtidos por meio dessa análise apresentados na Tabela 31.

Tabela 31 - Regressão linear simples entre os módulos de elasticidade e o fcm

Tipo de módulo	Concreto	Fonte da variação	gl¹	SQ²	MQ³	F⁴	F de significação⁵
Módulo de elasticidade dinâmico	RCV	Regressão	1	17,44	17,44	10,50	
		Resíduo	13	21,59	1,66		0,006
		Total	14	39,04			
	ARC20	Regressão	1	77,58	77,58	47,55	
		Resíduo	13	21,21	1,63		0,00001
		Total	14	98,79			
	ARC40	Regressão	1	61,06	61,06	25,45	
		Resíduo	13	31,19	2,40		0,0002
		Total	14	92,25			
	REF	Regressão	1	92,36	92,36	140,71	
		Resíduo	7	4,59	0,66		6,9E-06
		Total	8	96,95			
Módulo de elasticidade estático	RCV	Regressão	1	48,84	48,84	13,80	
		Resíduo	13	46,00	3,54		0,003
		Total	14	94,84			
	ARC20	Regressão	1	40,21	40,21	6,38	
		Resíduo	13	81,91	6,30		0,025
		Total	14	122,12			
	ARC40	Regressão	1	17,31	17,31	3,73	
		Resíduo	13	60,34	4,64		0,076
		Total	14	77,64			
	REF	Regressão	1	48,84	48,84	13,80	
		Resíduo	13	46,00	3,54		0,003
		Total	14	94,84			

¹gl = grau de liberdade; ²SQ = soma quadrada; ³MQ = média quadrada; ⁴F= valor de F;

⁵F de significação = interação entre as variáveis.

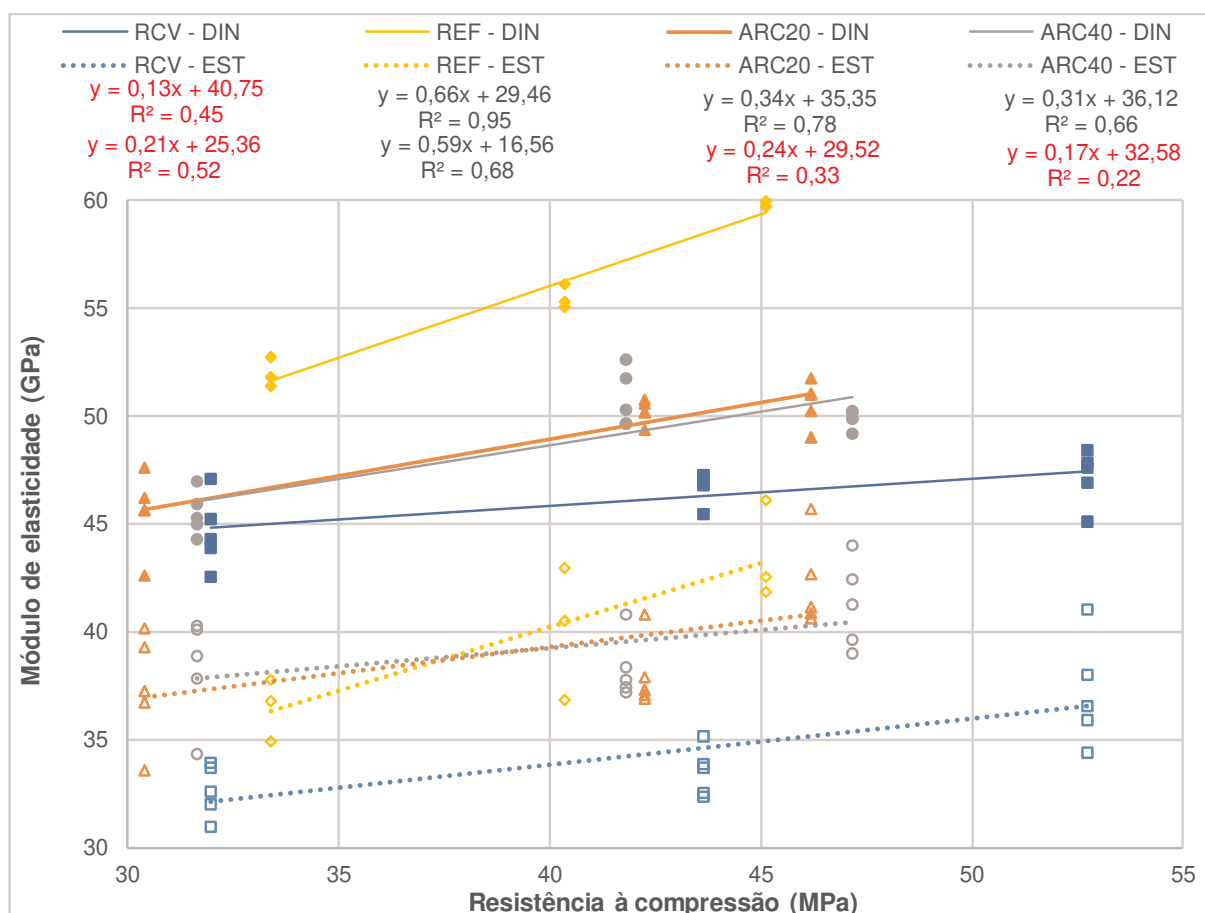
Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir da análise estatística, percebe-se que, de modo geral, a resistência à compressão é fortemente relacionada aos módulos de elasticidade do concreto,

exceto no concreto ARC40 onde não existe relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade estático.

De posse da análise estatística, é apresentado no Gráfico 29 um modelo estatístico linear generalizado, apresentando as equações das retas e os coeficientes de determinação em função dos tipos de módulo de elasticidade e dos tipos de agregados graúdos utilizados na produção dos concretos.

Gráfico 29 - Módulos de elasticidade em função da resistência à compressão¹



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os coeficientes de determinação e coeficientes angulares dos concretos variam em função do agregado graúdo e do tipo de módulo de elasticidade.

A partir do Gráfico 29, é possível perceber no módulo de elasticidade dinâmico que existem três grupos de comportamentos, sendo um formado pelo concreto REF, o segundo formado pelo concreto ARC20/40 e por fim o concreto RCV. Provavelmente os menores valores obtidos pelos concretos produzidos com

¹ Os valores de coeficientes de determinação destacados em vermelho são muito baixos e, portanto, a reta não representa adequadamente o comportamento do fenômeno estudado.

agregados graúdos reciclados, em comparação ao concreto referência, têm relação com a maior porosidade dos agregados reciclados, que em certa medida faz com que as velocidades de passagem das ondas sejam menores. Lee et al. (2017) citam que as ondas de ultrassom se movem paralelas à direção da emissão dos pulsos e podem se propagar em meios sólidos, líquidos e gasosos. Sendo assim a porosidade dos agregados graúdos, inferem na duração do percurso das ondas ultrassônicas entre o emissor e receptor do pulso elétrico, o que acarreta em velocidades distintas a depender da estrutura interna do concreto.

Em relação ao módulo de elasticidade estático, é possível perceber que o comportamento muda, sendo visível dois grupos de comportamentos. O primeiro grupo é formado pelo concreto referência e concretos produzidos com ARC20 e ARC40; o outro grupo com o concreto produzido com RCV. Nota-se que a partir da resistência de 38 MPa o concreto referência apresenta valores de E_e superior aos concretos produzidos com agregados graúdos reciclados. Provavelmente os menores valores obtidos pelos concretos produzidos com agregados graúdos reciclados, conforme citam Xiao et al. (2018), devem-se a menor capacidade destes de suportarem deformações. Os autores monitoraram as deformações impostas aos concretos produzidos com agregados graúdos reciclados (diagrama tensão-deformação), constatando que para mesmas resistências à compressão o módulo de elasticidade do concreto referência era significativamente maior que o módulo de elasticidade do concreto produzido com agregado graúdo reciclado, sendo esse fenômeno creditado aos elevados valores de deformação do agregado graúdo reciclado. Esse comportamento obtido pelos autores se intensificou ao elevarem o percentual de substituição de agregados graúdos reciclados por agregados graúdos naturais, sendo a tendência observada linear, confirmando que o concreto produzido com agregados graúdos reciclados possui propriedades que conduzem a maiores deformações em comparação ao concreto produzido com AGN.

Conforme visto na Tabela 31, o concreto RCV apresenta relação entre a resistência à compressão e módulo de elasticidade, obtendo 45 e 52% dos dados explicados para o módulo de elasticidade dinâmico e estático, respectivamente. A partir dos coeficientes angulares do concreto RCV, é possível constatar uma maior relação entre resistência à compressão e módulo de elasticidade estático, isso pode ser explicado a partir dos resultados obtidos na Tabela 31, em que o valor F de significação, para o módulo de elasticidade estático, é mais próximo de 0. É possível

observar que os concretos produzidos com AGRCV apresentam os menores módulos de elasticidade, algo já esperado devido a maior porosidade, menor massa específica e maior absorção de água propiciarem um concreto com matriz da pasta de cimento de menor resistência e, por conseguinte de menor rigidez, influenciando diretamente na velocidade de passagem das ondas ultrassônicas (menor módulo de elasticidade dinâmico), além de influenciarem na capacidade destes de suportarem às deformações (menor módulo de elasticidade estático).

Os concretos ARC20 e ARC40 apresentam retas que se sobrepõe uma à outra. Os coeficientes de determinação em relação ao módulo de elasticidade dinâmico são de 0,78 e 0,66, enquanto para o módulo de elasticidade estático os coeficientes são de 0,33 e 0,22, respectivamente. De forma geral, a partir dos coeficientes angulares apresentados no Gráfico 29, é possível notar que a resistência à compressão dos concretos ARC20 e ARC40 possuem maior relação com o módulo dinâmico, isso pode ser confirmado a partir da análise estatística apresentada na Tabela 31, em que o valor F de significação para o módulo de elasticidade dinâmico se aproxima mais de 0.

O concreto REF possui os maiores coeficientes de determinação da reta, representando 95 e 68% dos dados para o módulo dinâmico e estático respectivamente. Além disso, em ambos os módulos, os valores dos coeficientes angulares foram maiores, ao passo que os valores F de significação, expostos na Tabela 31, foram os menores, o que pode ser atribuído ao fato desses (concretos REF's) serem mais homogêneos que os concretos produzidos com AGR.

Os valores de módulo de elasticidade dinâmico para uma mesma resistência à compressão dos concretos REF's são superiores aos concretos produzidos com AGR, sendo por exemplo, para uma f_{cm} de 35 MPa o RCV possui E_d de 45 GPa, ARC20/40 de 47 GPa e concreto REF de 53 GPa. Esse comportamento mostrou-se similar ao efetuar testes comparativos em outras classes de resistência à compressão, além, também, de ter mostrado comportamento similar em relação ao módulo de elasticidade estático exceto em resistências de até 37 MPa, onde o RCV possui E_e de 33 GPa, ARC20/40 de 38 GPa e concreto REF de 37 GPa, sendo assim, de forma geral, os concretos produzidos com agregados graúdos reciclados influenciam a capacidade de deformação do concreto (menores módulos estáticos).

4.3.2 Módulos de elasticidade em função da porosidade do concreto

Com o intuito de relacionar o módulo de elasticidade e a porosidade do concreto, foi realizada análise por regressão linear simples entre as duas propriedades, sendo esta, apresentada a seguir na Tabela 32.

Tabela 32 - Regressão linear simples entre os módulos de elasticidade e porosidade

Tipo de módulo	Concreto	Fonte da variação	gl ¹	SQ ²	MQ ³	F ⁴	F de significação ⁵
Módulo de elasticidade dinâmico	RCV	Regressão	1	16,00	16,00	9,03	
		Resíduo	13	23,04	1,77		0,01
		Total	14	39,04			
	ARC20	Regressão	1	57,08	57,08	17,79	
		Resíduo	13	41,71	3,21		0,001
		Total	14	98,79			
	ARC40	Regressão	1	36,33	36,33	8,45	
		Resíduo	13	55,92	4,30		0,01
		Total	14	92,25			
	REF	Regressão	1	94,86	94,86	316,64	
		Resíduo	7	2,10	0,30		4,4E-07
		Total	8	96,95			
Módulo de elasticidade estático	RCV	Regressão	1	11,67	11,67	1,82	
		Resíduo	13	83,17	6,40		0,20
		Total	14	94,84			
	ARC20	Regressão	1	62,25	62,25	13,52	
		Resíduo	13	59,87	4,61		0,003
		Total	14	122,12			
	ARC40	Regressão	1	25,38	25,38	6,31	
		Resíduo	13	52,27	4,02		0,026
		Total	14	77,64			
	REF	Regressão	1	73,78	73,78	15,40	
		Resíduo	7	33,53	4,79		0,006
		Total	8	107,31			

¹gl = grau de liberdade; ²SQ = soma quadrada; ³MQ = média quadrada; ⁴F= valor de F;

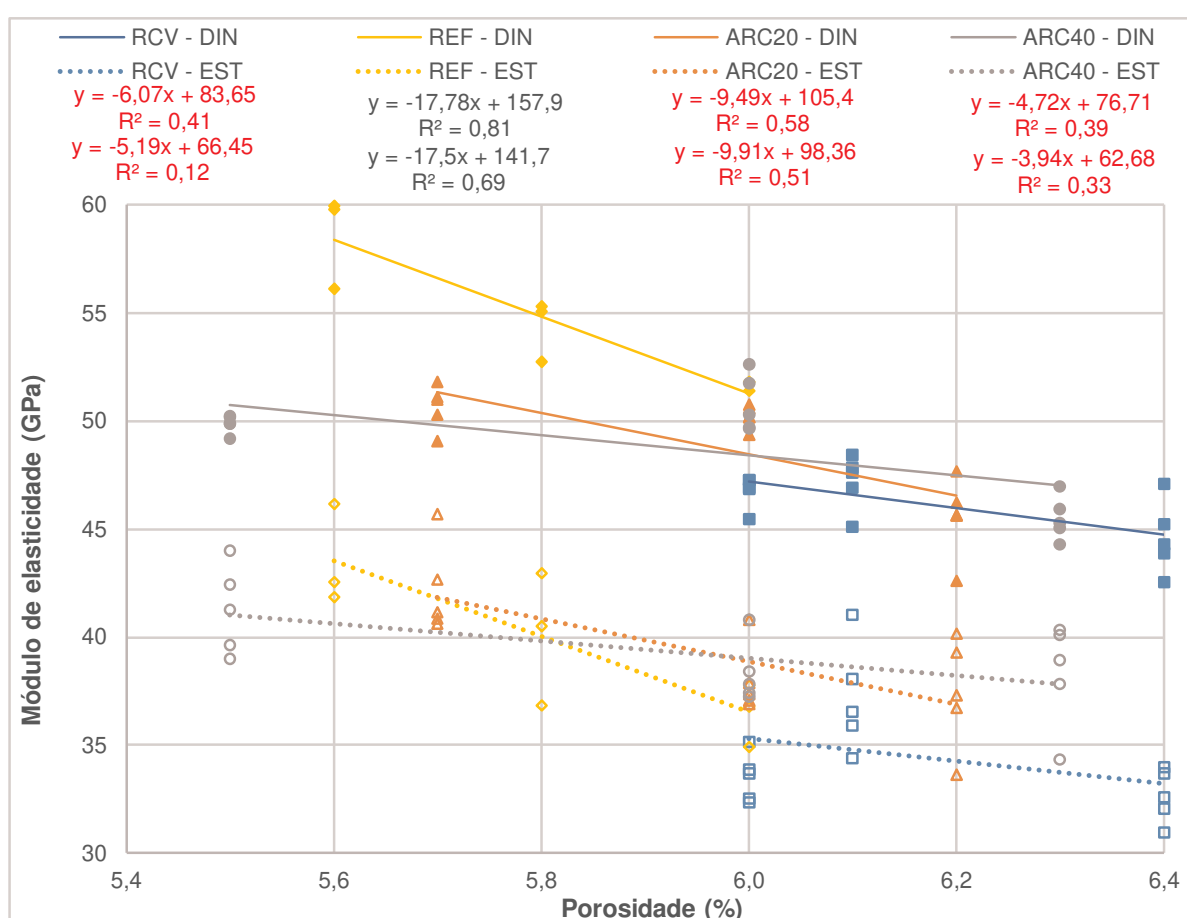
⁵F de significação = interação entre as variáveis.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir da análise estatística, percebe-se que de modo geral existe relação entre módulo de elasticidade e porosidade do concreto, para um nível de significância de 5%, exceto no concreto RCV que não apresenta relação entre o módulo de elasticidade estático e a porosidade do concreto.

De posse da análise estatística, é apresentado no Gráfico 30 o modelo estatístico linear generalizado com as respectivas equações das retas e os respectivos coeficientes de determinação das retas.

Gráfico 30 - Módulos de elasticidade em função da porosidade²



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os coeficientes angulares dos concretos variam em função do tipo de resíduo utilizado como agregado e do tipo de módulo de elasticidade. A partir dos maiores coeficientes angulares e maiores R², é possível perceber que a porosidade se relaciona mais com o módulo de elasticidade dinâmico.

² Os valores de coeficientes de determinação destacados em vermelho são muito baixos e, portanto, a reta não representa adequadamente o comportamento do fenômeno estudado.

Observa-se também que a porosidade do concreto somente apresenta uma boa relação com os módulos de elasticidade nos concretos com o agregado natural.

Os concretos produzidos com agregados graúdos naturais apresentaram coeficientes de determinação acima de 69%, além dos maiores valores de coeficientes angulares, em uma relação inversamente proporcional entre o módulo de elasticidade e a porosidade.

Para uma mesma porosidade, os agregados reciclados, por suas características, influenciam diretamente no módulo de elasticidade, principalmente o dinâmico, como pode ser observado pelos valores apresentados. Dessa forma, é possível afirmar que o tipo de resíduo utilizado como agregado graúdo reciclado e suas respectivas porosidades tendem a concretos reciclados mais porosos e mais deformáveis, conduzindo a menores módulos de elasticidade (TENÓRIO, 2007).

4.3.3 Módulos de elasticidade em função da massa específica do concreto

Com o intuito de relacionar o módulo de elasticidade e a massa específica do concreto, foi realizada análise por regressão linear simples entre as duas propriedades, sendo os valores apresentados na Tabela 33.

Tabela 33 - Regressão linear entre os módulos de elasticidade e a ρ do concreto

Tipo de módulo	Concreto	Fonte da variação	gl ¹	SQ ²	MQ ³	F ⁴	F de significação ⁵	
Módulo de elasticidade dinâmico	RCV	Regressão	1	30,34	30,34	45,32		
		Resíduo	13	8,70	0,67	1,4E-05		
		Total	14	39,04				
	ARC20	Regressão	1	80,73	80,73	58,12		
		Resíduo	13	18,06	1,39	3,8E-06		
		Total	14	98,79				
	ARC40	Regressão	1	64,98	64,98	30,97		
		Resíduo	13	27,27	2,10	9,1E-05		
		Total	14	92,25				
	REF	Regressão	1	55,02	55,02	9,19		
		Resíduo	7	41,93	5,99	0,019		
		Total	8	96,95				
ti	o	RCV	Regressão	1	46,41	46,41	12,46	0,004

	Resíduo	13	48,43	3,73	
	Total	14	94,84		
	Regressão	1	12,17	12,17	1,44
ARC20	Resíduo	13	109,95	8,46	0,25
	Total	14	122,12		
	Regressão	1	4,07	4,07	0,72
ARC40	Resíduo	13	73,57	5,66	0,41
	Total	14	77,64		
	Regressão	1	48,20	48,20	5,71
REF	Resíduo	7	59,11	8,44	0,048
	Total	8	107,31		

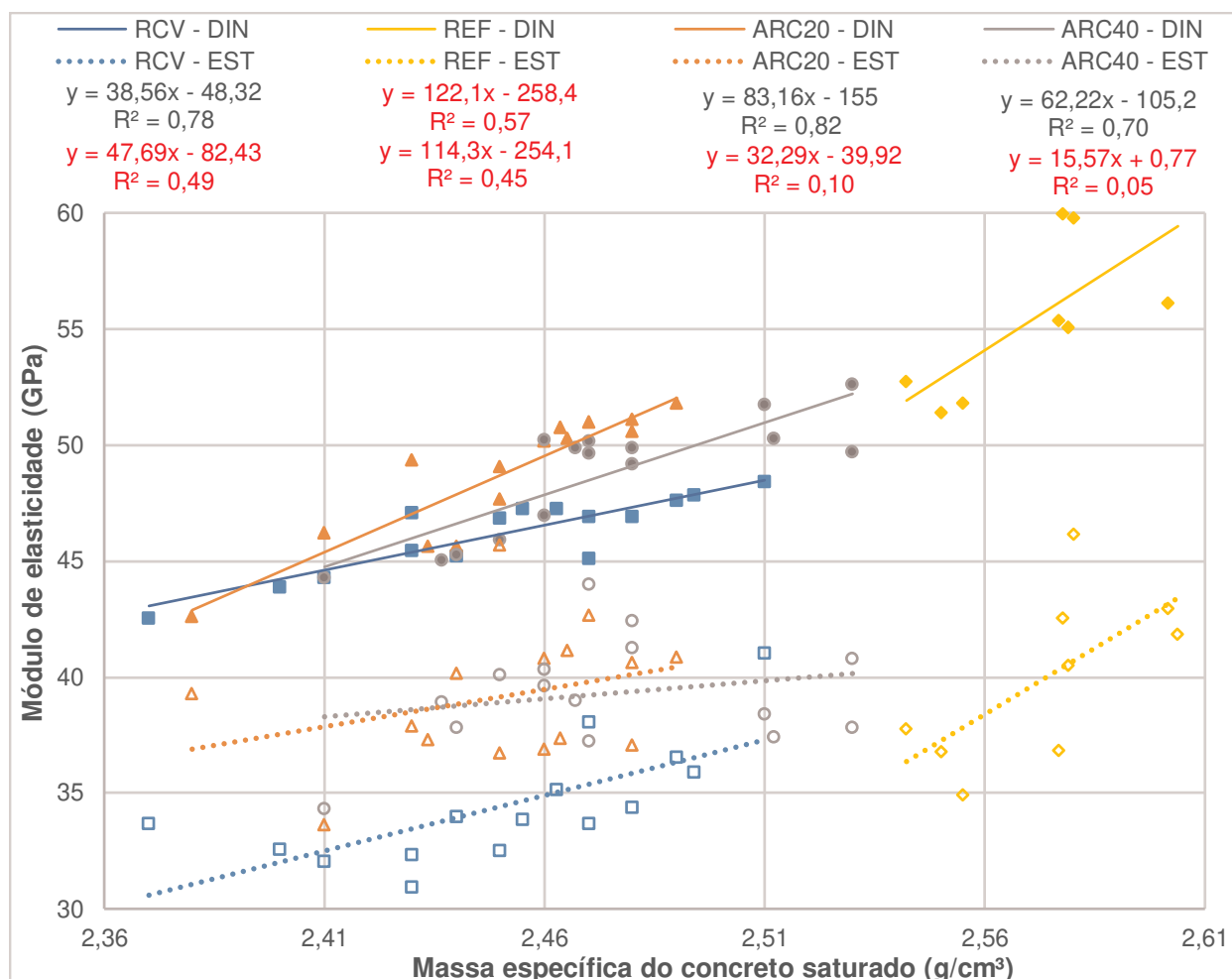
¹gl = grau de liberdade; ²SQ = soma quadrada; ³MQ = média quadrada; ⁴F= valor de F;

⁵F de significação = interação entre as variáveis.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir da análise estatística, percebe-se que de modo geral existe relação entre módulo de elasticidade e massa específica do concreto, para um nível de significância de 5%, exceto nos concretos ARC20 e ARC40 que não apresentam relação entre a massa específica do concreto e o módulo de elasticidade estático.

De posse da análise estatística, é apresentado no Gráfico 31 o modelo estatístico linear com as equações das retas e os coeficientes de determinação.

Gráfico 31 - Módulos de elasticidade em função da massa específica do concreto³

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os coeficientes de determinação dos concretos variam em função do tipo de AG, do tipo de módulo de elasticidade relacionando-o a massa específica do concreto. Em relação ao módulo de elasticidade dinâmico os coeficientes de determinação dos concretos produzidos com RCV, ARC20, ARC40 e REF foram de 78, 82, 70 e 57%, demonstrando que o comportamento do módulo de elasticidade dinâmico pode ser modelado por meio de uma reta.

Em relação aos valores obtidos, observa-se que, para uma mesma massa específica do concreto, o concreto RCV alcançou os menores valores de Ed. Para a massa específica de 2,41 g/cm³, por exemplo, os concretos produzidos com AGRCV alcançaram quase o mesmo valor de módulo de elasticidade dinâmico, sendo este de aproximadamente 45 GPa, a partir dessa massa específica os concretos ARC20

³ Os valores de coeficientes de determinação destacados em vermelho são muito baixos e, portanto, a reta não representa adequadamente o comportamento do fenômeno estudado.

e ARC40 devido maior coeficiente angular tiveram maiores acréscimos de valores de módulo de elasticidade dinâmico, a exemplo disso na massa específica $2,48 \text{ g/cm}^3$ o módulo de elasticidade dinâmico do concreto produzido com RCV alcançou 47 GPa, enquanto os concretos ARC20 e ARC40 alcançaram, respectivamente, 50 e 52 GPa. Esse comportamento é explicado a partir dos valores apresentados na Tabela 20, em que demonstram que o AGRCV possui menor massa específica, resultando em concreto de módulo de elasticidade dinâmico inferior aos demais.

A título de comparação, a menor massa específica do concreto REF foi de $2,55 \text{ g/cm}^3$ e gerou o menor módulo de elasticidade dinâmico do concreto REF de 52 GPa, mesmo esse sendo o menor valor de módulo de elasticidade dinâmico obtido pelo concreto referência, é superior ao maior valor de módulo de elasticidade dinâmico do concreto produzido com agregado graúdo reciclado de maior massa específica. De forma geral, esses valores são consistentes com a literatura e o mesmo comportamento é observado em pesquisa de Omary et al. (2016).

Em relação ao módulo de elasticidade estático, observa-se que para uma mesma massa específica do concreto o concreto produzido com agregados graúdos reciclados de cerâmica vermelha alcançou os menores valores, sendo esse comportamento mais acentuado que o apresentado no módulo de elasticidade dinâmico. Para massa específica $2,41 \text{ g/cm}^3$, por exemplo, os concretos produzidos com AGRCV alcançaram valor de E_e de aproximadamente 32 GPa, enquanto os concretos ARC20/40 alcançaram aproximadamente 38 GPa. Basicamente a diferença de valores nas outras massas específicas deve-se aos diferentes coeficientes angulares que é maior no concreto produzido com agregados graúdos cerâmicos, que mesmo sendo maior não foi o suficiente para superar os demais. Na massa específica $2,48 \text{ g/cm}^3$ o E_e do concreto produzido com RCV alcançou 36 GPa, enquanto os concretos ARC20 e ARC40 alcançaram 40 e 39 GPa, respectivamente.

É possível perceber, a partir da análise por regressão linear, que, de modo geral, a massa específica do concreto teve uma maior relação ao módulo de elasticidade dinâmico em todos os concretos produzidos.

4.3.4 Relação entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico

Com o intuito de relacionar o módulo de elasticidade estático e dinâmico, foi realizada análise por regressão linear simples entre essas duas propriedades. A Tabela 34 apresenta os valores da análise por regressão linear simples entre módulo de elasticidade estático e módulo de elasticidade dinâmico.

Tabela 34 - Regressão linear entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico

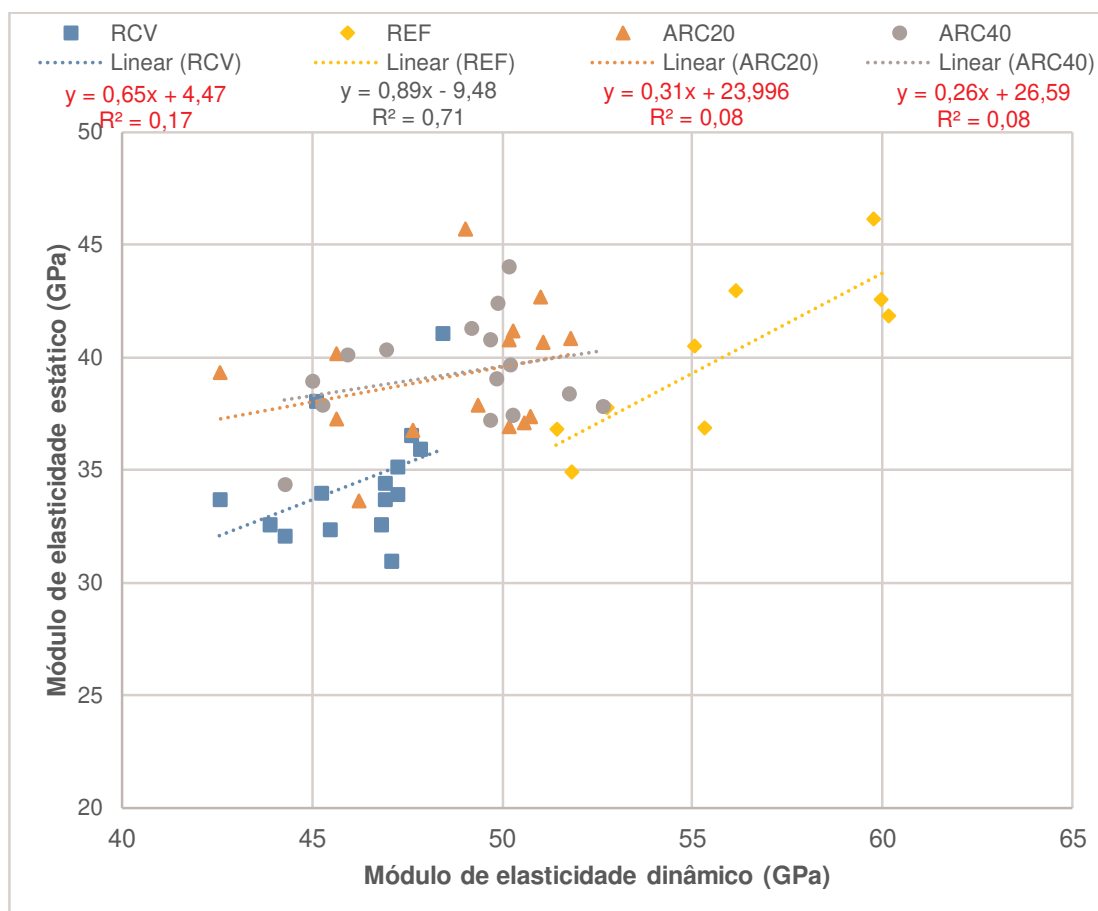
Concreto	Fonte da variação	gl ¹	SQ ²	MQ ³	F ⁴	F de significação ⁵
RCV	Regressão	1	16,44	16,44	2,73	
	Resíduo	13	78,40	6,03		0,12
	Total	14	94,84			
ARC20	Regressão	1	9,60	9,60	1,11	
	Resíduo	13	112,52	8,66		0,31
	Total	14	122,12			
ARC40	Regressão	1	6,27	6,27	1,14	
	Resíduo	13	71,37	5,49		0,30
	Total	14	77,64			
REF	Regressão	1	76,30	76,30	17,22	
	Resíduo	7	31,01	4,43		0,004
	Total	8	107,31			

¹gl = grau de liberdade; ²SQ = soma quadrada; ³MQ = média quadrada; ⁴F valor; ⁵ANOVA = análise de variância.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir da análise estatística, percebe-se que não existe relação entre módulo de elasticidade estático e o módulo de elasticidade dinâmico em concretos produzidos com agregados graúdos reciclados, para um nível de significância de 5%, isso porque os concretos produzidos com agregados graúdos reciclados apresentam um valor F de significação maior que 0,05.

De posse da análise estatística, é apresentado, no Gráfico 32, o modelo estatístico linear com as respectivas equações das retas e seus coeficientes de determinação. Os coeficientes de determinação dos concretos variaram em função do tipo de agregado graúdo utilizado para a produção do concreto.

Gráfico 32 - Relação entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico⁴

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que apenas é possível determinar uma relação aceitável entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico nos concretos de referência.

O concreto REF, assim como esperado, pode ser modelado a partir de uma equação de regressão linear com um coeficiente de determinação 0,71, representando 71% dos dados, e possui um coeficiente angular elevado, indicando que existe uma forte relação entre o módulo de elasticidade estático e o dinâmico, corroborando com o baixo valor F de significação.

Na tentativa de se elaborar uma equação de regressão linear para os concretos ARC20 e ARC40, os coeficientes de determinação encontrados são 0,08, e o concreto produzido com AGRCV apresenta coeficiente de determinação 0,17, o que indica que nesses concretos não há um comportamento linear. A inexistência de relação entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico nos concretos

⁴ Os valores de coeficientes de determinação destacados em vermelho são muito baixos e, portanto, a reta não representa adequadamente o comportamento do fenômeno estudado.

produzidos com agregados graúdos reciclados provavelmente é decorrente dos AGR's possuírem um módulo de elasticidade inferior ao módulo de elasticidade da pasta de cimento, pois, segundo Topçu e Uğurlu (2007), o módulo de elasticidade do concreto só é diretamente proporcional ao módulo de elasticidade dos agregados quando o E_c da pasta de cimento é inferior ao módulo de elasticidade dos agregados. Outro fator que influencia os resultados é o fato de se utilizar todos os corpos de prova no estado saturado, o que aumenta a velocidade de transmissão de onda no concreto e conseqüentemente eleva o valor do módulo de elasticidade dinâmico.

Com intuito de verificar as diferenças percentuais entre o concreto REF e os concretos produzidos com agregados reciclados, é apresentado a Tabela 35:

Tabela 35 - Variação entre o E_c 's dos concretos reciclados e concreto REF

Relação a/c	Concreto reciclado	ΔE_d - REF (%)	ΔE_e - REF (%)
0,675	RCV	-23,1	-10,7
	ARC20	-21,6	2,5
	ARC40	-21,6	4,9
0,540	RCV	-24,9	-16,4
	ARC20	-19,3	-5,2
	ARC40	-18,3	-4,5
0,405	RCV	-27,4	-14,5
	ARC20	-22,2	-3,0
	ARC40	-23,2	-5,0

Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota-se que o concreto produzido com AGRCV apresenta maior variação comparando-o ao concreto REF, sendo as diferenças maiores quando se tratam de E_d . Esse fato indica que a elevada porosidade do AGRCV, além de menor massa específica, influencia, diretamente, em ambos os valores de módulos.

Em relação aos concretos produzidos com AGRC o comportamento foi similar ao do concreto RCV na determinação do módulo de elasticidade dinâmico, entretanto, não foi similar ao módulo de elasticidade estático, uma vez que na relação a/c 0,675 o uso de AGRC resultou em E_e 's maiores que o concreto REF.

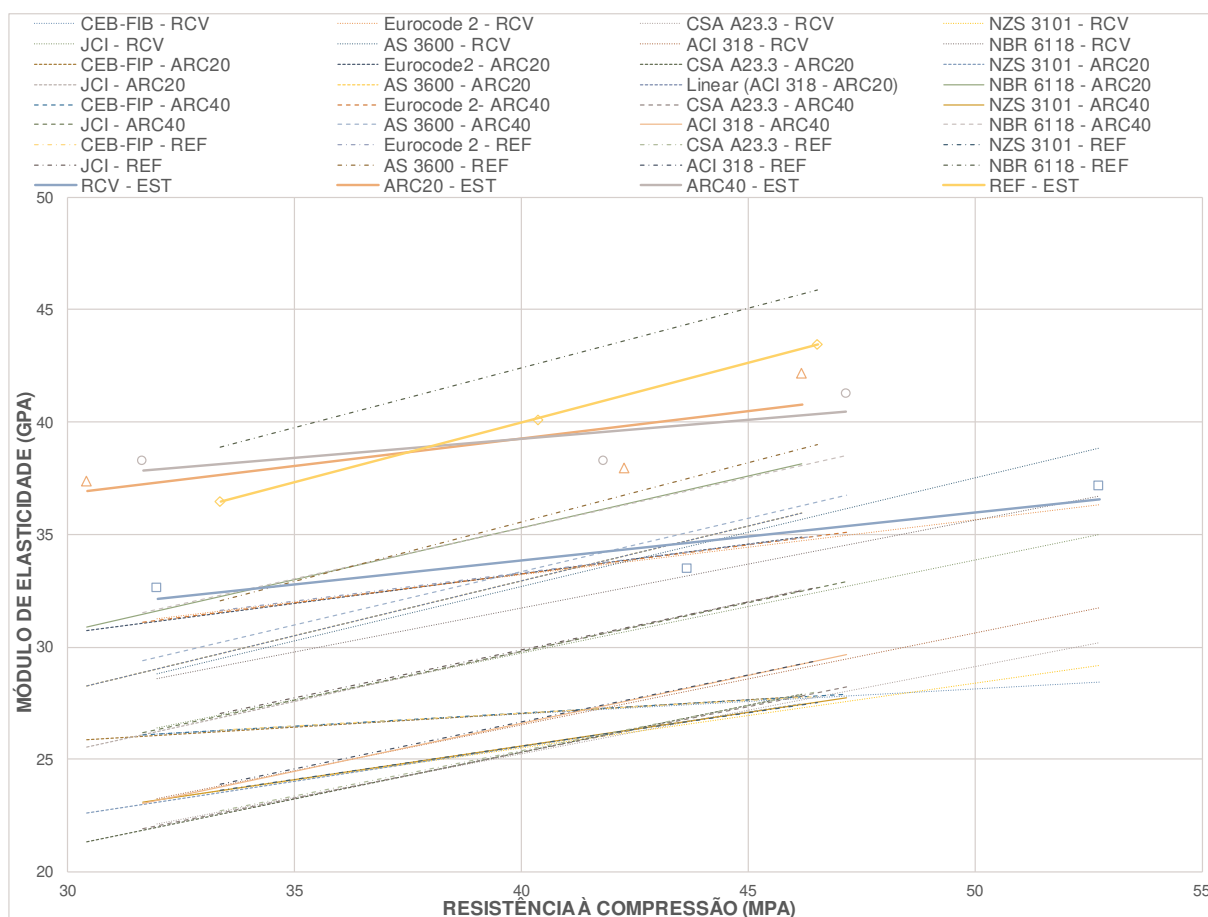
O uso de AGR's afeta mais o módulo de elasticidade dinâmico. As diferenças entre os módulos estáticos e dinâmicos se baseiam no fato de que as características

não homogêneas do concreto afetam os módulos de diferentes maneiras, além disso, o uso de AGR's torna o concreto mais homogêneo, diminuindo ainda mais a linearidade entre E_e e E_d (PHILLEO,1955 apud LEE, et al., 2017).

4.3.5 Módulos de elasticidade estático e E_c estimado a partir de normas

O Gráfico 33 apresenta módulo de elasticidade estático em função dos valores experimentais e o módulo estimado a partir de equações propostas por normas selecionadas. Na Tabela D 1 (APÊNDICE D) são apresentados os resultados obtidos a partir dessas normas em função dos tipos de concretos.

Gráfico 33 - E_e experimental e E_c estimado a partir de normas



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir das várias normas utilizadas, encontram-se valores de módulo de elasticidade, apresentando variação de até 45% a depender do tipo de agregado graúdo utilizado. É importante salientar que a maioria desses modelos levam em consideração apenas a resistência à compressão do concreto para estimar o módulo de elasticidade. Exceção ocorre nas normas AS 3600 (ASCS, 2009) e a NBR 6118

(ABNT, 2014) que não usam apenas a resistência à compressão do concreto, utilizando também a massa específica do concreto e um fator de correção devido ao tipo de agregado graúdo utilizado respectivamente.

Verificando a norma mais conservadora dentre essas (CSA A23.3), é possível constatar que para o concreto referência os valores estimados de E_e , em comparação aos valores experimentais foram 42% menores, em comparação a norma AS3600 o módulo de elasticidade estimados foram 12% menores, enquanto se comparados à NBR 6118 (ABNT, 2014) conduzem a valores 6,5% maiores.

Para concretos ARC20 e ARC40 o comportamento, assim como as retas apresentadas no Gráfico 33 se sobrepõe, sendo assim, os valores aproximados estimados a partir da norma CSA A23.3 conduzem a valores cerca de 42% inferiores em comparação aos valores experimentais de E_e , em comparação a norma AS3600 os E_e 's estimados foram 22% menores, enquanto a NBR 6118 (ABNT, 2014) conduziu a valores 18% inferiores.

Para o concreto produzido com RCV o comportamento foi similar aos demais. Para a norma CSA A23.3 teve um decréscimo em relação ao valor experimental de 31%, em comparação a norma AS3600 o módulo de elasticidade estimado foi 11% menor, enquanto para a NBR 6118 o decréscimo foi de 12%.

Sendo assim é possível constatar que os modelos de previsão a partir das normas são bastante genéricos, sendo que o uso de agregados reciclados, mesmo em pequena taxa de substituição, conduz a valores distintos, não sendo então estes modelos capazes de estimar adequadamente os módulos estáticos.

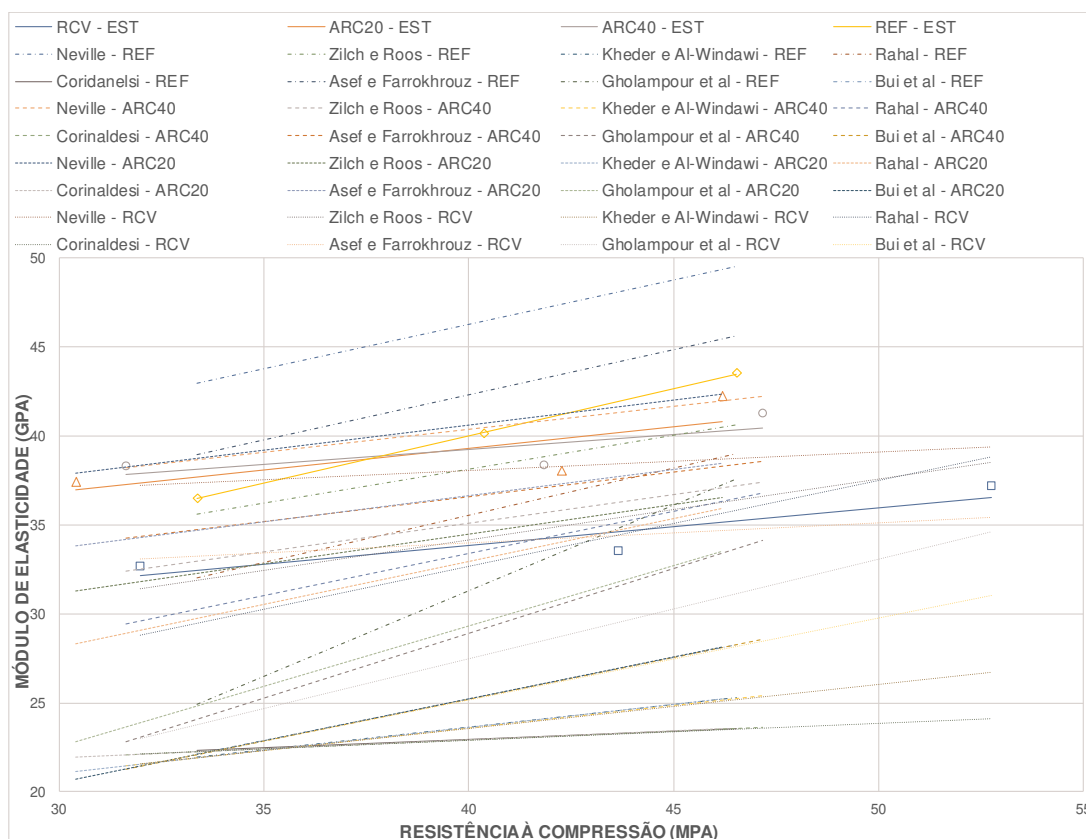
Mesmo os modelos não sendo integralmente confiáveis, quando levam em consideração algumas outras propriedades do concreto além do f_{cm} , e/ou quando levam em consideração características particulares dos AG's presentes na mistura, resultam em valores um pouco mais próximos das retas experimentais.

A condução de pesquisas com esse intuito tem sido realizada ao longo das últimas décadas e modelos de previsão de módulo de elasticidade propostos por autores da literatura surgiram para preencher essa lacuna deixada pelas normas. Nesse sentido, alguns modelos começam a levar em consideração itens como percentual de substituição, massa específica dos agregados graúdos, entre outros, sendo apresentados a seguir no item 4.3.6.

4.3.6 Módulos de elasticidade estático e E_c estimado a partir da literatura

O Gráfico 34 apresenta as retas de módulo de elasticidade estático experimentais e módulo de elasticidade estático estimado a partir de equações propostas por autores da literatura selecionados. Na Tabela D 2 (APÊNDICE D) são apresentados os valores das equações em função dos tipos de concretos.

Gráfico 34 - E_e e E_c estimado a partir da literatura



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir de equações disponíveis na literatura, encontra-se valores de módulo de elasticidade bem distintos, com variabilidade de até 75% a depender de qual equação (autor) levada em consideração. Dentre os autores citados, excepcionalmente Kheder e Al-Windawi (2005); Corinaldesi (2010); Bui et al. (2018), utilizam apenas a resistência à compressão do concreto como parâmetro para estimativa do módulo de elasticidade, os demais modelos utilizam fatores como massa específica do concreto, coeficientes de correção devido à rocha de origem do agregado graúdo, relação a/c, módulo de elasticidade dinâmico e até o percentual de substituição de AGR, como em estudo dos autores Gholampour et al. (2018).

Fazendo uma comparação entre os valores obtidos, percebeu-se que a equação que resultou em valores menores de E_e , ou seja, mais conservadora, foi proposta por Dilbas et al. (2016), enquanto as menos conservadoras de modo geral foram as equações propostas por Neville (1995) e Asef e Farrokhrouz (2017), a equação que de modo geral se ajustou melhor aos resultados experimentais foi a proposta por Zilch e Roos (2001). Um ponto em comum com os valores obtidos a partir das normas menos conservadoras é que ambas utilizam equações que relacionam o módulo de elasticidade estático ao módulo de elasticidade dinâmico, apresentando valores bem próximos aos valores obtidos experimentalmente, enquanto a equação que melhor se ajustou aos valores experimentais utilizam a massa específica do concreto e resistência à compressão como parâmetros.

5 CONCLUSÃO

Neste capítulo serão apresentadas as considerações finais obtidas a partir das análises dos resultados, além de sugestões para trabalhos futuros.

As considerações finais seguirão a seguinte sequência: breve relato sobre as propriedades avaliadas dos agregados graúdos, massa específica do concreto no estado fresco e endurecido, porosidade do concreto, resistência à compressão, módulo de elasticidade dinâmico; módulo de elasticidade estático; relação entre módulo de elasticidade estático e módulo de elasticidade dinâmico, além das estimativas de módulo de elasticidade estático em função das normas e da literatura.

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As massas específicas dos concretos, no estado fresco e endurecido, variam em função do tipo de agregado graúdo reciclado utilizado para a produção do concreto de modo mais expressivo do que em concretos produzidos com agregados graúdos naturais. As análises estatísticas indicam que não existem diferenças significativas de porosidade entre os concretos de cada grupo de relação a/c. Entretanto, de forma geral, o uso de agregado graúdo reciclado, em comparação ao concreto produzido inteiramente com agregados naturais, elevou os valores de porosidade nas relações a/c 0,675 e 0,540. O uso de agregados graúdos reciclados, em percentual de substituição de 30%, apresenta resistências à compressão similares às resistências à compressão do concreto referência.

O módulo de elasticidade dinâmico dos concretos produzidos com agregados graúdos reciclados é reduzido, significativamente, em relação aos concretos produzidos com agregados graúdos naturais, apresentando maior relação em função do tipo de resíduo utilizado como agregado graúdo, isto é, agregados graúdos mais porosos e menos densos proporcionam módulos de elasticidade dinâmico menores, o que indica que as características inerentes aos tipos de agregados graúdos afetam o módulo de elasticidade dinâmico de formas distintas.

O módulo de elasticidade estático apresenta comportamento distinto do módulo de elasticidade dinâmico. Nos concretos de maior resistência (relações a/c 0,540 e 0,450), o uso de agregados graúdos reciclados de concreto, se comparados ao concreto referência, não apresentam diferenças significativas, todavia, em

comparação aos concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de RCV, de modo geral, apresentam diferenças significativas.

Os concretos produzidos inteiramente com agregados graúdos naturais apresentam uma boa relação entre os módulos de elasticidade estático e o dinâmico, o que não ocorre nos concretos produzidos com agregados graúdos reciclados. De modo geral, os concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de resíduos de cerâmica vermelha apresentam as maiores diferenças de valores em comparação ao concreto referência. Nesse sentido, não é possível obter uma relação linear entre o módulo de elasticidade estático e o módulo de elasticidade dinâmico dos concretos produzidos com agregados graúdos reciclados, sendo observado que quanto mais porosos e menos densos são os agregados graúdos reciclados, menor a relação entre o módulo de elasticidade estático e o módulo de elasticidade dinâmico.

Os módulos de elasticidade estimados a partir de equações algébricas apresentam elevada variabilidade, sendo necessário a validação dos valores estimados a partir de testes experimentais para identificação da equação que melhor representa o comportamento do concreto, em função das características dos agregados graúdos utilizados. De forma geral, as equações citadas pela literatura se mostram mais precisas (menos variáveis) que as equações normalizadas, o que provavelmente está relacionado aos avanços dos estudos da literatura e do maior número de fatores levados em consideração nas equações propostas pelos autores.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No decorrer da dissertação algumas questões foram levantadas e não puderam ser contempladas por falta de tempo hábil, além do que essas questões não abrangiam parte do escopo desta pesquisa. Sendo assim, sugere-se, para trabalhos futuros, o aprimoramento do estudo das propriedades elásticas de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados:

- aumentar o total de relações a/c investigadas (Ex: 0,20; 0,30; 0,40; 0,50; 0,60; 0,70) para obter concretos em várias faixas de resistência à compressão, inclusive em concretos de alta-resistência, de modo a verificar a influência da relação a/c no módulo de elasticidade do concreto;

- ampliar a investigação sobre o comportamento elástico dos concretos, moldando corpos de prova adicionais para a realização de diagrama tensão-deformação para os diferentes tipos de concretos;
- escolher três percentuais de substituição de agregados graúdos reciclados por agregados graúdos naturais (Ex: 10; 20; 30%) de modo a verificar a influência dos agregados graúdos reciclados a baixos teores de substituição;
- aumentar o campo de investigação, avaliando os módulos de elasticidade das fases constituintes do concreto (pasta, agregados e zona de transição), o que por sua vez pode ajudar a explicar as diferenças de valores do concreto referência para os concretos produzidos com agregados graúdos reciclados;
- verificar se o uso de materiais cimentícios suplementares em conjunto com os agregados graúdos reciclados propiciam menores diferenças de módulo de elasticidade para os concretos produzidos com agregados graúdos naturais, em comparação ao não uso dos materiais cimentícios suplementares;
- utilizar resíduos de resistências bem distintas entre si, para gerar agregados graúdos reciclados de porosidades bastante variáveis, avaliando o efeito dessas porosidades dos agregados graúdos reciclados nos módulos de elasticidade dos concretos produzidos;
- propor equação algébrica que relacione fatores como, resistência à compressão; massa específica do concreto; percentual de substituição de agregado graúdo reciclado por agregado graúdo natural; relação a/c, massa específica dos agregados graúdos; percentual de absorção de água dos agregados graúdos; e tipo de agregado graúdo utilizado, ao módulo de elasticidade estático do concreto;
- proceder com uma investigação da microestrutura do concreto produzido com agregados graúdos reciclados, relacionando os comportamentos observados aos valores de módulo de elasticidade.

REFERÊNCIAS

- 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.
- AJDUKIEWICZ, A.; KLISZCZEWICZ, A. Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. **Cement and concrete composites**, v. 24, n. 2, p. 269-279, 2002.
- ALAM, A.I; HASELBACH, L. Estimating the modulus of elasticity of pervious concrete based on porosity. **Advances in Civil Engineering Materials**, v. 3, n. 1, p. 256-269, 2014.
- 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.
- ANDERSON, D. J.; SMITH, S. T.; AU, F. T.K. Mechanical properties of concrete utilising waste ceramic as coarse aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 117, p. 20-28, 2016.
- ANDRADE, W. P. **Concretos–Massa, Estrutural, projetado e Compactado com Rolo: Ensaio e Propriedades**. São Paulo: Editora Pini, 1997.
- ANDREU, G.; MIREN, E. Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 52, p. 227-235, 2014.
- ARAÚJO, S. D. S; GUIMARÃES, G. N.; GEYER, A. L. B. Influência do Tipo de Medição na Determinação do Módulo Estático de Elasticidade do Concreto. **RIEM-IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 5, n. 5, p. 555-575, 2012.
- ARRUDA, A. M. D. **Módulo de elasticidade de concretos produzidos com formações rochosas do triângulo mineiro**. 2013. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia Civil - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Uberlândia - FECIV, Uberlândia, MG, 2013.
- ASEF, M. R.; FARROKHROUZ, M. A semi-empirical relation between static and dynamic elastic modulus. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 157, p. 359-363, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5733**. Cimentos Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5738**. Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5739**. Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6118**. Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7211**. Agregados para concreto - especificação. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8522**. Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8802**. Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2013.
- 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, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 30**. Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 45**. Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 52**. Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 53**. Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 67**. Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento de tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 248**. Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 209R**: Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures. Detroit, 1997. 26 p.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318**: Building code requirements for structural concrete and commentary, PCA notes on ACI 318-11: with design applications. Farmington Hills (Mich): ACI International; 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C597-16**. Standard test method for pulse velocity through concrete. W. Conshohocken, PA: ASTM International, 4 p, 2016.

AUSTRALIAN STANDARD. **AS 3600**. Australian Standard for Concrete Structures. S. A, North Sydney, **225p**, 2009.

AWOYERA, P. O. et al. Characterization of ceramic waste aggregate concrete. **HBRC Journal**, v. In Press, Corrected Proof, 2016.

BELABDELOUAHAB, F. ET AL. Comparative Analysis of Estimated Young's Modulus of Rubberized Mortar and Concrete. **International Journal of Civil Engineering**, v. 14, p. 1-11, 2016.

BENDIMERAD, A. Z.; ROZIERE, E.; LOUKILI, A. Combined experimental methods to assess absorption rate of natural and recycled aggregates. **Materials and Structures**, v. 48, n. 11, p. 3557-3569, 2015.

BENETTI, J. K. **Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico de concreto produzido com agregado graúdo reciclado de concreto**. 2012. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo, RS, 2012.

BRAVO, M. ET AL. Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants. **Journal of cleaner production**, v. 99, p. 59-74, 2015.

BUI, N. K.; SATOMI, T.; TAKAHASHI, H. Mechanical properties of concrete containing 100% treated coarse recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 496-507, 2018.

CABRAL, A. E. B. ET AL. Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 4, p. 421-430, 2010.

CALLISTER, William. **Ciência E Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5. ed. São Paulo: Grupo Gen-LTC, 2000.

CARRIJO, P. M. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto**. 2005. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) -- Escola Politécnica - Departamento de Engenharia de Construção Civil. Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, SP, 2005.

CHAVHAN, P.; VYAWAHARE, M. Correlation of static and Dyanmic Modulus of Elasticity for Different SCC Mixes. **Int. J. Recent Innov. Trends Comput. Comun**, v. 3, p. 4914-4919, 2015.

CHEN, H. J.; YEN, T.; CHEN, K. H. Use of building rubbles as recycled aggregates. **Cement and concrete research**, v. 33, n. 1, p. 125-132, 2003.

CHOUBEY, R. K.; KUMAR, S.; RAO, M. Chakradhara. Modeling of fracture parameters for crack propagation in recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 106, p. 168-178, 2016.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **CEB-FIP Model Code 1990: design code**. Telford, 1993.

CORDEIRO, L. D. N. P. **Análise dos parâmetros principais que regem a variabilidade de concretos produzidos com agregado graúdo reciclado de concreto**. 2013. 127 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, RS, 2013.

CORINALDESI, V. Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 9, p. 1616-1620, 2010.

COROMINAS, A. G.; ETXEBERRIA, M.; POON, C.S. Influence of the quality of recycled aggregates on the mechanical and durability properties of High Performance Concrete. **Waste and Biomass Valorization**, p. 1-12, 2016.

COSMES-LÓPEZ, M. F.; CASTELLANOS, F.; CANO-BARRITA, P. F. de J. Ultrasound frequency analysis for identification of aggregates and cement paste in concrete. **Ultrasonics**, v. 73, p. 88-95, 2017.

CANADIAN STANDARD ASSOCIATION. **CSA A23.3-04**: Design of concrete structures. Ontário, Ottawa, **258p**, 2009.

DE ALMEIDA, S. M. **Análise do Módulo de Elasticidade Estático e Dinâmico do Concreto de Cimento Portland através de ensaios de Compressão Simples e de frequência ressonante**. 2012. 213 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) -- Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte, MG, 2012.

DE BRITO, J.; ALVES, F. Concrete with recycled aggregates: the Portuguese experimental research. **Materials and structures**, v. 43, n. 1, p. 35-51, 2010.

DILBAS, H.; ÇAKIR, Ö.; ŞİMŞEK, M. Recycled aggregate concretes (RACs) for structural use: an evaluation on elasticity modulus and energy capacities. **International Journal of Civil Engineering**, p. 1-15, 2016.

DOS SANTOS, A. C. et al. Influence of coarse aggregate on concrete's elasticity modulus. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 39, n. 1, p 17-25, 2017.

ETXEBERRIA, M ET AL. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. **Cement and concrete research**, v. 37, n. 5, p. 735-742, 2007.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EUROCODE 2**. Design of concrete structures: Part 1-1: general rules and rules for buildings. British Standards Institution BS EN. London, p. 230, 2004.

FONTEBOA, B. G.; ABELLA, F.M.; LÓPEZ, J. E.; PAZ, S.S. Effect of recycled coarse aggregate on damage of recycled concrete. **Materials and Structures**, v. 44, n. 10, p. 1759, 2011.

GOLAFSHANI, E. M.; BEHNOOD, A. Application of soft computing methods for predicting the elastic modulus of recycled aggregate concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 176, p. 1163-1176, 2018.

GHOLAMPOUR, A.; GANDOMI, A. H.; OZBAKKALOGLU, T. New formulations for mechanical properties of recycled aggregate concrete using gene expression programming. **Construction and Building Materials**, v. 130, p. 122-145, 2017.

GHOLAMPOUR, A.; OZBAKKALOGLU, T. Time-dependent and long-term mechanical properties of concretes incorporating different grades of coarse recycled concrete aggregates. **Engineering Structures**, v. 157, p. 224-234, 2018.

GHORBEL, E.; WARDEH, G. Influence of recycled coarse aggregates incorporation on the fracture properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 51-60, 2017.

GOMES, M.; DE BRITO, J. Structural concrete with incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates: durability performance. **Materials and Structures**, v. 42, n. 5, p. 663-675, 2009.

GOMES, M.; DE BRITO, J.; BRAVO, M. Mechanical performance of structural concrete with the incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 26, n. 10, p. 04014076, 2014.

GONÇALVES, R. D. C. **Agregados reciclados de resíduos de concreto: Um novo material para dosagens estruturais**. 2001. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) -- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo - USP, São Carlos, SP, 2001.

GUJEL, D. A. **Avaliação do comportamento elástico de concretos produzidos com substituição parcial dos agregados graúdos naturais por reciclados de concreto a partir de ensaios estático e dinâmico**. 2014. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo, RS, 2014.

GUO, H. ET AL. Durability of recycled aggregate concrete - A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 89, p. 251-259, 2018.

HADLEY, D. W. **The Nature of the Paste-Aggregate Interface**. 1972. 186 f. Tese (Doutorado) – Purdue University, West Lafayette, Indiana, 1972.

HANSEN, T. C. Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945–1985. **Materials and structures**, v. 19, n. 3, p. 201-246, 1986.

HANSEN, T. C. **Recycling of demolished concrete and masonry**. v. 6. RILEM n. 6, 1992.

HASSAN, A. M. T.; JONES, S. W. Non-destructive testing of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC): A feasibility study for using ultrasonic and resonant frequency testing techniques. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 361-367, 2012.

HENTGES, T. I. Comparação do beneficiamento do agregado graúdo reciclado de concreto por carbonatação e por impregnação com resíduo de cerâmica vermelha. 2018. 156f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo, RS, 2018.

HO, N. Y. ET AL. Efficient utilization of recycled concrete aggregate in structural concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, n. 3, p. 318-327, 2013.

HOFFMANN, C. et al. Recycled concrete and mixed rubble as aggregates: Influence of variations in composition on the concrete properties and their use as structural material. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 701-709, 2012.

HOPKINSON, B.; ROGERS, F. The Elastic Properties of Steel at High Temperatures. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character**, v. 76, n. 512, p. 419-425, 1905.

JONES, R.; FAÇAÇOARU, I. Recommendations for testing concrete by the ultrasonic pulse method. **Materials and Structures**, v. 2, n. 4, p. 275-284, 1969.

JUROWSKI, K.; GRZESZCZYK, S. The influence of concrete composition on Young's modulus. **Procedia Engineering**, v. 108, p. 584-591, 2015.

JAPAN CONCRETE INSTITUTE. **JCI-08**. Guidelines for Control of Cracking of Mass Concrete. Tokyo, 2008.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **JSCE15**. Standard specification for concrete structure. Tokyo, 2007.

JIA, Z. et al. Quantitative characterization and elastic properties of interfacial transition zone around coarse aggregate in concrete. **Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.**, v. 32, n. 4, p. 838-844, 2017.

KANEMA, J. M.; EID, J.; TAIBI, S. Shrinkage of earth concrete amended with recycled aggregates and superplasticizer: Impact on mechanical properties and cracks. **Materials & Design**, v. 109, p. 378-389, 2016.

KHEDER, G. F.; AL-WINDAWI, S. A. Variation in mechanical properties of natural and recycled aggregate concrete as related to the strength of their binding mortar. **Materials and Structures**, v. 38, n. 7, p. 701-709, 2005.

KISKU, N. ET AL. A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material. **Construction and Building Materials**, v. 131, p. 721-740, 2017.

KLISZCZEWICZ, A.; AJDUKIEWICZ, A. Differences in instantaneous deformability of HS/HPC according to the kind of coarse aggregate. **Cement and Concrete Composites**, v. 24, n. 2, p. 263-267, 2002.

KOCAB, D. ET AL. Development of the Elastic Modulus of Concrete under Different Curing Conditions. **Procedia Engineering**, v. 195, p. 96-101, 2017.

KOCAB, D. ET AL. Experimental Analysis of the Development of Elastic Properties and Strength under Different Ambient Temperature during the Hardening of Concrete. **Procedia Engineering**, v. 195, p. 102-107, 2017.

LANDAU, L. D.; LIFSHITZ, E. M. **Theory of Elasticity**. v. 7. Course of theoretical physics, 1959.

LASERNA, S.; MONTERO, J. Influence of natural aggregates typology on recycled concrete strength properties. **Construction and Building Materials**, v. 115, p. 78-86, 2016.

LEE, B. J. et al. Evaluating the Dynamic Elastic Modulus of Concrete Using Shear-Wave Velocity Measurements. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2017, p. 1-13, 2017.

LEE, K. M.; PARK, J. H. A numerical model for elastic modulus of concrete considering interfacial transition zone. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 3, p. 396-402, 2008.

LEITE, M. B. **Avaliação das propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 270 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, RS, 2001.

LEITE, M. B.; MONTEIRO, P. J. M. Microstructural analysis of recycled concrete using X-ray microtomography. **Cement and Concrete Research**, v. 81, p. 38-48, 2016.

LENZ, L. A. **Avaliação da influência do empacotamento do esqueleto granular no módulo de elasticidade de concretos convencionais**. 2016. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil, Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba, PR, 2016.

LI, Y. ET AL. Integrated experimental-computational approach for evaluating elastic modulus of cement paste corroded in brine solution on microscale. **Construction and Building Materials**, v. 162, p. 459-469, 2018.

LI, L. G. et al. Effects of packing on compressive behaviour of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 757-777, 2017.

LIU, B. D. et al. Effect of moisture content on static compressive elasticity modulus of concrete. **Construction and building materials**, v. 69, p. 133-142, 2014.

LIU, J. et al. Basic properties of concrete incorporating recycled ceramic aggregate and ultra-fine sand. **Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.**, v. 30, n. 2, p. 352-360, 2015.

LOTFI, S ET AL. Performance of recycled aggregate concrete based on a new concrete recycling technology. **Construction and building materials**, v. 95, p. 243-256, 2015.

LU, X. ET AL. Evaluation of dynamic modulus of elasticity of concrete using impact-echo method. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 231-239, 2013.

LYE, C. Q ET AL. Creep strain of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 102, p. 244-259, 2016.

MALEŠEV, M. ET AL. The effect of aggregate, type and quantity of cement on modulus of elasticity of lightweight aggregate concrete. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 39, n. 2, p. 705-711, 2014.

MALHOTRA, V. M.; CARINO, N. J. **Handbook on Nondestructive Testing of Concrete Second Edition**. 2. ed. Boca Raton: CRC press, 2004.

MARTINČEK, G. The determination of poisson's ratio and the dynamic modulus of elasticity from the frequencies of natural vibration in thick circular plates. **Journal of Sound and Vibration**, v. 2, n. 2, p. 116-127, 1965.

MCNEIL, K; KANG, T. H..K. Recycled concrete aggregates: A review. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 7, n. 1, p. 61-69, 2013.

MEDINA, C.; DE ROJAS, M.I S.; FRÍAS, M. Reuse of sanitary ceramic wastes as coarse aggregate in eco-efficient concretes. **cement and concrete composites**, v. 34, n. 1, p. 48-54, 2012.

MEDJIGBODO, S. et al. How do recycled concrete aggregates modify the shrinkage and self-healing properties? **Cement and Concrete Composites**, v. 86, p. 72-86, 2018.

MEFTEH, H. ET AL. Influence of moisture conditioning of recycled aggregates on the properties of fresh and hardened concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 54, p. 282-288, 2013.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties, and materials**. 4. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014.

MONTEIRO, P. J. M.; MEHTA, P. K. The transition zone between aggregate and type K expansive cement. **Cement and Concrete Research**, v. 16, n. 1, p. 111-114, 1986.

NEVILLE, A. M. **Properties of concrete**. 5. ed. Harlow: Pearson Education, 2011.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Concrete technology**. 2. ed. Harlow: Pearson Education, 2010.

NIXON, P. J. The use of materials from demolition in construction. **Resources Policy**, v. 2, n. 4, p. 276-283, 1976.

NEW ZEALAND STANDARD. **NZS 3101**. Concrete structures standard. The design of concrete structures. Wellington, New Zealand; 2006.

OMARY, S.; GHORBEL, E.; WARDEH, G. Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties. **Construction and Building Materials**, v. 108, p. 163-174, 2016.

OUTERBRIDGE, A. E. Recent progress in metallurgy. **Journal of the Franklin Institute**, v. 160, n. 6, p. 401-420, 1905.

PACHECO, R. F. R. **Análise do módulo de elasticidade e resistência à compressão de concretos produzidos em centrais na Grande Vitória. Experimentos e Estatística**. 2006. 331 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, Vitória, ES, 2006.

PADOVAN, R. G. **Influência da pré-molhagem nas propriedades de concretos produzidos com agregados reciclados de concreto**. 2013. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo, RS, 2013.

PAYAN, C.; GARNIER, V.; MOYSAN, J. Effect of water saturation and porosity on the nonlinear elastic response of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 3, p. 473-476, 2010.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento portland**. 13. ed. São Paulo: Editora Globo, 1998.

PRADHAN, S.; KUMAR, S.; BARAI, S. V. Recycled aggregate concrete: Particle Packing Method (PPM) of mix design approach. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 269-284, 2017.

QIXIAN, L.; BUNGEY, J. H. Using compression wave ultrasonic transducers to measure the velocity of surface waves and hence determine dynamic modulus of elasticity for concrete. **Construction and building materials**, v. 10, n. 4, p. 237-242, 1996.

RAHAL, K. Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. **Building and environment**, v. 42, n. 1, p. 407-415, 2007.

RAO, C.V.S. Kameswara.; SWAMY, R. N.; MANGAT, P. S. Mechanical behaviour of concrete as a composite material. **Matériaux et Construction**, v. 7, n. 4, p. 265-271, 1974.

RECOMMENDATION, RILEM. RILEM TC 121-DRG. Specifications for concrete with recycled aggregates. **Materials and Structures**, v. 27, n. 173, p. 557-559, 1994.

RECOMMENDATION, RILEM. RILEM TC 116-DRG Permeability of Concrete as a Criterion of its Durability. **Materials and Structures**, v. 32, p. 163-173, 1999.

SEARA-PAZ, S. ET AL. Time-dependent behaviour of structural concrete made with recycled coarse aggregates. Creep and shrinkage. **Construction and Building Materials**, v. 122, p. 95-109, 2016.

SIDERIS, K. K.; MANITA, P.; SIDERIS, K. Estimation of ultimate modulus of elasticity and Poisson ratio of normal concrete. **Cement and concrete composites**, v. 26, n. 6, p. 623-631, 2004.

SILVA, K. A. N. D. **Estudo de propriedades mecânicas de concretos produzidos com diferentes agregados reciclados**. 2011. 113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas - UFAL, Maceió, AL, 2011.

SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. Prediction of the shrinkage behavior of recycled aggregate concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 77, p. 327-339, 2015.

SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 2171-2186, 2016.

SIMEONOV, P.; AHMAD, S. Effect of transition zone on the elastic behavior of cement-based composites. **Cement and Concrete research**, v. 25, n. 1, p. 165-176, 1995.

SINGH, S; NAGAR, R; AGRAWAL, V. A review on Properties of Sustainable Concrete using granite dust as replacement for river sand. **Journal of Cleaner Production**, v. 126, p. 74-87, 2016.

TAQA, A. G. A et al. The effect of interfacial transition zone properties on the elastic properties of cementitious nanocomposite materials. **Journal of Nanomaterials**, v. 16, n. 1, p. 130, 2015.

TAYLOR, H. S. Catalysis and catalytic agents in chemical processes. **Journal of the Franklin Institute**, v. 194, n. 1, p. 1-27, 1922.

TENÓRIO, J.J.L. **Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição visando aplicações estruturais**. 2007. 138f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL, 2007.

THOMAS, C., et al. Durability of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 1054-1065, 2013.

TIWARI, A. SINGH, S. NAGAR, R. Feasibility assessment for partial replacement of fine aggregate to attain cleaner production perspective in concrete: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 135, p. 490-507, 2016.

TOPÇU, İ. B.; UĞURLU, A. Elasticity theory of concrete and prediction of static modulus for dam concrete using composite models. **Teknik Dergi**, v. 18, n. 1, p. 4055-4067, 2007.

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, p. 30-49, 2018.

WANG, H.; LI, Q. Prediction of elastic modulus and Poisson's ratio for unsaturated concrete. **International Journal of Solids and Structures**, v. 44, n. 5, p. 1370-1379, 2007.

WERLE, A. P. **Determinação de propriedades de concretos com agregados reciclados de concreto, com ênfase na carbonatação**. 2010. 162 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2010.

XIAO, J.; ZHANG, K.; AKBARNEZHAD, A. Variability of stress-strain relationship for recycled aggregate concrete under uniaxial compression loading. **Journal of Cleaner Production**, v. 181, p. 753-771, 2018.

YILDIRIM, H.; SENGUL, O. Modulus of elasticity of substandard and normal concretes. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 4, p. 1645-1652, 2011.

ZHOU, F. P.; LYDON, F. D.; BARR, B. I. G. Effect of coarse aggregate on elastic modulus and compressive strength of high performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 1, p. 177-186, 1995.

ZILCH, K.; ROOS, F. HAUPTAUFSATZE-An equation to estimate the modulus of elasticity of concrete with recycled aggregates. *Bauingenieur*, v. 76, n. 4, p. 187-190, 2001.

APÊNDICE A - VALORES INDIVIDUAIS DOS CONCRETOS PRODUZIDOS

Tabela A 1 - Resultados dos concretos produzidos com AGRCV

Traço	CP's	Ø (mm)	H (mm)	F rup (KN)	fcm (Mpa)	Vel (m/s)	ρ sat (kg/m ³)	Ed (GPa)	Ee (GPa)	Trup (MPa)
RCV-POBRE	1	97,82	197	*	*	4467	2,37	42,6	33,7	32,59
	2	98,21	199	*	*	4518	2,41	44,3	32,0	33,72
	3	98,00	197	*	*	4539	2,44	45,2	34,0	30,86
	4	97,59	197	*	*	4508	2,40	43,9	32,6	31,96
	5	98,47	200	*	*	4640	2,43	47,1	30,9	33,22
	6	98,98	199	251,1	32,6	*	*	*	*	*
	7	98,32	197	247,0	32,5	*	*	*	*	*
	8	98,28	198	251,4	33,1	*	*	*	*	*
	9	98,17	200	227,4	30,0	*	*	*	*	*
	10	97,83	199	237,1	31,5	*	*	*	*	*
RCV-INT	1	97,96	197	*	*	4560	2,43	45,5	32,3	44,09
	2	97,05	199	*	*	4617	2,46	47,2	35,1	43,28
	3	98,20	197	*	*	4624	2,46	47,2	33,9	40,29
	4	97,51	198	*	*	4594	2,47	46,9	33,7	43,01
	5	97,06	194	*	*	4608	2,45	46,8	32,5	46,35
	6	98,79	201	330,6	43,1	*	*	*	*	*
	7	97,16	198	325,9	44,0	*	*	*	*	*
	8	98,53	199	323,2	42,4	*	*	*	*	*
	9	96,74	200	344,3	46,8	*	*	*	*	*
	10	97,87	199	315,7	42,0	*	*	*	*	*
RCV-RICO	1	97,93	200	*	*	4505	2,47	45,1	38,0	50,39
	2	97,83	199	*	*	4617	2,49	47,8	35,9	49,10
	3	97,63	201	*	*	4610	2,49	47,6	36,6	52,50
	4	97,80	199	*	*	4585	2,48	46,9	34,4	49,96
	5	97,97	201	*	*	4631	2,51	48,4	41,1	57,20
	6	97,89	200	393,4	52,3	*	*	*	*	*
	7	98,71	199	461,6	60,3	*	*	*	*	*
	8	96,52	199	322,2	44,0	*	*	*	*	*
	9	97,99	201	406,6	53,9	*	*	*	*	*
	10	96,89	199	392,2	53,2	*	*	*	*	*

Tabela A 2 - Resultados dos concretos produzidos com AGRC20

Traço	CP's	Ø (mm)	H (mm)	F rup (KN)	fcm (Mpa)	Vel (m/s)	ρ sat (kg/m³)	Ed (GPa)	Ee (GPa)	Trup (MPa)
ARC20-POBRE	1	97,35	199	*	*	4617	2,41	46,2	33,6	32,32
	2	97,89	199	*	*	4564	2,43	45,6	37,3	28,00
	3	97,82	198	*	*	4648	2,45	47,6	36,7	31,55
	4	96,92	198	*	*	4459	2,38	42,6	39,3	30,79
	5	97,81	199	*	*	4558	2,44	45,6	40,2	32,56
	6	97,54	198	225,4	30,2	*	*	*	*	*
	7	98,57	198	226,1	29,6	*	*	*	*	*
	8	97,42	198	224,6	30,1	*	*	*	*	*
	9	98,45	197	231,4	30,4	*	*	*	*	*
	10	97,98	197	239,7	31,8	*	*	*	*	*
ARC20-INT	1	97,66	198	*	*	4760	2,48	50,6	37,1	37,83
	2	97,36	199	*	*	4784	2,46	50,7	37,3	42,79
	3	97,91	200	*	*	4751	2,43	49,4	37,9	41,63
	4	97,23	198	*	*	4760	2,46	50,2	40,8	43,34
	5	98,27	198	*	*	4760	2,46	50,2	36,9	41,29
	6	96,33	197	300,9	41,3	*	*	*	*	*
	7	96,92	196	316,0	42,8	*	*	*	*	*
	8	96,47	198	327,3	44,8	*	*	*	*	*
	9	97,48	199	299,6	40,2	*	*	*	*	*
	10	96,74	198	310,9	42,3	*	*	*	*	*
ARC20-RICO	1	97,65	199	*	*	4794	2,47	51,1	42,7	52,75
	2	99,77	199	*	*	4784	2,48	51,1	40,6	50,95
	3	97,62	198	*	*	4760	2,47	50,3	41,1	48,04
	4	97,39	199	*	*	4716	2,45	49,0	45,7	47,85
	5	97,56	199	*	*	4807	2,49	51,8	40,9	46,13
	6	97,94	200	358,1	47,5	*	*	*	*	*
	7	97,87	198	345,7	46,0	*	*	*	*	*
	8	97,20	198	333,6	45,0	*	*	*	*	*
	9	97,80	198	339,1	45,1	*	*	*	*	*
	10	97,99	198	357,1	47,4	*	*	*	*	*

Fonte: Elaborado pela autor.

Tabela A 3 - Resultados dos concretos produzidos com AGRC40

Traço	CP's	Ø (mm)	H (mm)	F rup (KN)	fcm (Mpa)	Vel (m/s)	ρ sat (kg/m ³)	Ed (GPa)	Ee (GPa)	Trup (MPa)
ARC40-POBRE	1	97,35	197	*	*	4518	2,41	44,3	34,3	33,23
	2	98,72	198	*	*	4541	2,44	45,3	37,8	31,10
	3	97,81	199	*	*	4564	2,45	45,9	40,1	32,98
	4	97,81	199	*	*	4606	2,46	47,0	40,3	30,72
	5	98,37	198	*	*	4531	2,44	45,0	38,9	33,44
	6	96,52	198	222,4	29,7	*	*	*	*	*
	7	97,55	199	237,3	31,8	*	*	*	*	*
	8	98,27	199	227,1	30,0	*	*	*	*	*
	9	97,95	201	263,3	35,0	*	*	*	*	*
	10	97,36	199	237,7	31,9	*	*	*	*	*
ARC20-INT	1	98,60	199	*	*	4727	2,47	49,7	37,2	42,08
	2	97,18	199	*	*	4716	2,51	50,3	37,4	41,79
	3	97,46	199	*	*	4671	2,53	49,7	40,8	41,73
	4	98,43	200	*	*	4808	2,53	52,6	37,8	39,57
	5	97,03	202	*	*	4787	2,51	51,8	38,4	40,84
	6	97,70	200	305,4	40,7	*	*	*	*	*
	7	97,27	199	321,8	43,3	*	*	*	*	*
	8	97,36	199	317,6	42,7	*	*	*	*	*
	9	97,82	202	304,1	40,5	*	*	*	*	*
	10	97,72	199	314,8	42,0	*	*	*	*	*
ARC20-RICO	1	98,25	200	*	*	4751	2,47	50,2	44,0	44,81
	2	99,05	201	*	*	4763	2,46	50,2	39,7	34,41
	3	97,93	199	*	*	4727	2,48	49,9	42,4	35,06
	4	97,87	200	*	*	4739	2,47	49,9	39,0	47,92
	5	97,44	200	*	*	4695	2,48	49,2	41,3	40,11
	6	97,96	201	390,0	51,8	*	*	*	*	*
	7	98,61	199	346,8	45,4	*	*	*	*	*
	8	97,78	201	337,3	44,9	*	*	*	*	*
	9	98,35	200	384,2	50,6	*	*	*	*	*
	10	98,87	198	331,5	43,2	*	*	*	*	*

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela A 4 - Resultados dos concretos produzidos com AGN

Traço	CP's	Ø (mm)	H (mm)	F rup (KN)	fcm (Mpa)	Vel (m/s)	ρ sat (kg/m ³)	Ed (GPa)	Ee (GPa)	Trup (MPa)
REF-POBRE	1	97,57	197	256,58	34,3	*	*	*	*	*
	2	97,64	199	248,17	33,1	*	*	*	*	*
	3	97,14	198	242,67	32,7	*	*	*	*	*
	4	97,74	199	*	*	4747	2,55	51,82	34,93	32,14
	5	97,83	199	*	*	4733	2,55	51,41	36,78	31,11
	6	97,95	200	*	*	4802	2,54	52,76	37,75	34,24
REF-INT	1	97,03	200	321,63	43,5	*	*	*	*	*
	2	97,66	200	273,75	39,5	*	*	*	*	*
	3	98,65	199	290,90	38,1	*	*	*	*	*
	4	97,8	199	*	*	4884	2,58	55,32	36,85	39,79
	5	97,61	199	*	*	4870	2,58	55,05	40,50	40,12
	6	96,56	198	*	*	4896	2,60	56,13	42,94	38,30
REF-RICO	1	97,24	200	338,99	45,6	*	*	*	*	*
	2	98,98	200	363,43	47,2	*	*	*	*	*
	3	97,78	200	351,39	46,8	*	*	*	*	*
	4	97,88	199	*	*	5073	2,58	59,76	46,13	48,98
	5	97,63	199	*	*	5083	2,58	59,94	42,53	46,87
	6	98,87	198	*	*	5066	2,60	60,14	41,84	47,32

Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE B - VALORES DOS CONCRETOS PRODUZIDOS PARA DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE

Tabela B 1 - Resultados de porosidades dos concretos RCV

Traço	CP's	Ø (mm)	H (mm)	Porosidade (%)
RCV POBRE	1	99,95	49,86	6,74
	2	100,22	51,87	6,91
	3	105,05	54,46	6,68
RCV INT	1	100,66	49,13	6,27
	2	100,47	45,59	6,70
	3	100,88	48,01	6,57
RCV RICO	1	100,33	48,54	6,29
	2	100,79	48,93	6,28
	3	100,71	45,80	6,16

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela B 2 - Resultados de porosidades dos concretos ARC20

Traço	CP's	Ø (mm)	H (mm)	Porosidade (%)
ARC20 POBRE	1	105,38	52,33	6,93
	2	105,11	52,69	6,57
	3	105,38	52,89	6,28
ARC20 INT	1	104,55	52,25	6,21
	2	104,66	53,86	6,53
	3	104,57	52,93	6,23
ARC20 RICO	1	99,97	48,68	5,74
	2	99,59	48,10	6,25
	3	99,31	49,62	6,15

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela B 3 - Resultados de porosidades dos concretos ARC40

Traço	CP's	Ø (mm)	H (mm)	Porosidade (%)
ARC40 POB	1	105,49	53,04	6,82
	2	105,50	49,77	6,75
	3	105,56	56,65	6,61
ARC40 INT	1	105,64	52,74	6,48
	2	105,58	54,90	6,18
	3	105,76	55,70	6,51
ARC40 RICO	1	100,61	48,21	5,96
	2	100,73	48,35	5,88
	3	100,13	48,06	5,93

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela B 4 - Resultados de porosidades dos concretos REF

Traço	CP's	Ø (mm)	H (mm)	Porosidade (%)
REF POBRE	1	105,58	52,56	6,27
	2	105,61	53,83	6,59
	3	105,61	55,25	6,22
REF INT	1	100,33	49,82	6,41
	2	100,47	46,49	6,24
	3	100,37	48,78	5,93
REF RICO	1	99,89	50,21	6,14
	2	100,28	47,75	6,13
	3	100,56	43,47	5,88

Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE C - DESVIO PADRÃO E CV DOS CONCRETOS

Tabela C 1 - Desvio padrão e CV dos concretos produzidos

Traço	fcm		Ed		Ee		ρ sat		Porosidade	
	Desvio padrão (MPa)	CV (%)	Desvio padrão (GPa)	CV (%)	Desvio padrão (GPa)	CV (%)	Desvio padrão (g/cm³)	CV (%)	Desvio padrão (%)	CV (%)
RCV-POBRE	1,23	3,84	1,68	3,77	1,23	3,77	0,03	1,1	0,12	1,80
ARC20-POBRE	0,82	2,69	1,84	4,05	2,55	6,82	0,03	1,2	0,32	4,92
ARC40-POBRE	2,11	6,65	1,02	2,23	2,43	6,33	0,02	0,8	0,11	1,61
REF-POBRE	0,80	2,50	0,35	0,60	1,43	3,93	0,01	0,25	0,20	3,15
RCV-INT	1,94	4,44	0,73	1,57	1,13	3,38	0,02	0,6	0,22	3,37
ARC20-INT	1,73	4,10	0,53	1,06	1,60	4,21	0,02	0,7	0,18	2,83
ARC40-INT	1,22	2,92	1,33	2,62	1,45	3,78	0,02	1,0	0,18	2,88
REF-INT	2,80	6,94	0,92	1,47	3,06	7,64	0,01	0,53	0,24	3,92
RCV-RICO	5,81	11,0	1,28	2,72	2,53	6,79	0,02	0,6	0,07	1,16
ARC20-RICO	1,21	2,62	1,05	2,07	2,11	5,00	0,02	0,6	0,27	4,50
ARC40-RICO	3,76	7,98	0,41	0,82	2,03	4,92	0,01	0,3	0,04	0,69
REF-RICO	0,80	1,79	0,04	0,06	2,30	5,30	0,01	0,55	0,15	2,39

Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE D - MÓDULOS DE ELASTICIDADE ESTÁTICOS ESTIMADOS

Tabela D 1 - Ec's estimados a partir de equações algébricas normalizadas

Traço	a/c	Ee	CEB-FIP (1990)	Eurocode 2 (2004)	CSA A23.3 (2004)	NZS 3101 (2006)	JSCE15 (2007)	JCI (2008)	AS 3600 (2009)	ACI 318 (2011)	NBR 6118 (2014)
RCV	0,675	32,6	26,1	31,2	22,0	23,2	23,0	26,3	28,8	23,2	28,5
	0,540	33,5	27,5	34,2	26,9	26,7	28,1	31,5	34,5	28,2	33,3
	0,405	37,2	28,4	36,2	30,1	29,1	31,4	34,8	38,8	31,6	36,6
ARC20	0,675	37,4	25,9	30,7	21,3	22,6	22,3	25,5	28,3	22,4	30,9
	0,540	38,0	27,3	33,9	26,3	26,3	27,5	30,9	34,1	27,7	36,4
	0,405	42,2	27,7	34,8	27,8	27,4	29,0	32,4	35,9	29,2	38,1
ARC40	0,675	38,3	26,1	31,1	21,9	23,0	22,9	26,2	29,1	23,0	31,5
	0,540	38,3	27,3	33,8	26,2	26,2	27,3	30,7	35,0	27,5	36,2
	0,405	41,3	27,8	35,0	28,2	27,7	29,4	32,8	36,3	29,6	38,5
REF	0,675	36,5	26,3	31,6	22,7	23,6	23,7	27,0	32,0	23,8	38,8
	0,540	40,1	27,1	33,4	25,6	25,8	26,7	30,1	35,9	26,9	42,7
	0,405	43,5	27,8	34,9	27,9	27,5	29,2	32,6	38,9	29,4	45,8

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela D 2 - Ec's estimados a partir da literatura

Traço	a/c	Ee	Neville (1995)	Zilch e Roos (2001)	Kheder e Al- Windawi (2005)	Rahal (2007)	Corinaldesi (2010)	Dilbas et al. (2016)	Asef e Farrokhrouz (2017)	Gholam pour et al (2017)	Bui et al (2018)
RCV	0,675	32,6	37,0	31,4	21,5	28,8	22,1	8,0	32,9	23,3	21,4
	0,540	33,5	38,8	35,4	24,6	34,5	23,3	11,6	34,8	28,8	26,9
	0,404	37,2	39,2	38,5	26,6	38,8	24,0	14,1	35,3	35,1	31,0
ARC20	0,675	37,4	37,8	31,3	21,1	28,3	21,9	7,5	33,7	23,3	20,7
	0,540	38,0	41,7	35,2	24,2	34,1	23,2	11,2	37,7	28,8	26,3
	0,405	42,2	42,0	36,5	25,2	35,9	23,5	12,3	38,2	35,1	28,1
ARC40	0,675	38,3	37,8	32,1	21,5	29,1	22,1	8,0	33,8	23,3	21,3
	0,540	38,3	42,2	36,6	24,1	35,0	23,1	11,3	38,3	28,8	26,1
	0,405	41,3	41,4	36,7	25,4	36,3	23,6	12,6	37,8	35,1	28,5
REF	0,675	36,5	43,2	35,5	21,9	32,0	22,3	9,0	39,1	25,2	22,1
	0,540	40,1	46,1	38,5	23,8	35,9	23,0	11,3	42,1	31,0	25,4
	0,405	43,5	49,8	40,5	25,2	38,9	23,5	13,0	45,8	37,9	28,2

Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE E - DADOS ESPECÍFICOS DOS AGREGADOS GRAÚDOS

Tabela E 1 - massa unitária e volume de vazios dos AG

Propriedade	Massa unitária (g/cm ³) e índice de volume de vazios (%)											
	RCV			ARC20			ARC40			REF		
	Det1	Det2	Det3	Det1	Det2	Det3	Det1	Det2	Det3	Det1	Det2	Det3
Massa unitária (g/cm ³)	1,02	1,02	1,02	1,26	1,27	1,28	1,25	1,25	1,22	1,67	1,69	1,70
Índice de volume de vazios (%)	58,7	58,7	58,7	53,7	54,3	53,2	55,2	53,9	53,6	42,0	42,8	41,2

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela E 2 - ρ do AG seco, ρ do AG saturado superfície seca, ρ aparente e absorção de água

Propriedade	ρ AG seco, ρ AG sss, ρ Aparente e absorção de água							
	RCV		ARC20		ARC40		REF	
	Det1	Det2	Det1	Det2	Det1	Det2	Det1	Det2
ρ do AG seco (g/cm ³)	2,47	2,47	2,72	2,71	2,70	2,70	2,88	2,89
ρ do AG sss (g/cm ³)	2,17	2,16	2,42	2,42	2,43	2,42	2,81	2,79
ρ aparente (g/cm ³)	1,96	1,96	2,26	2,26	2,27	2,26	2,76	2,75
Absorção de água (%)	10,66	10,58	7,28	7,40	7,02	7,01	1,63	1,63

Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE F - DADOS ESPECÍFICOS DO AGREGADO MIÚDO

Tabela F 1 - massa unitária e volume de vazios do AM

Propriedade	Determinação		
	Det1	Det2	Det3
Massa unitária (g/cm ³)	1,56	1,56	1,57
Índice de volume de vazios (%)	39,60	39,73	39,60

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela F 2 - ρ do AM seco, ρ do AM saturado superfície seca, ρ aparente e absorção de água

Propriedade	Determinação	
	Det1	Det2
ρ aparente do AM seco (g/cm ³)	2,55	2,56
ρ do AM SSS (g/cm ³)	2,57	2,57
ρ (g/cm ³)	2,59	2,58
Absorção de água (%)	0,51	0,51

Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE G - ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO DOS AG'S

Tabela G 1 - Absorção de água por imersão dos agregados graúdos

Tempo (min)	Absorção de água (%)			
	RCV	ARC20	ARC40	REF
1	1,0	0,3	0,2	0,2
2	1,3	0,4	0,3	0,2
3	2,3	0,8	0,5	0,3
4	2,9	1,1	0,8	0,5
5	3,8	1,6	1,2	0,8
10	4,7	2,2	1,8	1,3
15	4,9	2,2	1,9	1,3
30	5,2	2,4	2,1	1,4
60	5,5	2,7	2,2	1,5
120	5,9	2,8	2,4	1,6
180	6,4	3,2	2,6	1,8
240	6,7	3,4	2,8	2,0
300	7,0	3,7	3,0	1,9
360	8,3	5,4	4,2	2,0
1440	8,4	5,5	4,4	2,1
2880	8,4	5,6	4,5	2,1
4320	8,4	5,7	4,6	2,1
8640	8,4	5,9	4,8	2,1
10080	8,5	6,3	5,1	2,1
20160	8,6	7,0	6,2	2,7

Fonte: Elaborada pelo autor.