



UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS
CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**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**

DANIELE ARTINI GUJEL

São Leopoldo, Abril de 2014.

DANIELE ARTINI GUJEL

**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**

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

Orientador: Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak

Co-Orientador: Prof. Dr. João Ricardo Masuero

Banca examinadora: Prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio Jr.

Prof. Dr. Mauricio Mancio

São Leopoldo, Abril de 2014.

G952a Gujel, Daniele Artini.

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, São Leopoldo - RS / por Daniele Artini Gujel. – 2014.

131 f. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, São Leopoldo, RS, 2014.
“Orientação: Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak”.

1. Agregados (Materiais de construção). 2. Concreto. I. Título.

CDU 691.322:552

Catálogo na Publicação:
Bibliotecário Thiago Lopes da Silva Wyse - CRB 10/2065

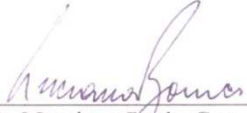
DANIELE ARTINI GUJEL

**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**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração: Gerenciamento de Resíduos, da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

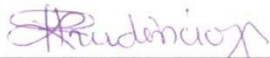
Aprovada em 02 de abril de 2014.


Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak
Orientador – PPGEC/UNISINOS


Prof.^a Dr.^a Luciana Paulo Gomes
Coordenadora do PPGEC/UNISINOS


Prof. Dr. João Ricardo Masuero
Coorientador - UFRGS

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio Jr. - UFSC


Prof. Dr. Mauricio Mancio – PPGEC/UNISINOS

“O mais importante de tudo é nunca deixar de se perguntar. A curiosidade tem sua própria razão de existir”.

Albert Einstein

“Talento é sorte. A única coisa que importa é coragem”.

Woody Allen

AGRADECIMENTOS

Em momento algum este trabalho foi realizado individualmente. Há muitas pessoas a quem devo agradecer e para muitas delas, um simples agradecimento é muito pouco para expressar o quanto fizeram por mim e o quanto torceram pelo meu sucesso.

Aos meus pais, Leda e Osvaldo pela minha criação e educação, o que me trouxe até aqui. Pelo amor de sempre e por estarem incondicionalmente ao meu lado. À minha irmã Angela pelo auxílio nos gráficos deste trabalho, assim como na formatação final.

Ao meu marido Daniel por todo amor, incentivo, paciência e ajuda. Meu “bolsista particular” do laboratório. Obrigada por ficar ao meu lado, para que eu pudesse enfrentar tudo com coragem e tranquilidade. Foste tu que, por muitas vezes, deste aquele empurrão para que eu continuasse forte, sem desistir. Foste tu quem mais acreditou em mim e me apoiou nesta caminhada. Obrigada por me aguentar quando estive triste, brava ou nervosa. Obrigada pelo refúgio de São Leopoldo. Obrigada por tudo. Não tenho palavras. Te amo.

Ao meu orientador, professor Claudio, por ter acreditado em mim e pela confiança depositada para a realização deste projeto de tamanha importância. Também agradeço a todos os ensinamentos conferidos, atenção, amizade e as horas em orientação.

Ao professor João Masuero, pelo amparo, acolhimento e excelente co-orientação. Pelas diversas trocas de e-mail, por todas as discussões em torno do trabalho e por toda aprendizagem que obtive contigo. Com certeza, com a tua participação o meu projeto ficou mais rico. Foi um prazer te conhecer e trabalhar contigo.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos e à FINEP, pelo financiamento da pesquisa.

Meus agradecimentos também:

Ao professor Mauricio Mancio pelas valiosas sugestões no exame de qualificação.

A todos os membros do grupo GMAT. Em especial à professora Marlova.

Aos demais professores do PPGEC. Saibam que, em cada uma de suas disciplinas aprendi conteúdos valiosos para o meu projeto.

À Votorantim, representada pelo Arq. Douglas Henkes pela doação de cimento. À empresa PréConcretos pelo donativo do agregado reciclado de concreto.

Ao pessoal da secretaria do PPGEC, em especial à Simone, que sempre deu uma forcinha para que eu não precisasse me deslocar por 100 km para assinar algum documento. Foste muito atenciosa sempre.

Aos “tchais”, técnicos do laboratório de materiais de construção, Maurício, Ingrid e Rodrigo. Um obrigado especial ao Felipe que até mesmo doente esteve “firme” para me ajudar em dias de concretagens e em dias de operação da prensa nos ensaios de módulo. Aos também “tchais”, bolsistas de iniciação científica, Lucas e Naiara por terem carregado, misturado, peneirado e pré-molhado os materiais, pela ajuda nas concretagens e também por terem entrado e saído diversas vezes da sala de cura, além de terem sujado suas mãos de vaselina junto comigo quando dos ensaios de módulo. Com certeza, com a companhia de vocês, todo o trabalho em laboratório ficou mais agradável e divertido.

A todos os colegas do mestrado, em especial ao Rodrigo e à Roseane, meus dindos.

À minha Dinda Miriam pelo apoio, pelas ligações reconfortantes e toda a boa energia a mim emanada.

À Pizzetti Engenheiros, por me incentivar a continuar os estudos, independente da área da engenharia e pela possibilidade que me deram para concluir esta etapa em minha vida.

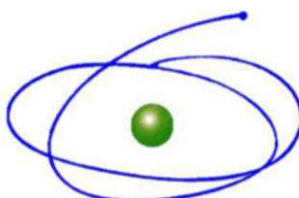
Ao Mestre Engenheiro Civil Artur, quem conheci através da engenharia, pelas dicas valiosas e por sempre se oferecer para revisar o meu trabalho.

A todos os meus amigos e amigas, em especial Bruna e Rodrigo, Cláudia e Marcelo, Kelly e Vinicius e Alex e Cássia, agradeço pela força, amizade e compreensão nos dias ausentes.

A todos, os meus sinceros agradecimentos. Obrigada por me compreenderem nos momentos difíceis e em minhas eventuais ausências. Mas saibam que tudo valeu a pena. Muito obrigada!

FONTES DE FINANCIAMENTO DA PESQUISA

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior –
CAPES/PROSUP.



C A P E S

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP.



FINANCIADORA DE ESTUDOS E PROJETOS
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	JUSTIFICATIVA	26
1.2	OBJETIVOS	29
1.2.1	Objetivo geral.....	29
1.2.2	Objetivos específicos	29
1.3	ESTRUTURA DA PESQUISA	30
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1	O MÓDULO DE ELASTICIDADE E O CONCRETO	31
2.1.1	Módulo de Elasticidade no concreto	32
2.1.2	Fatores que afetam a porosidade e o Módulo de Elasticidade.....	35
2.1.3	Métodos de Ensaio para Obtenção do Módulo de Elasticidade.....	39
2.1.4	Módulo de Elasticidade e relações de Normas internacionais e brasileiras.....	42
2.1.5	Módulo de Elasticidade de concretos com ARC.....	44
2.2	PROPRIEDADES DOS AGREGADOS PROVENIENTES DE CONCRETOS E DE CONCRETOS COM ARC.....	48
2.2.1	Propriedades no Concreto no Estado Fresco.....	53
2.2.2	Propriedades do Concreto no Estado Endurecido	54
2.2.3	Coefficiente de Poisson.....	55
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	56
3.1	PLANEJAMENTO DA PARTE EXPERIMENTAL	56
3.2	MATERIAIS.....	57
3.2.1	Cimento.....	57
3.2.2	Água.....	57
3.2.3	Agregado Graúdo Natural (AGN).....	58
3.2.4	Agregado Miúdo Natural (AMN).....	58
3.2.5	Agregado Graúdo Reciclado de Concreto (ARC)	60
3.3	MÉTODOS E PARÂMETROS DE ENSAIO.....	61
3.3.1	Idade dos Ensaios.....	62
3.3.2	Níveis de carregamento para determinação do módulo.....	62
3.3.3	Variáveis de controle.....	63
3.3.4	Variáveis de resposta.....	63
3.3.5	Matriz fatorial	64
3.3.6	Nomenclatura dos corpos de prova.....	64
3.3.7	Replica de ensaios	64
3.3.8	Métodos de Ensaio.....	65
3.3.9	Obtenção da curva tensão x deformação segundo a NBR 8522 (ABNT, 2008).....	73
3.3.10	Obtenção do Módulo de Elasticidade Estático.....	74
3.3.11	Obtenção da curva tensão x deformação a partir de um ensaio instrumentado com capacidade de leitura contínua e automatizada.....	77
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISES DE RESULTADOS.....	80
4.1	MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E DINÂMICO	80
4.1.1	Concretos sem ARC.....	80
4.1.2	Concretos com ARC.....	85
4.1.3	Concretos de mesmas Classes.	90
4.2	DISPERSÃO DE VALORES DE MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO	94
4.3	MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO SOB TENSÃO.....	96
4.4	COMPORTAMENTO ELÁSTICO E OBTENÇÃO DO MÓDULO POR REGRESSÃO	99
4.5	RELAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DINÂMICO E ESTÁTICO SOB O PONTO DE VISTA DA PERDA DE ELASTICIDADE LINEAR	105
4.6	CURVAS TENSÃO X DEFORMAÇÃO REPRESENTATIVAS	106
4.7	PREVISÃO DAS NORMAS VIGENTES.....	110
4.8	RESULTADOS PARA CONCRETOS JOVENS (7 DIAS).....	112

5	CONCLUSÕES	117
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	117
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	120
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Relações para o Módulo de Elasticidade e particularidades de duas normas internacionais e da norma brasileira.	43
Tabela 2 – Comparação das propriedades do concreto com agregados reciclados não contaminados em relação às do concreto com agregado natural de composição semelhante..	53
Tabela 3 – Características químicas do cimento Portland CPV-ARI RS.....	57
Tabela 4 – Características físicas e mecânicas do cimento Portland CPV-ARI RS.....	57
Tabela 5 – Características físicas do agregado graúdo natural.....	58
Tabela 6 – Características físicas do agregado miúdo natural.....	59
Tabela 7 - Características físicas do agregado reciclado de concreto.	60
Tabela 8 – Influência do coeficiente de Poisson no cálculo do Módulo de Elasticidade para concretos com ARC.....	72
Tabela 9 – Influência do coeficiente de Poisson no cálculo do Módulo de Elasticidade para concretos sem ARC.	72
Tabela 10 – Resultados dos ensaios para todas as relações a/agl , aos 28 e 63 dias de idade - concretos sem ARC.	81
Tabela 11 – ANOVA do fator independente em relação à compressão e idade para os concretos sem ARC (ensaio Estático).	82
Tabela 12 - ANOVA do fator independente em relação à compressão e idade para os concretos sem ARC (ensaio Dinâmico).	84
Tabela 13– Resultados dos ensaios para todas as relações a/agl , aos 28 e 63 dias de idade - concretos com ARC.....	86
Tabela 14 – ANOVA do fator independente em relação à compressão e idade para os concretos com ARC.....	87
Tabela 15 - ANOVA do fator independente em relação à compressão e idade para os concretos com ARC (ensaio Dinâmico).	88
Tabela 16 – Dados considerados na análise de concretos de mesma classe.....	91
Tabela 17 – ANOVA do fator independente (MEE e MED – Classe C40) em relação à porcentagem de substituição de AGN por ARC.....	91
Tabela 18 - ANOVA do fator independente (MEE com e sem exclusão de valores dispersos e MED – Classe C45) em relação à porcentagem de substituição de AGN por ARC.....	92
Tabela 19 - ANOVA do fator independente (MEE e MED – Classe C50) em relação à porcentagem de substituição de AGN por ARC.....	92
Tabela 20 – ANOVA do fator independente (MEE – Todas as Classes de concreto) em relação à porcentagem de substituição de AGN por ARC.	93
Tabela 21 - ANOVA do fator independente (MED – Todas as Classes de concreto) em relação à porcentagem de substituição de AGN por ARC.....	93
Tabela 22 – Valores de MEE dispersos e excluídos para concretos sem ARC.....	94
Tabela 23 – Valor de MEE disperso e excluído para concretos com ARC.....	94
Tabela 24 – ANOVA do fator independente em relação à compressão e idade para os concretos sem ARC (ensaio Estático) com a exclusão de valores de muita variabilidade.....	95
Tabela 25 – ANOVA do fator independente em relação à compressão e idade para os concretos com ARC (ensaio Estático) com a exclusão de valores de muita variabilidade.	95
Tabela 26 – Valores médios de MED para concretos sem ARC.....	98
Tabela 27 – Valores médios de MED para concretos com ARC.	98
Tabela 28 - Comparação entre MEE obtido através da norma NBR 8522 e através de regressão (concretos sem ARC).	101

Tabela 29 – Comparação entre MEE obtido através da norma NBR 8522 e através de regressão (concretos com ARC).	102
Tabela 30 – ANOVA do fator independente obtido através de regressão por mínimos quadrados em relação à compressão e idade para os concretos sem ARC.	103
Tabela 31 – ANOVA do fator independente obtido através de regressão por mínimos quadrados em relação à compressão e idade para os concretos com ARC.....	103
Tabela 32 – Coeficientes de determinação nos níveis de carga onde a velocidade de onda diminuiu – Concretos sem ARC.	105
Tabela 33 – Coeficientes de determinação nos níveis de carga onde a velocidade de onda diminuiu – Concretos com ARC.....	105
Tabela 34 – Resultados dos ensaios para todas as relações a/agl, aos 7 dias de idade– concretos sem ARC.....	113
Tabela 35 – Resultados dos ensaios para todas as relações a/agl, aos 7 dias de idade – concretos com ARC.	114
Tabela 36 – Valores dispersos e excluídos para concretos sem ARC, rompidos aos 7 dias de idade.	115
Tabela 37 – Valores dispersos e excluídos para concretos com ARC, rompidos aos 7 dias de idade.	115

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Número de artigos acadêmicos publicados na China entre 2000 e 2009 sobre agregados graúdos reciclados.	24
Figura 2 – Organograma com projetos do GMAT relacionados a resíduos de concreto.	28
Figura 3 - Diagrama tensão x deformação típico do concreto (compressão simples).	32
Figura 4 – Representação do comportamento tensão x deformação do concreto sob compressão uniaxial. (Baseado em Glücklich, J., <i>Proceedings of International Conference on the Structure of Concrete, Cement and Concrete Association</i> , Wexham Springs, Slough, U. K., pp. 176-185, 1968).	33
Figura 5 – Diferentes tipos de módulos de elasticidade e o método que os determina.	34
Figura 6 - Representação esquemática do módulo de deformação secante (E_{cs}).	34
Figura 7 – Módulo de Elasticidade de concretos com diferentes tipos de agregados graúdos e resistências.	36
Figura 8 – Relação entre a resistência à compressão e o Módulo de Elasticidade por Shideler, J. J., <i>J. ACI, Proc.</i> , v. 54, n. 4, 1957).	38
Figura 9 – Evolução média de resistência à compressão dos distintos tipos de cimento Portland.	38
Figura 10 – Valores de Módulo de Elasticidade obtidos por expressões teóricas.	44
Figura 11 - Relação entre os módulos de elasticidade do concreto em relação as densidades de agregados na mistura.	46
Figura 12 - Proporção entre os módulos de elasticidade do concreto e a razão entre as absorções de água de agregados na mistura.	46
Figura 13 - Proporção entre os módulos de elasticidade do concreto e a razão entre as resistências aos 7 dias do concreto.	47
Figura 14 – Diagramas tensão x deformação dos concretos com teores crescentes de substituição de ARC. Fonte: Latterza (1998).	52
Figura 15- Resultados dos testes de compressão.	54
Figura 16 – Diagrama do estudo experimental.	56
Figura 17 - Curva da distribuição granulométrica do agregado miúdo natural.	59
Figura 18 – Absorção de água ao longo do tempo por imersão – ARC e AGN.	61
Figura 19 - Diagrama do estudo experimental.	64
Figura 20 – Forma de identificação dos exemplares.	64
Figura 21 – Representação esquemática do carregamento para a determinação do Módulo de Elasticidade.	66
Figura 22 – <i>Data logger</i> Ahlborn.	66
Figura 23 – <i>Clip gauges</i> do <i>Data Logger</i> acoplados no corpo de prova cilíndrico.	67
Figura 24 – Aparelho de ultrassom do tipo PUNDIT Lab.	68
Figura 25 – Cilindro padrão do ultrassom – Calibração.	68
Figura 26 – Medida longitudinal da velocidade de onda.	69
Figura 27 – Vista frontal e superior do corpo de prova com os adaptadores dos sensores acoplados no sentido transversal do exemplar.	69
Figura 28 – Corpos de prova com sensores do ultrassom e <i>clip gauges</i> ensaiados na prensa hidráulica.	71
Figura 29 – Gráfico tensão x deformação com patamares.	73
Figura 30 – Locação dos pontos para plotagem de gráficos sem patamares.	74
Figura 31 – Gráfico tensão x deformação sem patamares.	74
Figura 32 – Tensão x deformação para o concreto sem ARC, rompido aos 63 dias e com a/agl de 0,45.	76

Figura 33 - Tensão x deformação para o concreto com ARC, rompido aos 28 dias e com a/agl de 0,65.....	76
Figura 34 – Representação gráfica do módulo tangente inicial e do módulo secante a 3,6 MPa.	77
Figura 35 – Módulo de Elasticidade Estático para concretos sem ARC.	83
Figura 36 - Módulo de Elasticidade Dinâmico para concretos sem ARC.	84
Figura 37 – Comparação entre os valores do módulo Estático e Dinâmico para o concreto sem ARC, nas idades de 28 e 63 dias.	85
Figura 38 - Módulo de Elasticidade Estático para concretos com ARC.....	88
Figura 39 – Módulo de Elasticidade Dinâmico para concretos com ARC.	89
Figura 40 - Comparação entre os valores do módulo Estático e Dinâmico para o concreto com ARC, nas idades de 28 e 63 dias.	89
Figura 41 - Módulo de Elasticidade Estático para concretos sem ARC – valores dispersos excluídos.	96
Figura 42 - Módulo de Elasticidade Estático para concretos com ARC – valores dispersos excluídos.	96
Figura 43 – MED para concreto sem ARC, a/agl 0,45, rompido aos 28 dias.....	97
Figura 44 – Gráfico de tensão x deformação com o MEE obtido através de regressão para exemplar de concreto com ARC, a/agl 0,45, rompido aos 28 dias.....	100
Figura 45 – Gráfico de tensão x deformação com o MEE obtido através de regressão para exemplar de concreto sem ARC, a/agl 0,55, rompido aos 63 dias.	100
Figura 46 – Módulo de Elasticidade Estático obtido pela regressão por mínimos quadrados (desconsiderados valores de alta variabilidade) para concretos sem ARC.....	104
Figura 47 – Módulo de Elasticidade Estático obtido pela regressão por mínimos quadrados (desconsiderados valores de alta variabilidade) para concretos com ARC.	104
Figura 48 – Comparação das curvas de MEE dos dados tratados e com os pontos finais de cada patamar do exemplar 55N63D03.....	106
Figura 49 – Comparação das curvas de MEE dos dados tratados e com os pontos finais de cada patamar do exemplar 45R28D03.	107
Figura 50 – Curvas médias para concretos rompidos aos 28 dias de idade com obtenção de dados conforme NBR 8522.....	108
Figura 51 – Curvas médias para concretos rompidos aos 63 dias de idade com obtenção de dados conforme NBR 8522.....	109
Figura 52 – Curvas médias para concretos de mesma relação a/agl sem ARC (28 e 63 dias)-Obtenção de dados conforme NBR 8522 e por aquisição automática de dados.....	110
Figura 53 - Curvas médias para concretos de mesma relação a/agl com ARC (28 e 63 dias)-Obtenção de dados conforme NBR 8522 e por aquisição automática de dados.....	110
Figura 54 – Comparação entre MEE para concretos com e sem ARC e valores normativos.....	111
Figura 55 - Comparação entre MED para concretos com e sem ARC e valores normativos.....	112

LISTA DE ABREVIATURAS

A.A.D – Aquisição automática de dados

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de normas técnicas

ACI – *American Concrete Institute*

AGN - Agregado graúdo natural

ARC - Agregado graúdo reciclado de concreto

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

BS – *British Standards Institutions*

CEB-FIP - *Comité Euro-International du Béton - Fédération Internationale de la Précontrainte*

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CPB – Cimento Portland Branco

CPC – Cimento Portland Comum

CPIII-AF – Cimento Portland de Alto Forno

CPI-S – Cimento Portland Comum

CPIV – Cimento Portland Pozolânico

CPV-ARI – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial

CV – Coeficiente de Variação

DIFER. REL. – Diferença relativa

ES – Efeito significativo

GL – Grau de liberdade

GMAT – Grupo de Pesquisa em Materiais de Construção e Reciclagem

IPT-EPUSP – Instituto de Pesquisas Tecnológicas – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

LE – Comprimento de propagação de onda ultrassônica equivalente

MED – Módulo de Elasticidade Dinâmico

MEE – Módulo de Elasticidade Estático

MQ – Média quadrada

NBR – Norma Brasileira

ND – Não Disponível

NM – Norma Mercosul

NRE – Não realizado ensaio

PPGEC – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

PUNDIT – *Portable Ultrasonic Non Destructive Indicating Tester*

R² - Coeficiente de determinação

RCD – Resíduos de construção e demolição

RILEM – *Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages*

S.AGN – Substituição de agregado natural

SQ – Soma quadrada

T – Tempo de propagação de onda ultrassônica

TA - Tempo de propagação de onda ultrassônica nos adaptadores

TD - Tempo de propagação de onda ultrassônica diametral

V – Velocidade de onda ultrassônica

VL – Velocidade de onda na direção longitudinal

VM – Velocidade de propagação de onda ultrassônica medida

VR – Velocidade de propagação de onda ultrassônica real

LISTA DE SÍMBOLOS

a/agl – Relação água/aglomerante

C₃S – Silicato tricálcico

cm – Centímetro

E_{ci} – Módulo de Elasticidade tangente inicial do concreto, referindo-se ao módulo cordal a 30% f_c

E_c – Módulo de Elasticidade longitudinal tangente

E_{cs} – Módulo de Elasticidade secante do concreto

f_c – Resistência à compressão do concreto

f_{cj} – Resistência à compressão do concreto aos j dias

f_{ck} – Resistência característica à compressão do concreto

f_{cm} – Resistência média à compressão do concreto

f_t – Resistência à tração

g/cm³ - Grama por centímetro cúbico

GPa – Giga Pascal

h – horas

kg – Quilograma

kg/dm³ - Quilograma por decímetro cúbico

kg/m³ - Quilograma por metro cúbico

kHz - Quilohertz

kN – Quilo Newton

MgO – Óxido de magnésio

mm – milímetro

mm/mm – Milímetro por milímetro

MPa – Mega Pascal

°C – Grau Celsius

s – Segundo

SO₃ – Trióxido de enxofre

t/m³ - Tonelada por metro cúbico

ν = Coeficiente de Poisson

w_c – Densidade do concreto

α_E – Variável do tipo do agregado

δ – Densidade do concreto

ε – Deformação específica

ε_a – Deformação específica média sob tensão básica (0,5 MPa)

ε_b – Deformação específica média sob a tensão maior

ε_o – Deformação do concreto, cujo valor médio é 2 ‰

ε_u – Deformação do concreto, cujo valor médio é 3,5 ‰

ε_x – Deformação específica em 3,6 MPa

σ_c – Tensão à compressão no concreto

σ_b – Tensão maior em 0,3 f_c

RESUMO

GUJEL, DANIELE ARTINI. **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**. São Leopoldo, 2014. 127 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo. 2014.

A construção civil é um setor que causa elevado impacto ambiental devido à geração de resíduos e ao elevado consumo de matérias-primas. Demandas cada vez maiores por áreas a serem destinadas a aterros, aliadas à escassez de recursos naturais, favorecem a utilização de resíduos de construção e demolição como fonte para agregados.

Neste contexto, muitos estudos estão sendo feitos a respeito de concretos produzidos com resíduos de construção e demolição, focados principalmente nas propriedades mecânicas de resistência à tração e à compressão. Para aplicação como material estrutural, entretanto, a relação tensão x deformação e, particularmente, o Módulo de Elasticidade são importantes parâmetros a serem analisados, pois são diretamente relacionados com o projeto de estruturas. Frente ao exposto, o presente trabalho utilizou agregado graúdo reciclado de concreto (ARC) na confecção de novos concretos e teve como objetivo analisar o comportamento elástico dos mesmos. Para tanto, foram confeccionados concretos com 0% e 50% de substituição de agregados graúdos naturais (AGN) por ARC. O comportamento elástico foi determinado através de um método destrutivo (Estático) e através de um método não destrutivo (Dinâmico) nas idades de 7, 28 e 63 dias para os níveis de carregamento de 0 (somente Dinâmico), 20, 30, 40, 50, 60, 70 e 80% da resistência do concreto. Os resultados encontrados para o Módulo de Elasticidade foram comparados com estimativas a partir de métodos empíricos previstos nas normas CEB-FIP *Model Code* 1990, ACI 318 (2011) e NBR 6118 (ABNT, 2007 e 2014). Com isso, visou-se observar a influência do ARC nas propriedades elásticas do concreto, comparar o comportamento elástico dos concretos de referência aos resultados dos concretos com ARC, estudar a correlação entre os dois métodos experimentais (Dinâmico e Estático) e verificar a correspondência entre os resultados experimentais obtidos com os normativos.

Como principais conclusões, pôde-se verificar que os concretos com ARC apresentam limite elástico similar aos concretos que utilizam somente AGN (este limite situa-se entre 40 e 50% da f_c); não foi possível identificar uma relação única entre os valores de módulo obtidos pelo Método Dinâmico e pelo Método Estático para ambos os concretos; não é possível afirmar que concretos de resistências similares, mas idades diferentes apresentaram módulos diferentes; os concretos com e sem ARC estudados apresentaram valores de Módulo de Elasticidade obtidos pelo método Estático bastante inferiores aos previstos pelas normas estudadas; os valores de Módulo de Elasticidade obtidos pelo método Dinâmico, para concretos com e sem ARC, estão contidos na faixa entre a norma mais conservadora e a menos conservadora e as curvas obtidas mostram que os concretos com ARC têm comportamento similar aos concretos sem ARC, mas são menos rígidos (maiores deformações para as mesmas tensões).

Palavras-chave: agregado reciclado de concreto, módulo de elasticidade, concreto.

ABSTRACT

GUJEL, DANIELE ARTINI. **Evaluation of the elastic behavior on concretes produced by the partial substitution of natural coarse aggregates by recycled ones from dynamics and static trials.** São Leopoldo, 2014. 127 p. Dissertation (Master Degree in Civil Engineering) – Postgraduate Civil Engineering Program, Unisinos, São Leopoldo.

The construction industry causes a great environmental impact due to the generation of waste and the high consumption of raw material. Increasing demands for areas to become landfills, as well as shortages of natural resources, have favored the use of construction and demolition waste as a source of aggregate.

In this context, many studies have been made regarding concretes produced with the use of demolition and construction waste; mainly focused on the mechanical properties of tensile and compressive strength. However, in order to use concretes produced with waste as a structural material, the stress-strain behavior and, particularly, the elastic modulus are important parameters to be analyzed, once they are directly related to structural design.

Based on that, the objective of this project is to analyze the elastic behavior of concretes using coarse natural aggregates (NA) and 50% of substitution of these aggregate by coarse recycled concrete aggregates (RCA).

The elastic behavior was determined by both a destructive method (static) and a non-destructive one (dynamic) on the ages of 7, 28 and 63 days for the loading levels of 0 (only dynamic), 20, 30, 40, 50, 60, 70 and 80% of respective concrete strength. The found results for the Modulus of Elasticity have been compared to estimates based on the empirical recommendations by CEB-FIP Model Code 1990, ACI 318 (2011) and NBR 6118 (ABNT, 2007 and 2014) standards.

The objectives of this work were to observe the influence of the RCA on the elastic properties of concrete; to compare the elastic behavior between concretes with and without RCA, to study the correlation of both experimental methods (dynamic and static) and finally to check the relation between measured and calculated values of modulus of elasticity.

The conclusions indicate that concretes with and without RCA have similar elastic limits (between 40% and 50% of the concrete strength); it is not possible to identify a unique relationship between the values obtained by dynamic and static methods for both concretes; it is not possible to assert that concretes with similar strength, but different ages, have different modulus; the values of modulus of elasticity obtained by the static method for both concretes are significantly below that indicated by the considered standards; the values of modulus of elasticity obtained by the dynamic method for concrete with and without RCA are contained in the range between the more and less conservative standards and concretes with RCA have a similar behavior than concretes without RCA, but are less rigid (larger strain for the same stress).

Key words: recycled concrete aggregate, modulus of elasticity, concrete.

1 INTRODUÇÃO

Dentre os produtos passíveis de serem obtidos a partir de Resíduos de Construção e Demolição (RCD), os agregados graúdos gerados a partir da britagem de fragmentos de concreto, chamados Agregados Reciclados de Concreto (ARC) são os que apresentam maior potencial de aproveitamento para uso em novos concretos com fins estruturais.

No dimensionamento estrutural, a resistência mecânica dos concretos (em especial a resistência à compressão) está intimamente ligada ao comportamento da estrutura no estado limite último, ao passo que o Módulo de Elasticidade está associado ao comportamento no estado limite de serviço, determinando a maior ou menor deformação da estrutura sob a ação das cargas. O Módulo de Elasticidade dos concretos varia em função das propriedades dos seus componentes, particularmente do agregado graúdo (Mehta e Monteiro, 2008).

Desta forma, a viabilização do uso de ARC em concretos para fins estruturais, em substituição parcial aos Agregados Graúdos Naturais (AGN), depende também do entendimento de como tais agregados afetam o comportamento elástico dos concretos resultantes, tema pouco estudado e objeto deste trabalho.

Segundo Xiao, Li e Poon (2012), na China os estudos sobre produção e comportamento de agregados reciclados de concreto começaram a cerca de 15 anos e, após a publicação de um artigo em 2003 por Xiao, os benefícios e a importância dos ARC começaram a ficar mais conhecidos por mais engenheiros na China. Nos últimos 10 anos, mais de 30 Universidades se engajaram a estudar as propriedades físicas e mecânicas, proporções, efeitos e aplicações dos ARC. No ano de 2008, em Xangai, foi criado o Código “*Technical code for application of recycled concrete*” (DG/TJ08-2018-2007). Além disso, um livro acadêmico chamado “*Recycled Concrete*” foi escrito por Xiao e publicado em 2008. Conforme os autores expõem, o número de publicações sobre esse assunto tem aumentado nos últimos nove anos, o que pode ser visualizado na Figura 1.

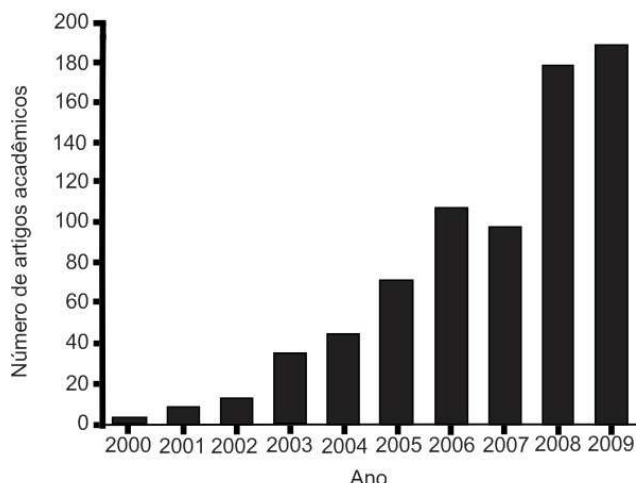


Figura 1 – Número de artigos acadêmicos publicados na China entre 2000 e 2009 sobre agregados graúdos reciclados.

Fonte: <http://wanfangdata.com.cn> apud Xiao, Li e Poon (2012).

Na Espanha, não há lei nacional de regulação ambiental para materiais reciclados, e, os órgãos ambientais dos diferentes governos regionais são os principais responsáveis pela regulamentação do uso de materiais secundários na construção de estradas e outras aplicações na construção. No entanto, existem várias especificações técnicas para materiais utilizados na construção. Por exemplo, o Código Espanhol de Concreto Estrutural EHE-08 estabelece as especificações para estruturas de concreto. Mais especificamente, o artigo 28 apresenta os requisitos para agregados, e o anexo 15 relaciona as especificações para agregados reciclados. Na província de Granada (Andaluzia, Espanha), um plano de gestão de resíduos de construção e demolição foi implantado e o programa gerencia esses tipos de resíduos em algumas usinas de reciclagem; os agregados reciclados, que podem ser usados na construção, e outros produtos recicláveis como madeira, plástico e metal foram assim recuperados, e o resto dos materiais foi depositado em aterros sanitários. (MARTÍN-MORALES et al., 2011)

Tam (2009) estudou a implantação de concretos reciclados em indústrias da construção civil na Austrália e no Japão. Aproximadamente 68% das empresas de construção japonesas e 48% das australianas usam políticas de reciclagem de concreto. O governo japonês exige dos empreiteiros um plano detalhado de reciclagem de material antes do início de qualquer edificação, com isso, é necessário que as construtoras tenham claras as políticas de reciclagem de concreto. Conforme o *World Business Council For Sustainable Development* (2009), o Japão possui amplas leis no que diz respeito ao desenvolvimento sustentável e há grande interesse em limitar o aterro e fazer a reutilização e reciclagem de materiais, sendo que no ano de 2000 entrou em vigor uma lei exigindo a obrigatoriedade da

reutilização/reciclagem de Resíduo de Construção e Demolição (RCD). Na Austrália, 32,6 milhões de toneladas de resíduos sólidos são gerados anualmente, dos quais em torno de 42% são a partir da construção e demolição, sendo que, cerca de 7,8 milhões de toneladas (57%) dos RCD são reciclados (incluindo as parcelas de ARC). No Japão, os resíduos gerados a partir de atividades de construção e demolição são de cerca 16% do total de resíduos, com cerca de 0,75 milhão de toneladas de resíduos gerados anualmente.

Já o Reino Unido introduziu uma série de políticas para encorajar uma maior utilização de agregado de concreto secundário e reciclados como uma alternativa para substituição de agregados primários (LIMBACHIYA et al., 2004).

O *World Business Council For Sustainable Development* (2009) apresenta alguns dados gerais sobre a reciclagem no Mundo:

- A Holanda não aceita que resíduo de concreto vá para aterro, ou seja, todos são reciclados;
- Trinta e oito estados dos Estados Unidos utilizam ARC em sub-base de estradas;
- A Tailândia usa ARC em novos concretos pré-moldados para projetos da sociedade.
- Qatar e Emirados Árabes Unidos desenvolvem programa de reciclagem de ARC devido ao elevado preço dos agregados naturais e por preocupações ambientais e restrições a respeito de resíduos;

No Brasil, a tarefa de quantificação é ainda difícil. Diferentemente de outros países, uma importante fonte na geração dos RCD são os geradores informais, para os quais dados estatísticos estão indisponíveis e podem representar uma parcela importante dos RCD gerados em um município (PINTO, 1999; PINTO et al., 2005). Careli (2008), Souza et al. (2004) e Pinto (1999) estudaram a geração de RCD no Brasil e obtiveram valores por unidade de área variando entre 0,050 e 0,150 t/m².

Ainda no Brasil, para Carrijo (2005) ao contrário do volume crescente dos RCD, as jazidas dos agregados naturais estão se tornando mais escassas, fazendo com que se busque este material em lugares cada vez mais distantes, aumentando seus custos de produção, transporte e comercialização, conseqüentemente refletindo no custo total da obra. Segundo Ângulo et. al. (2011) foi em 2002, com a aprovação da resolução 307, que ficaram estabelecidos critérios e procedimentos para a gestão de RCD no Brasil (CONAMA, 2002).

As empresas privadas de construção, maiores geradoras deste tipo de resíduo, devem desenvolver, desde então, projetos de gerenciamento específicos, por exemplo, triagem e reciclagem. Demandas cada vez maiores por áreas a serem destinadas a aterros (ou ausência de locais de deposição adequados) por um lado e a escassez de recursos naturais, por outro lado, favoreceram a utilização de resíduos de construção como fonte para agregados, além da conscientização da proteção ambiental. (KATZ, 2003; ZEGA; VILLAGRÁN-ZACCARDI; DI MAIO, 2009; LIMBACHIYA et al., 2004).

1.1 JUSTIFICATIVA

Várias são as fontes de geração de resíduos na construção civil. Por exemplo, a falta de qualidade dos bens e serviços, no setor da construção, pode dar origem às perdas de materiais, os quais saem das obras em forma de entulho e contribuem sobremaneira no volume de resíduos gerados. Além disso, devido aos erros construtivos e na tecnologia dos materiais, poderá haver uma redução da vida útil das estruturas, que necessitarão de manutenção mais frequente, vindo também a propiciar maior consumo de matéria-prima e geração de resíduos (LEITE, 2001).

Todas as etapas do processo construtivo como a extração da matéria-prima, produção de materiais para a indústria da construção civil, construção e demolição causam impactos ambientais, afetando direta ou indiretamente a segurança e o bem estar da população, as atividades sociais e econômicas, as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente e a qualidade dos recursos naturais. Entretanto, se os resíduos de construção e demolição forem empregados em novas matrizes cimentícias, não apenas se aliviará a demanda por aterros sanitários, bem como, não serão utilizados recursos naturais não renováveis.

Ao se triar os resíduos de construção e demolição e separar os resíduos de concreto, transformando-os em agregado reciclado de concreto, é possível se obter uma carga de material mais nobre em relação ao próprio RCD. Segundo Buttler (2003), os resíduos de concreto possuem um grande potencial para serem reciclados quando comparados com outros resíduos, devido ao pré-conhecimento do tipo de material empregado no material de origem.

Uma importante propriedade a ser estudada em concretos é o Módulo de Elasticidade, sobretudo porque o concreto é um material heterogêneo e é elástico dentro de certos limites (NEVILLE, 1997). Normas internacionais e uma norma brasileira propõem

equações para estimar o Módulo de Elasticidade do concreto a partir da resistência à compressão do mesmo, devido a maior facilidade de se obter experimentalmente este parâmetro. Contudo, o mais apropriado é determiná-lo de forma direta. A própria NBR 6118 (ABNT, 2007) descreve que o Módulo de Elasticidade deve ser obtido segundo ensaio descrito na norma NBR 8522 (ABNT, 2008) e em caso da falta desse ensaio, estimá-lo através de equação.

Porém, para concretos convencionais, existem divergências entre valores obtidos através de procedimentos experimentais e os estimados a partir da resistência. A divergência tende a ser ainda maior se forem utilizadas as equações de norma em concretos produzidos com ARC. Conforme Araújo (2010), o tipo de agregado graúdo tem grande influência sobre o valor do módulo do concreto, porém, é muito difícil definir um coeficiente de correção para cada tipo.

A maioria das pesquisas dá ênfase para as propriedades mecânicas de resistência do concreto, não levando em consideração o comportamento elástico, como por exemplo: TROIAN, 2010; WERLE, 2010; XIAO; LI; POON, 2012; ZEGA; VILLAGRÁN-ZACCARDI; DI MAIO, 2009; LEITE, 2001; LEVY, 2001; KATZ, 2003. Magalhães et al (2010) explica que os sistemas estruturais de concreto dispõem cada vez mais de peças esbeltas, o que torna o estudo das deformações uma condição crítica para seu bom desempenho em serviço. Conforme Barbosa e Geyer (2010), existe a necessidade de conhecimento do módulo de deformação devido à decorrência de problemas estruturais em prédios, em virtude de deformações lentas.

Toda estrutura de concreto armado deve atender aos estados limites último (resistência) e de serviço (deformação), tornando imperativo o conhecimento do comportamento tensão x deformação (relações constitutivas) dos materiais estruturais empregados.

Portanto, é necessário ampliar o conhecimento a respeito do comportamento elástico de concretos utilizando ARC, colaborando assim, com o avanço da fronteira atual de conhecimento com relação aos efeitos destes agregados no concreto.

Este trabalho é parte integrante de projetos em desenvolvimento no Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Unisinos coordenados pelo Grupo de Pesquisa em Materiais de Construção e Reciclagem (GMAT), e tem como objetivo viabilizar tecnicamente a inserção de RCD em novas matrizes cimentícias. O principal projeto

relacionado com o tema do trabalho procede da Chamada Pública MCT/MCIDADES/FINEP/Ação Transversal, Saneamento Ambiental e Habitação - 7/2009, Tema 2.3 - Avaliação de desempenho de tecnologias inovadoras, cujo objetivo geral é a “Definição de critérios e métodos para avaliação de desempenho de produtos e sistemas construtivos inovadores”.

O organograma (Figura 2) apresentado a seguir demonstra a posição em que se encontra este trabalho no contexto das pesquisas.

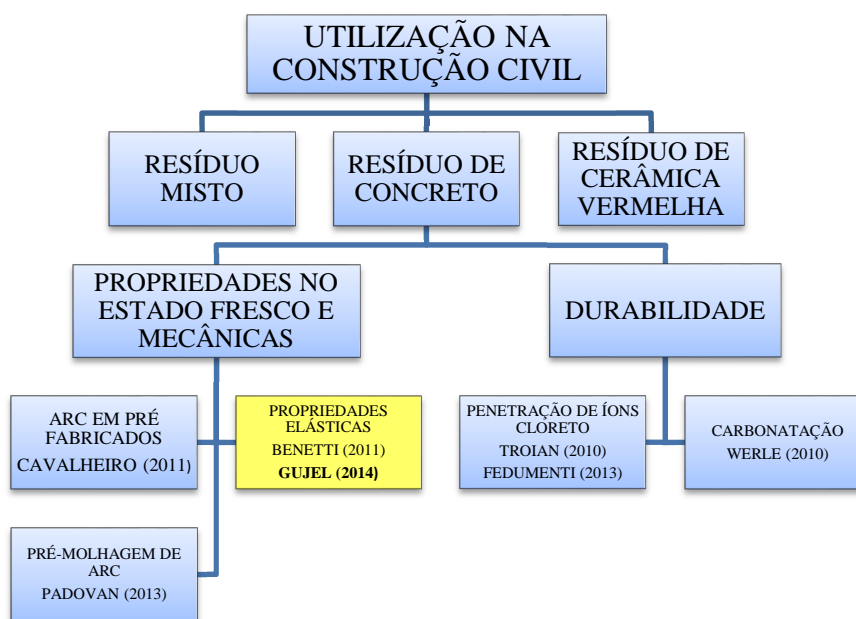


Figura 2 – Organograma com projetos do GMAT relacionados a resíduos de concreto.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O trabalho tem como objetivo geral a avaliação das propriedades elásticas de concretos produzidos com substituição de 50% de agregados graúdos naturais por ARC, nos níveis de resistência 0, 20, 30, 40, 50, 60, 70 e 80% da tensão de ruptura e nas idades 7, 28 e 63 dias para uso em elementos estruturais.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Observar se o limite elástico de concretos com ARC é similar aos concretos com agregados convencionais;
- Comparar o comportamento elástico dos concretos com ARC com o de concretos de trabalhabilidade e resistência similares, sem o uso de ARC;
- Estudar a correlação entre os módulos de elasticidade Estático (MEE) e Módulo de Elasticidade Dinâmico (MED), em concretos com agregados reciclados de concreto e em concretos com somente agregados naturais;
- Verificar se os níveis de carregamento interferem no valor do MED para concretos com e sem agregados reciclados de concreto;
- Avaliar se os concretos com a mesma resistência e idades diferentes possuem módulos de elasticidade similares e se existem diferenças entre concretos com agregado natural e reciclado de concreto;
- Estudar a correlação entre os valores experimentais e as normativas do ACI 318 (2011), CEB-FIP *Model Code* 1990, NBR 6118 (ABNT, 2007 e 2014).
- Obter as curvas de tensão x deformação representativas dos concretos com ARC e nos concretos de referência.

1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, sendo que o primeiro contém a introdução, justificativa, descrição da importância do tema e os objetivos principais e específicos.

O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica dos assuntos relevantes ao tema da pesquisa. A ênfase é dada ao Módulo de Elasticidade obtido pelos métodos Dinâmico e Estático em concretos produzidos com substituição parcial dos agregados graúdos naturais por reciclados de concreto, bem como às propriedades dos materiais constituintes que interferem no comportamento elástico de concretos.

O programa experimental está inserido no terceiro capítulo, onde estão definidas as variáveis envolvidas no estudo. São apresentados os materiais e métodos de ensaio.

No quarto capítulo são discutidos e analisados os resultados obtidos para os concretos com e sem substituição de agregado graúdo natural por reciclado. Faz-se uma correlação dos valores de Módulo de Elasticidade obtidos através do método Dinâmico e Estático e analisam-se separadamente os concretos jovens (rompidos aos 7 dias).

O quinto capítulo aborda as conclusões da pesquisa, apontando a influência das variáveis estudadas, além da apresentação das sugestões para futuros trabalhos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordadas as características dos agregados reciclados de concreto, as propriedades de concretos produzidos com este tipo de agregado e como se comporta sob o ponto de vista elástico.

2.1 O MÓDULO DE ELASTICIDADE E O CONCRETO

Quando uma força é aplicada a um corpo, este tende a mudar a forma e o tamanho. Tais mudanças são denominadas deformação. O alongamento ou a contração de um segmento de reta por unidade de comprimento é denominado deformação longitudinal específica ($E = \Delta l / l_i$). Já a mudança de ângulo ocorrida entre dois segmentos de reta, originalmente ortogonais, é denominada distorção específica (deformação por tensões tangenciais).

A resistência de um material depende de sua capacidade de suportar cargas sem deformação permanente ou ruptura. Essa propriedade é inerente ao próprio material e deve ser determinada experimentalmente. Os testes mais importantes a realizar nesse sentido são o teste de tração simples e compressão simples, que são utilizados para determinar a relação entre a tensão normal média e a deformação longitudinal específica. Com os dados do teste de tração e compressão, pode-se construir um gráfico onde a curva resultante é denominada diagrama tensão-deformação (HIBBELER, 2012).

O cientista inglês Robert Hooke (1635-1703) foi o primeiro a estabelecer experimentalmente a relação linear existente entre tensões e deformações e descreveu a equação 1 conhecida como Lei de Hooke:

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

Equação 1

Na referida equação, a constante de proporcionalidade E é chamada de Módulo de Elasticidade longitudinal ou módulo de Young e somente pode ser usada se o material tem comportamento elástico linear (HIBBELER, 2012). Para Souza (2006), o fato de o concreto ser um material que não obedece a lei de Hooke, tanto sob tensões de compressão como de tração, a determinação do Módulo de Elasticidade de concretos apresenta dificuldades. Corroborando, Mehta e Monteiro (2008) afirmam que as relações tensão x deformação do concreto são complexas, primeiro por ele não ser um material verdadeiramente elástico e, segundo, pelo fato de que nem as deformações nem as restrições são uniformes ao longo da

peça de concreto, uma vez que o material é heterogêneo, havendo concentrações de tensões nas interfaces entre o agregado e a pasta.

2.1.1 Módulo de Elasticidade no concreto

Conforme Araújo (2003), o concreto apresenta um comportamento não linear, quando submetido a tensões de certa magnitude. Conforme Melo Neto e Helene (2002), o comportamento deixa de ser linear um pouco antes de 50% da carga última. Esse desempenho é decorrente da microfissuração progressiva que ocorre na interface entre o agregado graúdo e a pasta de cimento.

Os materiais constituintes do concreto possuem Módulo de Elasticidade muito diferente do Módulo de Elasticidade do concreto: os agregados graúdos têm um módulo variando a partir de 35 GPa e a pasta de cimento variando a partir 16 GPa. O Módulo do concreto provavelmente será um valor intermediário entre o módulo do agregado e do módulo da pasta. (MELO NETO e HELENE, 2002)

O diagrama tensão x deformação ($\sigma \times \varepsilon$) típico de um concreto obtido a partir de um ensaio de compressão simples está demonstrado na Figura 3.

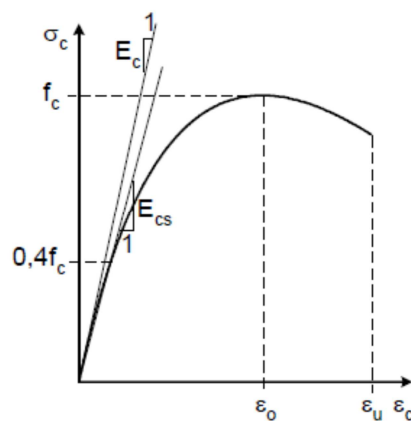


Figura 3 - Diagrama tensão x deformação típico do concreto (compressão simples).

Observa-se que o concreto somente pode ser considerado como elástico linear até um nível de tensões correspondente a faixa de 40 a 50% da tensão de ruptura. Tensões acima desse patamar provocam um estado de microfissurações que refletem em características macroscópicas que podem ser mais facilmente visualizadas, como a não linearidade crescente da curva tensão x deformação na etapa de carga, ou a existência de deformações permanentes quando o material submetido a tensões é descarregado (Mehta e Monteiro, 2008). Também a

norma NBR 6118 (ABNT, 2007) descreve no item 8.2.10.1 que, para tensões de compressão menores que $0,5 f_c$ (resistência à compressão do concreto), pode-se admitir uma relação linear entre tensões e deformações. Tal relação entre a estrutura microscópica dos concretos sob tensão e o comportamento macroscópico pode ser vista na Figura 4 (comportamento tensão x deformação do concreto sob compressão uniaxial).

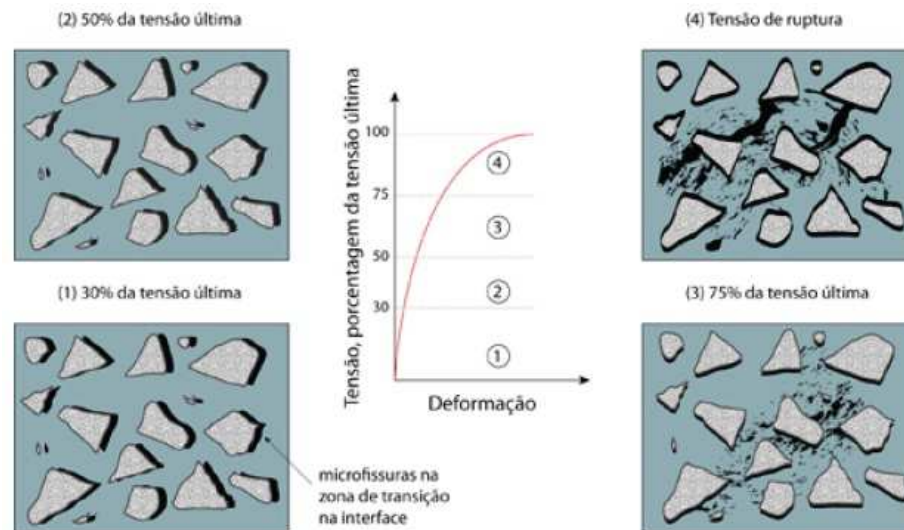


Figura 4 – Representação do comportamento tensão x deformação do concreto sob compressão uniaxial. (Baseado em Glucklich, J., *Proceedings of International Conference on the Structure of Concrete, Cement and Concrete Association, Wexham Springs, Slough, U. K., pp. 176-185, 1968*).

Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

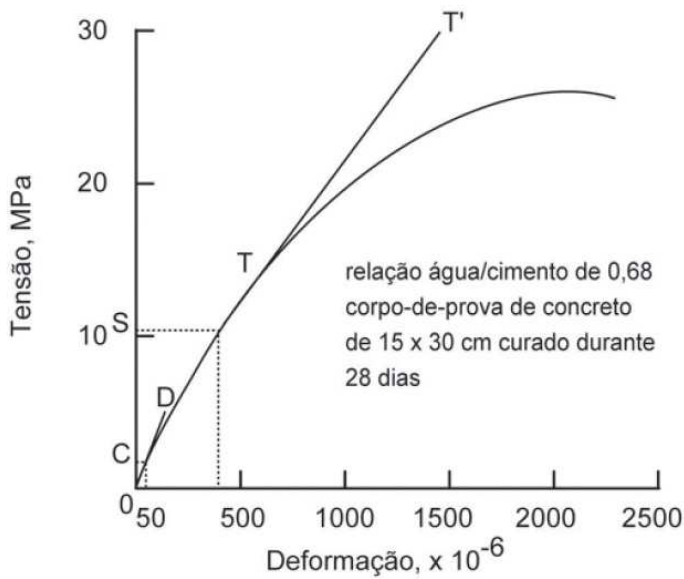
O engenheiro deve conhecer o Módulo de Elasticidade do concreto uma vez que este influi no projeto e no comportamento das estruturas; conhecido o módulo, será possível estimar as flechas máximas admissíveis, ou seja, flechas que não provocarão fissuras além de determinados limites (LEVY, 2001).

Uma vez que a curva tensão x deformação (Figura 5) para o concreto é não linear, três métodos para calcular constantes de proporcionalidade entre tensões e deformações são utilizados. Mehta e Monteiro (2008) definem:

O Módulo Tangente é dado pela declividade de uma reta traçada de forma tangente à curva de tensão-deformação em qualquer ponto da curva.

O Módulo Secante é dado pela declividade de uma reta traçada da origem até o ponto da curva que corresponde à tensão de 40% da carga de ruptura.

O Módulo Cordal é dado pela inclinação de uma reta traçada entre dois pontos da curva tensão-deformação. Comparando ao módulo secante, em vez de partir da origem, a linha é traçada de um ponto representando a deformação longitudinal de $50 \mu\text{m/m}$ até o ponto que corresponde a 40% da carga última. Recomenda-se deslocar a linha base em 50 microdeformações para corrigir a leve concavidade que normalmente se observa no início da curva de tensão-deformação.



Cálculo dos Módulos de Elasticidade

$$f_t = 26 \text{ MPa}$$

$$40\% f_t = 10,4 \text{ MPa} = S O$$

Módulo Secante: declividade da linha correspondente à tensão SO

$$10,4 / (417 \times 10^{-6}) = 24,9 \text{ GPa}$$

Módulo Cordal: declividade da linha correspondente à tensão SC

$$(10,4 - 1,6) / (417 \times 10^{-6} - 50 \times 10^{-6}) = 24 \text{ GPa}$$

Módulo Tangente: declividade da linha TT' traçada de forma tangente a qualquer ponto da curva σ - ϵ

$$(30 - 14,6) / (1445 \times 10^{-6} - 625 \times 10^{-6}) = 18,8 \text{ GPa}$$

Módulo Tangente Inicial: declividade da linha OD da origem $5 / 143 \times 10^{-6}$

$$= 34,9 \text{ GPa}$$

Figura 5 – Diferentes tipos de módulos de elasticidade e o método que os determina.

Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

Segundo a NBR 8522 (ABNT, 2008), o módulo de deformação secante (E_{cs}) é o coeficiente angular da reta secante ao diagrama tensão x deformação específica, passando pelos pontos A e B correspondentes (Figura 6), respectivamente, à tensão de 0,5 MPa e à tensão considerada no ensaio.

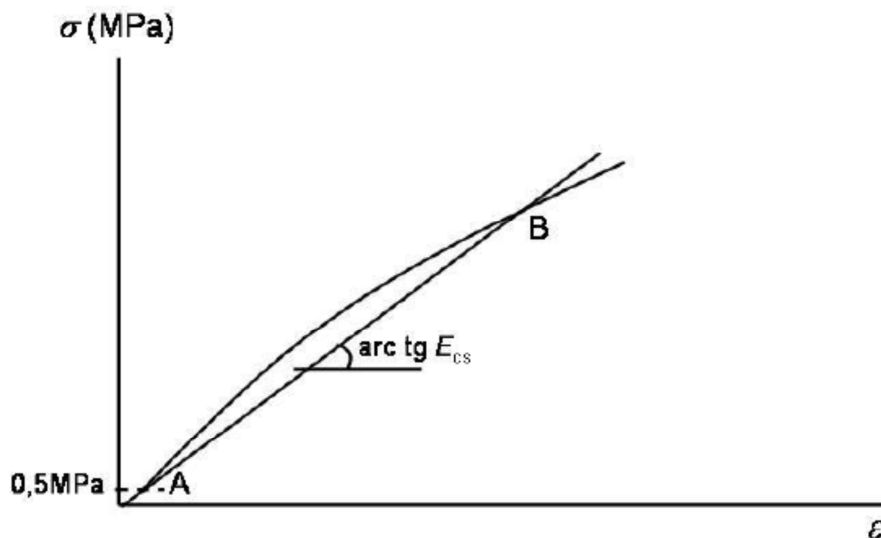


Figura 6 - Representação esquemática do módulo de deformação secante (E_{cs}).

Fonte: ABNT NBR 8522:2008.

O Módulo de Elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial (E_{ci}), conforme prescreve a NBR 8522 é a inclinação da reta tangente à curva tensão x deformação

na origem, e pode ser calculado como o módulo de deformação secante, considerando as tensões 0,5 MPa (inferior) e $0,3 f_c$ (superior).

Petrucci (1987) explica quais as razões da utilização de diferentes módulos de deformação do concreto:

O uso do concreto como material de construção traz consigo problemas de naturezas diferentes. Assim, a escolha da definição do módulo de deformação fica na dependência de qual problema especial se quer resolver. O cálculo de alteração de tensões em virtude de modificação no carregamento deve ser feito com módulo tangente, enquanto na determinação de uma flecha será usado o módulo secante, correspondente à deformação final, ou melhor, pelo módulo secante obtido no ensaio de flexão. Por outro lado, na avaliação da carga crítica de flambagem, por exemplo, o módulo de deformação a empregar será o módulo tangente à curva tensão-deformação, obtida no ensaio de compressão no ponto correspondente a essa carga crítica.

Diversas correlações entre o Módulo de Elasticidade (ou de deformação) longitudinal e a resistência à compressão do concreto são feitas em normas de projeto. Essas correlações são válidas para concretos de massa específica normal e para carregamento Estático. Para cargas dinâmicas, ocorre um aumento no valor do módulo de deformação longitudinal (ARAÚJO, 2010).

Para Mehta e Monteiro (2008), como primeira aproximação, faz sentido correlacionar o módulo de deformação com a resistência do concreto porque o comportamento de tensão x deformação dos três componentes do concreto (agregado, matriz pasta de cimento e zona de transição na interface) seria, na verdade, determinado por suas resistências individuais que, por sua vez, estão relacionadas à resistência última do concreto.

2.1.2 Fatores que afetam a porosidade e o Módulo de Elasticidade

2.1.2.1 Agregado

Dentre os elementos constituintes do concreto, a base deste estudo se concentra no tipo de agregado gráudo a ser utilizado, o agregado reciclado de concreto. Uma das características desse tipo de agregado é a alta porosidade, propriedade essa que influencia diretamente no Módulo de Elasticidade do concreto.

Para Mehta e Monteiro (2008), a porosidade dos agregados é a característica mais importante quando se diz respeito ao Módulo de Elasticidade. Isso se deve ao fato de que a porosidade do agregado determina sua rigidez, o que, por sua vez, controla a capacidade de o agregado restringir a deformação da matriz. Ensaio com amostras de rocha demonstraram

que o Módulo de Elasticidade de agregados naturais de baixa porosidade, como granito, rochas vulcânicas e basalto, encontra-se na faixa de 70 a 140 GPa, ao passo que, em arenitos calcários e cascalhos de variedade porosa, pode ser de 21 a 49 GPa. Agregados leves são altamente porosos. Dependendo da porosidade, o Módulo de Elasticidade de um agregado leve pode variar entre 7 GPa e 28 GPa.

A Figura 7 mostra os valores do Módulo de Elasticidade obtidos por Kliszczewicz e Ajdukiewicz (2002) nos ensaios de concretos produzidos com diferentes tipos de agregados graúdos (britas de granito, basalto e seixo), em função da resistência à compressão do concreto, demonstrando que existe influência significativa nos valores do parâmetro estudado. Como se pode observar, a rocha mais resistente (basalto) dentre as três estudadas, é a que possui maiores valores de módulo, seguido de seixo e granito.

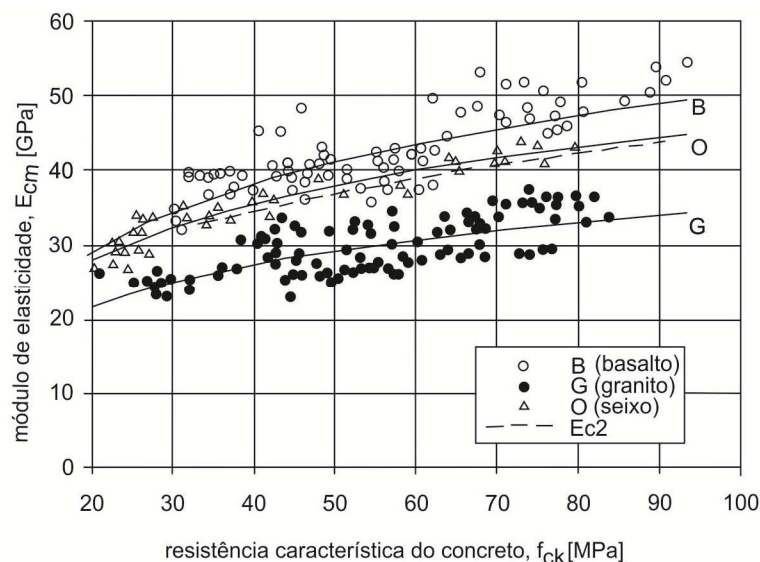


Figura 7 – Módulo de Elasticidade de concretos com diferentes tipos de agregados graúdos e resistências.

Fonte: Kliszczewicz e Ajdukiewicz (2002).

2.1.2.2 Matriz da pasta de cimento

Segundo Mehta e Monteiro (2008), os fatores que controlam a matriz da pasta de cimento são: porosidade da matriz, relação a/agl , adições minerais, grau de hidratação (tempo de cura, temperatura e umidade) e teor de ar (aprisionado e incorporado).

2.1.2.3 Zona de Transição

Conforme Mehta e Monteiro (2008), vazios capilares, microfissuras e cristais orientados de hidróxido de cálcio são relativamente mais comuns na zona de transição na

interface do que na matriz da pasta; por isso têm um papel importante na determinação das relações tensão x deformação do concreto.

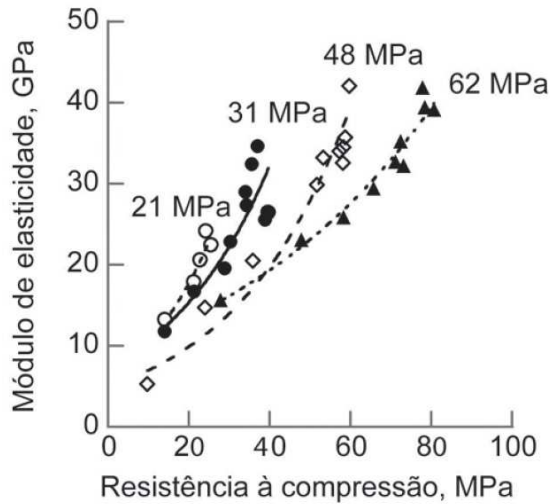
2.1.2.4 Condições ambientais

Independente das dosagens ou do tempo de cura, corpos de prova de concreto que são ensaiados em condições úmidas apresentam Módulo de Elasticidade em torno de 15% mais alto do que corpos de prova ensaiados em condições secas. A resistência à compressão se comporta de maneira oposta, ou seja, a resistência é 15% maior em corpos de prova secos. (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

2.1.2.5 Idade e nível de carregamento

O ganho de resistência dos concretos com a idade está relacionado com o grau de hidratação dos compostos do cimento. Cimentos mais finos e com teores maiores de silicato de cálcio (C_3S), como o CPV-ARI, tendem a apresentar uma resistência maior a idades menores do que cimentos com adições minerais (como o CPIII-AF e o CP IV).

Mehta e Monteiro (2008) explicam que a resistência e o Módulo de Elasticidade do concreto não são influenciados no mesmo grau pelo tempo de cura. Com diferentes dosagens de concreto de resistência variável, descobriu-se que, em idades mais avançadas (isto é, de três meses a um ano), o Módulo de Elasticidade aumenta com uma taxa mais alta do que a resistência à compressão, conforme visualizado na Figura 8, onde cada um dos pontos das curvas representam idade mais avançada que o ponto imediatamente anterior. E, segundo os mesmos autores, a interação química entre a pasta do cimento e o agregado é mais evidenciada para a relação tensão x deformação do que para a resistência à compressão do concreto.



A tendência ascendente das curvas $E-f'_c$ de dosagens de concreto de diferentes resistências, ensaiadas a intervalos regulares até um ano, demonstra que, em idades mais avançadas, o Módulo de Elasticidade aumenta a uma taxa mais rápida do que a resistência à compressão.

Figura 8 – Relação entre a resistência à compressão e o Módulo de Elasticidade por Shideler, J. J., J. ACI, Proc., v. 54, n. 4, 1957).

Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

Como se pode verificar na Figura 9, o CPV-ARI é o cimento que possui resistência à compressão maior devido à reação de hidratação mais rápida e por consequência, o Módulo de Elasticidade também será maior nas primeiras idades.

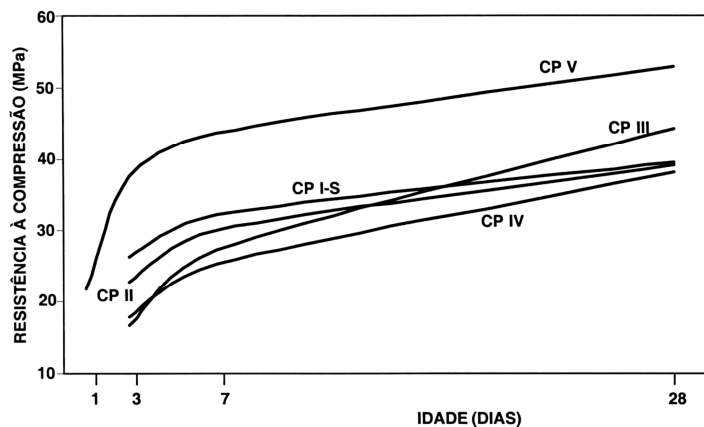


Figura 9 – Evolução média de resistência à compressão dos distintos tipos de cimento Portland.

Fonte: ABCP (2002).

Como tanto a resistência como o Módulo de Elasticidade crescem com o aumento da hidratação do cimento, é possível intuir, de forma indireta que, para um mesmo tipo de cimento e mesma idade, quanto maior a resistência à compressão, maior o valor do Módulo de Elasticidade.

Salvador (2007) chama a atenção que, na medida em que os elementos estruturais, submetidos predominantemente à flexão (vigas e lajes), são carregados antes das idades

previstas em projeto, pode-se iniciar um processo de maximização das deformações. Cargas a baixas idades, nas quais a reação de hidratação do cimento está incompleta, podem provocar deformações excessivas, uma vez que o Módulo de Elasticidade ainda é baixo, bem como provocar fissuração generalizada, pois a resistência também é baixa. Como efeito conjunto, as fissuras provocadas por rupturas localizadas do material aumentam as deformações, amplificando o efeito do módulo baixo.

No que se refere ao estudo das propriedades mecânicas de um concreto, levar em conta apenas a resistência à compressão não é suficiente para prever o comportamento da estrutura. Torna-se relevante, também, o estudo da resistência à tração do concreto e do Módulo de Elasticidade, que, quando este se apresentar com baixo valor, pode acarretar uma deformação instantânea excessiva das peças. (VIEIRA, 2008).

A norma NBR 14931 (ABNT, 2004) não estabelece prazos para se retirar escoramentos e fôrmas, mas, adverte que estes somente poderão ser retirados quando houver resistência suficiente do concreto de modo a resistir às ações atuantes sobre ele e quando houver rigidez suficiente, de modo a não deformar excessivamente, sendo recomendado o monitoramento do progresso da resistência do concreto nas primeiras idades.

De um modo geral, o Módulo de Elasticidade é importante durante toda a vida útil da edificação. Porém, devem-se escolher as idades em que os ensaios serão realizados. Shariq, Prasad e Abbas (2013) estudaram a adição de escória granulada de alto forno em concretos sob o ponto de vista do efeito da idade dos corpos de prova. O módulo Estático foi determinado nas idades de 3, 7, 28, 56, 90, 150 e 180 para 12 dosagens. Segundo os mesmos autores, o Módulo de Elasticidade nas primeiras idades é necessário para determinar o encurtamento elástico e o deslocamento do componente estrutural e, em idades mais avançadas é útil para prever o coeficiente de fluência e de deformação em concretos protendidos e a deflexão em concreto armado. Shariq, Prasad e Abbas (2013) concluíram que como esperado, o Módulo de Elasticidade Estático aumenta com a idade, mas a uma taxa decrescente, tendo sido verificado um aumento de 15,5% entre as idades de 28 e de 180 dias.

2.1.3 Métodos de Ensaio para Obtenção do Módulo de Elasticidade

Existem três métodos para a obtenção dos valores de Módulo de Elasticidade do concreto: Método Estático sob Compressão Simples, Método Dinâmico e Método Estático

sob Deformação à Flexão (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Serão descritas abaixo os métodos que serão utilizados no trabalho de dissertação:

2.1.3.1 Método Estático

O método Estático consiste na aplicação de carga de compressão crescente e com velocidade controlada, simultaneamente com a monitoração da deformação induzida, constituindo-se em um ensaio mecânico destrutivo. Está descrito na NBR 8522 sendo considerado nesta Norma o módulo de deformação tangente inicial cordal a 30% f_c , ou outra tensão especificada em projeto. É esse o módulo a ser especificado em projeto e controlado em obra.

Uma questão importante a ser apresentada é quanto à umidade dos corpos de prova. A NBR 8522 faz menção à NBR 5738 (ABNT, 2008) que diz respeito à moldagem e cura dos exemplares para o ensaio de compressão simples, que se faz com corpos de prova saturados. Para esta condição, o resultado obtido para a tensão de compressão do exemplar é um valor menor do que se realizado com o mesmo seco, estando, portanto o método de ensaio reproduzindo a situação mais crítica, importante para o dimensionamento no estado limite último. Porém, as condições ambientais críticas para o Módulo de Elasticidade são aquelas que levam a um menor valor, ou seja, em condição seca, o que acarretaria maiores deformações para as mesmas tensões, o que é crítico tanto para o dimensionamento de seções de concreto armado em estado limite último, devido à compatibilização das tensões entre aço e concreto, quanto para a verificação da estrutura em estado limite de serviço. Salvador (2007) mostra que a umidade relativa do ar afeta a deformação em cada instante de uma peça de concreto, e que o aumento da umidade do ar leva à diminuição das flechas em uma peça fletida, bem como a diminuição da umidade a um aumento nas flechas. Assim, a condição crítica para a determinação do módulo seria a condição seca, e não a saturada como preconizado pela NBR8522.

2.1.3.2 Método Dinâmico

Este método é não destrutivo (evitando assim, danos na estrutura a ser testada) e está relacionado com a velocidade de propagação de ondas de ultrassom no corpo de prova e com a frequência natural de vibração. O método está descrito nas normas C597 (ASTM, 2009) e NDT1 (RILEM, 1972) e o procedimento especificado na primeira será utilizado neste trabalho.

Conforme Carbonari et. al. (2010), o primeiro estudo sobre as ondas ultrassônicas foi realizado nos Estados Unidos em meados da década de 40 e, hoje em dia, este teste é um

dos ensaios não destrutivos mais realizados, devido à flexibilidade durante a execução e o baixo investimento necessário.

No Brasil ainda não existe uma norma para determinar o Módulo de Elasticidade do concreto a partir de um ensaio Dinâmico. Entretanto, a Norma NBR 8802 (ABNT, 1994) prescreve o método de ensaio não destrutivo para determinar a velocidade de propagação de ondas longitudinais, obtidas por pulsos ultrassônicos, através de um corpo de prova de concreto. Apesar de não ter como finalidade a obtenção do Módulo de Elasticidade do material em estudo, a norma pode auxiliar na execução do ensaio.

Para Evangelista (2002), o método baseia-se no fato de que a velocidade de propagação de ondas é influenciada pela qualidade do concreto, o que depende principalmente do coeficiente de Poisson, Módulo de Elasticidade, massa específica e presença de armadura, assim como, conforme a autora *apud* Chung e Law (1983), a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas relaciona-se principalmente com as propriedades elásticas e massa específica do concreto. Corroborando, Costa (2004) descreve que como o concreto é um material homogêneo, o tempo de propagação depende de fatores internos e externos a estrutura do concreto, tais como: natureza do agregado graúdo e miúdo, relação a/agl , tipo de cimento, aditivos, idade dos exemplares, temperatura ambiente, condições de superfície, entre outros. As falhas, fissuras ou vazios no interior do concreto ocasionam a obstrução da trajetória de propagação de onda incidente, deslocando-a através da periferia do defeito, resultando em maior tempo de propagação. (BS 1881 Part 203: 1986).

Para Mehta e Monteiro (2008) o Módulo de Elasticidade obtido por método Dinâmico é geralmente, 20, 30 e 40% maior em relação ao Módulo de Elasticidade obtido por método Estático para concretos convencionais de alta, média e baixas resistências, respectivamente. Os autores ainda afirmam que para análises de tensões de estruturas sujeitas a carga de impacto ou terremoto, é mais adequado utilizar o Módulo de Elasticidade obtido por método Dinâmico, por ser um método mais preciso. Morrell (1996) confirma salientando que o desenvolvimento dos métodos não destrutivos para a caracterização dos módulos elásticos foi motivado pela dificuldade de se obter estes parâmetros de forma confiável por meio de ensaios mecânicos Estáticos, principalmente para materiais frágeis e multifásicos. Hassan, Jones (2012) descrevem que valores superiores do Módulo de Elasticidade são encontrados em ensaios Dinâmicos devido a baixos níveis de tensão em que o módulo inicial tangente é medido, enquanto que módulos secantes são obtidos através de ensaios Estáticos.

Quanto à questão da umidade dos corpos de prova de concreto durante a determinação do Módulo de Elasticidade, Popovics (2004) explica que a velocidade de pulso ultrassônico é maior em concreto úmido em relação a concreto seco porque a velocidade ultrassônica é maior na água do que no ar, e afirma que não é apenas o teor de água que influencia na velocidade de propagação da onda, mas também a distribuição do líquido dos poros no concreto. Enfatizando, Carbonari et al. (2010) indicam que materiais com descontinuidades internas devem apresentar velocidades mais lentas em relação aos materiais intactos. Abo-Qudais (2005) utilizou em pesquisa quatro diferentes graduações de agregado graúdo e obteve maior velocidade de onda ultrassônica para agregado de tamanhos maiores. Para quantificar, a C597 (ASTM, 2009) descreve que a velocidade de pulso em concreto saturado pode ser até 5% superior ao do concreto seco. Benetti (2012) concluiu que os valores obtidos em corpos de prova úmidos se aproximam mais dos valores da norma BS 1881 Part 203 (1986) em comparação aos resultados de módulo obtidos em exemplares ensaiados secos.

2.1.4 Módulo de Elasticidade e relações de Normas internacionais e brasileiras.

São apresentadas na Tabela 1 algumas relações indicadas por normas internacionais (ACI 318 (2011) e CEB-FIP *Model Code* 1990) e brasileira NBR 6118 (ABNT, 2007 e 2014). A figura 10 demonstra graficamente as diferenças de valores para módulo de elasticidade para cada estudada. Deve-se salientar que estas formulações são consideradas para concretos cuja composição é de materiais convencionais.

Tabela 1– Relações para o Módulo de Elasticidade e particularidades de duas normas internacionais e da norma brasileira.

Norma	Módulo de Elasticidade	Particularidades das Formulações	Designações das Variáveis
ACI 318 (2011)	$E_c = w_c^{1,5} \times 0,043 f'_c{}^{1/2}$ $E_c = 4700 f'_c{}^{1/2}$	<p>Concretos com densidade entre 1441 e 2563 kg/m³</p> <p>Concreto com densidade normal (2400 kg/m³)</p>	<p>E_c = Módulo de Elasticidade (MPa)</p> <p>w_c = densidade do concreto (kg/m³)</p> <p>f'_c = resistência à compressão aos 28 dias (MPa)</p>
CEB-FIP (1990)	$E_c = 21.500 \times (f_{cm} / 10)^{1/3}$	<p>Fórmula para concretos com agregados quartzíticos. Outros tipos de agregados multiplicar E_c pelos fatores α_e:</p> <p>Basalto = 1,2 Calcário = 0,9 Arenito = 0,7</p>	<p>E_c = Módulo de elasticidade do concreto aos 28 dias (MPa)</p> <p>f_{cm} = Resistência à compressão média aos 28 dias</p> <p>Se f_{cm} não for conhecida, utilizar $f_{ck} + 8$</p> <p>f_{ck} = Resistência característica do concreto à compressão (MPa)</p>
NBR 6118 (2007)	$E_{ci} = 5600 f_{ck}{}^{1/2}$ $E_{cs} = 0,85 E_{ci}$	<p>Estimativa para o valor do Módulo de Elasticidade na inexistência de ensaios</p> <p>O Módulo de Elasticidade secante a ser utilizado nas análises elásticas de projeto, especialmente para determinação de esforços solicitantes e verificação de estados limites de serviço.</p>	<p>E_{ci} - Módulo de Elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial do concreto, referindo-se sempre ao módulo cordal a 30% f_c</p> <p>f_c = Resistência à compressão do concreto (MPa)</p> <p>f_{ck} = Resistência característica do concreto à compressão (MPa)</p>
NBR 6118 (2014)	$E_{ci} = \alpha_E 5600 f_{ck}{}^{1/2}$ <p>(para f_{ck} de 20 MPa a 50 MPa)</p> $E_{ci} = 21500 \alpha_E ((f_{ck}/10)+1,25)^{1/3}$ <p>(para f_{ck} de 55 MPa a 90 MPa)</p> <hr/> $E_{cs} = \alpha_i E_{ci}$ <p>Estimativa de Módulo de Elasticidade em idade $j \geq 7$ dias:</p> $E_{ci}(t) = [f_c(t) / f_c]^{0,5}$ <p>(para concretos com f_{ck} de 20 MPa a 50 MPa)</p> $E_{ci}(t) = [f_c(t) / f_c]^{0,3}$ <p>(para concretos com f_{ck} de 55 MPa a 90 MPa)</p>	<p>O Módulo de Elasticidade (E_{ci}) deve ser obtido segundo método de ensaio estabelecido na NBR 8522, sendo nesta Norma o módulo de deformação tangente inicial, obtido aos 28 dias de idade.</p> <p>Quando não forem realizados ensaios, pode-se estimar o valor do Módulo de Elasticidade inicial utilizando as expressões ao lado.</p>	<p>α_E é uma variável que tem valor alterado conforme o tipo de agregado utilizado na mistura do concreto, sendo:</p> <p>$\alpha_E = 1,2$ para basalto e diabásio $\alpha_E = 1,0$ para granito e gnaisse $\alpha_E = 0,9$ para calcário $\alpha_E = 0,7$ para arenito</p> <hr/> $\alpha_i = 0,8 + (0,2 (f_{ck}/80)) \leq 1,0$ <p>$E_{ci}(t)$ é a estimativa do Módulo de Elasticidade do concreto em uma idade entre 7 e 28 dias;</p> <p>$f_c(t)$ é a resistência à compressão do concreto na idade em que se pretende estimar o Módulo de Elasticidade</p>

Fonte: CEB-FIP 1990; ACI 318 (2011); NBR 6118 (ABNT, 2007); Santos, Bueno e Kimura (2013).

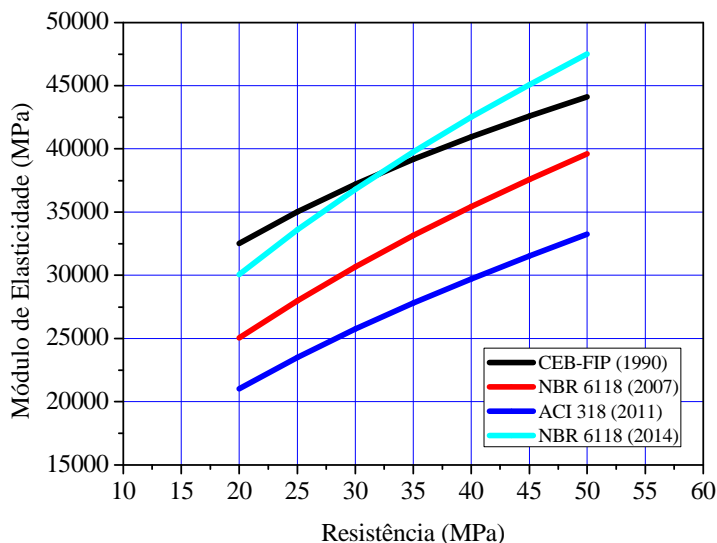


Figura 10 – Valores de Módulo de Elasticidade obtidos por expressões teóricas.

As expressões levam em consideração a resistência à compressão e em alguns casos, como da NBR 6118 (2014) e do CEB-FIP (1990), o módulo é função também do tipo de agregado. Pode-se verificar que existem grandes divergências nos valores de Módulo de Elasticidade obtidos a partir de expressões empíricas de Normas, o que é devido, provavelmente a necessidade da obtenção de expressões específicas para os concretos usados em cada região e a dificuldade de se obter um valor único e confiável, uma vez que são muitas as características que interferem no valor.

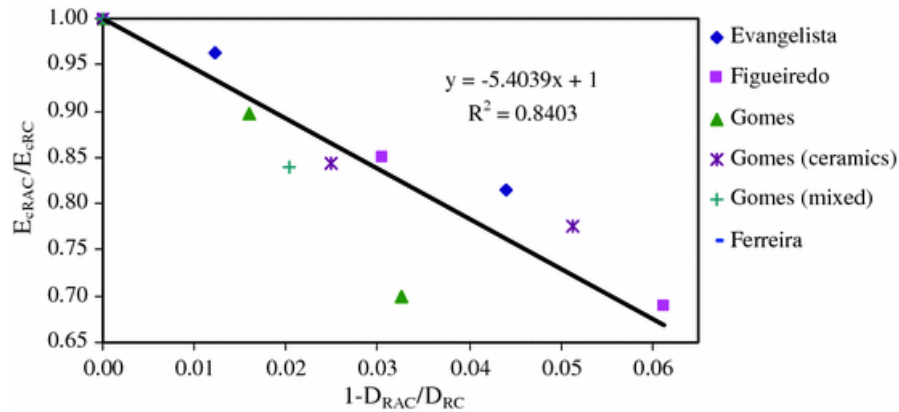
2.1.5 Módulo de Elasticidade de concretos com ARC

O Módulo de Elasticidade de concretos é dependente do teor de agregado graúdo e do teor de argamassa. Ao se substituir agregados convencionais por agregados reciclados ou de menor Módulo de Elasticidade, é necessário proceder-se investigações acerca desta propriedade (BENETTI, 2012).

Os agregados reciclados utilizados nesta pesquisa são altamente porosos, logo, a previsão de resultado para os ensaios a serem realizados são baixos valores para o Módulo de Elasticidade, como observado por autores como Xiao, Li e Zhang (2005), Katz (2003) e Benetti (2012). E ainda, segundo Leite (2001) o Módulo de Elasticidade do concreto depende, entre outros fatores, do agregado utilizado, cujo módulo de deformação está ligado, principalmente à sua porosidade, e é o que controla a capacidade de restrição da deformação

da matriz do concreto. Para Xiao, Li e Poon (2012), o Módulo de Elasticidade para concretos com ARC é sempre menor em relação a concretos convencionais devido a grande quantidade de argamassa ligada ao agregado natural, a qual quase sempre tem menores módulos de elasticidade. Corroborando, Fonseca, Brito e Evangelista (2011) descrevem que o Módulo de Elasticidade do concreto é conhecido por ser altamente dependente das fases de rigidez (agregados, pasta de cimento e a zona de transição). Um dos principais fatores que regulam a rigidez do agregado e da pasta de cimento é a porosidade e, por conseguinte, é natural que com a substituição de agregado natural de concreto por agregado reciclado de concreto o Módulo de Elasticidade diminua.

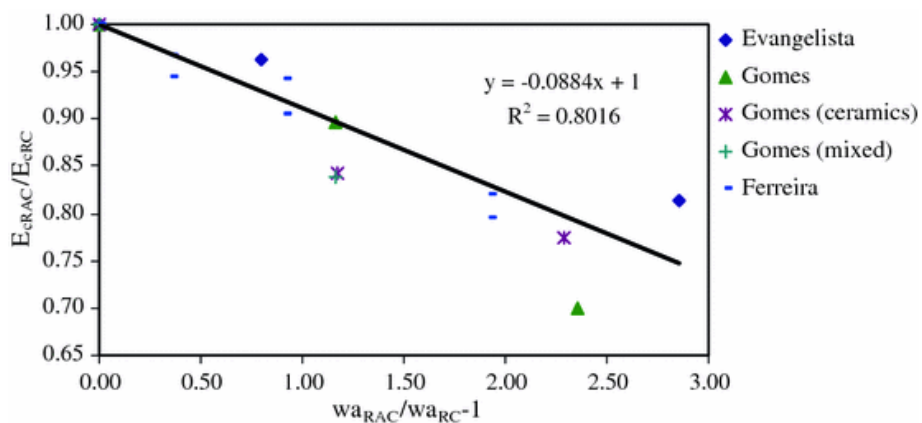
Domingo et al. (2010) e Brito e Alves (2010) verificaram que houve uma diminuição no valor de Módulo de Elasticidade em concretos de acordo com o aumento da porcentagem de substituição de AGN (Agregado Graúdo Natural) por ARC. Nas Figuras 11, 12 e 13, visualizam-se os resultados obtidos em comparação com diferentes autores, compilados por Brito e Alves (2010). Como se pode observar, há uma tendência para a redução do Módulo de Elasticidade quanto maior for a porcentagem de inserção do agregado reciclado na mistura, fazendo com que a rigidez dos concretos diminua.



Onde: D_{RAC} = Densidade dos concretos com agregado reciclado; D_{RC} = Densidade dos concretos de referência; E_{cRAC} = Módulo de elasticidade dos concretos com agregados reciclados; E_{cRC} = Módulo de elasticidade dos concretos de referência.

Figura 11 - Relação entre os módulos de elasticidade do concreto em relação às densidades de agregados na mistura.

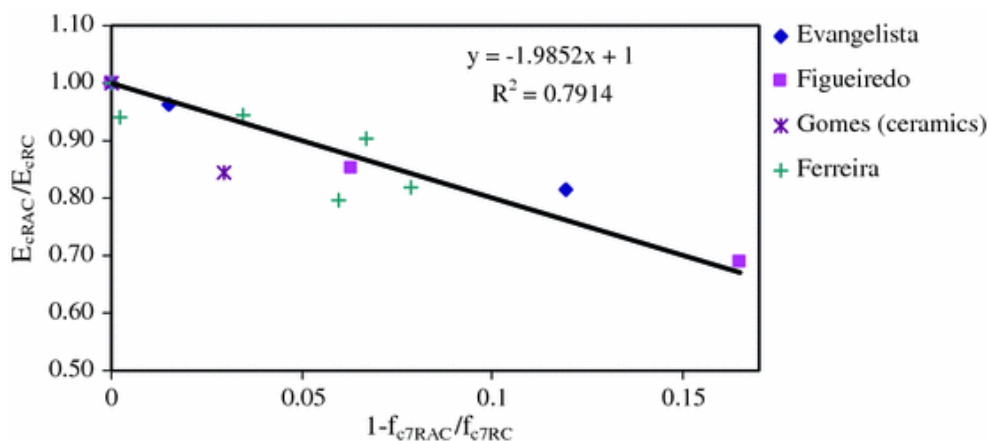
Fonte: Brito e Alves (2010).



Onde: W_{aRAC} = Absorção de água dos concretos com agregado reciclado; W_{aRC} = Absorção de água dos concretos de referência; E_{cRAC} = Módulo de elasticidade dos concretos com agregados reciclados; E_{cRC} = Módulo de elasticidade dos concretos de referência.

Figura 12 - Proporção entre os módulos de elasticidade do concreto e a razão entre as absorções de água de agregados na mistura.

Fonte: Brito e Alves (2010).



Onde: f_{c7RAC} = Resistência à compressão aos 7 dias dos concretos com agregado reciclado; f_{c7RC} = Resistência à compressão aos 7 dias dos concretos de referência; E_{cRAC} = Módulo de elasticidade dos concretos com agregados reciclados; E_{cRC} = Módulo de elasticidade dos concretos de referência.

Figura 13 - Proporção entre os módulos de elasticidade do concreto e a razão entre as resistências aos 7 dias do concreto.

Fonte: Brito e Alves (2010).

Na pesquisa de Topçu e Gunçan (1995), valores da redução do Módulo de Elasticidade para concretos com ARC foram de até 80% em relação a concretos com AGN. Xiao, Li e Zhang (2005) encontraram valores até 45% inferiores para o módulo quando houve substituição de 100% do AGN pelo ARC. Confirmando, Katz (2003) preparou um concreto que chegou aos 28 MPa em 28 dias e o britou em diferentes idades (um, três e vinte e oito dias), produzindo dois concretos utilizando dois tipos de cimento diferentes, o Portland branco (CPB) e Portland comum (CPC), os resultados chegaram a uma redução no Módulo de Elasticidade de 49,35% para concretos CPB (com brita de 1 dia de cura) e 49,78% para concretos CPC (com brita aos 28 dias de cura). Evangelista e Brito (2007) obtiveram uma redução de apenas 3,7% quando substituído 30% de AGN por ARC e 18,5% com 100% de substituição.

Como se pode observar, os valores encontrados para o Módulo de Elasticidade entre concretos com e sem ARC são muito divergentes, pois dependem de diversos fatores inerentes ao próprio ARC utilizado, como: idade do concreto de origem, resistência, quantidade de argamassa aderida, porcentagem de substituição, entre outros. Da mesma forma, a complexidade na estimação do módulo através das formulações apresentadas por normas para concretos convencionais aumenta para concretos que utilizam ARC.

2.2 PROPRIEDADES DOS AGREGADOS PROVENIENTES DE CONCRETOS E DE CONCRETOS COM ARC

Estima-se que apenas uma pequena fração de resíduo de concreto é utilizada na execução de novas estruturas, apesar dos benefícios ambientais e possivelmente econômicos oriundos da reciclagem. Isto pode ser atribuído à escassez de técnicas, dados, especificações, controle de qualidade, garantia de qualidade e procedimentos para produzir e utilizar o concreto com ARC. Este é ainda considerado como um material de qualidade inferior e inadequado para o uso em grau estrutural se comparado com concretos de agregado natural (FATHIFAZL et al., 2011). Porém, os resultados relatados por Evangelista e Brito (2007) mostram que é possível produzir concretos com agregado reciclado de concreto para fins estruturais e Leite (2001) também observa que o uso de agregado reciclado de concreto em concreto estrutural pode apresentar impacto positivo devido ao cimento não hidratado que está presente no agregado reciclado.

O uso de agregados reciclados de RCD na composição de concretos estruturais, tanto na forma de agregado miúdo quanto graúdo não é ainda frequente no Brasil. Isto decorre dos repetidos problemas econômicos e os prementes problemas sociais que ocupam a agenda de discussões econômicas (ANGULO; ZORDAN; JOHN, 2001) acompanhados de incertezas quanto à viabilidade técnica. Para Amadei et al. (2011) a maior parte das cidades brasileiras adota o método da gestão corretiva, ou seja, esse modelo consiste na prática do aterramento de terrenos vagos ou alagados, ao longo de corpos hídricos e em áreas periféricas urbanas com os RCD, o que, via de regra, trata-se de uma solução paliativa que promove um fluxo irracional dos resíduos, causando sérios problemas ao meio ambiente. Portanto, devem-se buscar alternativas para esses resíduos e uma delas é a aplicabilidade em novos concretos. E, considerando o fato do ARC ser um coproduto triado, este possui melhor qualidade em relação ao RCD.

Com relação aos ARC, as propriedades dos mesmos apresentam variabilidade e ainda não se conhece perfeitamente a influência destas nas propriedades do concreto. Existem muitas publicações a respeito de concretos produzidos com RCD (LEITE, 2001; CARRIJO, 2005; LEVY, 2001; ULSEN, 2006; ANGULO, 2005; DAMINELI, 2007; LEITE et al., 2011; YUAN, SHEN, LI, 2011; MARTÍN-MORALES et al., 2011 entre outros), mas há muito menos material a respeito de concretos produzidos a partir de ARC, o que pode ser explicado

devido a barreiras técnicas e de logística a serem resolvidas, como por exemplo, a triagem e correto acondicionamento dos resíduos de concreto no montante total de RCD, a necessidade dos processos de demolição utilizarem seletivo de desmontagem para máximo aproveitamento de material e ainda a falta de conhecimento das construtoras acerca da reciclagem (SACHS, 2012).

As propriedades dos agregados reciclados constituem um problema inicial, uma vez que os métodos normalizados foram estabelecidos para agregados naturais.

Os agregados reciclados de concretos e os agregados naturais apresentam características muito distintas de acordo com a origem dos mesmos. Nos ARC essas diferenças dependem da resistência do concreto original, das condições de exposição da estrutura que deu origem aos ARC, do tamanho e do tipo dos agregados naturais utilizados originalmente, da qualidade da pasta de cimento, da porosidade, forma e textura das partículas, entre outros. Todos estes fatores contribuem na qualidade dos concretos que utilizam ARC, afetando assim, as proporções de dosagem e o comportamento nos estados frescos e endurecido. Como exemplo das consequências destas propriedades, Deshpande, Kulkarni e Pachpande (2012) mencionam que os concretos com agregados reciclados precisam, em torno de 5% a mais de volume de água em relação aos concretos com agregados naturais, pois os agregados reciclados são mais porosos devido à composição dos mesmos, os quais são parte de agregado natural e parte de argamassa, contudo, não há diminuição de resistência.

Conforme Levy (2001) a importância de estudar os agregados isoladamente, reside no fato de que, em torno de 75% do volume do concreto é ocupado pelos agregados, não sendo surpreendente o fato de sua qualidade ser de considerável importância. O agregado pode influenciar a resistência do concreto, pois agregados com propriedades indesejáveis podem não apenas produzir um concreto pouco resistente, mas também podem comprometer a durabilidade e o desempenho estrutural. Mehta e Monteiro (2008) afirmam que as propriedades do agregado afetam não apenas as características de dosagem do concreto, mas também o comportamento do concreto nos estados fresco e endurecido.

Segundo Carrijo (2005), os agregados reciclados de concreto possuem uma camada de argamassa aderida ao mesmo, o que lhe confere uma maior porosidade. Além disso, entre o agregado graúdo natural e esta camada, há uma zona de transição, contribuindo também para o aumento da porosidade do agregado reciclado. Quando estes agregados são utilizados para a fabricação de novos concretos, há a formação de outra zona de transição

entre o agregado reciclado e a nova argamassa. Com isso, o concreto reciclado possui uma maior porosidade e permeabilidade que o concreto convencional. A porosidade dos agregados afeta negativamente a resistência à compressão, a resistência à abrasão, a absorção e o Módulo de Elasticidade dos concretos, podendo influenciar na durabilidade destes (GONÇALVES, et al., 2004). Mehta e Monteiro (2008) sugerem a divisão das propriedades dos agregados nos seguintes grupos:

- Características dependentes da porosidade: Massa específica, absorção de água, resistência, dureza, Módulo de Elasticidade e sanidade;

- Características dependentes das condições de exposição prévia e condicionante da fabricação: Tamanho, forma e textura das partículas;

- Características dependentes da composição química e mineralógica: Resistência, dureza, Módulo de Elasticidade e substâncias deletérias presentes.

Além da porosidade, outras propriedades importantes dos agregados reciclados, que diferem dos agregados convencionais são a massa específica e massa unitária, que normalmente são menores nos reciclados. O estudo de Zega et al. (2010) comprova esta afirmação, uma vez que obtiveram valores entre 2,48 e 3,03 kg/dm³ para agregados naturais, e entre 2,37 e 2,66 kg/dm³ para agregados reciclados de concreto. No estudo de Lovato (2007) foi constatado que a massa unitária dos agregados reciclados possui valor inferior à dos agregados naturais, e que isto se deve provavelmente à forma e à granulometria dos mesmos. No Programa de Pós Graduação de Engenharia Civil da Unisinos, nos trabalhos de Benetti, (2012), Werle (2010) e Troian (2010) também foram obtidos valores de massa específica inferiores para os agregados reciclados (2,50; 2,47 e 2,49 g/cm³) em relação ao agregado gráudo natural (2,75 g/cm³), o mesmo ocorrendo para a massa unitária dos agregados reciclados de concreto (1,21; 1,18 e 1,21 g/cm³), também inferiores aos do agregado gráudo natural (1,49 g/cm³). Yildirim e Sengul (2011) concluíram em seu estudo que os concretos produzidos com agregados de menor massa específica apresentam valores de Módulo de Elasticidade Dinâmico menores em relação àqueles produzidos com agregados de massa específica maior. Enfatizando, Leite (2001) afirma que a diminuição da massa específica dos agregados reciclados leva a uma redução nos valores de Módulo de Elasticidade quando comparados aos dos concretos de agregados convencionais, ainda mais se tratando de agregados gráudos.

Portanto, é importante analisar separadamente os agregados reciclados a serem utilizados na produção de concretos, pois suas propriedades podem oscilar bruscamente devido a heterogeneidade da composição dos mesmos, alterando assim, as propriedades de concretos preparados com este tipo de agregado. Para exemplificar, a pesquisa de Tavares, Silva e Pelisser (2006) teve por objetivo analisar o comportamento de concretos produzidos com diferentes teores de substituição dos agregados naturais por agregados reciclados de concretos com diferentes relações a/agl. Os resultados obtidos mostraram que os agregados de concreto apresentam um grande potencial para a utilização em novos concretos, porém, os autores enfatizam a necessidade de aumentar o conhecimento a cerca das propriedades dos agregados reciclados para aumentar a sua utilização. Corroborando, Levy e Helene (2006) utilizaram resíduos de concreto para produzir dois tipos de agregados; um gráudo e outro miúdo. Para a produção dos concretos, foram utilizados diferentes teores de cada agregado (0, 20, 50 e 100%) em substituição aos agregados naturais. Os pesquisadores construíram diagramas de dosagens, os quais possibilitaram a adoção de modelos matemáticos que os conduziram a uma análise criteriosa de diferentes classes de concreto como 20, 30 e 40 MPa. Os resultados apontaram que do ponto de vista do volume total dos poros, da absorção de água por imersão e da resistividade dos concretos, a substituição de agregados gráudos naturais por agregados reciclados gráudos até a taxa de 50% em nada prejudicou o concreto. Porém, os autores enfatizam que é necessário um correto manuseio e um gerenciamento adequado para incrementar a produção de agregados reciclados gráudos.

Os concretos com ARC contêm poros e estão microfissurados pela britagem que sofreram, logo, o Módulo de Elasticidade diminui à medida que aumenta o teor de substituição do agregado natural (porosidade quase desprezível) por esses agregados. Quando adicionados integralmente no concreto, a porosidade dos agregados reduz significativamente o Módulo de Elasticidade porque o volume desse material no concreto é muito superior ao volume da pasta de cimento. Por isso, não existe uma correlação única para o ARC e para o agregado de RCD (ANGULO; FIGUEIREDO, 2011). A Figura 14 mostra a comparação das curvas tensão x deformação para concretos com agregados totalmente naturais, para concretos com 100% de agregado reciclado e uma combinação de 50% de ambos.

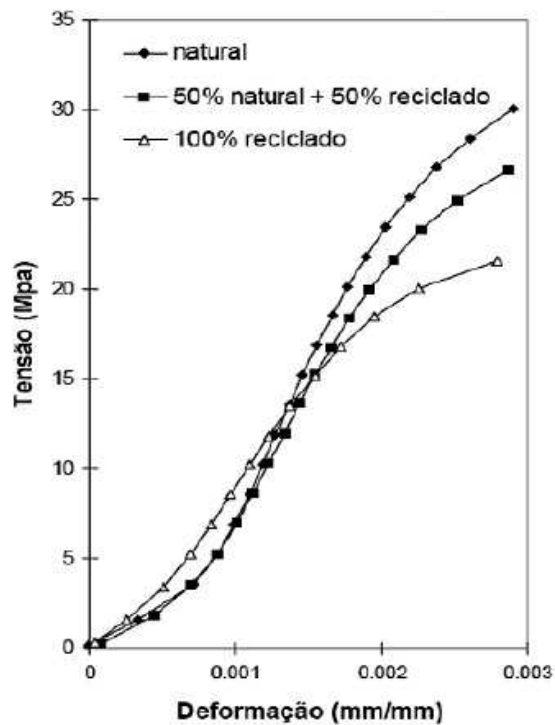


Figura 14 – Diagramas tensão x deformação dos concretos com teores crescentes de substituição de ARC.
Fonte: Latterza (1998).

Segundo Latterza (1998), apesar da curva para concreto com 100% de agregado reciclado possuir inicialmente, maior valor de tensão, para uma mesma deformação, a inclinação da curva apresentou-se maior em relação às outras duas, conferindo menor valor para o módulo de elasticidade.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), comparadas às misturas que contêm agregados naturais, as misturas que contêm ARC geralmente apresentam trabalhabilidade e durabilidade satisfatórias, mas resultam em concretos que possuem pelo menos dois terços do Módulo de Elasticidade e resistência à compressão dos concretos produzidos com agregados naturais. Estudos recentes mostram que, com métodos adequados de processamento do agregado reciclado de concreto, não há perda na qualidade do concreto com esse tipo de agregado, conforme visualizado na Tabela 2.

Tabela 2 – Comparação das propriedades do concreto com agregados reciclados não contaminados em relação às do concreto com agregado natural de composição semelhante.

Propriedades	Avaliação
Resistência de aderência agregado-argamassa do Agregado graúdo, principalmente pedregulho de concreto antigo.	Comparável à de controle
Resistência de aderência agregado-argamassa do Agregado miúdo, principalmente argamassa de concreto antigo.	55% daquela de controle
Resistência à compressão	64-100% daquela de controle
Módulo de Elasticidade Estático na compressão	60-100% daquele de controle
Resistência à flexão	80-100% daquele de controle
Resistência ao congelamento-degelo	Comparável à de controle
Coefficiente linear de expansão térmica	Comparável ao de controle
Variações de comprimento de corpos de prova de concreto armazenados por 28 dias a 90% de umidade relativa e 23°C	Comparável ao de controle
Abatimento pelo tronco de cone	Comparável ao de controle

Fonte: Frondistou-Yannas, S.A., *Progress in Concrete Technology*, V.M. Malhotra, ed. CANMET, Ottawa, p. 672, 1980 em Mehta e Monteiro (2008).

Porém, Kou, Poon e Wan (2012) expõem que muitos investigadores verificaram o uso de agregados reciclados para substituir parcialmente e/ou totalmente o agregado natural no concreto, e isso não só diminui a densidade, a resistência à compressão, o Módulo de Elasticidade do concreto, mas também diminui a durabilidade, incluindo resistência ao ataque de cloretos. Além disso, os concretos produzidos com agregados reciclados são geralmente mais porosos (possuindo valores de permeabilidade maiores do que os de concretos convencionais). Os efeitos negativos do agregado reciclado sobre a qualidade do concreto limitam o uso deste material em concreto estrutural.

2.2.1 Propriedades no Concreto no Estado Fresco

O agregado reciclado, por ser poroso, utiliza água livre da pasta de cimento quando não devidamente pré-saturado, gerando uma perda de consistência mais rápida, já nos primeiros 20 minutos (POON et al., 2004). Em geral, há uma redução no valor do abatimento de tronco de cone com o aumento do teor de ARC na mistura. A coesão das misturas contendo mais de 50% de conteúdo de ARC tende a ser reduzida.

Ao estudar as propriedades do concreto no estado fresco, é importante citar as alterações na trabalhabilidade em função da pré-molhagem. Malešev; Radonjanin e Marinkoviæ (2010) estudaram as propriedades de concretos com três diferentes percentagens de agregado graúdo reciclado de concreto na composição (nas proporções de 0, 50 e 100%). Como conclusão, a maneira como foram preparadas as misturas com ARC influencia na

trabalhabilidade do concreto, ou seja, se os agregados reciclados são pré-molhados (saturados) e misturados, a trabalhabilidade do concreto convencional e com ARC é semelhante.

Conforme Padovan (2013), as alterações na quantidade de água resultam em alterações na porosidade de concretos com ARC. Este comportamento é atenuado, se para a correção da trabalhabilidade forem utilizados aditivos plastificantes, mantendo a quantidade de água constante e como consequência, pouco alterando a porosidade do novo concreto. Desta forma, dependendo de como a trabalhabilidade necessária é obtida, o Módulo de Elasticidade poderá ser afetado.

2.2.2 Propriedades do Concreto no Estado Endurecido

Conforme Carrijo (2005), a resistência dos materiais está intimamente relacionada à sua porosidade. Quanto mais porosos estes se apresentam, menor tende a ser sua resistência. Conforme os ensaios realizados pela autora, a resistência à compressão de todos os concretos (inclusive os que foram utilizados agregados naturais) reduziu à medida que se aumentou a porosidade da pasta, ou seja, quando se aumenta a relação a/agl dos concretos. Percebeu-se que a resistência à compressão dos concretos reciclados teve valores inferiores à dos concretos naturais e que esta reduziu à medida que a massa específica dos agregados diminuiu. Para Limbachiya et al. (2004), os resultados mostram que teores até 30% de ARC têm efeito pouco expressivo sobre a resistência do concreto, porém, com teores maiores de 30% há uma redução gradual com o aumento de ARC, conforme Figura 15.

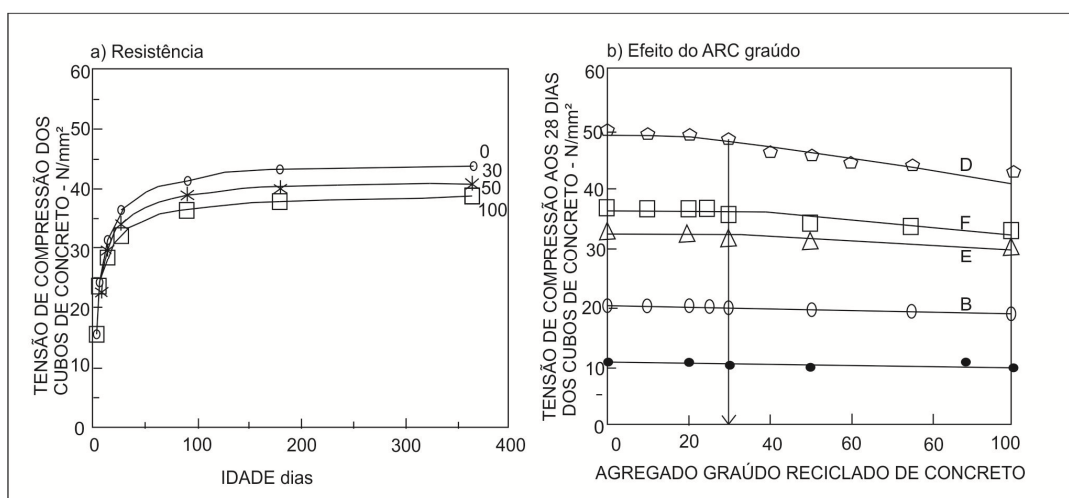


Figura 15- Resultados dos testes de compressão.

Fonte: Limbachiya et al. (2004).

Para Deshpande, Kulkarni e Pachpande (2012), propriedades dos agregados reciclados dependem da relação a/agl empregada no concreto original e da quantidade de argamassa aderida aos grãos. Brito e Alves (2010) e Buttler (2003) também concluíram que há uma tendência de diminuição de resistência à compressão e à tração com o aumento da taxa de substituição dos agregados naturais pelos reciclados, explicada pela argamassa aderida aos agregados reciclados.

2.2.3 Coeficiente de Poisson

Conforme Diógenes et. al. (2011), o valor do coeficiente de Poisson varia com a resistência do concreto, sendo menor para concretos de alta resistência. Outro fator que influencia o coeficiente de Poisson é a umidade do concreto, sendo maior em concretos saturados. Contudo, não há uma relação direta entre o coeficiente de Poisson e a idade do concreto, a relação água/aglomerante, o tempo de cura ou a granulometria do agregado. Os autores ainda afirmam que o valor do coeficiente varia entre 0,15 e 0,22 para concretos de massa específica normal, entre 2.000 e 2.800 kg/m³. Conforme a NBR 6118 (ABNT, 2007), para concretos sob tensões de compressão menores que 0,5 vezes a respectiva resistência à compressão, o coeficiente de Poisson pode ser tomado como igual a 0,2.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 PLANEJAMENTO DA PARTE EXPERIMENTAL

A execução da parte experimental seguiu a sequência de etapas mostradas no diagrama da Figura 16. Este trabalho é sequência de outro, realizado por Padovan (2013). As atividades cujos balões têm fundo preenchidos e letras em negrito foram realizadas neste plano experimental, já as demais, por Padovan (2013).

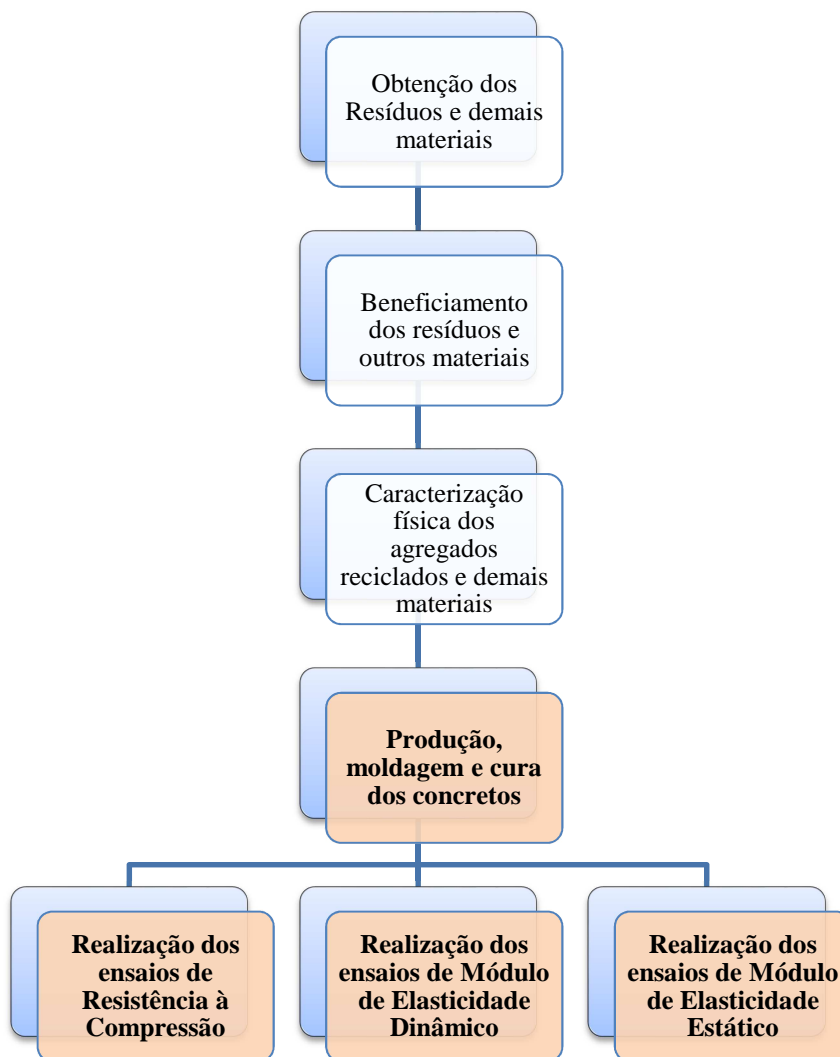


Figura 16 – Diagrama do estudo experimental.

A caracterização dos agregados contempla os ensaios de granulometria, massa específica, massa unitária, absorção de água e distribuição de poros.

3.2 MATERIAIS

3.2.1 Cimento

O cimento utilizado nesta pesquisa foi o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI RS) pelo fato de não conter adições e permitir um elevado grau de hidratação nas idades previstas no programa experimental. Dessa forma foram obtidos resultados de resistência à compressão maiores em um menor período de tempo.

As propriedades do cimento, o qual foi obtido de um único lote, foram fornecidas pelo fabricante e são apresentadas nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Características químicas do cimento Portland CPV-ARI RS.

Ensaio Químico CPV-ARI RS fabricado em 28 de maio/2012		
Teores (%)	Resultados	Limites da NBR 5737 (ABNT, 1992)
PF	3,40	≤ 4,50
MgO	6,03	≤ 6,50
SO ₃	3,03	Não aplicável
RI	6,42	Não aplicável

Fonte: Fabricante (2012).

Tabela 4 – Características físicas e mecânicas do cimento Portland CPV-ARI RS.

Ensaio Físico e Mecânico CPV-ARI RS fabricado em 28 de maio/2012		
Características avaliadas	Resultados	Limites da NBR 5737 (ABNT, 1992)
Resistência à compressão (MPa) (1 dia)	22,60	≥ 11,0
Resistência à compressão (MPa) (3 dias)	35,10	≥ 24,0
Resistência à compressão (MPa) (7 dias)	38,80	≥ 34,0
Resistência à compressão (MPa) (28 dias)	46,70	Não aplicável
Finura #200 (%)	0,10	≤ 6,0
Finura #325 (%)	1,00	Não aplicável
Blaine (cm ² /g)	5040	≥ 3000
Água de Cons. (%)	28,80	Não aplicável
Tempo de pega (h:m) Início	230	≥ 60
Tempo de pega (h:m) Fim	290	≤ 600
Expansão a quente (mm)	0,00	≤ 5,0

Fonte: Fabricante (2012).

3.2.2 Água

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

3.2.3 Agregado Graúdo Natural (AGN)

O agregado graúdo natural utilizado é de origem basáltica, proveniente da região de Quatro Colônias, no município de Campo Bom, Rio Grande do Sul.

O material foi previamente lavado para retirar possíveis finos e impurezas aderidas ao grão, e, posteriormente, seco em estufa a $100 \pm 5^\circ\text{C}$ durante 48h.

A granulometria do agregado graúdo foi definida de acordo com os padrões da NBR NM 248 (ABNT, 2003) e a fração utilizada compreendeu o que fica retido na peneira de malha 4,8 mm e o passante na peneira 19 mm.

A massa específica, massa unitária e a composição granulométrica do AGN foram determinadas em um trabalho anterior, do mesmo grupo de pesquisa (Padovan, 2013), as quais foram determinadas de acordo com as normas NBR NM 52 (ABNT, 2009) e NBR NM 45 (ABNT, 2006) conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Características físicas do agregado graúdo natural.

Abertura de peneira #	% Retido	% Acumulado
19 mm	1	1
12,5 mm	57	58
9,5 mm	33	91
6,3 mm	9	100
4,8 mm	0	100
Dimensão máxima característica (mm)		19
Módulo de finura		6,92

Fonte: Padovan (2013).

A massa unitária foi determinada e resultou em $1,51 \text{ g/cm}^3$ e a massa específica do AGN em $2,73 \text{ g/cm}^3$ (esta última propriedade está de acordo com a literatura, uma vez que NETO (2011) descreve que os valores para basalto encontram-se em uma faixa de 2,7 à 2,9 g/cm^3).

3.2.4 Agregado Miúdo Natural (AMN)

O agregado miúdo natural destinado aos experimentos é de origem quartzosa e é proveniente do rio Jacuí no Rio Grande do Sul.

Este material também foi o mesmo utilizado e caracterizado por Padovan (2013). Os ensaios realizados para caracterização do material foram: granulometria, massa específica

e massa unitária, conforme as normas NBR NM 248 (ABNT, 2003), NBR NM 52 (ABNT, 2009) e NBR NM 45 (ABNT, 2006).

Para a utilização em laboratório, o material foi previamente seco em estufa a $100 \pm 5^\circ\text{C}$ por 48h. Após a secagem, este material foi submetido a um processo de peneiramento durante 10 minutos. Utilizou-se a fração retida na peneira de malha 0,075 mm e o passante em malha 4,8 mm, conforme Tabela 6. É possível visualizar a distribuição granulométrica na Figura 17.

Tabela 6 – Características físicas do agregado miúdo natural.

Abertura de peneira #	% Retido	% Acumulado
6,3 mm	1	1
4,8 mm	1	2
2,4 mm	7	9
1,2 mm	13	22
0,6 mm	20	42
0,3 mm	37	79
0,15 mm	17	96
0,075 mm	3	99
<0,075	1	100,0
Dimensão máxima característica (mm)		4,8
Módulo de finura		2,50

Fonte: Padovan (2013).

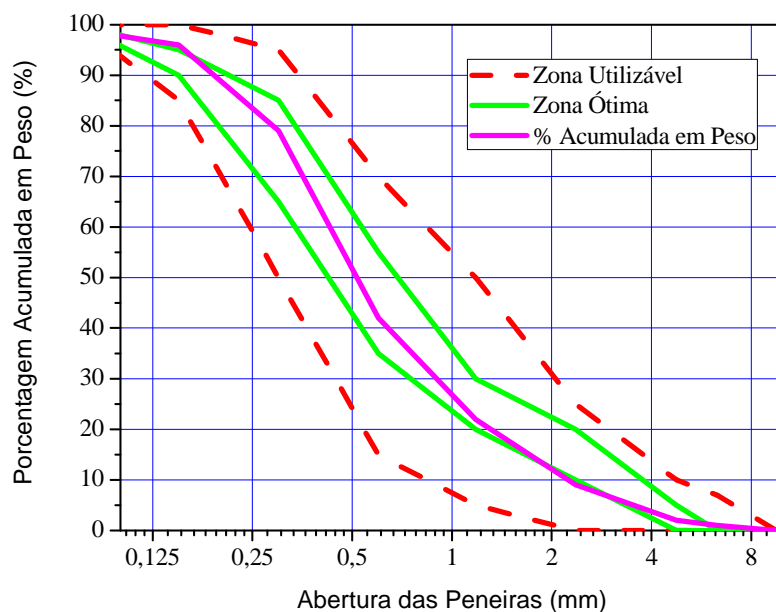


Figura 17 - Curva da distribuição granulométrica do agregado miúdo natural.

O agregado miúdo natural tem massa unitária de 1,47 g/cm³ e massa específica de 2,57 g/cm³.

3.2.5 Agregado Graúdo Reciclado de Concreto (ARC)

Este material é proveniente de resíduos de estacas advindas de empresa de pré-fabricados da região de Porto Alegre. O ARC é proveniente de concreto de f_{cj} de 35 MPa, submetido a cura térmica.

A faixa granulométrica do ARC foi a mesma do AGN, especificada na Tabela 7. A massa unitária deste agregado é de 1,13 g/cm³ e a massa específica de 2,21 g/cm³.

Tabela 7 - Características físicas do agregado reciclado de concreto.

Abertura de peneira #	% Retido	% Acumulado
19 mm	1	1
12,5 mm	57	58
9,5 mm	33	91
6,3 mm	9	100
4,8 mm	0	100
Dimensão máxima característica (mm)		19
Módulo de finura		6,92

Fonte: Padovan (2013).

Conforme Padovan (2013), o teor de argamassa (agregado miúdo e cimento) aderida aos grãos no ARC resultou em aproximadamente 70%, o que significa que aproximadamente 30% da composição do ARC são agregados naturais (miúdos e graúdos). O teor de argamassa é elevado, mas, deve-se considerar que o concreto que originou o agregado reciclado é um concreto produzido para peças pré-moldadas, com elevado teor de argamassa, devido ao tipo de fôrma e da elevada taxa de armadura existente nas peças.

Devido ao teor de argamassa aderida aos grãos no ARC, este possui maior porosidade e conseqüentemente apresenta alta taxa de absorção de água. Esta informação é extremamente relevante em dosagens de concretos, a fim de evitar que os agregados absorvam água da mistura, refletindo assim, na trabalhabilidade (e resistência) do mesmo. A curva de absorção de água do ARC obtida por Padovan (2013) está representada na Figura 18 a seguir, e está comparada com a curva de absorção de água do AGN também utilizado nesta pesquisa. O percentual de absorção de água é dado em massa.

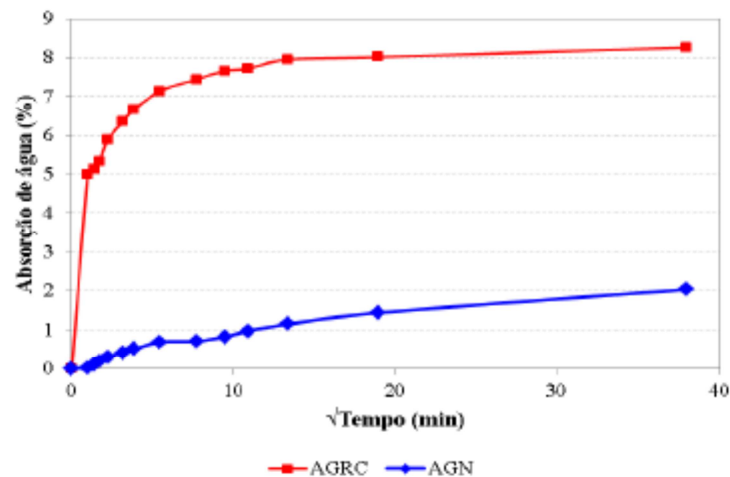


Figura 18 – Absorção de água ao longo do tempo por imersão – ARC e AGN.

Fonte: Padovan (2013).

3.3 MÉTODOS E PARÂMETROS DE ENSAIO

Os traços utilizados para os concretos com e sem agregados reciclados foram de 1: 1,641 : 2,25 (Relação a/aglomerante de 0,45), 1 : 2,228 : 2,75 (a/aglomerante de 0,55) e 1 : 2,815 : 3,25 (a/aglomerante de 0,65). Esses traços foram determinados por Padovan (2013) utilizando o método de dosagem IPT/EPUSP de Helene e Terzian (1992). O abatimento foi fixado em 100 ± 20 mm. O teor de argamassa adotado foi de 54% e a quantidade de água $H = 9,2\%$. Não foram utilizados aditivos plastificantes ou super plastificantes em ambos os concretos (com e sem ARC).

Para os concretos com somente agregados naturais, todos os agregados foram misturados secos; já para os concretos com o agregado reciclado, o ARC foi pré-molhado em 80% da saturação da seguinte maneira: pesava-se a água equivalente para cada traço, borriava-se a água da pré-molhagem no agregado reciclado em partes, sendo despejado em um recipiente plástico. Após todo o ARC ser aspergido com água, vedava-se o recipiente plástico com tampa de rosca e fita adesiva de alta resistência de modo a evitar a perda de umidade, onde permaneceu durante 7 dias até o momento da mistura. O recipiente plástico era agitado de 2 a 3 vezes por dia. A sala onde era realizada a pré-molhagem e onde permanecia até o momento da mistura tinha temperatura constante de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar constante de $60 \pm 10\%$. Todo o procedimento de pré-molhagem demorava em torno de 5 minutos.

A quantidade de água utilizada para a pré-molhagem dos agregados reciclados foi obtida utilizando-se a taxa de absorção de água ao longo do tempo no período de 24 horas, onde a taxa de absorção obtida no ensaio para o tempo referido para o ARC foi de 8,26% (Padovan, 2013), conforme visto na Figura 18.

Considerando os concretos com e sem ARC, foram executadas 6 betonadas de 70 kg cada. Resultando assim, em 18 corpos de prova para cada traço (betonada) de a/aglomerante 0,45; 0,55 e 0,65. Desses 18 exemplares, 6 eram destinados para cada idade estipulada (7, 28 e 63 dias), sendo 2 deles utilizados para a resistência à compressão, 3 para os ensaios de Módulo de Elasticidade e 1 posto de reserva.

Foram moldados corpos de prova com dimensões de 10 x 20 cm conforme prescrições da norma NBR 5738 (ABNT, 2008), utilizando vibrador de imersão de modo a se obter um adensamento padrão. Estes permaneceram nos moldes em uma sala protegida das intempéries à temperatura e umidade ambiente pelo período de 24h com o topo protegido por placa de vidro, de modo a evitar a perda de água para a superfície externa. Após esse intervalo, submeteram-se os exemplares ao processo de cura em câmara úmida onde se manteve a umidade em 100% pelo tempo necessário (7, 28 e 63 dias) para a realização dos experimentos (Módulo de Elasticidade Estático e Dinâmico e compressão axial).

Todos os exemplares tiveram topo e base retificados aos 7 dias de idade.

3.3.1 Idade dos Ensaio

Os corpos de prova foram submetidos aos ensaios aos 7, 28 e 63 dias, quando o cimento possui, respectivamente, hidratação média, alta e quase completa.

3.3.2 Níveis de carregamento para determinação do módulo

Para a determinação do Módulo Estático e do Módulo Dinâmico foram adotados os valores de 20, 30, 40, 50, 60, 70 e 80% da carga correspondente à resistência à compressão do concreto (carga última). O Módulo Dinâmico foi também determinado para o material sem tensão (descarregado). Não se utilizou valores acima de 80% pelo fato de se estimar que uma estrutura, em condições normais, não seja submetida a carregamentos acima deste valor, e também por um cuidado com os equipamentos utilizados, precavendo possíveis danos quando da ruptura dos corpos de prova. Mehta e Monteiro (2008) anotam que em até cerca de 50% da carga última, pode-se admitir que exista um sistema estável de microfissuras na zona de

transição, não alterando significativamente os níveis de resistência. A partir de 60% da carga começam a surgir fissuras na matriz, e, a partir de 75% da carga última, não só o sistema de fissuras na zona de transição torna-se instável, mas também a proliferação e propagação de fissuras na matriz aumentarão, fazendo com que o Módulo de Elasticidade diminua progressivamente.

3.3.3 Variáveis de controle

As variáveis de controle foram determinadas de modo a permitir a avaliação das influências sobre as variáveis de resposta.

Os fatores controláveis são:

- I. Relação água/aglomerante: 0,45; 0,55 e 0,65;
- II. Idades dos ensaios: 7, 28 e 63 dias;
- III. Nível de carregamento: 20, 30, 40, 50, 60, 70 e 80% de f_c .
- IV. Porcentagem de substituição de AGN por ARC: 0 e 50%

Os fatores fixos ou constantes são:

- I. Tipo de cimento: CPV-ARI RS;
- II. Tipo de resíduo de concreto para produção de ARC: proveniente de estacas pré-moldadas;
- III. Abatimento de tronco de cone 100 ± 20 ;
- IV. Teor de pré-molhagem dos ARC 80%;
- V. Prensa da marca Controls, a qual é aferida periodicamente e apresenta carga linear a partir de 20 kN e tem capacidade máxima de 2.000 kN.

3.3.4 Variáveis de resposta

- I. Módulo de Elasticidade Estático;
- II. Módulo de Elasticidade Dinâmico;
- III. Resistência à compressão.

3.3.5 Matriz fatorial

A Figura 19 mostra a matriz fatorial dos experimentos, na qual se observa que foram confeccionados um total de 108 corpos de prova. Foram moldados 6 exemplares para cada marcação, de modo a direcionar 3 deles para os ensaios de Módulo de Elasticidade Estático e Dinâmico; 2 para o ensaio de compressão em cada idade e 1 deles foi deixado como reserva. A porcentagem é correspondente ao teor de substituição em massa do AGN por ARC.

		Fator a/ aglomerante		
		0,45	0,55	0,65
Idade (dias)	7	X	X	X
	28	X	X	X
	63	X	X	X
Adição de 0%				
		Fator a/ aglomerante		
		0,45	0,55	0,65
Idade (dias)	7	X	X	X
	28	X	X	X
	63	X	X	X
Adição de 50%				

Figura 19 - Diagrama do estudo experimental.

3.3.6 Nomenclatura dos corpos de prova

A nomenclatura utilizada neste trabalho está de acordo com a Figura 20 a seguir:

Fator a/agl	X	Idade	D	N ^o . exemplar
45 (designando a/agl 0,45) 55 (designando a/agl 0,55) 65 (designando a/agl 0,65)	N ou R (designando Natural ou Reciclado)	7 ou 28 ou 63	dias	De 1 a 6

Figura 20 – Forma de identificação dos exemplares.

3.3.7 Replica de ensaios

Devido a algumas falhas cometidas durante determinados ensaios, fez-se necessário replicar os experimentos:

- 0% de ARC: 7 dias para a/agl 0,55; 7 e 28 dias para a/agl 0,45;
- 50% de ARC: 28 dias para a/agl 0,55.

Ao final do número do exemplar foi adicionada a letra “B” para designar a repetição do ensaio.

3.3.8 Métodos de Ensaio

Dois métodos de estimativa de Módulo de Elasticidade foram realizados simultaneamente: Método Dinâmico, através da Norma C597 (ASTM, 2009), e Método Estático, seguindo a Norma NBR 8522 (ABNT, 2008).

Inicialmente foi obtida a resistência à compressão simples de dois corpos de prova. Caso a diferença entre os resultados ultrapassasse 5%, um terceiro exemplar era ensaiado. A resistência à compressão do concreto era então estimada ou pela média dos resultados obtidos (em caso de 2 corpos de prova) ou pela média dos dois valores mais próximos entre os três resultados (em caso de 3 corpos de prova).

Assim, foi possível calcular as porcentagens de carga para a realização dos ensaios de Módulo de Elasticidade Estático e Dinâmico, executados simultaneamente.

Além disso, o diâmetro dos corpos de prova foi determinado por meio da média de três medidas, e a altura foi pela média de três geratrizes. Foi medido o peso de cada corpo de prova com precisão de 0,001 kg.

O módulo Dinâmico para o material sem tensões foi medido previamente à aplicação de carga sobre os corpos de prova.

Os ensaios de Módulo de Elasticidade foram realizados seguindo as etapas 1, 2 e 3 descritas no item 6.2.2.1 (Metodologia A) da norma 8522 (ABNT, 2008). Em função da incerteza quanto a concretos com ARC permanecerem elásticos até a tensão de 30% da resistência à compressão, o primeiro patamar estipulado pela norma (30%) foi alterado para 20%. Além disso, foram feitas medições em 40, 50, 60, 70 e 80% para a determinação do comportamento tensão x deformação. Em seguida, os exemplares foram levados até a ruptura. O procedimento do ensaio está descrito na Figura 21 a seguir.

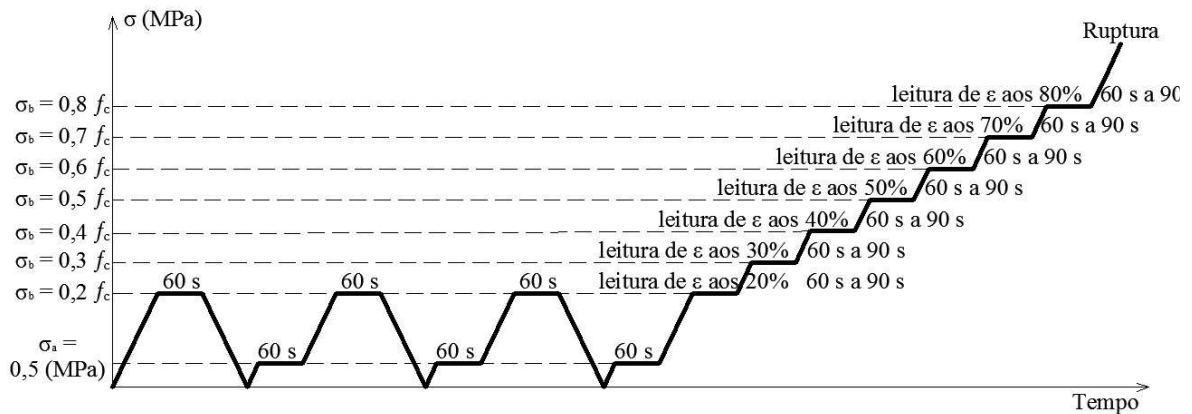


Figura 21 – Representação esquemática do carregamento para a determinação do Módulo de Elasticidade.

Fonte: Modificado de NBR 8522 (ABNT, 2008).

O equipamento utilizado para a aquisição de dados durante o ensaio de Módulo de Elasticidade Estático foi um *data logger* do fabricante Ahlborn do tipo ALMEMO® 2490 (Figura 22), que recebeu dois sensores do tipo *Clip Gauge* modelo ER-25 da empresa MSI (Figura 23) que medem a deformação em corpos de prova de concreto. Estes sensores têm altura de 10 cm e os mesmos foram acoplados a 2 cm do topo do corpo de prova, em função do arranjo necessário para a instalação simultânea dos *clip gauges* e dos sensores do equipamento de ultrassom nos exemplares.



Figura 22 – Data logger Ahlborn.



Figura 23 – Clip gauges do Data Logger acoplados no corpo de prova cilíndrico.

Um computador foi utilizado para fazer a aquisição dos dados de deslocamento medidos pelos *clip gauges* e processados pelo *data logger*, bem como dos dados de carga aplicada pela prensa, à taxa de uma leitura a cada 3 segundos.

As deformações específicas foram obtidas dividindo-se os deslocamentos adquiridos pelo *data logger* pelo comprimento base dos *clip gauges*, 100 mm. As correspondentes tensões de compressão aplicadas foram obtidas dividindo-se o valor das cargas aplicadas pela área da seção transversal do corpo de prova.

A determinação do Módulo de Elasticidade Dinâmico sob tensão ocorreu simultaneamente ao ensaio Estático.

O equipamento de ultrassom utilizado neste estudo é um “emissor-receptor de pulsos” do tipo PUNDIT Lab desenvolvido pela empresa Proceq AS (Figura 24). O dispositivo é composto por uma fonte em que dois transdutores são ligados. O primeiro aplica ondas acústicas de ultrassom ao material a ser analisado. O segundo transdutor recebe o pulso acústico e o equipamento registra o tempo decorrido entre a emissão e a recepção do pulso, o que, junto com o afastamento entre os transdutores, permite determinar a velocidade de propagação do som no material sendo ensaiado. Os materiais com descontinuidades internas apresentam velocidades mais lentas em relação aos materiais de maior densidade. O equipamento pode ser utilizado com transdutores piezoelétricos sobre uma gama de frequência de 20 a 500 kHz, sendo que neste estudo foi empregada a frequência de 54 kHz. O

aparelho foi utilizado através do método de transmissão direta (os impulsos de saída do transmissor são propagados na direção normal à face do receptor) por ser mais satisfatória.



Figura 24 – Aparelho de ultrassom do tipo PUNDIT Lab.

Para a calibragem do ultrassom foi utilizado um cilindro padrão do equipamento. Este procedimento era realizado antes do ensaio de cada grupo de 3 corpos de prova (Figura 25).



Figura 25 – Cilindro padrão do ultrassom – Calibração.

Com o corpo de prova descarregado, os sensores do aparelho de ultrassom eram acoplados na direção longitudinal (sensores normais às faces superior e inferior) e se fazia a leitura de velocidade de onda, medida esta denominada de VL (Figura 26).



Figura 26 – Medida longitudinal da velocidade de onda.

Após, transversalmente ao exemplar e com o uso de adaptadores visualizados na Figura 27, fazia-se a leitura de tempo de propagação de onda ultrassônica (T).

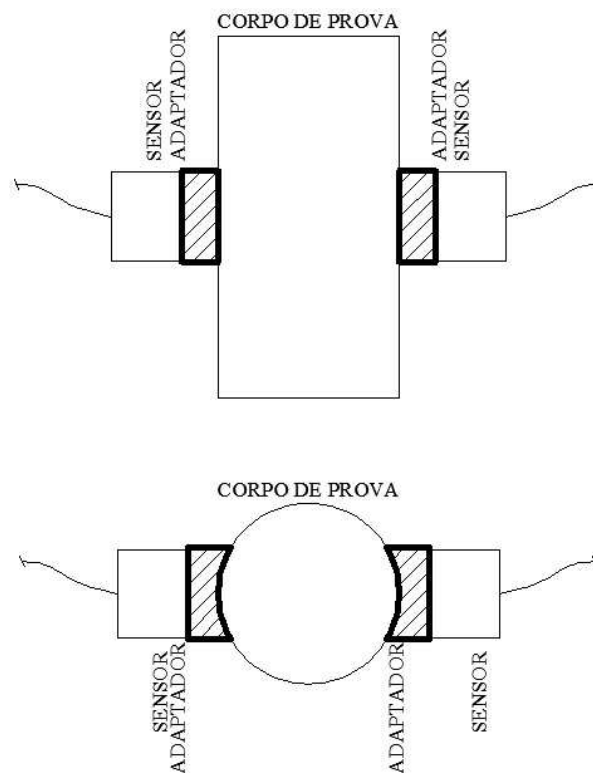


Figura 27 – Vista frontal e superior do corpo de prova com os adaptadores dos sensores acoplados no sentido transversal do exemplar.

Então, eram multiplicados VL e T e o valor obtido era de uma distância compensatória devido aos adaptadores dos sensores para acoplamento transversal. Esse valor

era informado no ultrassom. Este procedimento pôde ser feito somente para os valores de velocidade de onda nos corpos de prova descarregados. Para as demais leituras, enquanto o material é submetido a tensões e assim, apresentando microfissuras, a velocidade de propagação de onda ultrassônica cai e o tempo de propagação aumenta, mas isso ocorre apenas no concreto (não acontece o mesmo nos adaptadores), portanto, para os valores de velocidade de onda ultrassônica com carga, o procedimento para compensação foi feito conforme descrito a seguir nas Equações 2 à 5.

Obtém-se o comprimento equivalente, LE:

$$LE = VL \times T \quad \text{Equação 2}$$

Obtém-se o tempo de propagação diametral no concreto, TD:

$$TD = \frac{\text{Diâmetro do exemplar}}{VL} \quad \text{Equação 3}$$

Obtém-se o tempo de propagação nos adaptadores, TA:

$$TA = T - TD \quad \text{Equação 4}$$

Obtém-se a velocidade de propagação real, VR, a partir da velocidade medida, VM:

$$VR = \frac{\text{Diâmetro do exemplar}}{\frac{LE}{VM} - TA} \quad \text{Equação 5}$$

As leituras de velocidade da onda ultrassônica foram realizadas em 0% de carga e nos mesmos níveis de carga do ensaio de módulo Estático (20, 30, 40, 50, 60 70 e 80% *fc*).

Entre os sensores e os adaptadores; e entre os adaptadores e o corpo de prova foi utilizada vaselina sólida industrial (material de interface, que tem a função de servir, como elemento acoplante entre o exemplar e o transdutor).

A seguir, na Figura 28, imagens de exemplar na prensa hidráulica com os sensores do ultrassom e os *clips gauges* acoplados para o ensaio Estático e Dinâmico.



Figura 28 – Corpos de prova com sensores do ultrassom e *clip gauges* ensaiados na prensa hidráulica.

Para a determinação do Módulo de Elasticidade, utilizou-se a Equação 6 que está de acordo com o CEB-FIP *Model Code* 1990.

$$E_c = \frac{V^2 \cdot \delta \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \times 10^{-3} \quad \text{Equação 6}$$

Sendo:

E_c = Módulo de Elasticidade do concreto em MPa;

V = Velocidade ultrassônica em m/s;

δ = Densidade do concreto em kg/dm³;

ν = Coeficiente de Poisson

O uso da Equação 6 exige a determinação do valor do Coeficiente de Poisson, que para concretos assume valores entre 0,15 e 0,22 (Mehta e Monteiro, 2008), sendo indicado o valor de 0,2 para concretos sob tensão inferior a $0,5 f_c$ (NBR 6118, 2007). Contudo, sua influência sobre o valor do Módulo Dinâmico é relativamente pequena para a faixa de variação indicada. .

Na Tabela 8 se tomou como exemplo o concreto produzido com ARC, relação a/aglomerante de 0,65 e idade de 28 dias, quanto que na Tabela 9 o exemplo foi do concreto

produzido sem ARC, com relação a/aglomerante de 0,45 e também na idade de 28 dias. Percebeu-se que as diferenças entre os valores de Módulo de Elasticidade Dinâmico considerando Poisson de 0,15 e de 0,22, são inferiores a 4,06% em relação aos valores médios para ambos os exemplos.

Tabela 8 – Influência do coeficiente de Poisson no cálculo do Módulo de Elasticidade para concretos com ARC.

v	MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa)							
	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,2	0,21	0,22
20% f_c	43.833,52	43.462,73	43.060,70	42.626,29	42.158,29	41.655,46	41.116,45	40.539,90
30% f_c	43.833,52	43.462,73	43.060,70	42.626,29	42.158,29	41.655,46	41.116,45	40.539,90
40% f_c	43.833,52	43.462,73	43.060,70	42.626,29	42.158,29	41.655,46	41.116,45	40.539,90
50% f_c	43.833,52	43.462,73	43.060,70	42.626,29	42.158,29	41.655,46	41.116,45	40.539,90
60% f_c	43.264,92	42.898,94	42.502,12	42.073,35	41.611,42	41.115,11	40.583,10	40.014,02
70% f_c	41.551,50	41.200,02	40.818,92	40.407,12	39.963,49	39.486,83	38.975,89	38.429,35
80% f_c	39.275,93	38.943,69	38.583,46	38.194,22	37.774,88	37.324,33	36.841,37	36.324,76

Tabela 9 – Influência do coeficiente de Poisson no cálculo do Módulo de Elasticidade para concretos sem ARC.

v	MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa)							
	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,2	0,21	0,22
20% f_c	38.241,25	37.917,77	37.567,03	37.188,04	36.779,75	36.341,07	35.870,83	35.367,83
30% f_c	38.241,25	37.917,77	37.567,03	37.188,04	36.779,75	36.341,07	35.870,83	35.367,83
40% f_c	38.241,25	37.917,77	37.567,03	37.188,04	36.779,75	36.341,07	35.870,83	35.367,83
50% f_c	38.241,25	37.917,77	37.567,03	37.188,04	36.779,75	36.341,07	35.870,83	35.367,83
60% f_c	37.586,33	37.268,38	36.923,65	36.551,15	36.149,85	35.718,68	35.256,50	34.762,11
70% f_c	35.731,65	35.429,39	35.101,67	34.747,55	34.366,06	33.956,16	33.516,78	33.046,79
80% f_c	32.337,27	32.063,72	31.767,14	31.446,66	31.101,40	30.730,45	30.332,81	29.907,46

Em função destes resultados, não foi feita a determinação experimental do valor do Coeficiente de Poisson para os diferentes concretos estudados, sendo utilizado o valor de 0,2.

3.3.9 Obtenção da curva tensão x deformação segundo a NBR 8522 (ABNT, 2008)

Ao se fazer um gráfico com os dados de tensão aplicada com a correspondente deformação específica resultante, obtém-se curvas semelhantes às mostradas na Figura 29.

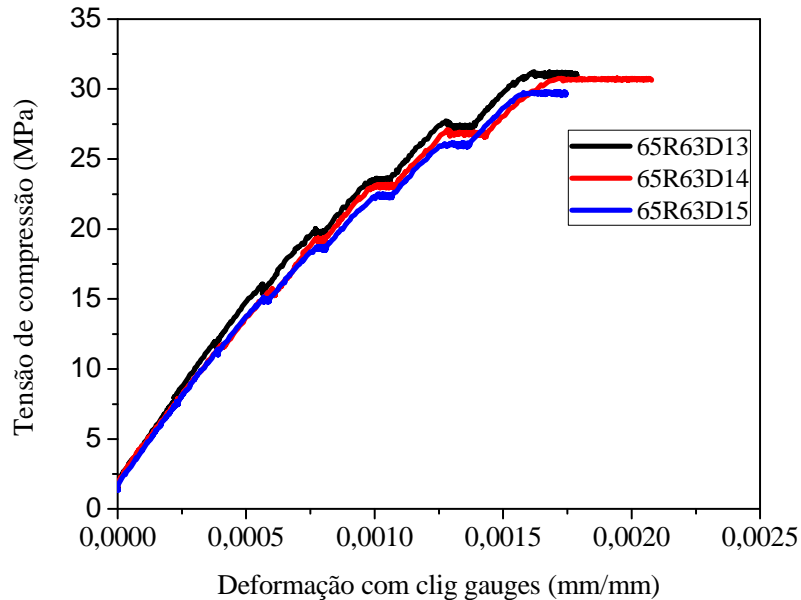


Figura 29 – Gráfico tensão x deformação com patamares.

Os patamares observados na curva resultante são devidos ao procedimento experimental determinado pela NBR 8522, que preconiza fazer as leituras de tensão e deformação em até 30s somente após a tensão aplicada ter sido mantida constante por 60s. Desta forma, se é empregada instrumentação que permita a aquisição de dados com pequenos intervalos de tempo entre as leituras, o efeito de microfissuração ou de deformações diferidas (fluência ou comportamento viscoelástico) fica evidente.

Conforme a NBR 8522, os valores representativos do comportamento tensão x deformação são aqueles obtidos, transcorridos os 60s mínimos no qual a tensão permanece constante em cada patamar. Estes pontos estão indicados na Figura 30.

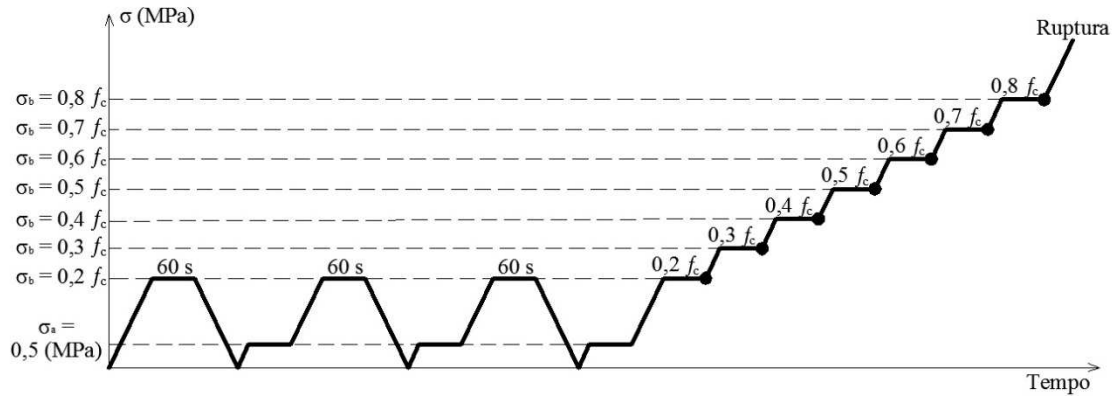


Figura 30 – Locação dos pontos para plotagem de gráficos sem patamares.

A aplicação deste critério resultou em curvas tensão x deformação com o formato mostrado na Figura 31:

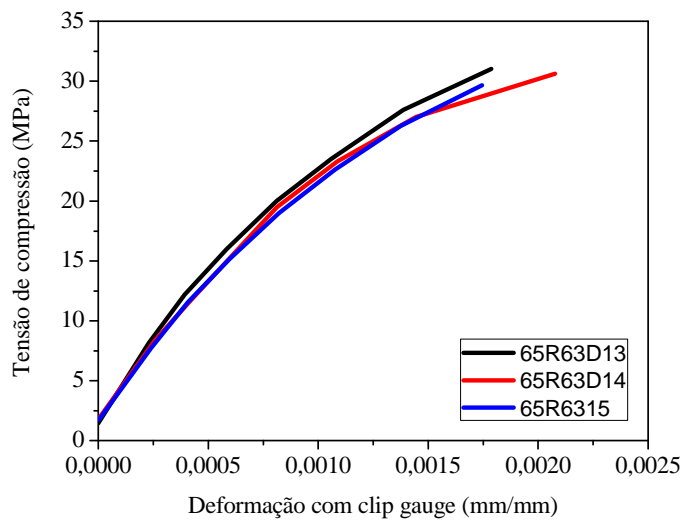


Figura 31 – Gráfico tensão x deformação sem patamares.

3.3.10 Obtenção do Módulo de Elasticidade Estático

Conforme a NBR 8522, o Módulo de Elasticidade, E_{ci} , em megapascais, deve ser calculado através da equação 7:

$$E_{ci} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

σ_b é a tensão maior, em megapascais; ($\sigma_b = 0,3 f_c$);

0,5 é a tensão básica, expressa em megapascais (MPa);

ε_b é a deformação específica média dos corpos de prova sob a tensão maior;

ε_a é a deformação específica média dos corpos de prova sob tensão básica (0,5 MPa).

A norma estabelece uma tensão básica de 0,5 MPa, a partir da qual os corpos de prova são submetidos a tensões crescentes até $0,3 f_c$, permitindo o cálculo do Módulo de Elasticidade. O valor σ_b e ε_b correspondentes a $0,3 f_c$ são obtidos a partir da curva tensão x deformação da NBR 8522, ou seja, são valores obtidos com a tensão mantida estável por um período mínimo de 60s e máximo de 90s.

Contudo, nos ensaios realizados, não foi possível estabilizar a tensão aplicada pela prensa a níveis tão baixos como 0,5 MPa para todos os exemplares, uma vez que a prensa apresenta um patamar de linearidade inferior de 20 kN, o que equivale a uma tensão de 2,55 MPa para corpos de prova de 10 x 20cm. Além do limite inferior de calibração da prensa, sabe-se que no início do processo de aplicação de tensões por parte da prensa, com a acomodação dos corpos de prova, a falta de precisão no início da escala de cargas, etc., faz com que as leituras obtidas não reproduzam adequadamente o comportamento do material ensaiado sob tensões.

Cada corpo de prova demandou uma tensão de estabilização diferente, chegando a 3,6 MPa no caso mais crítico. Desta forma, o Módulo de Elasticidade foi obtido para todos os corpos de prova a partir da expressão modificada (Equação 8):

$$E_{ci} = \frac{\sigma_b - 3,6 \text{ MPa}}{\varepsilon_b - \varepsilon_x} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

ε_x é a deformação em 3,6 MPa.

Se o material é elástico linear ao longo de toda a faixa de tensões abaixo de $0,3 f_c$, o uso da expressão original ou da modificada resulta no mesmo valor de Módulo de Elasticidade.

Atestam tal afirmação os gráficos tensão x deformação (Figuras 32 e 33) até o valor de $0,3 f_c$ apresentados, escolhidos aleatoriamente:

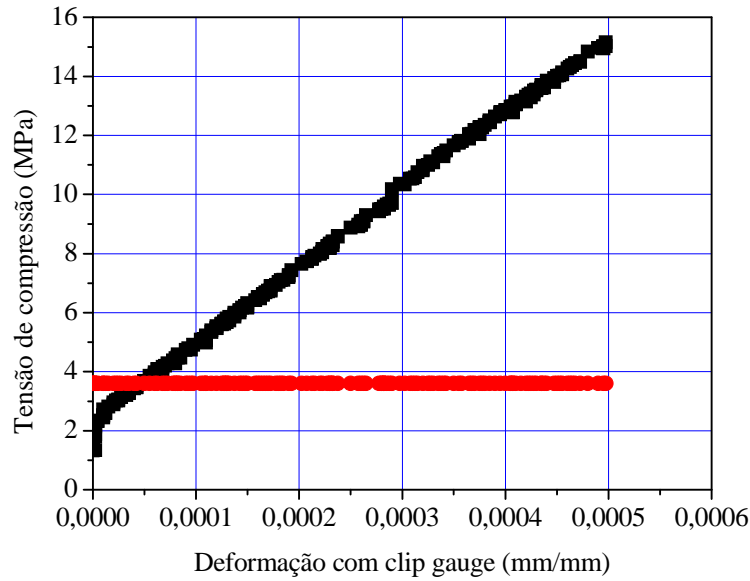


Figura 32 – Tensão x deformação para o concreto sem ARC, rompido aos 63 dias e com a/agl de 0,45.

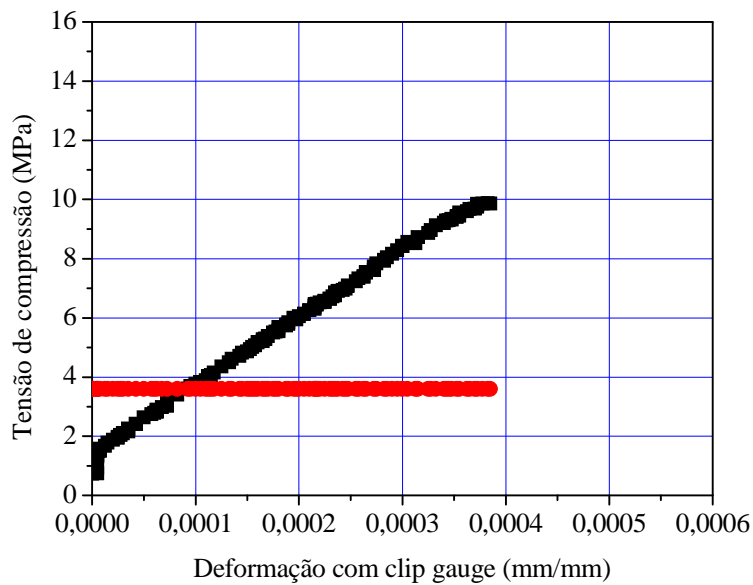


Figura 33 - Tensão x deformação para o concreto com ARC, rompido aos 28 dias e com a/agl de 0,65.

Como é possível verificar, a zona de pontos iniciais apresenta um comportamento que não é inerente ao material (uma vez que todos os exemplares, de todas as relações a/aglomerante, com e sem agregado reciclado e de 28 e 63 dias de idade apresentaram o mesmo comportamento), e sim, é relativo à forma como o ensaio é desenvolvido e também, devido à prensa que possui capacidade muito maior em relação às cargas ali aplicadas.

Como não foi considerada a tensão básica indicada pela NBR 8522, o Módulo de Elasticidade Estático obtido neste trabalho deveria ser denominado, segundo a nomenclatura

de Mehta e Monteiro (2008) de Módulo de Elasticidade cordal nas tensões de 3,6 MPa e $0,3 f_c$, e não tangente inicial.

A Figura 34 representa, através da inclinação da linha traço-ponto, o valor do módulo tangente inicial dado pela NBR 8522, e da inclinação da linha tracejada, o módulo que foi considerado no presente trabalho. Tais valores somente são diferentes se o comportamento apresentado nas Figuras 32 e 33 no início do diagrama tensão x deformação, efetivamente representam um comportamento do material e não o comportamento do procedimento de ensaio. Como as curvas representadas nessas figuras são essencialmente retas entre 3,6 MPa e $0,3 f_c$, e que não é provável que o material ensaiado apresente um dado comportamento entre 0 e 3,6 MPa, e mude bruscamente de comportamento a partir de 3,6 MPa (como aparecem nas referidas figuras), a conclusão é que o trecho inicial não reflete o comportamento do material, mas simplesmente do procedimento de ensaio empregado. Assim, o valor da tensão base a ser empregado na determinação do Módulo de Elasticidade deveria garantir que a região de perturbação decorrente do procedimento de ensaio esteja na região de tensões inferior a ela e o Módulo de Elasticidade medido é efetivamente o Módulo Tangente Inicial e não o Módulo Cordal.

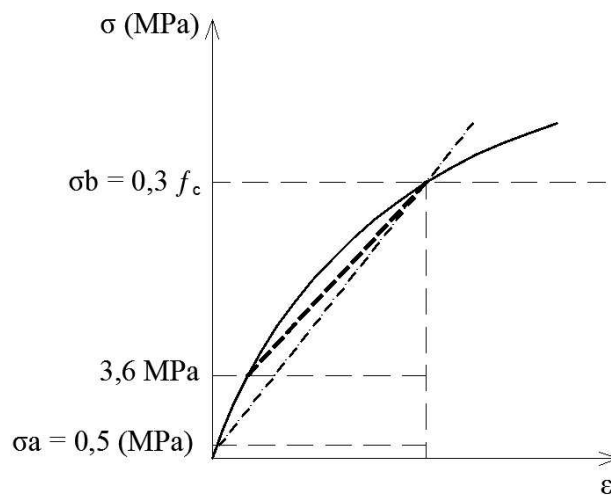


Figura 34 – Representação gráfica do módulo tangente inicial e do módulo secante a 3,6 MPa.

3.3.11 Obtenção da curva tensão x deformação a partir de um ensaio instrumentado com capacidade de leitura contínua e automatizada

Os procedimentos de ensaio prescritos pela NBR 8522 permitem a determinação da curva tensão x deformação e a obtenção do Módulo de Elasticidade tangente inicial mesmo quando os equipamentos utilizados são de leitura analógica e manual, como é o caso de uma prensa cuja velocidade de carregamento é definida manualmente e as cargas são lidas através

de um relógio de escala e de deslocamentos lidos a partir de um ou mais relógios comparadores (deflectores mecânicos). Para equalizar os tempos de leitura em qualquer condição experimental, a norma impõe a permanência em cada patamar de carga por 60s, permitindo até mais 30s para a leitura dos diversos mostradores analógicos.

Tal procedimento traz duas consequências: a definição da curva de comportamento tensão x deformação a partir de um número bastante limitado de pontos e a inclusão, no comportamento elástico do material, de fenômenos diferidos (microfissuração, fluência, etc.) ao impor até 90s de cargas constantes em cada nível de leitura. Esses fenômenos diferidos se tornam mais evidentes à medida que as tensões de compressão aplicadas crescem.

Quando há disponibilidade de uma prensa automatizada, que permita a programação da velocidade de aplicação de carga e a aquisição digital das cargas aplicadas em cada instante e de uma instrumentação para a medição de deslocamentos também automatizada, permitindo a aquisição digital dos mesmos de forma simultânea à aquisição das informações de cargas, parece desnecessário manter patamares de carga constante de 60 a 90s em poucos níveis de carga especificados, uma vez que todas as cargas aplicadas passam a ser níveis de medida. Nestas condições, o melhor procedimento experimental seria após uma ciclagem inicial para acomodação corpo de prova – prensa, aplicar as cargas de forma crescente, a uma velocidade de carga pré-definida e constante, até a ruptura, sem patamares. A definição do valor do Módulo de Elasticidade tangente inicial seria feita a partir de regressão linear simples (mínimos quadrados) sobre todos os pontos adquiridos entre a tensão mínima a partir da qual não há mais efeito de acomodação do exemplar na prensa (tensão de estabilização) e a tensão limite superior ($0,3 f_c$). Entretanto, no programa experimental deste trabalho, priorizou-se a abordagem proposta pela NBR 8522. A manutenção dos patamares de carga por 60 a 90s impossibilitou a programação de uma velocidade de aplicação de carga constante na prensa, exigindo controle manual das cargas. Desta forma, a velocidade de aplicação de carga não foi constante, fazendo com que alguns trechos da curva tivessem um número maior de pontos adquiridos (pares carga-deslocamento) que outros. Ao se utilizarem regressões para a determinação do comportamento elástico, um peso maior é dado a este trecho da curva pela presença de um maior número de pontos. Além disso, mesmo não havendo deformações diferidas, a utilização dos pontos adquiridos nos patamares faz com que a regressão atribua um peso maior a estes pares carga-deslocamento. Em função disso, para esta abordagem, os dados adquiridos ao longo do ensaio de cada corpo de prova sofreram dois

tratamentos: o primeiro consiste em remover do conjunto todos os dados que correspondiam a uma descarga em relação a dados anteriormente lidos (remoção das oscilações de carga provenientes do controle manual da prensa); o segundo consiste em eliminar o efeito diferido decorrente dos patamares de carga, igualando os deslocamentos (ou deformações) no final do patamar ao seu valor no início do mesmo, para um mesmo nível de tensão. Acredita-se que nenhum destes tratamentos seria necessário se o ensaio fosse realizado com a programação da prensa com uma velocidade de aplicação de carga constante, procedendo-se o ensaio até a ruptura sem patamares.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISES DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados, analisados e discutidos os resultados obtidos a partir do programa experimental. Os dados foram tratados estatisticamente, utilizando-se da ferramenta de análise de regressão por mínimos quadrados e correlação entre as variáveis do estudo (análise de variância).

4.1 MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E DINÂMICO

4.1.1 Concretos sem ARC

Os valores de Módulo de Elasticidade determinados pelos métodos Estático e Dinâmico, o coeficiente de variação desses resultados, a diferença relativa entre a média desses dois valores, tomando como base o valor do método Estático; a resistência à compressão obtida no ensaio de compressão simples e a tensão de ruptura de cada corpo de prova no ensaio de módulo, podem ser observados na Tabela 10 (as posições sem valores e com a sigla “ND” indicam que o módulo Dinâmico não foi avaliado para os respectivos exemplares em função de dificuldades experimentais). Os valores aos 7 dias foram desconsiderados, pois serão tratados separadamente no item 4.8 devido aos seus comportamentos serem distintos.

Tabela 10 – Resultados dos ensaios para todas as relações a/agl, aos 28 e 63 dias de idade - concretos sem ARC.

a/agl 0,45_SEM ARC_28 DIAS	045N28D01B	045N28D02B	045N28D03B	MÉDIA	CV	DIFER. REL.
E (GPa) Estático	37,49	25,26	28,58	30,44	20,8%	24%
E (GPa) Dinâmico	37,48	39,17	36,27	37,64	3,9%	
Tensão de ruptura (MPa)	43,46	37,76	37,17	39,46	8,8%	-15%
Resistência (MPa)		46,55				
a/agl 0,55_SEM ARC_28 DIAS	055N28D01	055N28D02	055N28D03	MÉDIA	CV	DIFER. REL.
E (GPa) Estático	29,21	22,97	22,94	25,04	14,4%	57%
E (GPa) Dinâmico	39,67	38,61	39,49	39,26	1,4%	
Tensão de ruptura (MPa)	43,53	39,70	40,02	41,08	5,2%	-4%
Resistência (MPa)		42,7				
a/agl 0,65_SEM ARC_28 DIAS	065N28D01	065N28D02	065N28D03	MÉDIA	CV	DIFER. REL.
E (GPa) Estático	18,16	21,03	20,38	19,86	7,6%	75%
E (GPa) Dinâmico	33,03	36,34	35,06	34,81	4,8%	
Tensão de ruptura (MPa)	27,27	31,48	29,45	29,40	7,2%	-7%
Resistência (MPa)		31,5				
a/agl 0,45_SEM ARC_63 DIAS	045N63D01	045N63D02	045N63D03	MÉDIA	CV	DIFER. REL.
E (GPa) Estático	24,02	29,52	24,96	26,17	11,2%	51%
E (GPa) Dinâmico	36,82	42,02	ND	39,42	9,3%	
Tensão de ruptura (MPa)	47,07	48,65	51,28	51,28	4,3%	-2%
Resistência (MPa)		50,15				
a/agl 0,55_SEM ARC_63 DIAS	055N63D01	055N63D02	055N63D03	MÉDIA	CV	DIFER. REL.
E (GPa) Estático	24,69	26,08	24,21	24,99	3,9%	52%
E (GPa) Dinâmico	40,33	35,79	ND	38,06	8,4%	
Tensão de ruptura (MPa)	47,14	45,69	47,64	46,82	2,2%	-4%
Resistência (MPa)		48,55				
a/agl 0,65_SEM ARC_63 DIAS	065N63D01	065N63D02	065N63D03	MÉDIA	CV	DIFER. REL.
E (GPa) Estático	22,11	23,71	23,90	23,24	4,2%	51%
E (GPa) Dinâmico	35,49	34,54	ND	35,01	1,9%	
Tensão de ruptura (MPa)	37,36	36,81	35,05	36,41	3,3%	-5%
Resistência (MPa)		38,4				

Onde: CV = coeficiente de variação; DIFER. REL. = diferença relativa entre a média de MEE e MED; ND =

Não disponível.

A análise de variância do Módulo de Elasticidade obtido pelo Método Estático para os concretos sem ARC em função da resistência à compressão, da idade e da interação entre os dois está apresentada na Tabela 11 a seguir.

Tabela 11 – ANOVA do fator independente em relação à compressão e idade para os concretos sem ARC (ensaio Estático).

<i>Fator</i>	<i>GL</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>Teste F</i>	<i>Significância P</i>	<i>R²</i>	<i>ES</i>
Resist. à comp.	1	85,671	85,671	6,0232	0,0260	0,2735	Sim
Idade	1	0,445	0,445	0,0227	0,8820	0,0014	Não
Resist. à comp. e idade	2	133,531	66,765	5,5725	0,01550	0,4263	Sim

Onde: GL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada; R² = coeficiente de determinação; ES = Efeito significativo.

Através dos resultados da análise apresentados na Tabela 11 é possível visualizar estatisticamente a relação do fator resistência à compressão e da interação deste fator com a idade, para um nível de significância de 5%.

Como a grande maioria das normas estabelece modelos de previsão do valor do módulo exclusivamente em função da resistência à compressão, sem levar em consideração a idade do concreto, os resultados obtidos para a relação módulo estático x tensão de ruptura à compressão são mostrados na Figura 35. Uma linha de tendência segundo uma função do tipo potência (o mesmo tipo empregado pelo modelo de previsão propostos pelas normas – ver Tabela 1) resultou, para os dados disponíveis neste programa experimental, em um coeficiente de determinação R² igual a 0,3788, valor que indica que não é possível fazer uma previsão do módulo a partir da resistência à compressão com precisão. Não se utilizou nenhum critério de exclusão de dados espúrios nesta regressão, uma vez que todos os resultados mostrados no gráfico atendem ao critério de aceitação da NBR 8522, de tensão de ruptura entre 80% e 120% do valor da resistência à compressão obtida no ensaio de compressão simples.

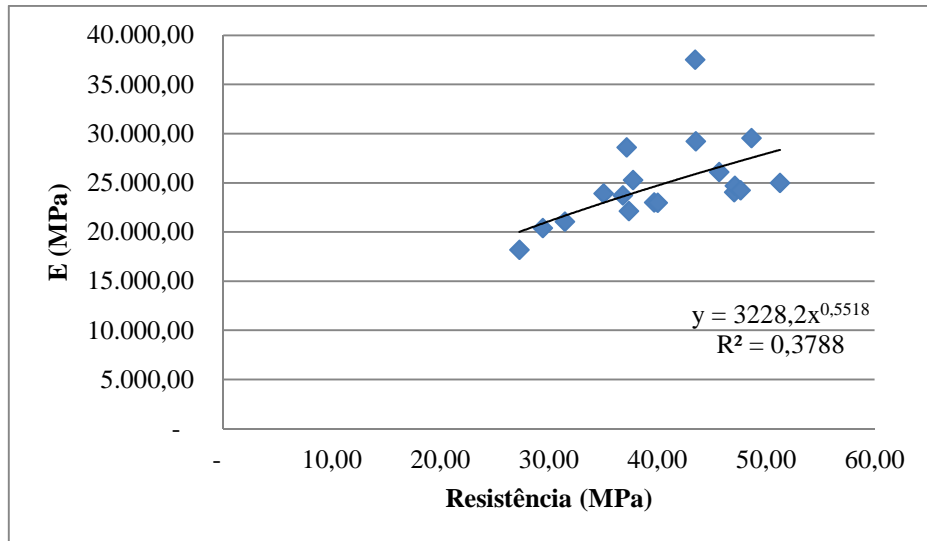


Figura 35 – Módulo de Elasticidade Estático para concretos sem ARC.

Conforme Aguilar, Silva e Correa (2006) utilizando o Método Estático, ou seja, da submissão ao material uma força de compressão para medir sua deformação podem resultar valores que diferem entre si de até 20%, mesmo para materiais como o aço, porque, se o material tiver um módulo alto, a deformação será mínima, o que dificulta a precisão da medida, além disso, a velocidade de aplicação de carga interfere nos valores, uma vez que quanto maior a velocidade de aplicação de carga, maior será o Módulo de Elasticidade. Segundo os mesmos autores, o concreto não é um material tipicamente elástico e, portando não segue a lei de Hooke e o valor de módulo determinado através de ensaio de compressão é apenas uma aplicação grosseira e aproximada do módulo de Young.

A análise de variância do Módulo de Elasticidade obtido pelo Método Dinâmico para os concretos sem ARC em função da resistência à compressão, da idade e da interação entre os dois está apresentada na Tabela 12 a seguir.

Tabela 12 - ANOVA do fator independente em relação à compressão e idade para os concretos sem ARC (ensaio Dinâmico).

<i>Fator</i>	<i>GL</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>Teste F</i>	<i>Significância P</i>	<i>R²</i>	<i>ES</i>
Resist. à comp.	1	41,258	41,258	12,042	0,0041	0,4809	Sim
Idade	1	0,248	0,248	0,0376	0,8492	0,0029	Não
Resist. à comp. e idade	2	54,508	27,254	10,4515	0,0024	0,6353	Sim

Onde: GL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada; R² = coeficiente de determinação; ES = Efeito significativo.

Através dos resultados da análise apresentados na Tabela 12 é possível visualizar estatisticamente a relação do fator resistência à compressão e da interação deste fator com a idade, para um nível de significância de 5%.

Os resultados obtidos para a relação Módulo Dinâmico x tensão de ruptura à compressão são mostrados na Figura 36. Uma linha de tendência segundo uma função do tipo potência (o mesmo tipo empregado pelo modelo de previsão proposto pelo CEB-FIP *Model Code* 1990 – ver Equação 6) resultou, para os dados disponíveis neste programa experimental, em um coeficiente de determinação R² igual a 0,495, ainda baixo para permitir uma estimativa precisa do Módulo de Elasticidade.

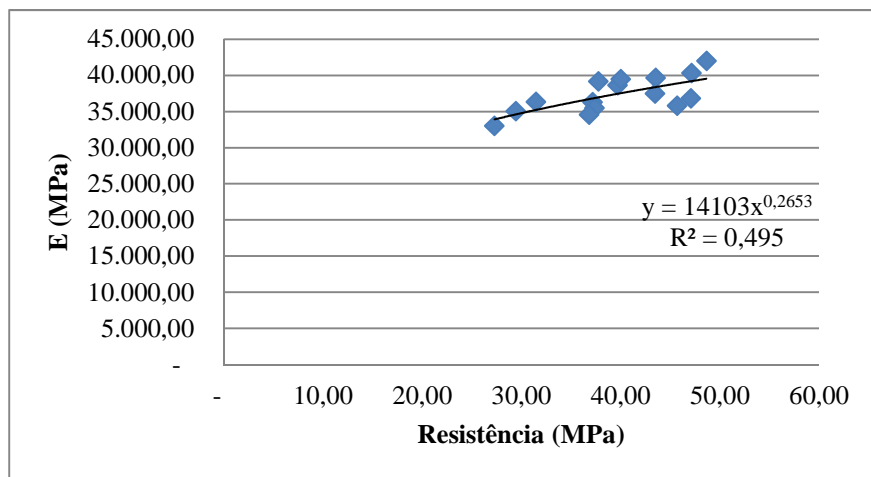


Figura 36 - Módulo de Elasticidade Dinâmico para concretos sem ARC.

A relação entre os valores de Módulo de Elasticidade obtidos através do ensaio Dinâmico e Estático pode ser visualizada na Figura 37. A partir dos dados disponíveis neste programa experimental, embora seja possível identificar uma tendência de comportamento, não é possível estabelecer uma relação confiável entre os valores de módulo obtidos pelos dois métodos.

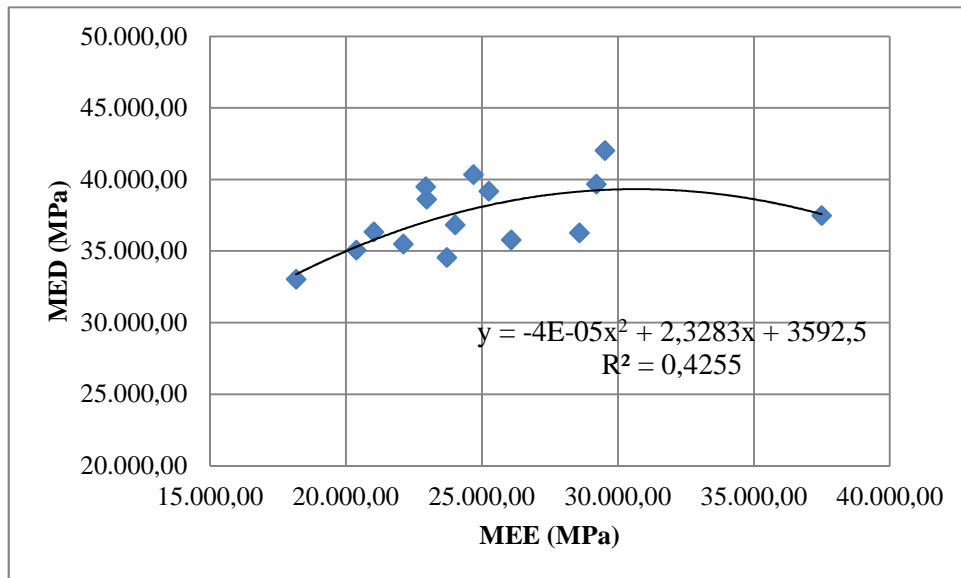


Figura 37 – Comparação entre os valores do módulo Estático e Dinâmico para o concreto sem ARC, nas idades de 28 e 63 dias.

Conforme Aguilar, Silva e Correa (2006), a rigor, o Método Dinâmico não poderia ser aplicado a materiais não homogêneos, como o concreto, no entanto, bons resultados são obtidos desde que seja feito um número adequado de medidas de modo a minimizar a influência da heterogeneidade do material (uma vez que o ensaio é não destrutivo, inúmeras medidas podem ser feitas no mesmo corpo de prova). Os mesmos autores indicam que é de se esperar que os módulos Dinâmicos sejam maiores que os Estáticos, o que também foi observado por esta pesquisa.

Apesar da idade não ser estatisticamente significativa para os resultados de módulo, pela análise dos resultados apresentados na Tabela 10, percebe-se que, aos 63 dias, os resultados para o Módulo Estático apresentam uma menor dispersão que aos 28 dias, e a relação entre as duas estimativas de módulo (Estático e Dinâmico) é praticamente constante. Isto aponta, possivelmente, para a necessidade de haver uma hidratação mais completa do cimento (maiores idades) para uma avaliação mais correta do módulo por ambos os métodos.

4.1.2 Concretos com ARC

Os valores de Módulo de Elasticidade determinados pelos Métodos Estático e Dinâmico, o coeficiente de variação desses resultados, a diferença relativa entre a média desses dois valores, tomando como base o valor do Método Estático; a resistência à compressão obtida no ensaio de compressão simples e a tensão de ruptura de cada corpo de

prova no ensaio de módulo, podem ser observados na Tabela 13. Os valores aos 7 dias foram desconsiderados, pois serão tratados separadamente no item 4.8 devido a apresentarem comportamento distinto das demais idades.

Tabela 13– Resultados dos ensaios para todas as relações a/agl, aos 28 e 63 dias de idade - concretos com ARC.

a/agl 0,45_COM ARC_ 28 DIAS	045R28D01	045R28D02	045R28D03	MÉDIA	CV	DIFER. REL.
E (GPa) Estático	25,63	20,77	24,74	23,71	10,9%	46%
E (GPa) Dinâmico	33,52	33,52	36,62	34,55	5,2%	
Tensão de ruptura (MPa)	48,77	42,65	44,45	45,29	7,0%	-9%
Resistência (MPa)		49,65				
a/agl 0,55_COM ARC_ 28 DIAS	055R28D01B	055R28D02B	055R28D03B	MÉDIA	CV	DIFER. REL.
E (GPa) Estático	20,20	27,62	20,00	22,61	19,2%	56%
E (GPa) Dinâmico	34,37	36,03	35,74	35,38	2,5%	
Tensão de ruptura (MPa)	36,67	34,89	34,68	35,41	3,1%	-18%
Resistência (MPa)		43,15				
a/agl 0,65_COM ARC_ 28 DIAS	065R28D01	065R28D02	065R28D03	MÉDIA	CV	DIFER. REL.
E (GPa) Estático	21,67	23,67	20,83	22,06	6,6%	30%
E (GPa) Dinâmico	28,16	30,02	27,72	28,63	4,3%	
Tensão de ruptura (MPa)	33,66	34,58	34,16	34,13	1,3%	4%
Resistência (MPa)		32,85				
a/agl 0,45_COM ARC_ 63 DIAS	045R63D01	045R63D02	045R63D03	MÉDIA	CV	DIFER. REL.
E (GPa) Estático	22,41	19,50	21,11	21,01	6,9%	79%
E (GPa) Dinâmico	36,64	36,64	39,76	37,68	4,8%	
Tensão de ruptura (MPa)	46,24	54,57	52,27	51,03	8,4%	-8%
Resistência (MPa)		55,4				
a/agl 0,55_COM ARC_ 63DIAS	055R63D01	055R63D02	055R63D03	MÉDIA	CV	DIFER. REL.
E (GPa) Estático	24,71	28,36	22,02	25,03	12,7%	42%
E (GPa) Dinâmico	37,33	31,00	37,98	35,43	10,9%	
Tensão de ruptura (MPa)	45,96	45,10	45,53	45,53	0,9%	6%
Resistência (MPa)		43,1				
a/agl 0,65_COM ARC_ 63 DIAS	065R63D01	065R63D02	065R63D03	MÉDIA	CV	DIFER. REL.
E (GPa) Estático	26,39	22,47	23,80	24,22	8,2%	37%
E (GPa) Dinâmico	34,55	30,28	34,33	33,06	7,3%	
Tensão de ruptura (MPa)	39,82	33,33	38,76	37,30	9,3%	-2%
Resistência (MPa)		37,9				

Onde: CV = coeficiente de variação; DIFER. REL. = diferença relativa entre a média de MEE e MED.

A análise de variância do Módulo de Elasticidade obtido pelo Método Estático para os concretos com ARC em função da resistência à compressão, da idade e da interação entre os dois está apresentada na Tabela 14 a seguir.

Tabela 14 – ANOVA do fator independente em relação à compressão e idade para os concretos com ARC.

<i>Fator</i>	<i>GL</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>Teste F</i>	<i>Significância P</i>	<i>R²</i>	<i>ES</i>
Resist. à comp.	1	0,009	0,009	0,00114	0,9734	7,1472E-05	Não
Idade	1	1,757	1,757	0,2358	0,6339	0,0145	Não
Resist. à comp. e idade	2	1,950	0,975	0,1229	0,8853	0,0161	Não

Onde: GL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada; R² = coeficiente de determinação; ES = Efeito significativo.

Através dos resultados da análise apresentados na Tabela 14 é possível visualizar estatisticamente que nenhum fator possui relação para um nível de significância de 5%.

Embora não tenha sido possível identificar influência da resistência à compressão sobre o módulo na ANOVA, como a grande maioria das normas estabelece modelos de previsão do valor do módulo exclusivamente em função da resistência à compressão, sem levar em consideração a idade do concreto, os resultados obtidos para a relação módulo Estático x tensão de ruptura à compressão são mostrados na Figura 38. Uma linha de tendência segundo uma função do tipo potência (o mesmo tipo empregado pelo modelo de previsão propostos pelas normas – ver Tabela 1) resultou, para os dados disponíveis neste programa experimental, em um coeficiente de determinação R² igual a 0,0003, ou seja, para concretos com agregados reciclados de concreto não foi possível relacionar a resistência à compressão com o Módulo de Elasticidade Estático, como esperado em função dos dados obtidos na análise de variância. Não se utilizou nenhum critério de exclusão de dados espúrios nesta regressão, uma vez que todos os resultados mostrados no gráfico atendem ao critério de aceitação da NBR 8522 de tensão de ruptura entre 80% e 120% do valor da resistência à compressão obtida no ensaio de compressão simples.

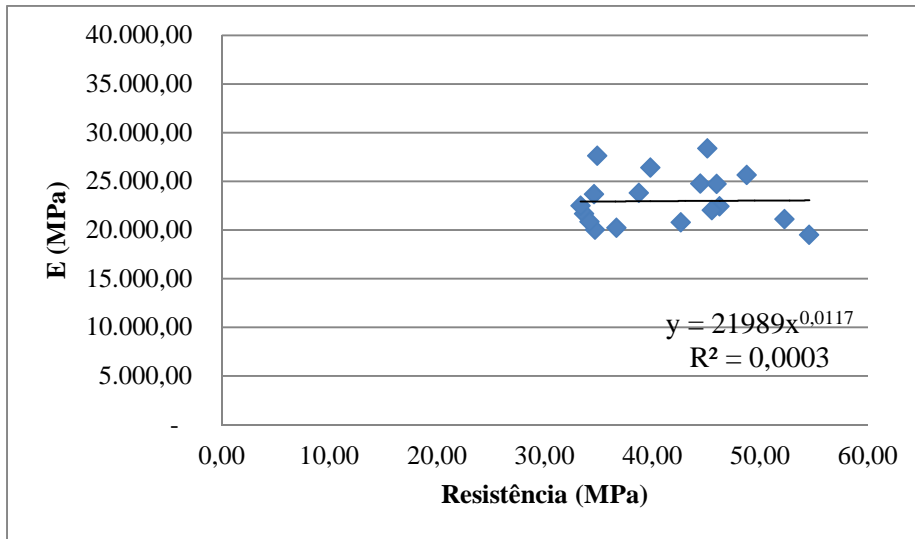


Figura 38 - Módulo de Elasticidade Estático para concretos com ARC.

Os valores de MEE encontrados para os concretos com ARC são, em geral, menores em relação aos concretos de referência. Esta característica já foi observada por autores como Cabral et al. (2008), Katz (2003), Fonseca, Brito e Evangelista (2011), Fathifazl et al., (2011).

A análise de variância do Módulo de Elasticidade obtido pelo Método Dinâmico para os concretos com ARC em função da resistência à compressão, da idade e da interação entre os dois está apresentada na Tabela 15 a seguir.

Tabela 15 - ANOVA do fator independente em relação à compressão e idade para os concretos com ARC (ensaio Dinâmico).

<i>Fator</i>	<i>GL</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>Teste F</i>	<i>Significância P</i>	<i>R²</i>	<i>ES</i>
Resist. à comp.	1	83,115	83,115	11,2777	0,0040	0,4134	Sim
Idade	1	28,951	28,951	2,6919	0,1204	0,1440	Não
Resist. à comp. e idade	2	84,355	42,177	5,4223	0,0169	0,4196	Sim

Onde: GL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada; R² = coeficiente de determinação; ES = Efeito significativo.

Através dos resultados da análise apresentados na Tabela 15 é possível visualizar estatisticamente a relação do fator resistência à compressão e da interação deste fator com a idade, para um nível de significância de 5%.

Os resultados obtidos para a relação módulo Dinâmico x tensão de ruptura à compressão são mostrados na Figura 39. Uma linha de tendência segundo uma função do tipo

potência (o mesmo tipo empregado pelo modelo de previsão proposto pelo CEB-FIP – ver Equação 6) resultou, para os dados disponíveis neste programa experimental, em um coeficiente de determinação R^2 igual a 0,4202, o que não permite uma estimativa adequada do Módulo de Elasticidade.

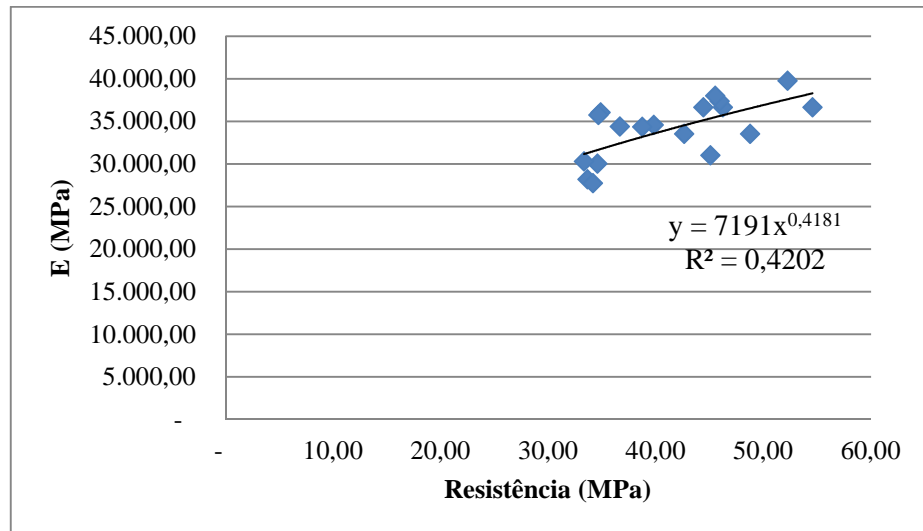


Figura 39 – Módulo de Elasticidade Dinâmico para concretos com ARC.

A relação entre os valores de Módulo de Elasticidade obtidos através do ensaio Dinâmico e Estático pode ser visualizada na Figura 40. A partir dos dados disponíveis neste programa experimental, não é possível estabelecer uma relação confiável entre os valores de módulo obtidos pelos dois métodos.

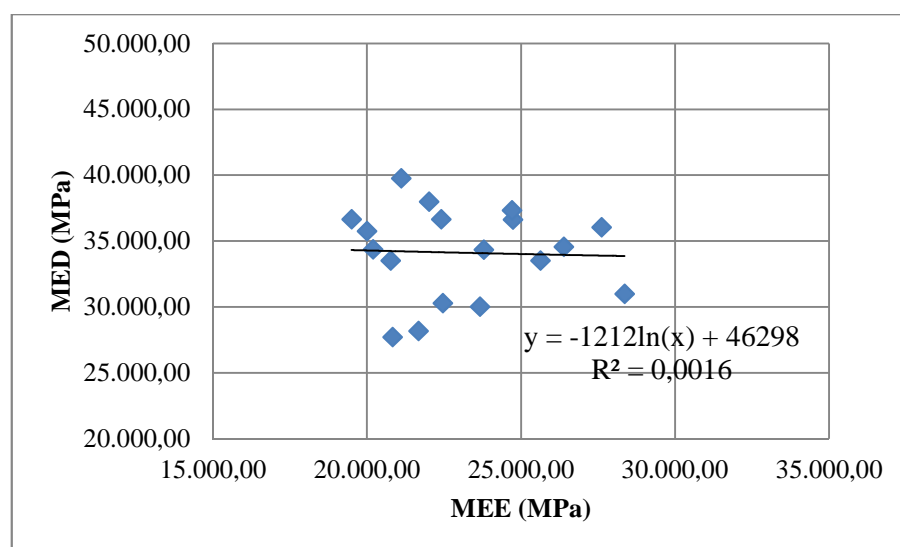


Figura 40 - Comparação entre os valores do módulo Estático e Dinâmico para o concreto com ARC, nas idades de 28 e 63 dias.

Em suma, existe uma diferença expressiva nos resultados determinados pelo Método Estático e Dinâmico e não é possível estabelecer uma relação confiável entre eles. Pode-se observar que, em concretos com agregados reciclados essa situação piora, devido às características do material.

Além disso, percebe-se que os resultados obtidos pelo Método Estático apresentam, em geral, maior dispersão que os obtidos pelo Método Dinâmico. As maiores dispersões parecem ocorrer quando a tensão de ruptura média obtida no ensaio de módulo apresenta-se mais afastada da resistência obtida no ensaio de compressão simples, considerando que todos os resultados atendem o critério de 0,8 a 1,2 f_c da NBR 8522 (ABNT, 2008). O melhor comportamento de ambos os métodos de estimativa para maiores idades observado nos concretos com somente AGN não se repetiu para os concretos com ARC. A variabilidade dos resultados obtidos pelo Método Dinâmico foi maior aos 63 dias que aos 28 dias, assim como a variabilidade da relação entre módulos.

4.1.3 Concretos de mesmas Classes.

Visando identificar se o teor de substituição de 50% de AGN por ARC influi no Módulo de Elasticidade de concretos com uma mesma classe de resistência, os resultados obtidos no programa experimental foram agrupados em 3 classes de resistência à compressão: C40 (de 37,6 a 42,5 MPa), C45 (de 42,6 a 47,5 MPa) e C50 (de 47,6 a 52,5 MPa). Somente foram consideradas classes nas quais foram obtidos resultados tanto para concretos com ARC como sem ARC. Assim, somente parte dos dados obtidos foi utilizada. Os dados considerados e mostrados na Tabela 16 são advindos das Tabelas 10 e 13. Os valores com sombreamento podem ser considerados de alta variabilidade.

Tabela 16 – Dados considerados na análise de concretos de mesma classe.

% S.AGN	MEE (GPa)			% S.AGN	MED (GPa)		
	C40	C45	C50		C40	C45	C50
0%	22,11	37,49	24,02	0%	35,49	39,67	36,82
0%	23,71	25,26	29,52	0%	34,54	38,61	42,02
0%	23,9	28,58	24,96	0%	34,55	39,49	40,33
0%		29,21	24,69	0%		37,48	35,79
0%		22,97	26,08	0%		39,17	
0%		22,94	24,21	0%		36,27	
50%	26,39	20,2	25,63	50%	30,28	34,37	33,52
50%	22,47	27,62	20,77	50%	34,33	36,03	33,52
50%	23,8	20	24,74	50%		35,74	36,62
50%		24,71		50%		37,33	
50%		28,36		50%		31,00	
50%		22,02		50%		37,98	

Onde: % S.AGN – Porcentagem de Substituição de AGN por ARC.

Para cada classe de resistência, foi feita uma Análise de Variância (ANOVA) com um único fator controlável, o teor de substituição de ARC por AGN. Em função do pequeno número de amostras por classes de resistência e a relativa variabilidade dos resultados, na análise de variância dos resultados de módulo por classe, será utilizado como critério um nível de significância de 10%, ao invés dos usuais 5%, para identificação de influências sobre a resposta. Tais análises estão mostradas nas Tabelas 17, 18 e 19.

Tabela 17 – ANOVA do fator independente (MEE e MED – Classe C40) em relação à porcentagem de substituição de AGN por ARC.

Fator	GL	SQ	MQ	Teste F	Significância P
MEE classe C40	1	1,4406	1,4406	0,5831	0,4876
MED classe C40	1	4,6177	4,6177	1,1532	0,3615

Onde: GL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada.

Para a Classe C40 não foi possível identificar estatisticamente diferenças para os módulos Estático e Dinâmico entre concretos com e sem ARC. Isso pode ser devido ao número de resultados que nesta classe é pequeno demais para permitir uma avaliação através da ANOVA de forma confiável. O resultado da Análise de Variância deve ser tomado apenas como indicativo.

Tabela 18 - ANOVA do fator independente (MEE com e sem exclusão de valores dispersos e MED – Classe C45) em relação à porcentagem de substituição de AGN por ARC.

Fator	GL	SQ	MQ	Teste F	Significância P
MEE Classe C45	1	46,1776	46,1776	2,1314	0,1750
MEE Classe C45 - E.R.D.	1	20,5441	20,5441	3,4692	0,1118
MED Classe C45	1	27,7248	27,7248	6,9102	0,0252

Onde: GL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada; E.R.D = exclusão de resultados dispersos.

Classe C45 – não foi possível identificar estatisticamente diferenças para os Módulos Estáticos entre concretos com e sem ARC, em função da grande variabilidade dos resultados obtidos. O Módulo Dinâmico de concretos com ARC é inferior ao dos concretos feitos somente com AGN, a uma significância de 2,5%.

Tabela 19 - ANOVA do fator independente (MEE e MED – Classe C50) em relação à porcentagem de substituição de AGN por ARC.

Fator	GL	SQ	MQ	Teste F	Significância P
MEE classe C50	1	6,9689	6,9689	1,4078	0,2741
MED classe C50	1	30,0483	30,0483	4,6830	0,0828

Onde: GL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada.

Para a Classe C50 não foi possível identificar estatisticamente diferenças para os Módulos Estáticos entre concretos com e sem ARC, em função da grande variabilidade dos resultados obtidos. O Módulo Dinâmico de concretos com ARC é inferior ao dos concretos feitos somente com AGN, a um nível de significância de 8,3%. O número de resultados de módulo Dinâmico nesta classe é pequeno demais para permitir uma avaliação através da ANOVA de forma confiável. O resultado da Análise de Variância deve ser tomado como indicativo.

Foi feita também uma Análise de Variância sobre os resultados de todas as classes, conforme as Tabelas 20 e 21.

Tabela 20 – ANOVA do fator independente (MEE – Todas as Classes de concreto) em relação à porcentagem de substituição de AGN por ARC.

Fontes Variação	GL	SQ	MQ	Teste F	Probabilidade
Teor de ARC (A)	1	28,96	28,96	2,33	14,2%
Classe Resist (B)	2	16,93	8,46	0,68	51,7%
Interação AB	2	25,05	12,52	1,01	38,2%
Erro	21	261,19	12,44		

Onde: GL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada.

Tabela 21 - ANOVA do fator independente (MED – Todas as Classes de concreto) em relação à porcentagem de substituição de AGN por ARC.

Fontes Variação	GL	SQ	MQ	Teste F	Probabilidade
Teor de ARC (A)	1	57,23	57,23	12,72	0,2%
Classe Resist (B)	2	37,96	18,98	4,22	3,1%
Interação AB	2	2,82	1,41	0,31	73,5%
Erro	18	81,00	4,50		

Onde: GL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada.

Fazendo-se uma análise de variância com todas as classes de resistência simultaneamente, não foi possível identificar influência do teor de substituição de AGN por ARC, da classe de resistência ou da interação desses dois fatores sobre o valor estimado do Módulo pelo Método Estático. Aplicando a mesma análise sobre o Método Dinâmico, foi possível identificar que tanto o teor de substituição de AGN por ARC e a classe de resistência influem sobre o módulo. Concretos com ARC apresentam módulo Dinâmico menor que concretos sem ARC, e as classes C45 e C50 apresentam módulos Dinâmicos superiores ao da classe C40, e iguais entre si.

Uma vez que tanto o Módulo Estático como o Módulo Dinâmico são efetivamente estimativas obtidas por métodos diferentes de uma mesma propriedade, é possível dizer que há uma indicação de que o Módulo de Elasticidade para concretos com ARC sejam menores que os concretos obtidos a partir somente de agregados naturais, e em concretos de classes de resistência mais baixos essa diferença desaparece. Estas conclusões devem ser entendidas como uma tendência.

4.2 DISPERSÃO DE VALORES DE MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO

Para a norma NBR 8522, o critério de aceitação de valores de Módulo de Elasticidade é baseado apenas no valor da resistência à compressão, ou seja, $\pm 20\% f_c$, sem nenhuma inferência sobre a dispersão dos valores do módulo medido.

Porém, em alguns casos, mesmo atendendo à exigência da norma, existe uma grande dispersão de valores de Módulo de Elasticidade, o que pode levar a dificuldades na determinação de relações de regressão. Deste modo, estabeleceu-se que além de atender $\pm 20\% f_c$, os valores de módulo devem estar em uma faixa $\pm 20\%$ entre si.

Os valores de MEE das Tabelas 10 e 13 estão representados nas Tabelas 22 e 23 com os valores excluídos tachados, assim como, a nova média, considerando os dois valores que permaneceram.

Tabela 22 – Valores de MEE dispersos e excluídos para concretos sem ARC.

a/agl 0,45_SEM ARC_28 DIAS	45N28D01B	45N28D02B	45N28D03B	MÉDIA	CV original	Novo CV
E (GPa) Estático	37,49	25,26	28,59	26,92	20,8%	8,7%

a/agl 0,55_SEM ARC_28 DIAS	55N28D01	55N28D02	55N28D03	MÉDIA	CV original	Novo CV
E (GPa) Estático	29,21	22,97	22,94	22,96	14,4%	0,1%

Onde: CV = coeficiente de variação.

Tabela 23 – Valor de MEE disperso e excluído para concretos com ARC.

a/agl 0,55_COM ARC_28 DIAS	55R28D01B	55R28D02B	55R28D03B	MÉDIA	CV original	Novo CV
E (GPa) Estático	20,20	27,62	20,00	20,10	19,2%	0,7%

a/agl 0,55_COM ARC_63DIAS	55R63D01	55R63D02	55R63D03	MÉDIA	CV original	Novo CV
E (GPa) Estático	24,71	28,36	22,02	23,36	12,7%	8,2%

Onde: CV = coeficiente de variação.

A análise de variância do Módulo de Elasticidade obtido pelo Método Estático para os concretos com e sem ARC em função da resistência à compressão, da idade e da interação entre os dois está apresentada nas Tabelas 24 e 25.

Tabela 24 – ANOVA do fator independente em relação à compressão e idade para os concretos sem ARC (ensaio Estático) com a exclusão de valores de muita variabilidade.

Fator	GL	SQ	MQ	Teste F	F de significação	R ²	E.S.
Resist. à comp.	1	53,27	53,27	11,0850	0,0050	0,4419	Sim
Idade	1	16,35	16,35	2,1973	0,1604	0,1357	Não
Resist. à comp. e idade	2	54,34	27,17	5,3353	0,0203	0,4508	Sim

Onde: GL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada; R² = coeficiente de determinação; ES = Efeito significativo.

Tabela 25 – ANOVA do fator independente em relação à compressão e idade para os concretos com ARC (ensaio Estático) com a exclusão de valores de muita variabilidade.

Fator	GL	SQ	MQ	Teste F	F de significação	R ²	E.S.
Resist. à comp.	1	0,13	0,128	0,0268	0,8722	0,0019	Não
Idade	1	1,49	1,486	0,3173	0,5821	0,0222	Não
Resist. à comp. e idade	2	1,52	0,762	0,1512	0,8612	0,0227	Não

Onde: GL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada; R² = coeficiente de determinação; ES = Efeito significativo.

Através dos resultados da análise é possível visualizar estatisticamente a relação do fator resistência à compressão e da interação deste fator com a idade, para um nível de significância de 5% para os concretos com agregados naturais. Nos concretos com agregado reciclado nenhum fator se apresentou estatisticamente significante.

Os resultados obtidos para a relação módulo Estático x tensão de ruptura à compressão, mostrados nas Figuras 41 e 42 com uma linha de tendência segundo uma função do tipo potência, resultou em um coeficiente de determinação R² igual a 0,5205 (diferentemente do valor 0,3788 encontrado anteriormente) para concretos sem ARC, e R² igual a 0,0047 (embora diferente, extremamente baixo, como o valor 0,0003 encontrado anteriormente) para concretos com ARC.

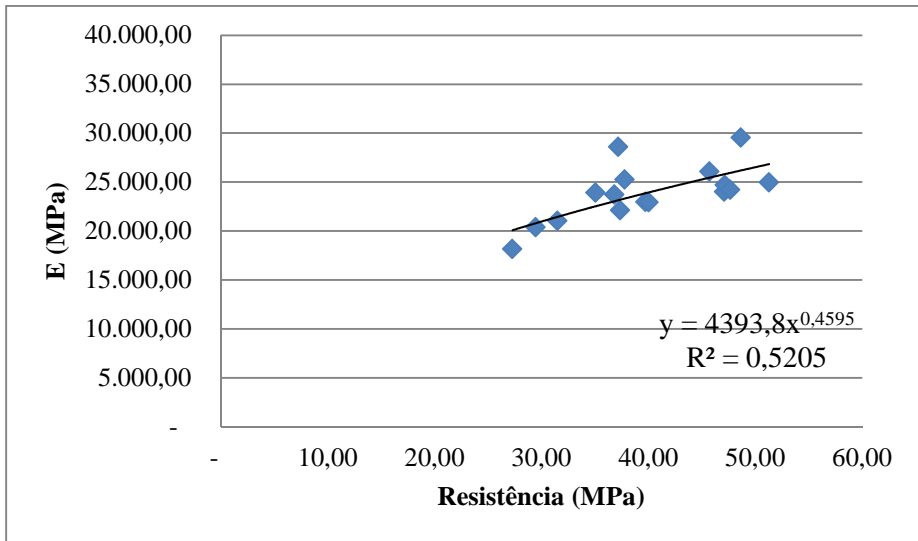


Figura 41 - Módulo de Elasticidade Estático para concretos sem ARC – valores dispersos excluídos.

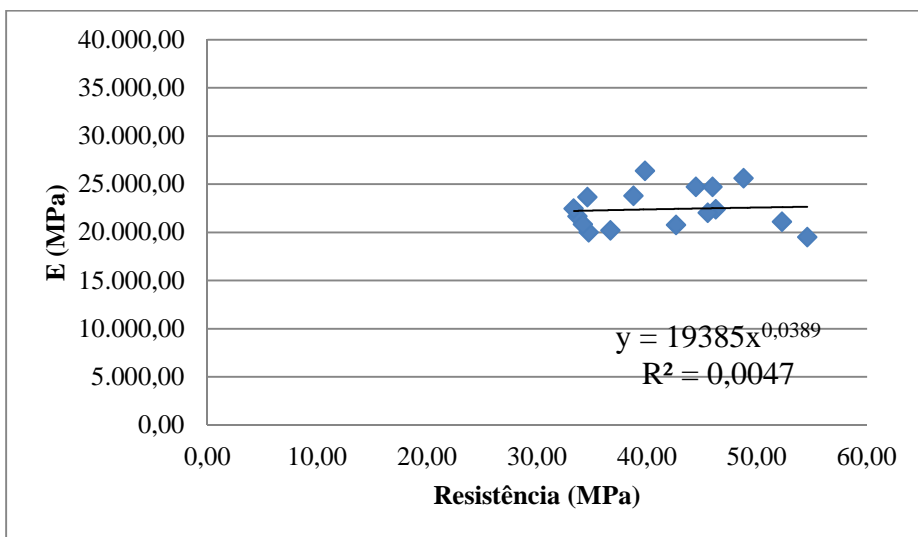


Figura 42 - Módulo de Elasticidade Estático para concretos com ARC – valores dispersos excluídos.

A exclusão dos resultados muitos dispersos melhorou a capacidade de previsão do valor do módulo a partir da resistência à compressão em concretos com AGN, porém o procedimento não foi suficiente para obter uma função de regressão com um mínimo de capacidade de previsão para os concretos com ARC.

4.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO SOB TENSÃO

Foi mostrado nas Tabelas 10 e 13 que a diferença percentual entre o MEE e MED é muito alta e não segue uma regra definida. Porém, o módulo Dinâmico pode ser utilizado

para determinar até qual tensão o material tem comportamento elástico (pela diminuição do módulo). Em concordância com o indicado na NBR 6118 (ABNT, 2007) a diminuição do valor medido do Módulo de Elasticidade do material ocorre em torno de $0,5 f_c$ e de acordo com o patamar indicado por Mehta e Monteiro (2008) para o limite do comportamento elástico linear (entre 40 e 50% da tensão de ruptura), conforme pode ser visualizado na Figura 43:

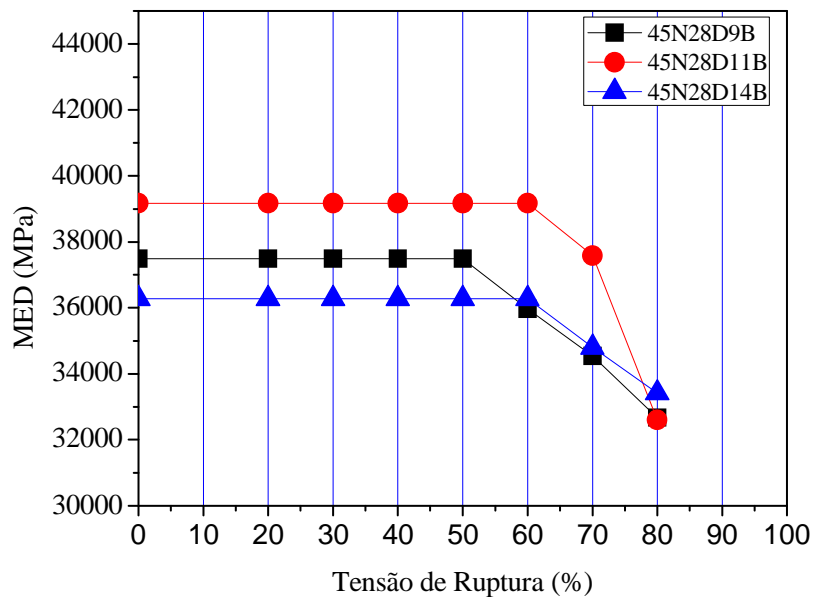


Figura 43 – MED para concreto sem ARC, a/agl 0,45, rompido aos 28 dias.

No gráfico é possível verificar que o valor de Módulo de Elasticidade se mantém constante até cerca de 50% da carga de ruptura, decaindo a partir de 60%.

Apresentam-se nas tabelas 26 e 27 os valores médios dos MED para os concretos com somente agregados naturais e com 50% de agregado reciclado de concreto para todos os níveis de tensão medidos. Estão sinalizados com sombreamento os valores em que a velocidade de onda se manteve constante, logo após, o valor cai e, conseqüentemente, o MED também.

Tabela 26 – Valores médios de MED para concretos sem ARC.

Valores de MED para concretos sem ARC (GPa)						
Tensão de Ruptura	28 dias			63 dias		
	a/agl	a/agl	a/agl	a/agl	a/agl	a/agl 0,65
	0,45	0,55	0,65	0,45	0,55	
0%	37,64	39,26	34,81	39,42	38,06	35,01
20%	37,64	39,26	34,81	39,42	38,06	35,01
30%	37,64	39,26	34,81	39,42	38,06	35,01
40%	37,64	39,26	34,81	39,42	38,06	35,01
50%	37,64	38,24	34,19	39,42	37,35	35,01
60%	37,14	37,73	33,95	38,55	37,35	35,01
70%	35,64	37,26	31,90	37,82	36,53	33,65
80%	32,90	34,96	31,01	36,32	35,09	32,02

Onde: Sombreamento demonstra os valores em que a velocidade de onda se manteve constante.

Tabela 27 – Valores médios de MED para concretos com ARC.

Valores de MED para concretos com ARC (GPa)						
Tensão de Ruptura	28 dias			63 dias		
	a/agl	a/agl	a/agl	a/agl	a/agl	a/agl 0,65
	0,45	0,55	0,65	0,45	0,55	
0%	35,02	35,38	28,63	38,20	37,65	33,23
20%	35,02	35,38	28,63	38,20	37,65	33,23
30%	35,02	35,38	28,63	38,20	37,65	33,06
40%	35,02	35,38	28,63	38,20	37,65	32,97
50%	35,02	34,90	28,63	35,86	37,65	32,79
60%	34,76	34,46	28,26	35,86	36,45	32,62
70%	33,25	33,12	27,15	35,18	36,16	32,46
80%	32,37	31,20	25,61	35,13	35,44	31,57

Onde: Sombreamento demonstra os valores em que a velocidade de onda se manteve constante.

É possível verificar que, para as relações água/aglomerante mais baixas, os concretos com e sem ARC apresentaram um comportamento semelhante, com velocidade de propagação de onda constante até 0,4 a 0,5 f_c , indicando um comportamento elástico linear até esse patamar de tensões. Para concretos com maior relação água/aglomerante e, conseqüentemente, menor resistência mecânica e maior porosidade, a dispersão de resultados para todos os agregados foi muito grande (limite de velocidade constante desde 0,2 f_c a 0,6 f_c), não sendo possível caracterizar uma tendência de comportamento.

Além disso, o limite de 0,3 f_c para tensão superior a ser utilizada no Método Estático para a determinação do módulo em concretos com agregados naturais parece ser também adequado aos concretos com ARC (dos três exemplares com este agregado e relação a/agl 0,65, apenas um apresentou queda da velocidade de propagação de onda a partir de 0,2 f_c , com os demais mantendo a velocidade constante até 0,4 e 0,6 f_c).

A diminuição na velocidade de onda (e do módulo) ocorre devido ao aumento da fissuração interna do concreto decorrente do carregamento aplicado e está de acordo com o que prescreve a norma NBR 8522 (comportamento elástico linear até $0,3 f_c$). Aguilari, Silva e Correa (2006) descrevem que a partir de 30% da tensão de ruptura, as fissuras da zona de transição começam a se propagar, mas a fissuração da matriz seria desprezível e é a partir de 50 a 60% da tensão de ruptura que se inicia a fissuração da matriz, tendo início a ruptura do material.

4.4 COMPORTAMENTO ELÁSTICO E OBTENÇÃO DO MÓDULO POR REGRESSÃO

Conforme já descrito em 3.3.9, os patamares observados nas curvas resultantes dos ensaios de Módulo de Elasticidade Estático são devidos ao procedimento experimental determinado pela NBR 8522, que preconiza realizar as leituras de tensão e deformação em até 30s somente após a tensão aplicada ter sido mantida constante por 60s. Desta forma, o efeito de microfissuração ou de deformações diferidas (fluência ou comportamento viscoelástico) fica evidente. Além disso, não foi possível estabilizar a tensão aplicada pela prensa a níveis tão baixos como 0,5 MPa para todos os exemplares, uma vez que a prensa apresenta um patamar de linearidade inferior de 20 kN, o que equivale a uma tensão de 2,55 MPa para corpos de prova de 10x20cm.

Buscou-se nesta seção fazer uma simulação de valores tensão x deformação, caso o ensaio fosse realizado de maneira direta (sem patamares e/ou paradas para leitura de deformações), onde o valor de módulo é obtido através da inclinação de reta pela regressão por mínimos quadrados.

O tratamento de dados consistiu na retirada de todos os valores de tensão de compressão oscilatórios, deixando apenas os valores crescentes, assim como, fez-se a retirada dos patamares, subtraindo as deformações obtidas em cada patamar. Os dados constam a partir da tensão de 3,6 MPa até $0,3 f_c$. Dois exemplos estão demonstrados nas Figuras 44 e 45.

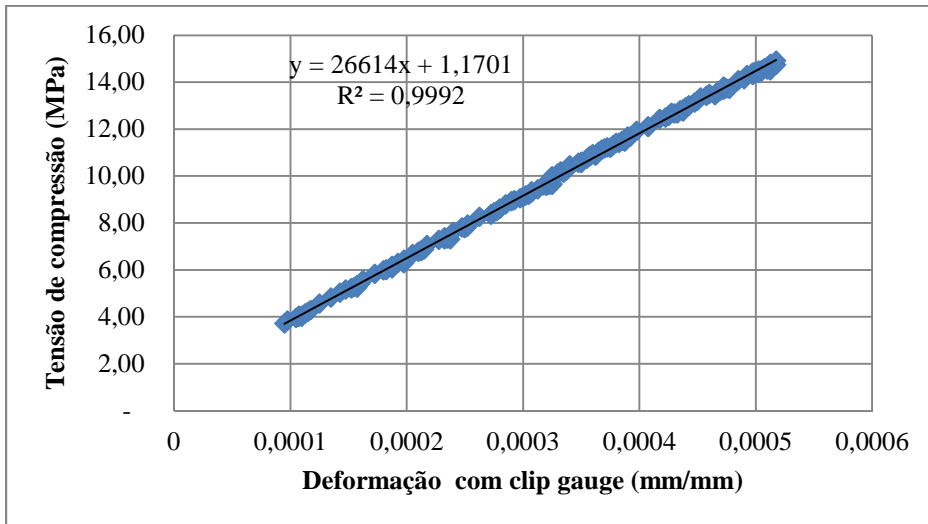


Figura 44 – Gráfico de tensão x deformação com o MEE obtido através de regressão para exemplar de concreto com ARC, a/agl 0,45, rompido aos 28 dias.

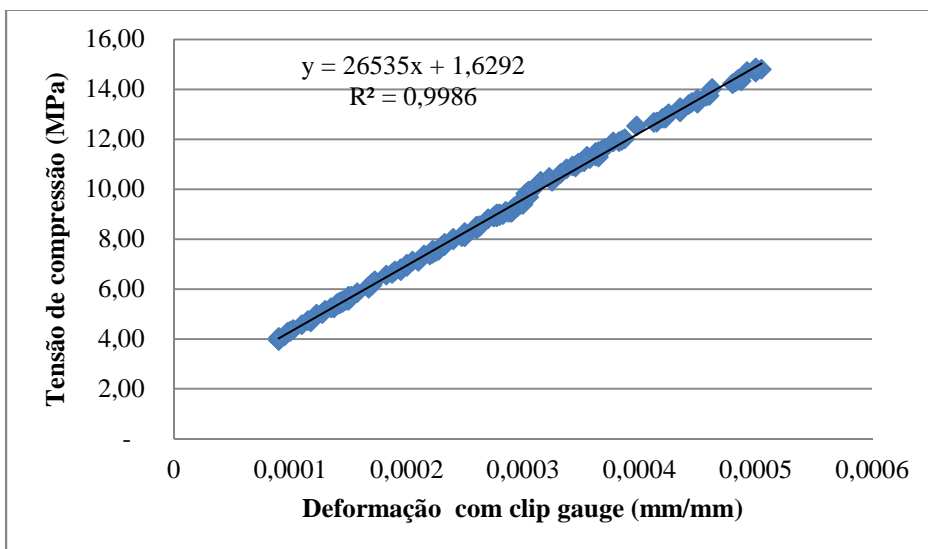


Figura 45 – Gráfico de tensão x deformação com o MEE obtido através de regressão para exemplar de concreto sem ARC, a/agl 0,55, rompido aos 63 dias.

A inclinação da reta informa que o valor de Módulo de Elasticidade para o primeiro exemplo é igual a 26,61 GPa, e para o segundo exemplo, 26,54 GPa.

As Tabelas 28 e 29 demonstram as diferenças entre os valores obtidos através de regressão e através do método da NBR 8522, assim como, os coeficientes de variação e as diferenças relativas.

Tabela 28 - Comparação entre MEE obtido através da norma NBR 8522 e através de regressão (concretos sem ARC).

a/agl 0,45_SEM ARC_28 DIAS	45N28D1B	45N28D2B	45N28D3B	MÉDIA	CV	DIFER. REL.
MEE (GPa)	37,49	25,26	28,58	26,92	23,5%	3,54%
MEE (GPa) - REGRESSÃO	39,09	26,53	29,23	27,88	23,7%	
Diferença relativa	4,3%	5,0%	2,2%			
a/agl 0,55_SEM ARC_28 DIAS	55N28D01	55N28D02	55N28D03	MÉDIA	CV	DIFER. REL.
MEE (GPa)	29,21	22,97	22,94	22,96	15,7%	6,83%
MEE (GPa) - REGRESSÃO	27,53	24,68	24,36	24,52	7,1%	
Diferença relativa	-5,7%	7,5%	6,2%			
a/agl 0,65_SEM ARC_28 DIAS	65N28D01	65N28D02	65N28D03	MÉDIA	CV	DIFER. REL.
MEE (GPa)	18,16	21,03	20,38	19,86	7,6%	5,88%
MEE (GPa) - REGRESSÃO	19,17	22,14	21,77	21,03	7,7%	
Diferença relativa	5,6%	5,3%	6,8%			
a/agl 0,45_SEM ARC_63 DIAS	45N63D01	45N63D02	45N63D03	MÉDIA	CV	DIFER. REL.
MEE (GPa)	24,02	29,52	24,96	26,17	11,2%	3,67%
MEE (GPa) - REGRESSÃO	26,06	30,25	25,08	27,13	10,1%	
Diferença relativa	8,5%	2,5%	0,5%			
a/agl 0,55_SEM ARC_63 DIAS	55N63D01	55N63D02	55N63D03	MÉDIA	CV	DIFER. REL.
MEE (GPa)	24,69	26,08	24,21	24,99	3,9%	5,43%
MEE (GPa) - REGRESSÃO	25,04	27,47	26,54	26,35	4,6%	
Diferença relativa	1,4%	5,3%	9,6%			
a/agl 0,65_SEM ARC_63 DIAS	65N63D01	65N63D02	65N63D03	MÉDIA	CV	DIFER. REL.
MEE (GPa)	22,11	23,71	23,90	23,24	4,2%	7,94%
MEE (GPa) - REGRESSÃO	23,217	25,15	24,85	25,08	0,8%	
Diferença relativa	5,0%	6,1%	4,0%			

Onde: CV = Coeficiente de variação. DIFER. REL. = diferença relativa entre a média de MEE e MEE por regressão.

Tabela 29 – Comparação entre MEE obtido através da norma NBR 8522 e através de regressão (concretos com ARC).

a/agl 0,45_COM ARC_28 DIAS	45R28D01	45R28D02	45R28D03	MÉDIA	CV	DIFER. REL.
MEE (GPa)	25,63	20,77	24,74	23,71	10,9%	6,95%
MEE (GPa) - REGRESSÃO	26,22	23,24	26,61	25,36	7,3%	
Diferença relativa	2,3%	11,9%	7,6%			
a/agl 0,55_COM ARC_28 DIAS	55R28D01 B	55R28D02 B	55R28D03 B	MÉDIA	CV	DIFER. REL.
MEE (GPa)	20,20	27,62	20,00	20,10	21,6%	-0,16%
MEE (GPa) - REGRESSÃO	20,16	25,09	19,98	20,07	14,4%	
Diferença relativa	-0,2%	-9,2%	-0,1%			
a/agl 0,65_COM ARC_28 DIAS	65R28D01	65R28D02	65R28D03	MÉDIA	CV	DIFER. REL.
MEE (GPa)	21,67	23,67	20,83	22,06	6,6%	4,96%
MEE (GPa) - REGRESSÃO	23,08	24,76	21,63	23,15	6,8%	
Diferença relativa	6,5%	4,6%	3,8%			
a/agl 0,45_COM ARC_63 DIAS	45R63D01	45R63D02	45R63D03	MÉDIA	CV	DIFER. REL.
MEE (GPa)	22,41	19,50	21,11	21,01	6,9%	10,63%
MEE (GPa) - REGRESSÃO	24,31	20,03	22,79	23,24	14,9%	
Diferença relativa	8,5%	2,7%	7,9%			
a/agl 0,55_COM ARC_63 DIAS	55R63D01	55R63D02	55R63D03	MÉDIA	CV	DIFER. REL.
MEE (GPa)	24,71	28,36	22,02	25,03	12,7%	1,79%
MEE (GPa) - REGRESSÃO	24,27	28,271	2,56	25,48	9,5%	
Diferença relativa	-1,8%	-0,3%	2,5%			
a/agl 0,65_COM ARC_63 DIAS	65R63D01	65R63D02	65R63D03	MÉDIA	CV	DIFER. REL.
MEE (GPa)	26,39	22,47	23,80	24,22	8,2%	2,93%
MEE (GPa) - REGRESSÃO	26,71	23,59	24,48	24,93	6,5%	
Diferença relativa	1,2%	5,0%	2,9%			

Onde: CV = Coeficiente de variação. DIFER. REL. = diferença relativa entre a média de MEE e MEE por regressão.

As diferenças relativas entre os valores médios de MEE por regressão não ultrapassaram 10,63%, permanecendo principalmente entre 0,1% e 6%. Além disso, os resultados obtidos por regressão apresentam, em geral, dispersão menor. Os resultados apontam para a possibilidade de fazer o ensaio de maneira direta, controlando a velocidade da prensa e sem realizar as paradas nos patamares de carga.

Conceitualmente, o módulo deixa de ser definido por apenas dois pares tensão x deformação e passa a ser definido pela totalidade de pares obtidos na faixa de tensões do ensaio, minimizando o efeito de variabilidade de medida em relação aos pares escolhidos e dando mais confiabilidade ao resultado.

A análise de variância do Módulo de Elasticidade Estático obtido através de regressão por mínimos quadrados para concretos com e sem ARC em função da resistência à compressão, da idade e da interação entre os dois estão apresentadas nas Tabelas 30 e 31 (os valores de grande variabilidade dos corpos de prova indicados na Tabela 22 não foram levados em conta nestas análises).

Tabela 30 – ANOVA do fator independente obtido através de regressão por mínimos quadrados em relação à compressão e idade para os concretos sem ARC.

Fator	GL	SQ	MQ	Teste F	F de significação	R ²	E.S.
Resist. à comp.	1	48,81	48,81	11,2211	0,0048	0,4449	Sim
Idade	1	19,13	19,13	2,9569	0,1075	0,1744	Não
Resist. à comp. e idade	2	48,91	24,46	5,2297	0,0216	0,4458	Sim

Onde: GL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada; R² = coeficiente de determinação; ES = Efeito significativo.

Tabela 31 – ANOVA do fator independente obtido através de regressão por mínimos quadrados em relação à compressão e idade para os concretos com ARC.

Fator	GL	SQ	MQ	Teste F	F de significação	R ²	E.S.
Resist. à comp.	1	3,88	3,88	0,5938	0,4529	0,0381	Não
Idade	1	7,58	7,58	1,2051	0,2896	0,0744	Não
Resist. à comp. e idade	2	8,25	4,13	0,6162	0,5540	0,0809	Não

Onde: GL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada; R² = coeficiente de determinação; ES = Efeito significativo.

Por meio dos resultados, é possível visualizar estatisticamente a relação do fator resistência à compressão e da interação deste fator com a idade, para um nível de significância de 5% para os concretos com agregados naturais. Para concretos com agregados reciclados, nenhum fator possui significância para o mesmo nível de confiança.

Os resultados obtidos para a relação módulo Estático x tensão de ruptura à compressão são mostrados nas Figuras 46 e 47. Uma linha de tendência segundo uma função do tipo potência (o mesmo tipo empregado pelos modelos de previsão propostos pelas normas) resultou, desconsiderando os valores de alta variabilidade dos corpos de prova apontados na Tabela 22, em um coeficiente de determinação R² igual a 0,5266 para concretos

sem ARC e igual a 0,0508 para concretos com ARC, ambos maiores que os coeficientes obtidos para módulos calculados a partir de apenas dois pares tensão x deformação.

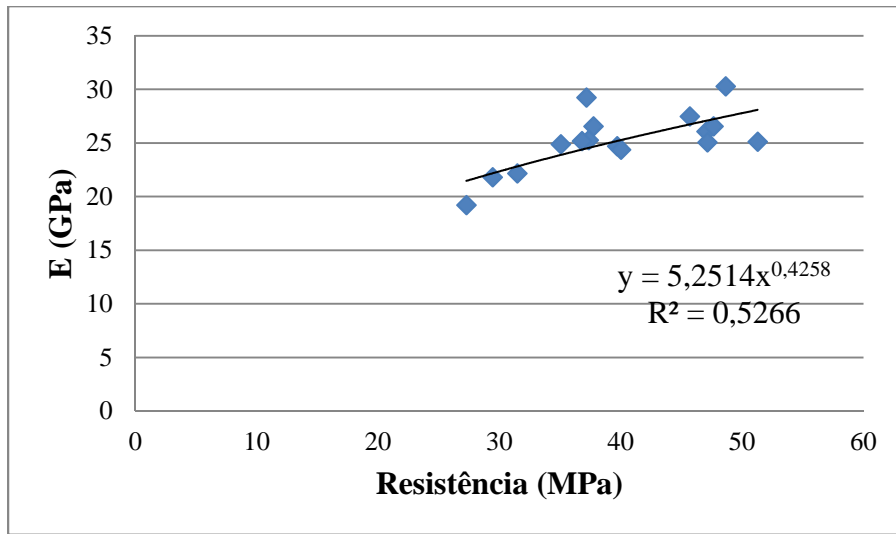


Figura 46 – Módulo de Elasticidade Estático obtido pela regressão por mínimos quadrados (desconsiderados valores de alta variabilidade) para concretos sem ARC.

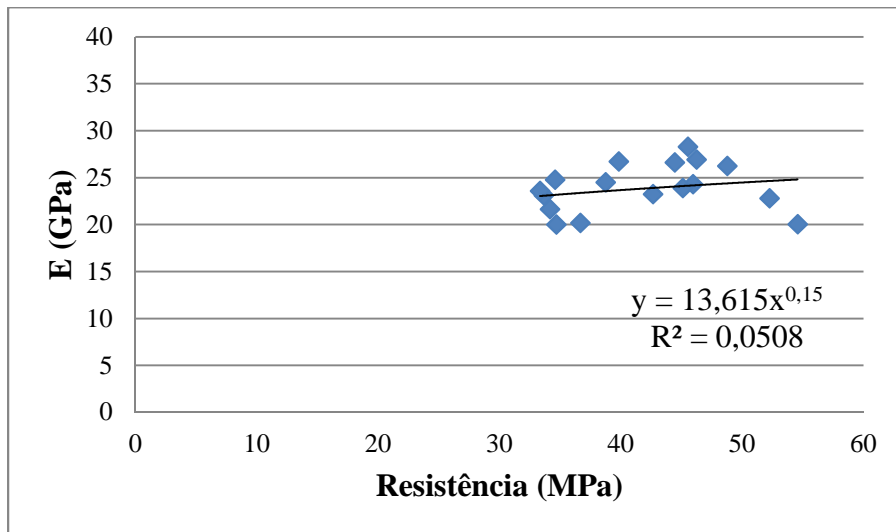


Figura 47 – Módulo de Elasticidade Estático obtido pela regressão por mínimos quadrados (desconsiderados valores de alta variabilidade) para concretos com ARC.

Em função dos resultados obtidos, parece ser mais adequado utilizar o coeficiente angular da reta obtida por regressão como valor do Módulo de Elasticidade que o obtido a partir de somente dois pares de tensão x deformação, quando uma aquisição automatizada de dados estiver experimentalmente disponível.

4.5 RELAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DINÂMICO E ESTÁTICO SOB O PONTO DE VISTA DA PERDA DE ELASTICIDADE LINEAR

Fez-se um estudo sobre o comportamento elástico linear do concreto através da regressão por mínimos quadrados, correlacionando-o com a velocidade de onda dos ensaios Dinâmicos. Pode ser visualizado nas Tabelas 32 e 33.

Tabela 32 – Coeficientes de determinação nos níveis de carga onde a velocidade de onda diminuiu – Concretos sem ARC.

	28 dias			63 dias		
Exemplar	45N28D010B	45N28D02B	45N28D03B	45N63D01	45N63D02	45N63D03
Tensão de Ruptura	50%	60%	60%	50%	60%	NRE
R ²	0,9968	0,9977	0,9991	0,9977	0,9966	MED
Exemplar	55N28D01	55N28D02	55N28D03	55N63D01	55N63D02	55N63D03
Tensão de Ruptura	40%	50%	50%	60%	40%	NRE
R ²	0,9963	0,9959	0,9982	0,9983	0,9989	MED
Exemplar	65N28D01	65N28D02	65N28D03	65N63D01	65N63D02	65N63D03
Tensão de Ruptura	40%	60%	40%	60%	60%	NRE
R ²	0,9959	0,9959	0,9968	0,9961	0,9981	MED

Onde: NRE MED – Não realizado ensaio do Módulo de Elasticidade Dinâmico.

Tabela 33 – Coeficientes de determinação nos níveis de carga onde a velocidade de onda diminuiu – Concretos com ARC.

	28 dias			63 dias		
Exemplar	45R28D01	45R28D02	45R28D03	45R63D01	45R63D02	45R63D03
Tensão de Ruptura	60%	50%	60%	40%	60%	40%
R ²	0,9987	0,9975	0,9989	0,9989	0,9981	0,9994
Exemplar	55R28D10B	55R28D02B	55R28D30B	55R63D01	55R63D02	55R63D03
Tensão de Ruptura	50%	40%	60%	50%	50%	50%
R ²	0,999	0,9959	0,9968	0,9995	0,9996	0,9995
Exemplar	65R28D01	65R28D02	65R28D03	65R63D01	65R63D02	65R63D03
Tensão de Ruptura	60%	50%	50%	20%	60%	40%
R ²	0,997	0,9972	0,9983	0,999	0,9994	0,999

O mais baixo valor encontrado de coeficiente de determinação para uma reta de regressão na região de tensões indicada como elástica linear pelo ensaio Dinâmico (velocidade de propagação de onda constante) foi de 0,9959. Dentro das limitações do programa experimental deste trabalho, um valor de Coeficiente de Determinação R² de 0,995 poderia ser considerado como o valor mínimo a ser atingido por uma reta de regressão em um ensaio realizado com cargas monotonicamente crescentes a uma velocidade constante na determinação do nível de tensão que o material poderia ser considerado como elástico linear, dispensando assim a realização do ensaio Dinâmico sob tensão.

4.6 CURVAS TENSÃO X DEFORMAÇÃO REPRESENTATIVAS

Os gráficos a seguir (Figuras 48 e 49) comparam as formas de obtenção das curvas tensão x deformação. As curvas em vermelho são obtidas a partir do procedimento da NBR 8522, onde os valores representativos são somente os pares tensão x deformação obtidos com a manutenção da tensão constante por um intervalo entre 60 e 90s. As curvas em preto são feitas a partir do tratamento de todos os pontos obtidos pelo sistema automatizado de aquisição de dados utilizado nos ensaios, simulando os dados obtidos em um ensaio com velocidade de aplicação de carga constante e sem patamares de tensão constante.

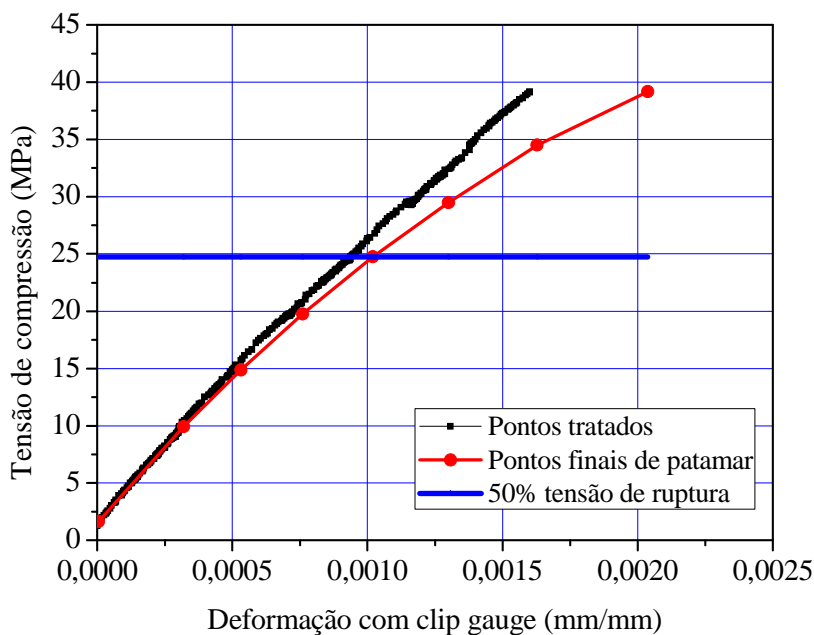


Figura 48 – Comparação das curvas de MEE dos dados tratados e com os pontos finais de cada patamar do exemplar 55N63D03.

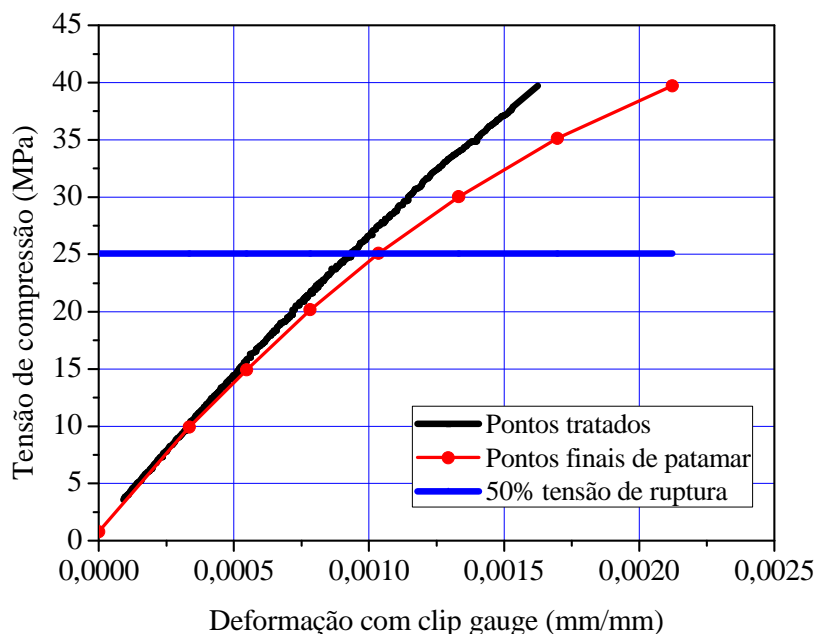


Figura 49 – Comparação das curvas de MEE dos dados tratados e com os pontos finais de cada patamar do exemplar 45R28D03.

Pode-se verificar que as curvas tensão x deformação obtidas pelos diferentes métodos diferem consideravelmente a partir de 50% da tensão de ruptura. A região até $0,7 f_c$ é empregada corriqueiramente no projeto de peças de concreto armado, tornando a previsão de deformações para esses níveis de tensão importante. Como esperado, as curvas obtidas pelo procedimento da NBR 8522 são menos rígidas (maiores deformações para os mesmos níveis de tensão) e altamente dependentes do tempo em que as tensões são mantidas constantes em um mesmo patamar (de 60 a 90s). Estima-se que curvas obtidas com leituras feitas ao final de 60s tendem a ser mais rígidas que as obtidas com a leitura feita ao final de 90s, em função dos efeitos de microfissuração e deformação diferida, amplificados pela manutenção da tensão em níveis constantes.

Conclui-se que havendo disponibilidade de equipamentos de ensaio que permitam a aplicação de cargas a uma velocidade constante e a aquisição das cargas e das respectivas deformações de forma automatizada e com um grande número de leituras, parece não haver justificativa para o procedimento de ensaio indicado pela NBR 8522.

A seguir apresentam-se as curvas médias para concretos com AGN e com substituição parcial de AGN por ARC, conforme definição da norma NBR 8522 (pares tensão x deformação obtidos com a manutenção da tensão constante por um intervalo entre 60 e 90s). As curvas foram obtidas da seguinte forma:

- Foi definido um patamar de tensão inicial de 3,6 MPa, conforme explicado no item 3.3.10, e níveis intermediários correspondentes a décimos da resistência à compressão, obtida no ensaio de compressão simples ($0,2 f_c$; $0,3 f_c$; $0,4 f_c$; $0,5 f_c$; $0,6 f_c$; $0,7 f_c$; $0,8 f_c$).

- Para cada nível de tensão foi feita a leitura da deformação de cada exemplar;

- Para garantir a coerência entre as diversas curvas, o valor da deformação obtida em cada nível de tensão em cada exemplar foi diminuída do valor da deformação obtida para a tensão de 3,6 MPa naquele exemplar. Desta forma, a curva tensão x deformação de todos os exemplares tem origem no ponto (tensão = 3,6 Mpa, deformação = 0).

- Para cada nível de tensão fez-se a média das deformações obtidas pelos diversos exemplares daquela configuração.

As curvas obtidas para os concretos com idade de 28 dias estão mostradas na Figura 50, e para a idade de 63 dias na Figura 51.

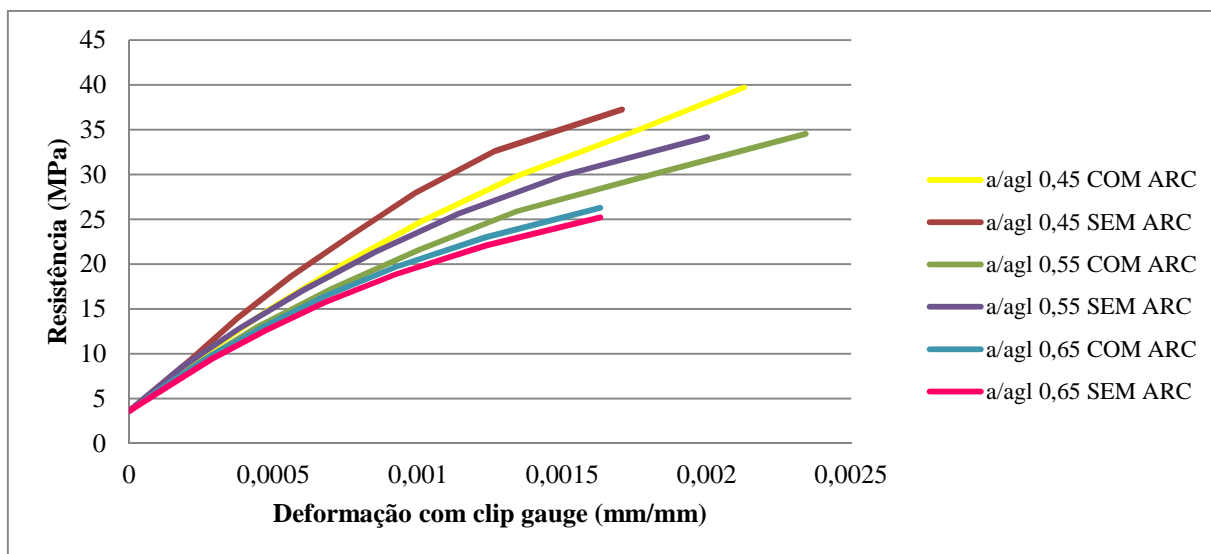


Figura 50 – Curvas médias para concretos rompidos aos 28 dias de idade com obtenção de dados conforme NBR 8522.

Visualmente, é possível identificar que o comportamento tensão x deformação para concretos com relação a/agl 0,65 é praticamente o mesmo em concretos com e sem ARC. Para relações a/agl menores, os concretos sem ARC apresentaram comportamento mais rígido (menores deformações para a mesma tensão) que os concretos com ARC.

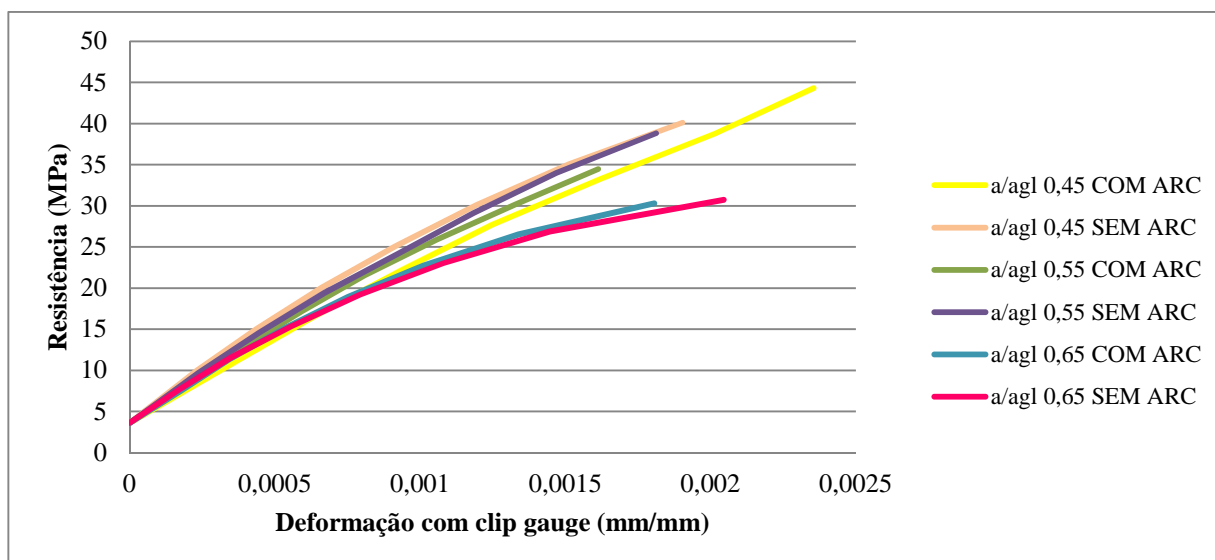
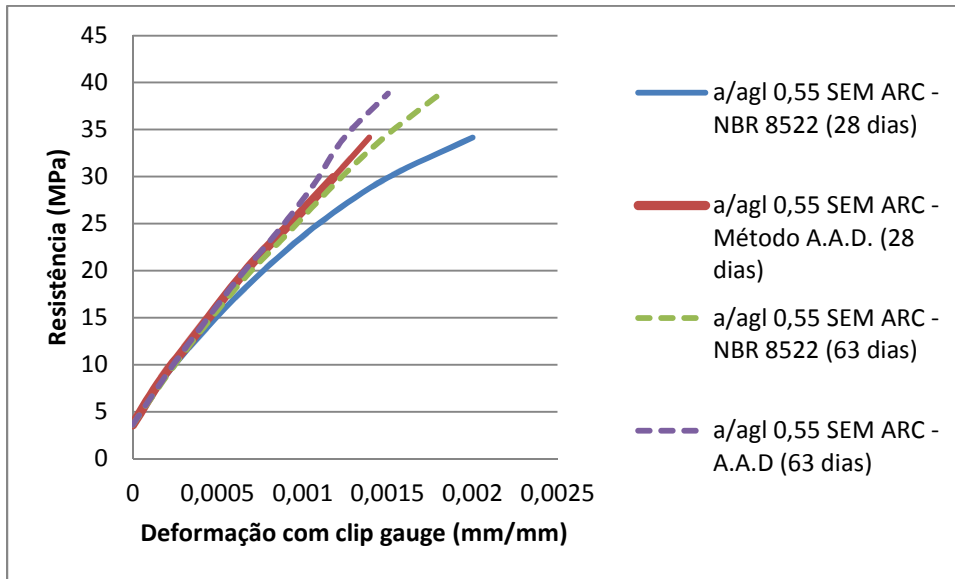


Figura 51 – Curvas médias para concretos rompidos aos 63 dias de idade com obtenção de dados conforme NBR 8522.

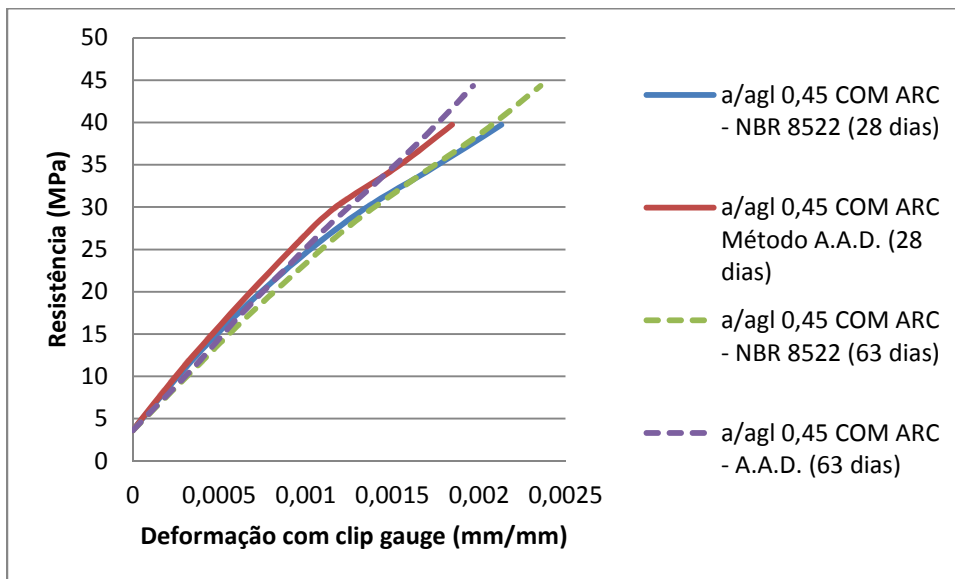
Para a idade de 63 dias, os concretos com relação a/agl de 0,45 e 0,55 apresentaram comportamentos tensão x deformação praticamente idênticos (curvas quase coincidentes), com os concretos com ARC sendo um pouco menos rígidos que os concretos sem ARC. Para a relação a/agl = 0,65, os concretos com e sem ARC apresentaram comportamento praticamente idêntico. Tal comportamento segue o padrão identificado para o Módulo de Elasticidade.

A seguir, nas Figuras 52 e 53, apresentam-se curvas escolhidas aleatoriamente de modo que se possa observar que o procedimento de aquisição de dados através de sistema automatizado resulta em curvas mais rígidas em relação ao procedimento da norma, uma vez que a aplicação de cargas a velocidade constante sem a manutenção de patamares de tensão constante minimiza os efeitos de fluência e microfissuração.



Onde: A.A.D = Aquisição automática de dados.

Figura 52 – Curvas médias para concretos de mesma relação a/agl sem ARC (28 e 63 dias)- Obtenção de dados conforme NBR 8522 e por aquisição automática de dados.



Onde: A.A.D = Aquisição automática de dados.

Figura 53 - Curvas médias para concretos de mesma relação a/agl com ARC (28 e 63 dias)- Obtenção de dados conforme NBR 8522 e por aquisição automática de dados.

4.7 PREVISÃO DAS NORMAS VIGENTES

A Figura 54 mostra os resultados para o Módulo de Elasticidade obtido pelo Método Estático, em comparação aos valores previstos pelas normas CEB-FIP *Model Code* 1990, NBR 6118 (2007 e 2014) e ACI 318 (2011) a partir da resistência à compressão dos concretos.

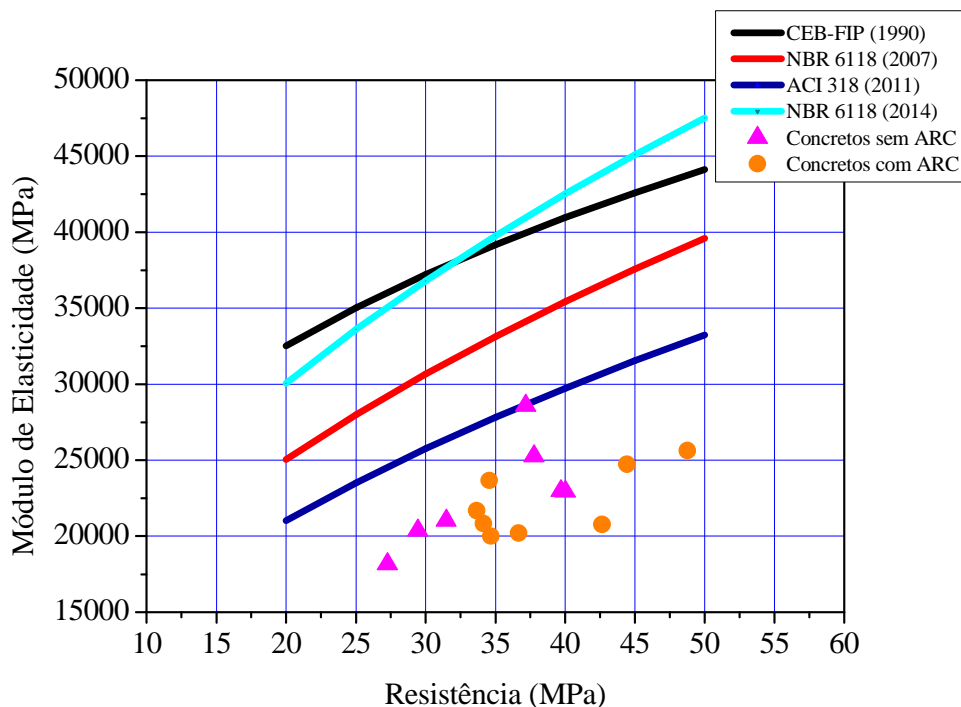


Figura 54 – Comparação entre MEE para concretos com e sem ARC e valores normativos.

Conforme a norma utilizada, o valor previsto para o Módulo de Elasticidade apresenta uma variação de até 65%, indicando a falta de consenso ainda existente para os modelos de previsão baseados simplesmente na resistência à compressão. Os valores de Módulo de Elasticidade obtidos pelo Método Estático, para concretos com e sem ARC, são todos bastante inferiores aos previstos pela norma mais conservadora (ACI 318). É importante ressaltar que não foi possível estabelecer uma função de correlação adequada entre o módulo Estático e a resistência à compressão para os dados deste programa experimental.

Para Melo Neto e Helene (2002), os valores de módulos de elasticidade em concretos podem variar muito de acordo com os parâmetros de dosagem, principalmente com o teor de agregado, o que representa um risco para os modelos de previsão que tomam como base somente a resistência à compressão. Confirmando, Aguilar, Silva e Correa (2006) expõem que a utilização das equações empíricas é aproximada e grosseira, uma vez que a porosidade dos constituintes/ propagação de trincas afeta as propriedades, mas não na mesma intensidade. No estudo de Carbonari et al. (2010), os valores de Módulo de Elasticidade Estático para concretos com agregados naturais ficaram muito abaixo dos valores estimados pelas normas NBR 6118 (ABNT, 2007) e CEB-FIP.

A Figura 55 mostra os resultados para o Módulo de Elasticidade obtido pelo Método Dinâmico, em comparação aos valores previstos pelas normas CEB-FIP, NBR 6118 (2007 e 2014) e ACI 318 (2011) a partir da resistência à compressão dos concretos.

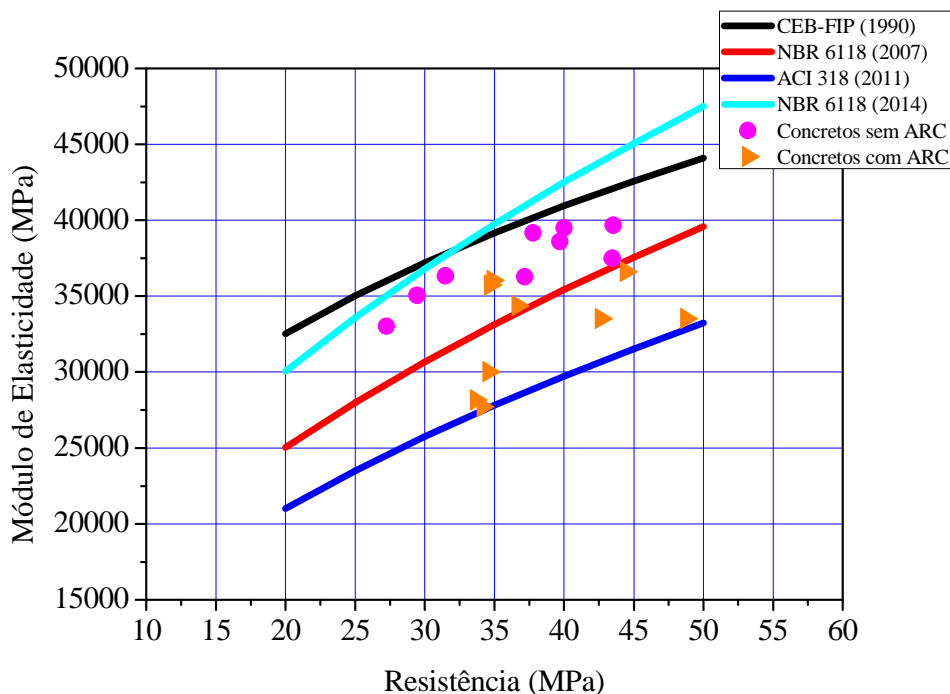


Figura 55 - Comparação entre MED para concretos com e sem ARC e valores normativos.

Os valores de Módulo de Elasticidade obtidos pelo Método Dinâmico, para concretos com e sem ARC, estão contidos na faixa entre a norma mais conservadora (ACI 318) e a menos conservadora (CEB-FIP para concretos de mais baixa resistência e NBR 6118 (ABNT, 2014) para concretos de mais alta resistência). Os resultados obtidos para concretos com agregados naturais parecem se enquadrar melhor no modelo de previsão do CEB-FIP. Por outro lado, os concretos com ARC não se enquadram em nenhum modelo de previsão das normas consultadas, inclusive por não ter sido possível estabelecer uma correlação entre módulo e resistência à compressão para esses concretos.

4.8 RESULTADOS PARA CONCRETOS JOVENS (7 DIAS)

Apresentam-se neste item os resultados para os concretos jovens, rompidos aos 7 dias de idade.

Os valores de Módulo de Elasticidade determinados pelos Métodos Estático e Dinâmico, o coeficiente de variação desses resultados, a diferença relativa entre a média

desses dois valores, tomando como base o valor do Método Estático; a resistência a compressão obtida no ensaio de compressão simples e a tensão de ruptura de cada corpo de prova no ensaio de módulo podem ser observados nas Tabelas 34 e 35.

Tabela 34 – Resultados dos ensaios para todas as relações a/agl, aos 7 dias de idade– concretos sem ARC.

a/agl 0,45_SEM ARC_7 DIAS	45N07D01B	45N07D02B	45N07D03B	MÉDIA	CV	DIFER. REL.
E (GPa) Estático	23,43	22,22	28,89	24,85	14,3%	48%
E (GPa) Dinâmico	36,95	36,72	36,88	36,85	0,3%	
Tensão de ruptura (MPa)	39,87	33,69	40,91	38,15	10,2%	-8%
Resistência (MPa)		41,35				
a/agl 0,55_SEM ARC_7 DIAS	55N07D01B	55N07D02B	55N07D03B	MÉDIA	CV	DIFER. REL.
E (GPa) Estático	19,20	24,48	18,52	20,73	15,7%	74%
E (GPa) Dinâmico	35,18	36,80	36,43	36,14	2,3%	
Tensão de ruptura (MPa)	29,68	31,62	29,13	30,14	4,3%	-11%
Resistência (MPa)		33,9				
a/agl 0,65_SEM ARC_7 DIAS	65N07D01	65N07D02	65N07D03	MÉDIA	CV	DIFER. REL.
E (GPa) Estático	21,55	14,19	19,70	18,48	20,7%	91%
E (GPa) Dinâmico	31,47	33,59	40,86	35,31	13,9%	
Tensão de ruptura (MPa)	25,07	25,71	23,69	24,82	4,2%	2%
Resistência (MPa)		24,3				

Onde: CV = coeficiente de variação; DIFER. REL. = diferença relativa entre a média de MEE e MED.

Tabela 35 – Resultados dos ensaios para todas as relações a/agl, aos 7 dias de idade – concretos com ARC.

a/agl 0,45_COM ARC_7 DIAS	45R07D01	45R07D02	45R07D03	MÉDIA	CV	DIFER. REL.
E (GPa) Estático	24,80	21,75	19,51	22,02	12,1%	38%
E (GPa) Dinâmico	31,75	40,78	34,02	35,52	13,2%	
Tensão de ruptura (MPa)	34,28	33,22	39,29	35,60	9,1%	-6%
Resistência (MPa)		37,95				
a/agl 0,55_COM ARC_7 DIAS	55R07D01	55R07D02	55R07D03	MÉDIA	CV	DIFER. REL.
E (GPa) Estático	27,34	21,75	19,38	22,82	17,9%	35%
E (GPa) Dinâmico	33,49	29,66	29,43	30,86	7,4%	
Tensão de ruptura (MPa)	28,36	30,20	30,19	29,58	3,6%	-5%
Resistência (MPa)		31,2				
a/agl 0,65_COM ARC_7 DIAS	65R07D01	65R07D02	65R07D03	MÉDIA	CV	DIFER. REL.
E (GPa) Estático	12,47	22,00	21,01	18,49	28,3%	119%
E (GPa) Dinâmico	37,77	40,82	42,78	40,45	6,2%	
Tensão de ruptura (MPa)	19,07	23,40	25,37	22,61	14,2%	-4%
Resistência (MPa)		23,55				

Onde: CV = coeficiente de variação; DIFER. REL. = diferença relativa entre a média de MEE e MED.

Com base nesses resultados, é possível verificar que se somente fosse utilizado o critério de aceitação ($\pm 20\%$ de f_c) da norma NBR 8522, todos os valores de MEE teriam sido aceitos. Porém, é possível verificar que, em alguns casos existe uma dispersão de valores muito alta e que tendem a aumentar conforme aumenta o fator a/agl. Da mesma forma que foi feito no item 4.2, os valores de módulo deveriam estar em uma faixa $\pm 20\%$ entre si. Os valores a serem desconsiderados, que não são confiáveis, estão marcados com sombreado nas Tabelas 36 e 37. Da mesma forma, a diferença relativa entre os dois ensaios se mostrou muito alta em relação aos resultados de 28 e 63 dias.

Tabela 36 – Valores dispersos e excluídos para concretos sem ARC, rompidos aos 7 dias de idade.

a/agl 0,45_SEM ARC_7 DIAS	45N7D01B	45N7D02B	45N7D03B	MÉDIA	CV original	Novo CV	DIFER. REL.
E (GPa) Estático	23,43	22,22	28,89	22,82	14,3%	3,7%	61%
E (GPa) Dinâmico	36,95	36,72	36,88	36,85	0,3%	----	

a/agl 0,55_SEM ARC_7 DIAS	55N7D01B	55N7D02B	55N7D03B	MÉDIA	CV original	Novo CV	DIFER. REL.
E (GPa) Estático	19,20	24,48	18,52	18,86	15,7%	2,6%	92%
E (GPa) Dinâmico	35,18	36,80	36,43	36,14	2,3%	----	

a/agl 0,65_SEM ARC_7 DIAS	65N7D01	65N7D02	65N7D03	MÉDIA	CV original	Novo CV	DIFER. REL.
E (GPa) Estático	21,55	14,19	19,70	20,63	20,7%	6,3%	58%
E (GPa) Dinâmico	31,47	33,59	40,86	32,53	13,9%	20,4%	

Onde: CV = Coeficiente de variação; DIFER, REL. = Diferença relativa entre a média de MEE e MED.

Tabela 37 – Valores dispersos e excluídos para concretos com ARC, rompidos aos 7 dias de idade.

a/agl 0,45_COM ARC_7 DIAS	45R7D01	45R7D02	45R7D03	MÉDIA	CV original	Novo CV	DIFER. REL.
E (GPa) Estático	24,80	21,75	19,51	20,63	12,1%	7,7%	59%
E (GPa) Dinâmico	31,75	40,78	34,02	32,89	13,2%	4,9%	

a/agl 0,55_COM ARC_7 DIAS	55R7D01	55R7D02	55R7D03	MÉDIA	CV original	Novo CV	DIFER. REL.
E (GPa) Estático	27,34	21,75	19,38	20,57	17,9%	8,1%	50%
E (GPa) Dinâmico	33,49	29,66	29,43	30,86	7,4%	----	

a/agl 0,65_COM ARC_7 DIAS	65R7D01	65R7D02	65R7D03	MÉDIA	CV original	Novo CV	DIFER. REL.
E (GPa) Estático	12,47	22,00	21,01	21,50	28,3%	3,3%	88%
E (GPa) Dinâmico	37,77	40,82	42,78	40,45	6,2%		

Onde: CV = Coeficiente de variação; DIFER, REL. = Diferença relativa entre a média de MEE e MED.

É possível perceber que alguns resultados fogem totalmente ao comportamento esperado, como no caso em que o concreto com relação a/agl 0,65 apresenta Módulo de Elasticidade Dinâmico maior do que os concretos com relação a/agl 0,55 e 0,45. Os módulos Estáticos obtiveram resultados muito próximos entre si, independente da relação a/agl, excluindo desta estatística apenas o concreto com somente AGN e com a/agl 0,45. Ou seja, estes resultados demonstram que em pequenas idades há grande dispersão nos valores das propriedades mecânicas, uma vez que as reações químicas e as condições de hidratação ainda não estão estáveis. Após a retirada dos valores considerados de alta variabilidade, os valores

de Módulo de Elasticidade Estático para ambos os concretos continuaram mostrando valores muito próximos entre si e o módulo Dinâmico continuou apresentando valor maior para os concretos de maior porosidade, o que parece continuar incoerente.

Comparando esses valores com os de idade mais avançada, o valor de MED não é confiável para a idade de 7 dias. Em geral, apresenta valores similares aos obtidos em 28 dias, mesmo quando há crescimento perceptível da resistência à compressão, como é o caso dos exemplares sem ARC com a/agl igual a 0,55. Outro exemplo que pode ser mencionado e que causa certa estranheza, são os valores dos exemplares com ARC com a/agl 0,65, quando a média dos valores de MED aos 7 dias é de 40,45 GPa, após, decai para 28,63 GPa aos 28 dias e cresce novamente para 33,06 GPa aos 63 dias, ou seja, existe algum fator que gera esses resultados duvidosos, possivelmente as reações de hidratação não estáveis para esta idade.

Para concretos com ARC, a determinação do módulo, por qualquer dos métodos, em concretos jovens não parece ser adequada ou recomendada. A determinação do módulo aos 63 dias parece ter mais confiabilidade que aos 28 dias. Isto tem implicações sobre o tempo para retirada de escoramentos em tais concretos, o que pode implicar nas especificações de novos procedimentos de norma para este material e a identificação de precauções/ restrições de uso. Cabe salientar que tal análise foi feita sobre concretos utilizando o cimento CPV-ARI-RS, sendo que para outros tipos de cimento, cujas reações de hidratação sejam mais lentas, a classificação de jovem poderá incluir concretos de maiores idades que 7 ou mesmo 28 dias.

5 CONCLUSÕES

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresenta as conclusões retiradas da análise dos resultados expostos no Capítulo 4 em relação aos objetivos estabelecidos, assim como sugestões para futuras pesquisas. As considerações expostas a seguir se restringem ao escopo do trabalho, e são feitas na mesma ordem das questões de pesquisa apresentadas no item 1.2.2.

Baseado nos resultados obtidos através do Método Dinâmico sob tensão, e sua comparação com os correspondentes resultados obtidos através do Método Estático, parece ser possível afirmar que os concretos com ARC apresentam limite elástico similar aos concretos que utilizam somente AGN. Este limite situa-se entre 40 e 50% da f_c , não sendo inferior a $0,3 f_c$. Desta forma, o procedimento da NBR 8522 (ABNT, 2008), especificando a obtenção do Módulo Estático a uma tensão superior de $0,3 f_c$ parece ser igualmente adequado aos concretos com teor de substituição de AGN por ARC de até 50%.

Para os valores obtidos de MEE para as classes de resistência C40, C45 e C50 e idade de 28 e 63 dias, não se identificam estatisticamente diferenças entre os concretos com e sem ARC. A análise é limitada pelo pequeno número de resultados e pela alta variabilidade dos mesmos. Para os resultados obtidos de MED para a classe de resistência C40 há um número pequeno de dados, sendo difícil avaliar através de análise de variância; porém, os concretos com ARC mostraram que, possuem valores de módulo menores do que os concretos sem ARC, a uma significância de 2,5 e 8,3% para os concretos C45 e C50 respectivamente. Fazendo-se uma análise de variância com todas as classes de resistência simultaneamente, não foi possível identificar influência do teor de substituição de AGN por ARC, da classe de resistência ou da interação desses dois fatores sobre o valor estimado do Módulo pelo Método Estático. Aplicando a mesma análise sobre o Método Dinâmico, foi possível identificar que tanto o teor de substituição de AGN por ARC e a classe de resistência influem sobre o módulo. Concretos com ARC apresentam módulo Dinâmico menor que concretos sem ARC, e as classes C45 e C50 apresentam módulos Dinâmicos superiores ao da classe C40, e iguais entre si. Uma vez que tanto o Módulo Estático como o Módulo Dinâmico são efetivamente estimativas obtidas por métodos diferentes de uma mesma propriedade, é possível dizer que há uma indicação de que o Módulo de Elasticidade para concretos com ARC seja menor que os concretos obtidos a partir somente de agregados naturais, e em concretos de classes de

resistência mais baixos essa diferença desaparece. Estas conclusões devem ser entendidas como uma tendência.

Não foi possível identificar uma relação única entre os valores de módulo obtidos pelo Método Dinâmico e pelo Método Estático. A aplicação do método Dinâmico resultou em valores entre 24 e 75% superiores aos valores obtidos pelo método Estático seguindo as prescrições da NBR 8522 para concretos utilizando somente AGN. A melhor função de correlação entre ambos apresentou um coeficiente de determinação de apenas 43%, insuficiente para estabelecer uma relação confiável entre ambos. Para concretos com substituição de 50% do AGN por ARC, os valores obtidos pelo método Dinâmico foram de 30 a 79% superiores aos obtidos pelo método Estático. Não foi possível estabelecer nenhuma função de correlação entre os valores obtidos pelos dois métodos.

O método Dinâmico realizado sob tensão permitiu verificar que a velocidade de propagação de onda ultrassônica em concretos mantém-se constante até um nível de tensão de aproximadamente $0,4$ a $0,5 f_c$, decaindo a partir daí. O comportamento foi aproximadamente o mesmo para os concretos utilizando somente AGN e para aqueles com substituição de 50% de AGN por ARC.

Para o fator idade, as análises de variância (ANOVA) efetuadas para concretos com e sem ARC indicaram que esta não influi sobre o Módulo de Elasticidade Dinâmico e Estático, a um nível de significância de 5%. A interação entre idade e resistência influi de forma significativa sobre o MEE e MED para concretos sem ARC; diferentemente do concreto com ARC, que mostrou influência apenas no MED. Como não foi possível estabelecer funções de regressão que permitam a previsão de valores de módulo Estático ou Dinâmico de maneira confiável a partir da resistência à compressão e de sua interação com a idade, não é possível afirmar que concretos de resistências similares, mas idades diferentes apresentaram módulos diferentes.

Os valores de Módulo de Elasticidade obtidos pelo método Estático, para concretos com e sem ARC, são todos bastante inferiores aos previstos mesmo pela norma mais conservadora (ACI 318, 2011) dentre as consideradas. Os valores de Módulo de Elasticidade obtidos pelo método Dinâmico, para concretos com e sem ARC estão contidos na faixa entre a norma mais conservadora (ACI 318) e a menos conservadora (CEB-FIP *Model Code* 1990 para concretos de mais baixa resistência e NBR 6118 (ABNT, 2007) e NBR 6118 (ABNT, 2014) para concretos de mais alta resistência). Os resultados obtidos para concretos com agregados naturais parecem se enquadrar melhor no modelo de previsão do CEB-FIP.

Por outro lado, os concretos com ARC não se enquadram em nenhum modelo de previsão das normas consultadas.

Dentro das limitações do programa experimental deste trabalho, foi possível obter curvas de comportamento tensão x deformação representativas das 3 relações água/aglomerante nas idades de 28 e 63 dias para concretos com somente AGN e concretos com 50% de substituição de AGN por ARC. Tais curvas foram obtidas utilizando tanto a partir da metodologia preconizada pela NBR 8522 quanto de uma metodologia alternativa, proposta neste trabalho (aplicação de cargas de forma monotonicamente crescente, com velocidade constante, sem a manutenção de patamares de tensão constante para a leitura dos resultados). As curvas obtidas mostram que os concretos com ARC têm comportamento similar aos concretos sem ARC, mas são menos rígidos (maiores deformações para as mesmas tensões). Foi possível constatar que o método alternativo resulta em curvas tensão x deformação mais rígidas (menores deformações para os mesmos níveis de tensão) em relação às curvas preconizadas pela norma NBR 8522.

Pode-se apontar outras conclusões obtidas, mas que não estavam descritas nos objetivos específicos deste trabalho: Os resultados aos 7 dias mostraram que, principalmente para os concretos com ARC, há grande variabilidade nos valores de módulo, chegando estes a serem maiores do que aos 28 e 63 dias, o que demonstra dispersão nos valores das propriedades mecânicas, uma vez que as reações químicas e as condições de hidratação ainda não estão estáveis. Novas especificações de novos procedimentos de norma e a identificação de precauções e restrições de uso se fazem necessárias para concretos com agregados reciclados. Deve-se ter uma atenção especial se forem utilizados cimentos cujas reações de hidratação sejam mais lentas (diferentemente do cimento CPV-ARI RS), pois poderão afetar os valores de Módulo de Elasticidade em idades maiores do que 7 dias.

Devido ao procedimento de ensaio de Módulo de Elasticidade Estático através da norma NBR 8522, é possível concluir que este método de ensaio está preconizado para equipamentos de ensaio não instrumentados, com leitura manual de valores de carga e deslocamento. Se utilizada instrumentação que permita a aquisição instantânea de dados e se conseguir manter a velocidade de aplicação de carga constante, é possível atenuar o efeito de microfissuração ou de deformações diferidas. Também foi constatado que não foi possível estabilizar a tensão aplicada pela prensa a níveis tão baixos como 0,5 MPa e uma nova expressão teve de ser utilizada, o que representa como um fator a mais, de que o método precisa ser revisado.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Devido a questionamentos que não puderam ser contemplados no escopo deste trabalho, em virtude do tempo hábil para a realização de uma dissertação de mestrado, faz-se necessário apontar algumas sugestões para aprimoramento do estudo das propriedades elásticas de concretos com ARC para fins estruturais:

- Determinação do Módulo de Elasticidade Dinâmico em corpos de prova paralelepípedicos de modo a não utilizar adaptadores para os sensores do ultrassom;

- Comparação de ensaio de comportamento elástico por método Estático entre o procedimento da NBR 8522 (ABNT, 2008) e um procedimento alternativo, com aplicação direta de cargas a velocidade constante, sem patamares, em equipamento de ensaio automatizado e instrumentado;

- Ampliar a investigação sobre o valor do módulo para concretos com e sem ARC de mesmas classes de resistência para classes de mais baixa resistência (C25 a C40), utilizando um programa experimental mais amplo, com um maior número de exemplares por configuração para minimizar os efeitos da variabilidade;

- Verificar os valores de Módulo de Elasticidade Estático e Dinâmico em corpos de prova secos;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738**: Concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – procedimentos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – procedimentos. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 8522**: Concreto – determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 8802**: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **NBR 14931**: Execução de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

ABO-QUDAIS, S. A. Effect of concrete mixing parameters on propagation of ultrasonic waves. **Construction and Building Materials**, v.19, n.4. p. 257-263, 2005.

AGUILAR, M. T. P.; SILVA, A. P. E.; CORREA, E. C. S.; CETLIN, P. R. Análise da capacidade de deformação do concreto: módulo de Young x módulo de deformação. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2006, Foz do Iguaçu, Brasil. **Anais... CEBECIMat**, 2006.

AMADEI, D. I. B. *et al.* A questão dos resíduos de construção civil: um breve estado da arte. **Revista NUPEM**, v. 3, n. 5, p. 185-199, 2011.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Building code requirements for structural concrete (ACI 318-11) and commentary**. Detroit, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL STANDARDS (ASTM). **ASTM C 597-09**: Standard test method for pulse velocity through concrete, EUA, 2009.

ANGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influencia de suas características no comportamento de concreto**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo: São Paulo, 2005.

ANGULO, S. C. *et. al.* Resíduos de construção e demolição: avaliação de métodos de quantificação. **Eng. Sanit. Ambient**, v. 16, n.11, p. 299-306, 2011.

ANGULO, S. C.; FIGUEIREDO, A. D. de. **Concreto: ciência e tecnologia**. 2 ed. Ibracon: São Paulo, 2011.

ANGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. **Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil**. n. 1. São Paulo, p. 1-13, 2001.

ARAÚJO, J. M. de. **Curso de concreto armado**. 2 ed. Dunas: Rio Grande, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento portland**. 7 ed. São Paulo, 2002.

BARBOSA, I. L. S.; GEYER, A. B. Influência dos agregados graúdos da região de Goiânia no módulo de deformação tangente inicial do concreto. In: 52º Congresso Brasileiro do Concreto, 2010, Fortaleza, Brasil. **Anais... IBRACON**, 2010.

BENETTI, J. K. **Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico de concreto produzido com agregado graúdo reciclado de concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de pós graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2012.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. **BS 1881: Part 201**: Guide to the use of non-destructive methods of test for hardened concrete, Londres, 1986.

_____. **B 1881: Part 203**: Recommendations for measurement of the velocity of ultrasonic pulses in concrete, Londres, 1986.

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

BUTTLER, A. M. **Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto – influencia da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Programa de pós graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

CABRAL, A. E. B. *et. al.* Determinação da influencia do tipo de agregado reciclado de resíduo de construção e demolição sobre o módulo de deformação de concretos produzidos com agregados reciclados. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 1, n. 2, p. 171-192, 2008.

CARBONARI, B. M. T. *et. al.* Utilization of the ultrasonic method to evaluate the properties of high performance concrete. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 3, n. 4, p. 494-502, 2010.

CARELI, E. D. **A resolução Conama nº. 307/2002 e as novas condições para gestão dos resíduos de construção e demolição**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Programa de pós-graduação em Tecnologia: Gestão, Desenvolvimento e Formação, Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza: São Paulo, 2008.

CARRIJO, P. M. **Análise da influencia da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP): São Paulo, 2005.

CEB/FIP. Comité Euro-Internacional Du Béton. Conde-modèle CEB/FIP pour les structures em Béton. **Bulletin d'Information 124/125**, Paris, 1990.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº. 307:** Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para gestão dos resíduos da construção civil. Brasília, 2002.

COSTA, R. M. **Análise de propriedades mecânicas do concreto deteriorado pela ação de sulfato mediante utilização do UPV.** Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Programa de pós graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

DAMINELI, B. L. **Estudo de métodos para caracterização de propriedades físicas de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados.** Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia) – Programa de pós graduação em Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

DESHPANDE, N. K; KULKARNI, S. S.; PACHPANDE, H. Strength characteristics of concrete with recycled aggregates and artificial sand. **International Journal of Engineering Research and Applications**, v. 2, n. 5, p. 38-42, 2012.

DG/TJ08-20180-2007. **Technical Code for Application of Recycled Concrete (in Chinese)**, 2007.

DIÓGENES, H. J. F. *et. al.* Determination of modulus of elasticity of concrete from the acoustic response. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 4, n. 5, p. 792-813, 2011.

DOMINGO, A. *et. al.* Long term deformations by creep and shrinkage in recycled aggregate concrete. **Materials and Structures**, v. 43, n. 8, p. 1147-1160, 2010.

EVANGELISTA, A. C. J. **Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos.** Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de pós graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002.

EVANGELISTA, L.; DE BRITO, J. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 29, n. 5, p. 397-401, 2007.

FATHIFAZL, G. *et.al.* Creep and drying shrinkage characteristics of concrete produced with coarse recycled concrete aggregate. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 10, p. 1026-1037, 2011.

FONSECA, N.; BRITO, J. de; EVANGELISTA, L. The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, p. 637-643, 2011.

GONÇALVES, A.; ESTEVES, A.; VIEIRA, M. Influence of recycled concrete aggregates on concrete durability. **International Rilem conference on the use of recycled materials in buildings and structures**, v. 2, p. 554-562, 2004.

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.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 7 ed. Person Educational: São Paulo, 2010.

KATZ, A. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 5, p. 703-711, 2003.

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

KOU, S. C.; POON, C.S.; WAN, H.W. Properties of concrete prepared with low-grade recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 881-889, 2012.

LATTERZA, L. M. **Concreto com agregado graúdo proveniente da reciclagem de resíduos de construção e demolição: um novo material para a fabricação de painéis leves de vedação**. São Paulo: UFSCar, 1998, 130f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

LEITE, F. D. *et. al.* Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 6, p. 2972-2979, 2011.

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

LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

LEVY, S. M.; HELENE, P. R. L. Utilização de agregados reciclados de concreto para produção de novos concretos. In: 48º Congresso Brasileiro do Concreto, 2006, Rio de Janeiro, Brasil. **Anais... IBRACON**, 2006.

LIMBACHIYA, M. C. *et. al.* Performance of recycled aggregate concrete. In: RILEM International Symposium on Environment-Conscious Materials and Systems for Sustainable Development, 2004, Londres, Inglaterra. **Anais... RILEM**, 2004.

LOVATO, P. S. **Verificação dos parâmetros de controle de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para utilização em concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

MAGALHÃES, A.G; CALIXTO, J.M; PAULINO, T.M; VASCONCELOS, L.W. Módulo de deformação do concreto: ensaio estático versus dinâmico. In: 52º Congresso Brasileiro do Concreto, 2010, Fortaleza, Brasil, 2010. **Anais... IBRACON**, 2010.

MALESEV, M.; RADONJANIN, V.; MARINKOVIC, S. Recycled concrete as aggregate for structural concrete production. **Sustainability**, v. 2, n. 5, p. 1204-1225, 2010.

MARTÍN-MORALES, M. *et. al.* Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 2, p. 742-748, 2011.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3 ed. Ibracon: São Paulo, 2008.

MELO NETO, A. A.; HELENE, P. R. L., Módulo de Elasticidade: Dosagem e avaliação de modelos de previsão do módulo de elasticidade de concretos. In: 44º Congresso Brasileiro do Concreto, Belo Horizonte, Brasil, 2002. **Anais...** IBRACON, 2002.

MORRELL, R. **Measuring elastic properties of advanced technical ceramics – a review**. Crown: Teddington, 1996.

NETO, A. A. de M.; HELENE, P. R. L. Módulo de elasticidade: dosagem e avaliação de modelos de previsão do módulo de elasticidade de concretos. In: 44º Congresso Brasileiro do Concreto, Belo Horizonte, Brasil, 2002. **Anais...** IBRACON, 2002.

NETO, C. S. **Concreto: ciência e tecnologia**. 2 ed. Ibracon: São Paulo, 2011

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

PADOVAN, R. G. **Influência da pré-molhagem nas propriedades de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2013.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland**. 11 ed. Globo: Rio de Janeiro, 1998.

PINTO, T. de P. Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de pós-graduação em Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

PINTO, T. de P. *et. al.* Ministério das Cidades. Manejo e gestão de resíduos da construção civil: como implementar um sistema de manejo e gestão nos municípios. **Caixa**, v. 1, p. 1-127, 2005.

POON, C. S. *et. al.* Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 1, p. 31-36, 2004.

POPOVICS, S. Effects of uneven moisture distribution on the strength of and wave velocity in concrete v. ultrasonic. **Ultrasonics**, v. 43, p. 429-434, 2005.

SACHS, A. Demolição reciclada. **Téchne Pini**, p. 28-32, 2012.

SALVADOR, P. F. **Influência dos ciclos de execução nas deformações das estruturas de concreto armado de edifícios de andares múltiplos**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

SANTOS, S. H. de C.; BUENO, S. B.; KIMURA, A. E. **ABNT NBR 6118**. In: 55º. Congresso Brasileiro do Concreto, Gramado, Brasil, 2013. Disponível em: <<http://www.ibracon.org.br/eventos/55CBC/PDFS/10hSergio.pdf>>. Acesso em nov. 2013.

SHARIQ, M.; PRASAD, J.; ABBAS, H. Effect of GGBFS on age dependent static modulus of elasticity of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 411-418, 2013.

SOUZA, C. A. de. **Utilização de resíduos de concreto como agregado miúdo para argamassa de concretos estruturais convencionais**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de pós-graduação em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

SOUZA, U. E. L. *et. al.* Diagnóstico e combate à geração de resíduos na produção de obras de construção de edifícios: uma abordagem progressiva. **Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, n.11, p. 33-46, 2004.

TAM, V. W. Y. Comparing the implementation of concrete recycling in the Australian and Japanese construction industries. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, n. 7, p. 688-702, 2009.

TAVARES, G. J.; SILVA, D. dos S. da; PELISSER, F. Análise do comportamento de concretos fabricados com agregados reciclados. In: 48º. Congresso Brasileiro do Concreto, Rio de Janeiro, Brasil. **Anais... IBRACON**, 2006.

TOPÇU, I. B.; GUNÇAN, N. F. Using waste concrete as aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 7, p. 1385-1390, 1995.

TROIAN, A. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto frente à penetração de íons cloreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -Programa de pós de graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2010.

ULSEN, C. **Caracterização tecnológica de resíduos de construção e demolição**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de pós de graduação em Engenharia de Minas e Petróleo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

VIEIRA, G. L. **Influência da microfissuração causada por carregamento precoce nas propriedades mecânicas de concretos produzidos com diferentes tipos de cimento**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

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

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

XIAO, J.; LI, W.; POON, C. Recent studies on mechanical properties of recycled aggregate concrete in China – a review. **Science China Technological Science**, v. 55, n. 6, p. 1463-1480, 2012.

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

YUAN, F.; SHEN, L.; LI, Q. Energy analysis of the recycling options for construction and demolition waste. **Waste management**, v. 31, n. 12, p. 2503-2511, 2011.

ZEGA, C. J.; VILLAGRAN-ZACCARDI, Y. A.; DI MAIO, A. A. Effect of natural coarse aggregate type on the physical and mechanical properties of recycled coarse aggregates. **Materials and Structures**, v. 43, n. 1-2, p. 195-202, 2010.