

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Alex Taira de Vasconcellos

**ESTUDO DA VARIABILIDADE DO MÓDULO DE
ELASTICIDADE DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM
DIFERENTES TIPOS DE AGREGADOS GRAÚDOS**

Florianópolis

2018

Alex Taira de Vasconcellos

**ESTUDO DA VARIABILIDADE DO MÓDULO DE
ELASTICIDADE DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM
DIFERENTES TIPOS DE AGREGADOS GRAÚDOS**

Dissertação submetida ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Ci-
vil para a obtenção do Grau de Mes-
tre.

Orientador

Universidade Federal de Santa Cata-
rina: Prof. Dr. Luiz Roberto Prudên-
cio Jr.

Florianópolis

2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Vasconcellos, Alex Taira de

Estudo da variabilidade do módulo de elasticidade de concretos produzidos com diferentes tipos de agregados graúdos / Alex Taira de Vasconcellos ; orientador, Luiz Roberto Prudêncio Jr., 2018.
122 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. I. Prudêncio Jr., Luiz Roberto. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Alex Taira de Vasconcellos

**ESTUDO DA VARIABILIDADE DO MÓDULO DE
ELASTICIDADE DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM
DIFERENTES TIPOS DE AGREGADOS GRAÚDOS**

Esta Dissertação foi julgada aprovada para a obtenção do Título de “Mestre”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Florianópolis, 13 de Junho de 2018.

Prof. Dr. Glicério Trichês
Coordenador

Universidade Federal de Santa Catarina

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio Jr.
Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Cláudio de Souza Kazmierczak
Universidade do Vale dos Sinos (UNISINOS) (videoconferência)

Prof. Dr. Philippe Jean Paul Gleize
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Fernando Pelisser
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho ao meu Senhor Jesus
Cristo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por todo amor e cuidado ao longo da minha vida. Agradeço por toda oportunidade que me concedeu e, especificamente, pela capacitação para concluir este trabalho.

Agradeço a toda minha família, em especial minha mãe Lenita Taira e meu irmão Igor Taira, por apoiar, suportar e me ajudar a perseverar até a conclusão deste trabalho, principalmente nos momentos de maiores dificuldades.

Aos professores: Sandra Bertocini e Andrés Batista Cheung, da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS) que foram exemplos para mim de dedicação pela profissão durante toda minha graduação.

Ao professor Luiz Roberto Prudêncio Jr. pela orientação ao longo deste trabalho. Obrigado por compartilhar o conhecimento e pela oportunidade em participar das consultorias que, sem dúvida, contribuíram para a minha formação pessoal e profissional.

Aos amigos da pós-graduação: Alexis Kiouranis, Ariane Rubin, Eduardo Guindani, Fábio Caon, Manuela Menger, Mariana Amaral, Régis Pamponet, que sempre se dispuseram a contribuir com o trabalho e me ensinaram muito sobre a cultura do Sul. Sempre lembrarei com carinho de cada um de vocês.

Aos amigos: Davi Figueiredo, Bruno Zanella, Henrique Tajiri, Pablo Munhoz e, tantos outros, que foram presentes de Deus e tornou muito mais leve e tranquila a caminhada aqui em Florianópolis.

Aos colegas do GTec: Eduardo Graeff, Lucas Onghero, Paulo Mattos, Rafael Sakata, Ronaldo Pilar e Rudiele Schankoski por todo companheirismo para realização das atividades. Em especial, agradeço ao amigo André Ribeiro por sempre ter me ajudado durante todo o desenvolvimento do mestrado, sem dúvida, seu envolvimento e participação foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

Agradeço às empresas: Engemix, Supermix e Maxmohr pela doação dos materiais e equipamentos necessários que tornaram viáveis a confecção deste trabalho.

À banca examinadora: Prof. Dr. Cláudio Kazmierczak, prof. Dr. Phillippe Gleize e ao prof. Dr. Fernando Pelisser por aceitarem participar da avaliação deste trabalho contribuindo com correções e sugestões. Por fim, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudo concedida e aos laboratórios da engenharia civil da UFSC que cederam os equipamentos para realização dos ensaios.

RESUMO

Em razão da crescente verticalização das edificações, a especificação de módulo de elasticidade mais elevados se tornou frequente no dimensionamento das estruturas de concreto armado. No entanto, como diversos fatores influenciam no comportamento desta propriedade, seus resultados exibem uma grande variabilidade, tornando-se difícil prever o seu valor. Dois pontos foram observados: A existência de uma diferença entre os resultados experimentais e aqueles previstos pela ABNT NBR 6118:2014 e também, o desconhecimento da variabilidade do módulo de elasticidade ao longo do tempo. Com o objetivo de contribuir no entendimento desses pontos, foi proposto um programa experimental onde se estudaram concretos com três diferentes relações de água/cimento, produzidos com diferentes tipos de agregados graúdos disponíveis no Estado de Santa Catarina (gnaisse e granito) coletados ao longo do tempo. O módulo de elasticidade dos diferentes tipos de concretos foram avaliados comparativamente através de ensaios estáticos e dinâmicos (velocidade de propagação de onda ultrassônica e frequência natural de vibração). Coerentemente com a bibliografia consultada, a influência do fator agregado graúdo se mostrou mais significativa na variação dos resultados de módulo de elasticidade evidenciando que, aumentar a resistência à compressão dos concretos não necessariamente resulta em um aumento nos valores de módulo. Foi observada uma variabilidade nos resultados do módulo de elasticidade ao longo do tempo, no qual se sugeriu tratá-lo como um parâmetro probabilístico obtidos a partir de ensaios experimentais prévios. Diferentemente do previsto pelo modelo prescrito na norma brasileira, concretos produzidos com agregados graúdos de granito e gnaisse, resultaram em valores de módulo de elasticidade significativamente discrepante entre si. Os resultados de ensaios obtidos por meio dos ensaios dinâmicos foram superiores aos valores estático, entretanto, o quanto esses valores são superiores se mostrou dependente da natureza do agregado e do ensaio adotado.

Palavras-chave: Concreto. Módulo de elasticidade. Agregado graúdo. Ensaio estático e dinâmicos.

ABSTRACT

Due to the increasing verticalization of buildings, the designation of elevated modulus of elasticity have become more common in the design of reinforced concrete structures. However, as several factors influence the behavior of this characteristic, a great variability is exhibited in its results, making it difficult to predict its value. Two observations were made: The existence of a difference between the experimental results and those predicted by ABNT NBR 6118:2014 and also, the unfamiliarity of the variability of the modulus of elasticity over time. With the aim of contributing to the understanding of this issue, an experimental program was proposed. Concretes with three different water-cement ratios, produced with different types of coarse aggregates (gneiss and granite) collected over time in Santa Catarina State were tested. The modulus of elasticity of these different types of concrete was evaluated comparatively through dynamic and static tests (ultrasonic wave propagation velocity and natural frequency of vibration). As the bibliography suggests, the influence of the coarse aggregate was the most significant factor to the variability of the modulus of elasticity, showing that increasing the compression resistance of concretes does not necessarily lead to an increase in the values of modulus. It was observed a variability in the results of elasticity modulus over time and it was treated as a probabilistic parameter obtained from the previous experimental tests. Unlike the predicted by the model of the Brazilian standard, concretes produced with coarse aggregates of granite and gneiss resulted in values of elasticity modulus significantly different. The results obtained through the dynamic tests were greater than those obtained in the static tests. However, this increase was dependent on the nature of the aggregate and on the type of the test adopted.

Keywords: Concrete. Modulus of elasticity. Coarse aggregate. Static and dynamic tests.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Representação das edificações mais altas existentes no Brasil que estão concluída ou em fase de construção	23
Figura 2	Relação esquemática entre tensão-deformação para ciclos de carga e descarga (a) elástico-linear, (b) elástico não-linear	28
Figura 3	Relação esquemática entre tensão-deformação para ciclos de carregamento e descarregamento típica do concreto	29
Figura 4	Diferença no comportamento da curva tensão-deformação do concreto e seus constituintes	30
Figura 5	Diagrama σ - ε do concreto e o avanço das microfissuras no interior do concreto em função da porcentagem de tensão aplicada	31
Figura 6	Representação esquemática dos diferentes tipos de módulos de elasticidade	33
Figura 7	Representação esquemática dos módulos de elasticidade (a) secante e (b) tangente inicial, segundo NBR 8522:2008	34
Figura 8	Representação do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade tangente inicial	35
Figura 9	Representação do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade secante a uma tensão indicada (σ_n)	35
Figura 10	Representação do carregamento para a determinação do traçado do diagrama tensão-deformação	36
Figura 11	Estudo comparativo do módulo de elasticidade obtido experimentalmente e por meio da equação da norma NBR 6118	40
Figura 12	Contribuição dos parâmetros intrínsecos (material) e extrínsecos (ensaios) que afetam o módulo de elasticidade do concreto	43
Figura 13	Detalhe do compressômetro para dois medidores de deformação confeccionado pela equipe GTec/UFSC	53
Figura 14	Representação esquemática do programa experimental proposto	59
Figura 15	Agregados miúdos utilizados: areia natural e areia industrial	61
Figura 16	Curva granulométrica da areia composta	62
Figura 17	Locais das empresas produtoras de agregados para concreto localizados próximos à Balneário Camboriú, Santa Catarina	63
Figura 18	Curva granulométrica do agregado graúdo composto,	

granito.	64
Figura 19 Curva granulométrica do agregado graúdo composto, gnaissel.	65
Figura 20 Curva granulométrica do agregado graúdo composto, gnaissel2.	65
Figura 21 Sequência de ensaios adotada nas propriedades do estado fresco e endurecido dos concretos estudados.	66
Figura 22 Proporção, em volume, dos materiais para as diferentes relações água/cimento.	67
Figura 23 Detalhe do misturador fabricado pela empresa Betomaq que foi utilizado para a produção dos concretos.	69
Figura 24 (a) detalhe do acondicionamento dos corpos de prova de concreto nas primeiras horas e, posteriormente, (b) armazenamento em tanques com água e cal.	71
Figura 25 Detalhe do equipamento utilizado para a determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e do gel de acoplamento utilizado nos ensaios.	73
Figura 26 Detalhe do equipamento utilizado para obtenção da frequência acústica do ensaio de impulso longitudinal.	74
Figura 27 Valores de consistência obtidos pelo ensaio de abatimento do tronco de cone de todos os concretos.	77
Figura 28 Massa específica aparente dos concretos produzidos com diferentes agregados graúdos, valores médios.	78
Figura 29 Teor de aditivo (em %) em relação a massa de cimento dos concretos produzidos com diferentes agregados graúdos, valores médios.	79
Figura 30 Consumo de cimento dos concretos produzidos com diferentes agregados graúdos, valores médios.	80
Figura 31 Resultados de resistência à compressão média, aos 28 dias, em função da relação a/c dos concretos produzidos com diferentes tipos de agregados graúdos, em diferentes lotes.	81
Figura 32 Valores médios obtidos para o módulo estático de elasticidade de todos os concretos em diferentes lotes aos 28 dias de idade.	84
Figura 33 Valores médios dos módulos estáticos de elasticidade em função das resistências à compressão obtidas.	88
Figura 34 Valores de módulo de elasticidade tangente inicial estimados pelas normas e obtidos experimentalmente.	93

Figura 35	Valores médios de módulos de elasticidade dinâmico dos concretos em função da velocidade de pulso, obtidos por meio do ensaio de pulso ultrassônico.	97
Figura 36	Valores médios de módulo de elasticidade dinâmico dos concretos em função da resistência à compressão, obtidos por meio do ensaio de pulso ultrassônico.	99
Figura 37	Módulo de elasticidade dinâmico dos concretos em função da frequências naturais, obtidos por meio do ensaio de impulso longitudinal.	100
Figura 38	Módulo de elasticidade dinâmico dos concretos em função da resistência à compressão, obtidos por meio do ensaio de impulso longitudinal.	100
Figura 39	Resumo das variações observadas dos resultados de módulo dinâmicos em relação aos valores de módulo obtidos por meio do ensaio estático.	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Quadro-resumo do avanço da microfissuração e do comportamento da curva σ - ε dos concretos em função da porcentagem da tensão última	31
Tabela 2	Expressões para a estimativa do módulo de elasticidade nas principais normas	39
Tabela 3	Formulações matemáticas para estimar o módulo de elasticidade a partir da mecânica dos compósitos.	42
Tabela 4	Propriedades típicas das rochas utilizadas na construção civil.	45
Tabela 5	Quadro-resumo de estudos que avaliaram a influência do tipo de agregado graúdo no comportamento elástico dos concretos	46
Tabela 6	Descrição dos tipos de medidores de deformação comumente utilizados no ensaio de módulo de elasticidade de concretos	54
Tabela 7	Caracterização do cimento CP-IV utilizado no trabalho.	60
Tabela 8	Caracterização do cimento CP-V ARI utilizado em estudos complementares.	61
Tabela 9	Caracterização física dos agregados miúdos utilizados. .	62
Tabela 10	Caracterização física dos agregados miúdos utilizados. .	64
Tabela 11	Especificação do aditivo utilizado na produção dos concretos.	66
Tabela 12	Proporção, em massa, dos materiais empregados na produção dos concretos.	68
Tabela 13	ANOVA - influência da relação a/c e agregado para os resultados de resistência à compressão dos concretos.	82
Tabela 14	Valores comparativos de resistência à compressão de concretos produzidos com cimento CP-IV com concretos confeccionados com cimento CP-V ARI, aos 28dias.	83
Tabela 15	ANOVA - influência da relação a/c, agregado e lote no parâmetro módulo de elasticidade estático a $0,3f_c$ para todos os concretos.	85
Tabela 16	Resultado do teste de Duncan para o módulo estático de elasticidade para os agregados graúdos de gnaisse.	86
Tabela 17	Análise de variância (ANOVA) dos parâmetros a/c e lote no módulo estático a $0,3f_c$ de elasticidade. Agregado de granito. . .	89

Tabela 18	Análise de variância (ANOVA) dos parâmetros a/c e lote no módulo estático a 0,3fc de elasticidade. Agregado de gnaiss(1)	90
Tabela 19	Análise de variância (ANOVA) dos parâmetros a/c e lote no módulo estático a 0,3fc de elasticidade. Agregado de gnaiss(2)	90
Tabela 20	Teste da normalidade de Kolmogorov-Smirnov dos valores de módulo estático.	91
Tabela 21	Cálculo da probabilidade dos valores experimentais e estimativa dos módulos de elasticidade característicos.	91
Tabela 22	Fração volumétrica e módulo de elasticidade das argamassas e das rochas utilizadas nos concretos.	94
Tabela 23	Comparativo dos módulos de elasticidade obtidos por meio dos modelos micromecânicos bifásicos com os resultados experimentais.	95
Tabela 24	Comparativo dos valores de módulo estático de elasticidade de concretos produzidos com cimento CP-V ARI e CP-IV.	96
Tabela 25	Resumo das variações observadas dos desvios padrões dos módulos de elasticidade (estático e dinâmicos).	102

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI – *American Concrete Institute*
ANOVA – Análise de Variância
ASTM – *American Society for Testing and Materials*
CEB – *Euro-International Committee for Concrete*
fip – *International Federation for Structural Concrete*
CP IV – Cimento *Portland* Tipo IV
CP V-ARI – Cimento *Portland* Tipo V de Alta Resistência Inicial
CTBUH – *Council Tall Buildings and Urban Habitat*
CV – Coeficiente de Variação (em porcentagem)
DS – Difere Significativamente
GPEND – Grupo de Pesquisas em Ensaios Não Destrutivos
GTec – Grupo de Tecnologia em Materiais e Componentes à Base de Cimento *Portland*
LMCC – Laboratório de Materiais de Construção Civil
LVDT – *Linear Variable Differential Transformer*
NANOTEC – Laboratório de Aplicações de Nanotecnologia em Construção Civil
NBR – Norma Brasileira
NM – Norma Mercosul
NDS – Não Difere Significativamente
PPGEC – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina
a/g – relação água/cimento
g/cm³ – gramas por centímetro cúbico
GN1 – gnaisse1 (nomenclatura adotada)
GN2 – gnaisse2 (nomenclatura adotada)
GPa – Giga Pascal
GR – granito (nomenclatura adotada)
kg/dm³ – quilograma por decímetro cúbico
kg/m³ – quilograma por metro cúbico
mm – milímetro
MPa – Mega Pascal
n – número de amostras

SUMÁRIO

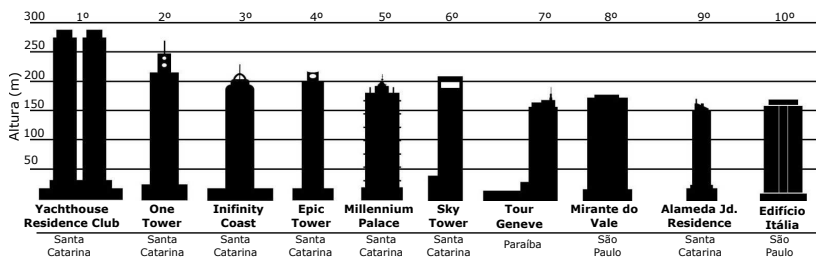
1	INTRODUÇÃO	23
1.1	OBJETIVOS	25
1.1.1	Objetivo geral	25
1.1.2	Objetivos específicos	25
1.2	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	26
2	PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS DO MÓDULO .	27
2.1	CONCEITUANDO MÓDULO DE ELASTICIDADE	27
2.2	DIAGRAMA TENSÃO-DEFORMAÇÃO EM CONCRETOS	29
2.3	TIPOLOGIAS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE	32
2.3.1	Módulo de elasticidade estático a partir do diagrama σ - ϵ	32
2.3.2	Módulo de elasticidade dinâmico	36
2.4	ESTIMATIVAS PARA O MÓDULO DE ELASTICIDADE	38
2.4.1	A partir de equações empíricas	38
2.4.2	Estimativas a partir da mecânica dos compósitos ..	41
2.5	SÍNTESE DO CAPÍTULO	41
3	FATORES INTERVENIENTES NO MÓDULO ..	43
3.1	MATRIZ CIMENTÍCIA E ZONA DE TRANSIÇÃO	44
3.2	AGREGADOS	44
3.2.1	Origem rochosa	44
3.2.2	Fração volumétrica	49
3.2.3	Dimensão máxima característica	50
3.3	PARÂMETROS DE ENSAIO	51
3.3.1	Tamanho do corpo de prova	51
3.3.2	Velocidade ou taxa de aplicação da carga	51
3.3.3	Instrumentação utilizada	52
3.4	PARÂMETROS NOS ENSAIOS DINÂMICOS	55
3.5	SÍNTESE DO CAPÍTULO	55
4	PROGRAMA EXPERIMENTAL	57
4.1	ESCOPO DA PESQUISA	57
4.2	MATERIAIS EMPREGADOS	59
4.2.1	Cimento <i>Portland</i>	60
4.2.2	Agregados miúdos	61
4.2.3	Agregados graúdos	63
4.2.4	Água	65
4.2.5	Aditivo	66

4.3	MÉTODOS DE ENSAIOS	66
4.3.1	Proporções das misturas	67
4.3.2	Parâmetros de produção dos concretos	69
4.3.3	Ensaio no estado fresco	70
4.3.3.1	Ensaio de consistência	70
4.3.3.2	Massa específica do concreto	70
4.3.3.3	Moldagem e cura dos corpos de prova	70
4.3.4	Ensaio no estado endurecido	71
4.3.4.1	Módulo estático de elasticidade	72
4.3.4.2	Módulo dinâmico obtido por meio do pulso ultrassônico ..	72
4.3.4.3	Módulo dinâmico obtido por meio do impulso longitudinal	73
4.4	TRATAMENTO E ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DA- DOS	75
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	77
5.1	RESULTADOS DE ENSAIOS NO ESTADO FRESCO ...	77
5.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	81
5.3	MÓDULO DE ELASTICIDADE	83
5.3.1	Módulo estático de elasticidade a $0,3f_c$	84
5.3.1.1	Efeito do fator ‘agregado graúdo’ no módulo estático.....	85
5.3.1.2	Efeito do fator ‘relação a/c’ no módulo estático.....	87
5.3.1.3	Efeito do fator ‘lote’ no módulo estático.....	89
5.3.1.4	Comparativo com os estimadores de previsão normativos .	92
5.3.1.5	Comparativo com os modelos micromecânicos bifásicos ...	94
5.3.2	Módulo de elasticidade dinâmico	97
5.3.2.1	Módulo dinâmico por meio do pulso ultrassônico	97
5.3.2.2	Módulo dinâmico por meio do impulso longitudinal	99
5.3.3	Comparativo entre ensaios estático e dinâmicos ...	101
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	103
6.1	CONCLUSÕES GERAIS	103
6.2	RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	104
	REFERÊNCIAS	105
	APÊNDICE A – Resultados individuais: determi- nação do módulo estático de elasticidade	114
	APÊNDICE B – Resultados: Determinação do módulo dinâmico por meio do pulso ultrassônico .	118
	APÊNDICE C – Resultados: Determinação do módulo dinâmico por meio do impulso longitudinal	120

1 INTRODUÇÃO

Atualmente têm sido bastante comum, projetos arquitetônicos que envolvem edifícios cada vez mais altos e esbeltos. Em virtude, principalmente, de um plano diretor que estimula a verticalização dos edifícios, é possível afirmar que Balneário Camboriú figura entre as cidades com os maiores arranha-céus do Brasil. De acordo com a base de dados da *Council Tall Buildings and Urban Habitat* (CTBUH (2016)), sete dos dez maiores edifícios do Brasil que estão concluídos ou que estão em fase de conclusão (Figura 1) se encontram na cidade localizada no litoral norte do Estado de Santa Catarina.

Figura 1: Representação das edificações mais altas existentes no Brasil que estão concluída ou em fase de construção



Fonte: Autor, 2017

Esta crescente verticalização demanda soluções cada vez mais arrojadas e desafiadoras para os profissionais de engenharia. Inserido nesse contexto, o grupo GTec/UFSC (Grupo de Tecnologia em Materiais e Componentes à Base de Cimento *Portland* da Universidade Federal de Santa Catarina) têm desenvolvido importantes estudos, especialmente, na linha de concretos especiais para os blocos de fundações de grande porte que esse tipo de empreendimento requer. Podem ser citados os estudos de Tochetto (2010), Graeff (2013), Junckes (2015) e Salum (2016). Além desses desafios, outro aspecto observado pelo grupo, diz respeito à rigidez da estrutura necessária para garantir a robustez dessas edificações.

As deformações das estruturas de concreto armado estão associadas, simplificadamente com: o tamanho da seção transversal, a quantidade de armaduras de tração e compressão das peças estruturais, a seleção dos materiais constituintes do concreto (FRANÇA, 2003) e, neste último aspecto, enfatiza-se que o agregado graúdo tem grande

participação no volume total do concreto exercendo, desta forma, uma importante influência nas diversas propriedades dos concretos (SBRIGHI NETO, 2011). Para diminuir as deformações, o responsável pelo projeto pode, basicamente, aumentar a base e/ou altura dos elementos, alterar a geometria da edificação (aumentando o número de pilares e diminuindo o comprimento do vão), inserir ou aumentar armaduras de protensão ou, ainda, solicitar uma seleção adequada dos materiais que promovam um maior módulo de elasticidade ao concreto (FRANÇA, 2003).

É consenso que, no dimensionamento das estruturas de concreto, adotam-se como premissas as propriedades mecânicas dos materiais e, sem dúvida, a resistência à compressão do concreto é a principal característica utilizada. Em razão disso, muitas vezes o módulo de elasticidade (propriedade que mensura a resistência do material à deformação) acaba sendo apenas uma consequência direta da resistência à compressão especificada em projeto e, dessa forma, o que se tem observado como prática de mercado é a elevação da resistência característica à compressão do concreto para que se melhore a rigidez das edificações (MARCHI, 2011; BORIN; BAUER; FIGUEIREDO, 2012).

A própria norma brasileira de estruturas NBR 6118:2014 induz essa tendência ao prever no item 8.2.8, caso não haja a realização de ensaios experimentais de módulo de elasticidade, que o mesmo seja estimado em função da resistência à compressão e, depois da última revisão, também em função da origem mineralógica do agregado. Entretanto, estudos prévios realizados pelos membros do GTec/UFSC e que motivaram esta pesquisa, mostraram que existem diferenças expressivas entre os resultados obtidos experimentalmente quando comparados com os valores previstos pela equação da norma brasileira.

Variações significativas quanto ao tipo de agregado graúdo também foram encontradas em estudos preliminares. Nesses estudos, foram utilizados agregados graúdos de gnaiss e granito disponíveis na região de Balneário Camboriú e os resultados dos módulos de elasticidade obtidos alcançaram diferenças significativas entre eles (na ordem de 10 GPa) convergindo com resultados apresentados em relatórios produzidos pelo grupo GTec/UFSC e por diversos outros estudos como por exemplo, Beushausen e Dittmer (2015), Biletsky (2016), Lopes et al. (2017). Segundo a NBR 6118:2014, concretos produzidos a partir de granitos e gnaisses (mantidos constantes as proporções e tipos dos demais materiais constituintes do concreto), deveriam apresentar resultados similares de módulo de elasticidade. Com isso, mostra-se que existe uma influência significativa do tipo do agregado graúdo no

comportamento elástico do concreto mas que o uso de equações normativas que estimam o módulo de elasticidade do concreto por meio de sua resistência característica e classificação mineralógica dos agregados graúdos pode não representar o desempenho real do material.

Diante do exposto, observam-se dois pontos principais: (a) que existe uma discrepância entre os valores de módulo de elasticidade obtidos experimentalmente (produzidos com alguns materiais regionais de Santa Catarina) e o estimado pela equação da norma brasileira (NBR 6118:2014) e (b) que esta discrepância é variável quando utilizados diferentes agregados graúdos disponíveis regionalmente, como é o caso de Balneário Camboriú. Tudo isto mostra a importância de se utilizar nos projetos estruturais, principalmente de edifícios altos, valores de módulo de elasticidade do concreto obtidos por meio de ensaios experimentais. No entanto, os valores obtidos experimentalmente, até o presente momento, são fruto de ensaios pontuais e é desconhecida, ainda, qual a variabilidade do módulo de elasticidade ao longo do tempo, quando são adotados o mesmo conjunto de materiais constituintes na confecção do concreto. Por isso, defende-se a ideia que, no dimensionamento das estruturas de concreto, sejam utilizados valores característicos de módulo de elasticidade obtidos de estudos experimentais e, para tal, é necessário que seja determinada qual é a variabilidade deste parâmetro para um dado conjunto de materiais constituintes.

Neste contexto, justifica-se a importância desta dissertação que visa contribuir com o estudo da variabilidade do módulo de elasticidade de concretos produzidos com diferentes tipos de agregados graúdos disponíveis na região próxima a Balneário Camboriú, Santa Catarina.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em estudar a influência de diferentes tipos de agregados graúdos na variabilidade do módulo de elasticidade.

1.1.2 Objetivos específicos

- Analisar a variabilidade do módulo de elasticidade de concretos em diferentes níveis de resistências à compressão;

- Verificar a influência dos agregados graúdos de mesma origem, porém, de diferentes procedências no módulo de elasticidade dos concretos;
- Comparar os resultados obtidos experimentalmente com os estimadores propostos pela norma brasileira NBR 6118:2014 e por códigos internacionais (por exemplo, o ACI 318-14 (2014), o CEB-*fib* Model Code (2010) e o Eurocode 2 (2004));
- Comparar os resultados por meio de ensaio estático com ensaios de módulo dinâmico (obtidos por meio de pulso de velocidade ultrassônica e impulso mecânico longitudinal);

1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação contém seis capítulos, estruturados conforme descrição a seguir.

O Primeiro Capítulo introduz o cenário em que este trabalho está inserido demonstrando a importância do tema escolhido. São apresentados os objetivos, tanto o geral quanto os específicos e, ainda a estrutura da dissertação.

O Segundo Capítulo introduz os principais conceitos e fundamentos relacionados ao módulo de elasticidade aplicados ao concreto. São abordados os diferentes tipos de módulos e como podem ser obtidos. No Capítulo três, são descritos os fatores intervenientes relevantes no comportamento elástico dos concretos.

São apresentados, no Capítulo quatro, os materiais e os métodos utilizados para a realização do programa experimental. São delimitados os parâmetros de controle que limitam o escopo da pesquisa para atingir os objetivos propostos. Ainda, é descrito o procedimento utilizado no tratamento e análise estatística dos dados obtidos.

Os resultados são apresentados e discutidos no Capítulo cinco. São divididos em resultados no estado fresco e no estado endurecido por meio de ensaios estáticos e dinâmicos.

No Capítulo seis, são sintetizados os principais resultados obtidos nesta dissertação decorrentes do programa experimental proposto. Também, neste capítulo, são sugeridos tópicos para estudos futuros.

Finalmente, nos Apêndices são apresentadas as planilhas com os resultados dos ensaios realizados.

2 PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS DO MÓDULO

Este capítulo aborda os principais conceitos relacionados ao assunto módulo de elasticidade aplicado ao concreto. Inicialmente, é introduzido o conceito definindo as nomenclaturas e os termos que são encontrados na literatura. Em seguida, são comentados os diferentes tipos de módulo de elasticidade que podem ser obtidos a partir da curva tensão-deformação ou através de métodos dinâmicos.

Por fim, discute-se a respeito dos modelos de previsão existentes para a obtenção do módulo de elasticidade, que podem ser fundamentados a partir da teoria dos compósitos ou de equações que correlacionam o módulo com alguma outra propriedade do concreto.

2.1 CONCEITUANDO MÓDULO DE ELASTICIDADE

A capacidade que um material apresenta de deformar-se está intimamente relacionada com a sollicitação (por exemplo, a mecânica) imposta sobre o mesmo (VAN VLACK; LAWRENCE, 2003; ASKELAND; PHULÉ, 2008). Em uma escala atômica, as deformações macroscópicas de um material estão associadas com a mudança nas posições dos átomos quando submetidos à aplicação de carga. Essas deformações podem ser: elásticas (reversíveis) ou plásticas (permanentes) (CALLISTER, 2002).

A deformação elástica ocorre quando, após a sollicitação, os átomos retornam às suas posições de origem, isto é, as dimensões geométricas do material não são alteradas e voltam à sua forma original após a retirada da tensão. Do contrário, quando ocorre uma alteração permanente da forma inicial, a deformação é dita como plástica (CALLISTER, 2002; VAN VLACK; LAWRENCE, 2003; ASKELAND; PHULÉ, 2008).

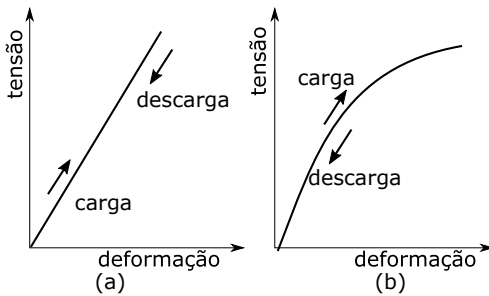
Neville (1997) e Askeland e Phulé (2008) mencionam que a maioria dos materiais utilizados na engenharia, inclusive o concreto, apresentam propriedades elásticas até determinado grau de tensão aplicada. É possível, então, afirmar que a tensão (σ) e deformação produzida (ε) são proporcionais para pequenos níveis de tensões e esta relação pode ser expressa pela equação: $\sigma = E.\varepsilon$. Esta expressão é conhecida como sendo a Lei de Hooke¹ e a inclinação do segmento de reta é definido

¹Robert Hooke. Físico inglês que viveu entre 1635-1703 que estudou a elasticidade dos corpos e observou que existia uma proporcionalidade entre as forças aplicadas e os alongamentos produzidos ($F = k.x$), onde k é denominado como

como módulo de elasticidade E ou módulo de *Young* (geralmente expresso em gigapascal, GPa) e pode ser interpretada como sendo uma medida de rigidez ou resistência do material à deformação elástica (CALLISTER, 2002).

Portanto, quanto maior for o coeficiente angular da reta do gráfico σ - ε (Figura 2-a), maior será a rigidez que o material apresentará, mediante a uma aplicação de tensão, ou seja, maior será o módulo do material (CALLISTER, 2002). Neste contexto, é importante destacar que um material com o comportamento elástico não implica, necessariamente, que apresente um comportamento linear, por exemplo, a Figura 2-b mostra um diagrama tensão-deformação de um material que apresenta um comportamento elástico porém não linear.

Figura 2: Relação esquemática entre tensão-deformação para ciclos de carga e descarga (a) elástico-linear, (b) elástico não-linear



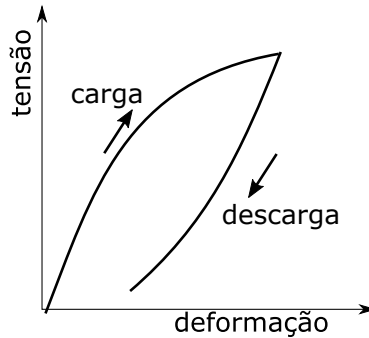
Fonte: Adaptado de Callister (2002)

A linearidade diz respeito à proporcionalidade entre tensão e deformação (diagrama linear), enquanto que, a elasticidade é conceituada pela ausência de deformações permanentes após a aplicação do esforço em qualquer que seja o nível de carregamento (NEVILLE, 1997; VASCONCELOS; GIAMUSSO, 1998). O concreto, de uma maneira geral, não apresenta nem um comportamento linear e nem um comportamento totalmente elástico, isto é, a deformação não é totalmente recuperada no descarregamento, como pode ser observado na curva tensão-deformação típica do concreto na Figura 3 (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Diante disso, Vasconcelos e Giamusso (1998) comentam que seria conveniente a substituição do termo módulo de elasticidade para módulo de deformação. Os autores comentam que, por comodidade, passou-se a designar o termo “módulo de elasticidade” para diagramas

sendo a constante de mola (ou elástica) do material (MONTIJA, 2007).

Figura 3: Relação esquemática entre tensão-deformação para ciclos de carregamento e descarregamento típica do concreto



Fonte: Adaptado de Neville (1997)

curvos e para diagramas com diferentes comportamentos no carregamento e descarregamento, como o caso do concreto.

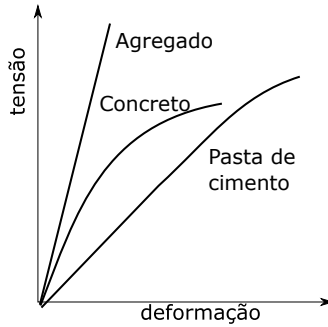
No entanto, de acordo com Shehata (2011), ao longo do tempo, ambas as nomenclaturas (deformação e elasticidade) têm sido aceitas e utilizadas nas redações das normas tanto nacionais quanto internacionais. Esta dissertação, por conveniência e opção, utilizará o termo módulo de elasticidade ao invés de módulo de deformação.

2.2 DIAGRAMA TENSÃO-DEFORMAÇÃO EM CONCRETOS

Mehta e Monteiro (2014) comentam que o comportamento σ - ϵ de um compósito complexo não necessariamente se equivale a soma dos comportamentos de seus constituintes. No caso do concreto e dos materiais que o constituem, o comportamento dos diagramas tensão-deformação podem ser visualizados na Figura 4.

Analisando isoladamente os diagramas tensão-deformação dos constituintes do concreto (agregados e a pasta de cimento hidratada) é possível observar que os mesmos apresentam um comportamento essencialmente linear. Entretanto, o concreto apresenta um comportamento não-linear diferente dos seus componentes (NEVILLE, 1997). O fato do comportamento do concreto não ser equivalente ao dos seus constituintes é atribuído à existência das zonas de transição (ZT) na interface entre o agregado graúdo e a matriz de argamassa que podem acarretar o surgimento de microfissuras nessas regiões, dependentes da tensão

Figura 4: Diferença no comportamento da curva tensão-deformação do concreto e seus constituintes



Fonte: Adaptado de Neville (1997)

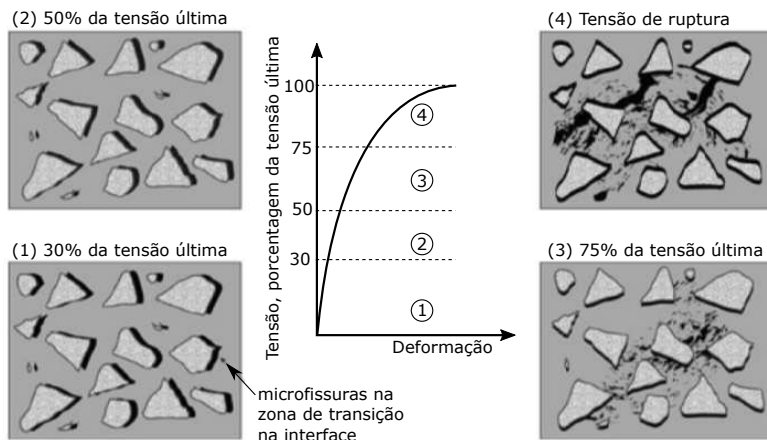
aplicada (NEVILLE, 1997).

Essa microfissuração progressiva do concreto sob a ação de cargas é a explicação da não-linearidade da relação tensão-deformação e provêm de diversos estudos compilados por GLUCKLICH (1968)² *apud* Mehta e Monteiro (2014). A Figura 5 mostra o comportamento (σ - ε) do concreto submetido à carga de compressão uniaxial e o avanço das microfissuras internas que variam em função do nível de tensão aplicada em relação à tensão de ruptura (ou tensão última).

A partir da Figura 5, é possível observar a existência de quatro etapas distintas no que diz respeito ao comportamento tensão-deformação do concreto. Complementando, a Tabela 1 resume a evolução das microfissuras no interior do concreto em função dos níveis de tensão aplicada bem como o comportamento da curva tensão-deformação.

²Glucklich, J., *Proceedings of International Conference on the Structure of Concrete*. Cement and Concret Association, Wexham Springs, Slough, U.K., pg. 176-186, 1968.

Figura 5: Diagrama σ - ϵ do concreto e o avanço das microfissuras no interior do concreto em função da porcentagem de tensão aplicada



Fonte: Mehta e Monteiro (2014)

Tabela 1: Quadro-resumo do avanço da microfissuração e do comportamento da curva σ - ϵ dos concretos em função da porcentagem da tensão última

Estágios	Porcentagem da tensão última	Avanço da microfissuração	Comportamento σ - ϵ
1	Abaixo de 30%	ZT: sistema estável;	Permanece linear;
2	30% - 50%	ZT: parece existir um sistema estável; Matriz: fissurações são insignificantes;	Ocorre um desvio da linearidade;
	50 - 60%	Fissuras começam a se formar na matriz	
3	60% - 75%	ZT: sistema instável; Matriz: aumenta a proliferação e propagação;	Inclinação consideravelmente para a horizontal;
4	Acima de 75%	Rápida propagação de fissuras na ZT e na matriz;	Alcança o nível crítico e o material se deforma até romper

Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2014)

Mehta e Monteiro (2014) ainda mencionam que, deformações diferenciais podem existir entre o agregado graúdo e a matriz cimentícia em razão da diferença entre os módulos de elasticidade. Como consequência, podem existir fissuras na zona de transição na interface antes mesmo da atuação de cargas externas. Principalmente por estes motivos que as normas, geralmente, preconizam tensões limites abaixo

de 50%, para a determinação dos procedimentos de ensaio de módulo de elasticidade. Entretanto, cabe destacar que, a porcentagem de tensão de carregamento não é um senso comum entre as principais normas relativa ao módulo.

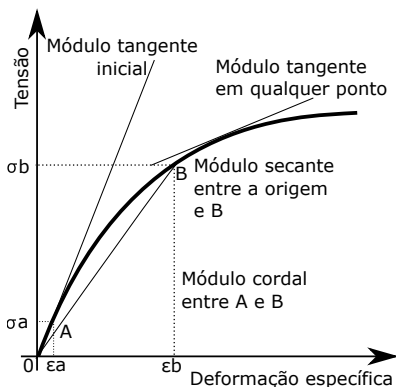
2.3 TIPOLOGIAS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE

A seguir, serão abordadas as tipologias existentes. Shehata (2011) comenta que os módulos de elasticidade são definidos como estáticos, que são aqueles oriundos do diagrama tensão-deformação, e dinâmicos, que são provenientes de ensaios não destrutivos. Ainda, o módulo de elasticidade estático pode ser obtido através por meio de ensaios realizados em corpos de prova sob compressão ou de uma viga biapoiada submetida ao ensaio de flexão (que não será detalhado nesta dissertação).

2.3.1 Módulo de elasticidade estático a partir do diagrama σ - ε

Mehta e Monteiro (2014) citam que existem três tipos de módulos de elasticidade estático provenientes da curva tensão-deformação para os concretos: tangente, secante e o cordal (Figura 6). Os autores atribuem a necessidade dessas definições, ao fato de que o concreto não obedece à Lei de Hooke, tendo como consequência imediata a não linearidade da curva tensão-deformação.

Figura 6: Representação esquemática dos diferentes tipos de módulos de elasticidade



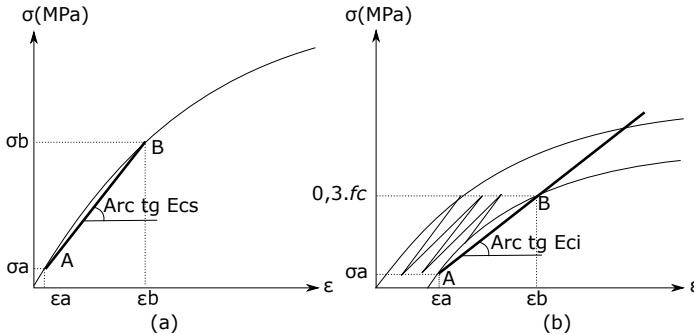
Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2014)

- O *módulo tangente* é o coeficiente angular da reta tangente a qualquer ponto da curva tensão–deformação de compressão. Entretanto, quando não se especifica os pontos da curva, geralmente refere-se à origem e, portanto, ao *módulo tangente inicial*.
- O *módulo secante* é definido pela declividade da reta que liga os pontos da origem até um ponto determinado da curva σ - ε . Geralmente, este ponto corresponde a uma tensão especificada entre 40% e 50% da resistência à compressão de ruptura.
- O *módulo cordal* é a inclinação de uma reta traçada a partir de dois pontos quaisquer da curva tensão-deformação.

Em virtude da ocorrência de perturbações iniciais que podem ser atribuídas a imperfeições nos corpos de prova, instabilidade das máquinas utilizadas no ensaio e, devido à acomodação do corpo de prova no início do carregamento (MARCHI, 2011), a NBR 8522 (2008) – "*Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão*" prevê uma tensão inicial diferente da origem, igual a 0,5 MPa. Dessa maneira, a norma brasileira NBR 8522 (2008) define o *módulo secante* como sendo o coeficiente angular da reta que liga dois pontos na curva σ - ε que correspondem a σ_a e σ_b especificado em projeto (ver Figura 7-a) e o *módulo de elasticidade tangente inicial ou à origem* (considerado equivalente ao módulo secante ou módulo cordal) como sendo o coeficiente angular entre os pontos $\sigma_a = 0,5$ MPa e $\sigma_b = 0,3fc$ (isto é, 30% da resistência de ruptura à compressão) que equivale ao valor

máximo de carregamento estabelecido para o método de ensaio (ver Figura 7-b).

Figura 7: Representação esquemática dos módulos de elasticidade (a) secante e (b) tangente inicial, segundo NBR 8522:2008

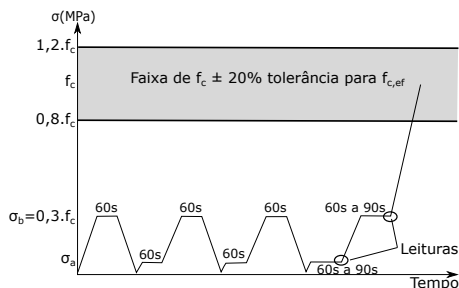


Fonte: Adaptado de NBR 8522 (2008)

Sendo assim, os procedimentos de ensaios para a determinação dos módulos de elasticidade (tangente inicial ou secante) também são diferentes. Basicamente, os métodos se distinguem em virtude da necessidade da realização de pré-ciclos de carregamento para o módulo tangente inicial enquanto que, para o módulo secante não há a necessidade desses pré-ciclos. Neville (1997) *apud* Montija (2007) comenta que, em aproximadamente três ou quatro ciclos de carregamento e descarregamento sucessivos, somente com a redução da carga a tensões mínimas, poderia ser obtida uma reta paralela à origem (tangente inicial), justificado, pela eliminação de parte da deformação plástica do concreto. Montija (2007) ainda comenta, que este conceito fundamentalmente empírico, tornou-se consagrado em muitas recomendações internacionais.

A determinação do módulo de elasticidade tangente inicial consiste, de forma sucinta, na realização de três pré-ciclos entre tensão mínima 0,5 MPa (metodologia A – σ_a tensão fixa) ou deformação mínima 50×10^{-6} mm (metodologia B – deformação fixa) e a tensão máxima de carregamento que corresponde a 30% da resistência de compressão prevista de ruptura, com períodos de estabilização de 60 segundos em cada nível de tensão ou deformação. Por fim, um quarto ciclo é realizado e procedidas as leituras das deformações (NBR 8522, 2008). A representação gráfica para a determinação do módulo está apresentado esquematicamente na Figura 8.

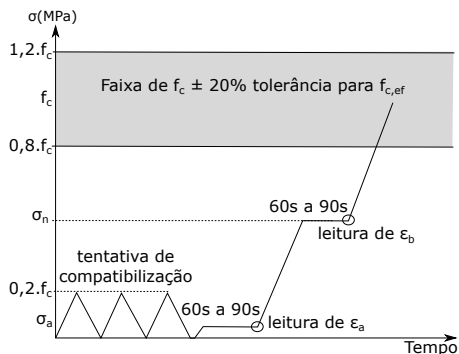
Figura 8: Representação do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade tangente inicial.



Fonte: Adaptado de NBR 8522 (2008)

Já o módulo de elasticidade secante a uma tensão indicada é obtido sem a necessidade da realização dos pré-ciclos de carregamento. Neste método de ensaio, primeiramente é realizado um carregamento de, no máximo, 20% da carga prevista de ruptura com o intuito de verificar as diferenças de deformações registradas nos medidores. Caso exista uma diferença superior a 20% entre eles, o corpo de prova é descarregado e ajustado, girando-o, até que essa diferença não seja maior que os 20%. Finalizada esta etapa de compatibilização das deformações, aplica-se um carregamento com a tensão mínima de 0,5 MPa até a tensão máxima especificada (σ_n), com períodos de estabilização de 60s (NBR 8522, 2008). O esquema pode ser visto na Figura 9.

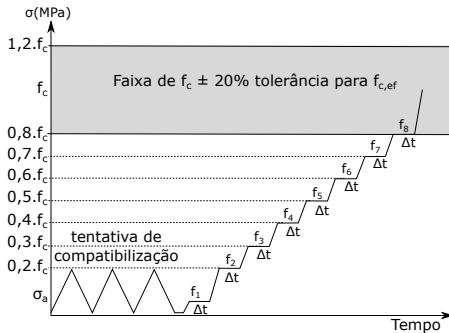
Figura 9: Representação do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade secante a uma tensão indicada (σ_n).



Fonte: Adaptado de NBR 8522 (2008)

Ainda, o anexo informativo da norma NBR 8522 (2008) descreve que, em casos especiais, pode ser necessário o traçado do diagrama $\sigma - \varepsilon$ em patamares de 10% da resistência prevista de ruptura 10.

Figura 10: Representação do carregamento para a determinação do traçado do diagrama tensão-deformação.



Fonte: Adaptado de NBR 8522 (2008)

Para os procedimentos de ensaios supramencionados, os corpos de prova devem ser levados a ruptura e, caso a resistência efetiva ($f_{c,ef}$) apresentar uma diferença superior a $\pm 20\%$ os resultados obtidos desses corpos de prova devem ser descartados.

2.3.2 Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico é determinado através de ensaios não destrutivos. Entre os procedimentos existentes, Shehata (2011) destaca o método que correlaciona o módulo com a frequência natural de vibração (por estímulos) e o método que correlaciona o módulo com a velocidade de propagação de ondas de ultrassom.

O cálculo para obtenção do módulo dinâmico por meio de estímulo consiste, basicamente, na captação de impulsos acústicos (frequência natural de vibração) que são produzidos por meio de impacto no corpo de prova. De posse da frequência, conhecendo as dimensões a massa da amostra, calcula-se o módulo dinâmico. É possível ainda, obter diferentes valores de módulos variando a orientação do impacto e a captação da frequência. Nesse sentido podem ser classificados como: módulos dinâmicos flexionais, longitudinais, ou ainda torcionais.

Os resultados obtidos por meio desse ensaio são dependentes da qualidade da superfície e do interior das amostras a serem ensaiadas.

Pacheco et al. (2014) citam que a retificação dos topos, a presença de impurezas aderidas na superfície, a existência de fissuras ou vazios no interior dos concretos podem influenciar nos resultados, igualmente como ocorre na determinação do módulo estático.

Diógenes et al. (2011) avaliaram o comportamento elástico dos concretos a partir de ensaios dinâmicos. Um dos sistemas estudados para a determinação foi o equipamento desenvolvido pela ATCP – Engenharia Física (instrumentação esta, que será utilizada na obtenção dos valores de módulo dinâmico desta dissertação). Ainda, segundo os autores, uma das vantagens desse sistema consiste que a captação das respostas acústicas não necessita de fixações de sensores nas amostras nem de hardwares adicionais para os computadores.

Os resultados obtidos permitiram concluir que a determinação dos módulos de elasticidade dos concretos obtidos por ensaios dinâmicos foram satisfatórios e superiores aos estáticos em torno de 20%, condizentes com as literaturas consagradas.

Jurowski e Grzeszczyk (2015) também compararam os módulos de elasticidade estáticos e dinâmicos (obtido por meio de respostas acústicas) em concretos autoadensáveis produzidos com diferentes tipos de agregados. Dentre outras observações, os resultados mostraram que os resultados dinâmicos são superiores aos estáticos, no entanto, a diferença entre estes valores variam conforme o tipo e com o volume de agregado graúdo nas misturas. Por exemplo, foram encontradas diferenças entre o módulo estático e o dinâmico distintas de 12% e 20% para concretos produzidos com os diferentes tipos de agregados.

A outra técnica utilizada comentada por Shehata (2011) é a obtenção do módulo dinâmico através da velocidade de propagação de ondas de ultrassom. Basicamente, o método consiste em medir o tempo de percurso das ondas que passam através do corpo de prova, sendo que a faixa de frequência utilizada no ensaio varia de 20kHz a 150kHz e, geralmente, é utilizado para verificação da uniformidade do concreto indicando a presença ou não de vazios.

De acordo com Andreucci (2016), o ensaio ultrassônico é realizado com ondas mecânicas inseridas no meio em inspeção e, sucintamente, podem ser classificadas em três tipos: ondas longitudinais (ou de compressão), ondas transversais (ou de cisalhamento), ondas superficiais (ou de Rayleigh).

Os fatores que afetam a velocidade de pulso ultrassônicos podem ser divididos em duas categorias: fatores intrínsecos e extrínsecos ao material (IRRIGARAY, 2012). Os resultados obtidos dependem, por exemplo, das distâncias e o sentido de propagação do transmissor e do

receptor; da presença de obstáculos (armaduras); das características dos materiais utilizados e, ainda, dos procedimentos de execução dos concretos (NBR 8802, 2013; PACHECO et al., 2014; SOUZA, 2017).

Neville (1997) cita que as tensões aplicadas nas amostras são muito baixas e, por conseguinte, as deformações instantâneas também são e, por este motivo, o módulo dinâmico se assemelha ao módulo tangente inicial. Mehta e Monteiro (2014) comentam que os resultados dos módulos dinâmicos são superiores aos resultados dos módulos estáticos e varia em cerca de 20% a 40% dependendo do nível de resistência à compressão dos concretos.

2.4 ESTIMATIVAS PARA O MÓDULO DE ELASTICIDADE

O módulo de elasticidade, além da realização dos ensaios experimentais citados acima, pode ser estimado considerando o concreto como um compósito constituído de fases ou, também, a partir expressões calculadas que correlacionam o módulo de elasticidade com outras propriedades do concreto e, serão comentadas nos tópicos a seguir.

2.4.1 A partir de equações empíricas

Nunes (2005) cita que é prática comum entre os pesquisadores e as normas a determinação de expressões empíricas para obtenção do módulo de elasticidade. Essas equações são correlações do módulo de elasticidade (tangente ou secante) com alguma propriedade do concreto, geralmente, a resistência à compressão, a massa específica do concreto ou, também, o tipo do agregado graúdo utilizado. As equações de previsão especificadas pela norma brasileira e por códigos internacionais estão descritas na Tabela 2.

A norma brasileira, antes da revisão, somente contemplava o termo f_{ck} em sua equação de previsão e, de acordo com Araújo (2008) correlações do módulo de elasticidade que levam em consideração a resistência à compressão estão sujeitas a erros, que podem ser bastantes grosseiros. Dessa maneira, com a última revisão da NBR 6118 datada de 2014, observou-se uma convergência da norma brasileira de levar em consideração a influência do tipo do agregado graúdo utilizado na produção do concreto, através do termo α_E , assim como já existia na recomendação do CEB-*fib* Model Code. Destaca-se novamente que as normas e as recomendações divergem em relação a diversos parâmetros,

Tabela 2: Expressões para a estimativa do módulo de elasticidade nas principais normas

Norma	item	Expressão	Observações
ABNT NBR 6118:2014	8.2.8	20 MPa < f_{ck} < 50MPa $E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}}$	- tangente à 0,3, f_c ; - arenito, $\alpha_E = 0,7$; - calcário, $\alpha_E = 0,9$;
		55 MPa < f_{ck} < 90 MPa $E_{ci} = 21500 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{1/3}$	- granito e gnáisse, $\alpha_E = 1,0$; - basalto, $\alpha_E = 1,2$; $E_{cs} = \left[0,8 + 0,2 \cdot \left(\frac{f_{ck}}{80} \right) \right] \cdot E_{ci}$
ACI 318-14	19.2.2.1	90 lb/ft ³ < ω_c < 160 lb/ft ³ $E_c = \omega_c^{1,5} \cdot 33 \cdot \sqrt{f_c}$ (E_c em psi)	- secante à 0,45, f_{ci} , conforme comentário no item R.19.2.2.1;
		concretos de massa específica normal $E_c = 57000 \cdot \sqrt{f_c}$ (E_c em psi)	- resultados obtidos nos ensaios podem variar de 80% a 120% dos valores previstos;
CEB- <i>fib</i> Model Code 2010	5.1.7.2	$E_{ci} = 21500 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck} + 8}{10} \right)^{1/3}$ (E_{ci} em MPa)	- tangente à 0,4, f_{ck} ; - α_E em função do agregado;
Eurocode 2: 2004	3.1.3	$E_{cm} = 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3}$ (f_{cm} em MPa)	- secante à 0,4, f_{cm} ; - $E_c = 1,05 \cdot E_{cm}$ (tangente) - resultados variam com agregado

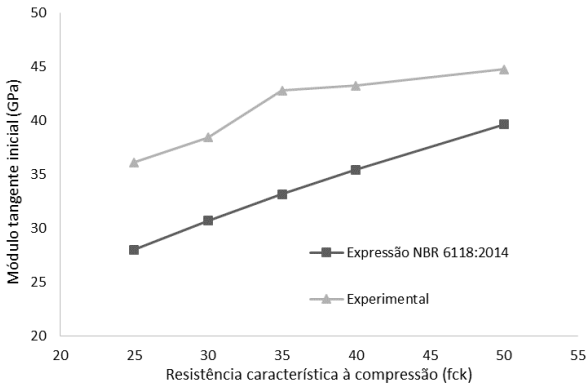
Fonte: Autor, 2018

como por exemplo, a tensão máxima de carregamento, o plano de carregamento (secante ou tangente) e nos parâmetros adotados em suas equações. Por exemplo, o ACI 318-14 leva em consideração a massa específica do concreto enquanto que as demais levam em consideração do tipo de agregado.

Um dos estudos que motivaram esta dissertação, consiste no relatório técnico realizado por Graeff e Prudêncio Jr. (2016) que avaliaram o módulo de elasticidade para diferentes classes de resistências e compararam os resultados obtidos com o estimador proposto pela NBR 6118:2014. Foram adotadas cinco classes de resistência (20, 30, 35, 40 e 50 MPa) e os concretos foram produzidos, preparados e entregues por uma empresa prestadora do serviço de concretagem da região de Santa Catarina e, em seguida, foi procedido com os ensaios de módulo de elasticidade de acordo com a (NBR 8522, 2008). Como pode ser visualizado na Figura 11, os autores observaram (dentro das limitações do estudo realizado nos quais ressalta-se que foram utilizados agregados graúdos de gnáisse de Santa Catarina) uma discrepância considerável, na ordem de 20%, entre os valores obtidos experimentalmente com os resultados estimados pela equação da norma brasileira, com exceção para a classe de 50 MPa, onde a diferença percentual observada foi um pouco menor.

A partir dos resultados obtidos, também é possível observar que

Figura 11: Estudo comparativo do módulo de elasticidade obtido experimentalmente e por meio da equação da norma NBR 6118



Fonte: Adaptado de Graeff e Prudêncio Jr. (2016)

a taxa de crescimento do valor do módulo de elasticidade em função da resistência à compressão obtida experimentalmente apresenta um comportamento diferente da equação proposta. Por exemplo, a expectativa de crescimento do módulo de elasticidade do concreto aumentando de um f_{ck} 35 MPa para um f_{ck} 50 MPa (com $\alpha_E=1,0$ para agregado de granito) segundo proposto pela NBR 6118:2014, deveria ser de aproximadamente 19,5% (30,7 GPa para 39,6 GPa), enquanto que, o crescimento experimental obtido foi de 4,6% (42,8 GPa para 44,7 GPa).

Lopes et al. (2017) também observaram uma sensível diferença nas taxas de crescimento entre os resultados experimentais obtidos e os estimados pela norma NBR 6118 (2014). Os estudos consistiram, basicamente em concretos que compreendem a faixa de resistência de 15 MPa a 50 MPa. Sucintamente, os autores concluem que, nas baixas resistências, os valores experimentais são superiores aos obtidos pela norma e à medida aumenta a resistência do concreto foram observados que os experimentais foram inferiores aos calculados pela equação da norma.

Nesse contexto, fica evidente a necessidade de maiores estudos pois, a prática atual do mercado da construção civil em aumentar a resistência à compressão dos concretos com objetivo de atender o requisito de módulo de elasticidade nem sempre é atendida.

2.4.2 Estimativas a partir da mecânica dos compósitos

Resumidamente, esses modelos teóricos são baseados nas frações volumétricas e nos módulos de elasticidade das fases constituintes do concreto. Marchi (2011) comenta que a principal dificuldade desses modelos está relacionada com a necessidade de se conhecer as propriedades das fases previamente. Alguns dos principais pesquisadores que contribuíram com esse método de determinação do módulo de elasticidade foram: W. Voigt, A. Reuss, Hirsch, Hansen, Counto, dentre outros (MONTIJA, 2007; BARBOSA, 2010).

Em um relatório para a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) em 1998, Helene estudou diversos modelos de previsão, dentre eles, o modelo em paralelo (W. Voigt) e o modelo em série (A. Reuss). Na pesquisa, foram admitidos módulos de elasticidade para a pasta e agregado graúdo, de maneira que fosse possível estimar o módulo pelos modelos e, posteriormente, comparado com os valores obtidos experimentalmente. O autor observa que, para os concretos analisados, o modelo de Voigt superestima os valores de módulo. Por exemplo, o resultado obtido da mistura 1:5 de consistência plástica foi de 32,3 GPa. Os modelos de previsão, resultaram em módulo iguais a 48,5 GPa (paralelo) e 33,7 GPa (série) (HELENE, 1998).



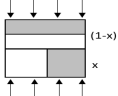


As expressões propostas pelos autores podem ser visualizadas na Tabela 3 abaixo, onde E representa o módulo de elasticidade, f as frações volumétricas das fases constituintes e x o grau de aderência entre as fases (nesta dissertação, adotado igual a 0,5).

2.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Buscou-se com este capítulo, primeiramente, conceituar módulo de elasticidade citando os termos que são sinônimos (módulo de *Young* e módulo de deformação) e que também podem ser utilizados para designar o comportamento elástico dos concretos. Foi comentado à respeito das diferentes maneiras para a obtenção do módulo de elasticidade que podem ser, estáticos (a partir do diagrama tensão-deformação: tangentes ou secantes) e dinâmicos (por frequência natural de vibração ou por velocidade das ondas de ultrassom).

Sempre que pertinente, foi comentado à respeito das normalizações nacionais e dos principais códigos internacionais, enfatizando que não são consensuais entre si em diversos aspectos, como, por exemplo, a porcentagem da tensão aplicada, o plano de carregamento (se é

Tabela 3: Formulações matemáticas para estimar o módulo de elasticidade a partir da mecânica dos compósitos.

Modelo	Esquema	Expressão
Voigt		$E_c = E_1 \cdot f_1 + E_2 \cdot f_2$
Reuss		$\frac{1}{E_c} = \frac{f_1}{E_1} + \frac{f_2}{E_2}$
Hirsch		$\frac{1}{E_c} = (1 - x) \left[\frac{f_1}{E_1} + \frac{f_2}{E_2} \right] + x \left[\frac{1}{f_1 E_1 + f_2 E_2} \right]$
Hansen		$E_c = \left[\frac{E_1 \cdot f_1 + E_2 \cdot (1 + f_2)}{E_2 \cdot f_1 + E_1 \cdot (1 + f_2)} \right]$
Counto		$\frac{1}{E_c} = \frac{1 - \sqrt{f_2}}{E_1} + \frac{1}{\left(\frac{1 - \sqrt{f_2}}{\sqrt{f_2}} \right) E_1 + E_2}$

Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2014)

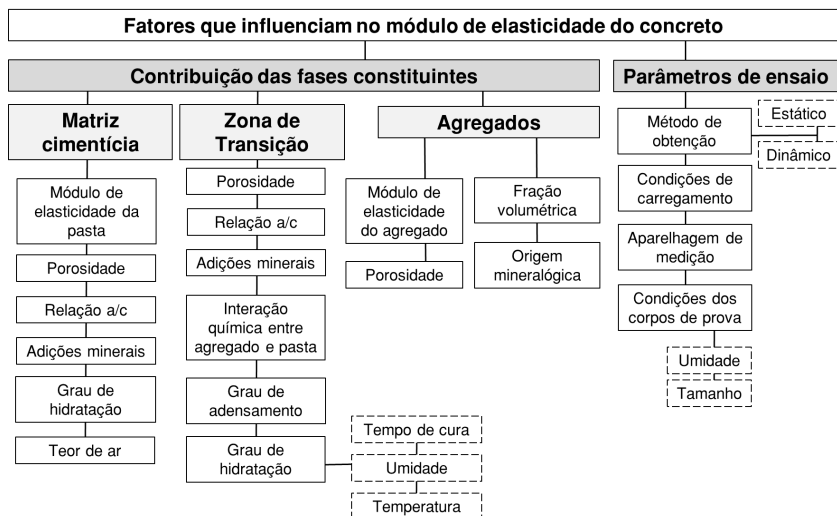
secante ou tangente) e dos parâmetros adotados nas equações de predições. Assim, este capítulo, de maneira concisa, contemplou os princípios fundamentais sobre o comportamento elástico dos concretos que darão subsídios para que se possa entender a respeito dos parâmetros influenciadores nos resultados do módulo de elasticidade.

3 FATORES INTERVENIENTES NO MÓDULO

Mehta e Monteiro (2014) citam que um conjunto de fatores determinam o comportamento elástico de um compósito. No caso do concreto, esses fatores podem estar relacionados: à matriz cimentícia, às zonas de transições e aos agregados e, da mesma forma que ocorre na resistência à compressão, o módulo de elasticidade também é influenciado pela porosidade das fases constituintes. Além dos parâmetros intrínsecos ao material, Shehata (2011) e Battagin (2007) complementam que parâmetros de ensaio como, as condições relativas aos corpos de prova e aos procedimentos experimentais também influenciam diretamente na obtenção dos valores do módulo de elasticidade.

Os fatores supramencionados englobam um conjunto de outros parâmetros que também afetam o comportamento elástico dos concretos. A Figura 12 resume os principais fatores os quais serão detalhados nos itens a seguir.

Figura 12: Contribuição dos parâmetros intrínsecos (material) e extrínsecos (ensaios) que afetam o módulo de elasticidade do concreto



Fonte: Adaptado de Battagin (2007) e Mehta e Monteiro (2014)

3.1 MATRIZ CIMENTÍCIA E ZONA DE TRANSIÇÃO

Mehta e Monteiro (2014) relatam que o módulo de elasticidade da matriz da pasta de cimento é determinado pela sua porosidade que, por sua vez, é governado pela relação a/c , teor de ar, adições minerais e grau de hidratação do cimento. Por exemplo, comenta-se o estudo realizado por Yildirim e Sengul (2011) que observaram, como esperado, que o aumento da relação a/c promove um aumento na porosidade e um enfraquecimento da zona de transição, que por sua vez, alteram a curvatura do diagrama tensão-deformação e, conseqüentemente, resultam em menores valores para o módulo de elasticidade. Para relações a/c próximas a 0,3, os valores de módulo obtidos estiveram entre 40 e 50 GPa enquanto que, para relações a/c próximas a 0,8 os resultados estiveram entre 20 e 30 GPa (YILDIRIM; SENGUL, 2011).

Silva e Pelisser (2005) estudaram a influência do tipo de cimento no módulo de elasticidade. Na composição dos concretos, foram utilizados o cimento *Portland* tipo IV e o tipo V. Os autores observaram, uma tendência similar a que ocorre na resistência à compressão, isto é, os resultados de módulo de elasticidade foram superiores para os concretos confeccionados com cimento CP IV em comparação com o concreto produzidos de cimento CP V em idades superiores a 28 dias.

3.2 AGREGADOS

É fato que, além da vantagem econômica que os agregados graúdos apresentam, vantagens técnicas importantes que melhoram o desempenho dos concretos, tais como, resistência mecânica, durabilidade e estabilidade dimensional (SBRIGHI NETO, 2011) também ocorrem. Assim como diversos autores que serão citados ao longo dessa pesquisa, estudos prévios e relatórios técnicos desenvolvidos pelos membros do GTec/UFSC mostraram que diferentes tipos de agregados na composição dos concretos promovem diferenças significativas nos valores de módulo de elasticidade. Nesse contexto, serão investigados os principais efeitos do agregado graúdo no módulo de elasticidade.

3.2.1 Origem rochosa

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), a porosidade presente nos mais variados tipos dos agregados parece ser a característica mais

importante no que tange ao comportamento do agregado no módulo de elasticidade. Isto se deve, principalmente, pelo fato de que a rigidez do agregado é influenciada pela porosidade e que esta determina a capacidade do mesmo em impedir ou não a deformação da matriz. O módulo de elasticidade das rochas tipicamente utilizadas na construção civil e algumas de suas propriedades podem ser vistas na Tabela 4.

Tabela 4: Propriedades típicas das rochas utilizadas na construção civil

Tipo de Rocha	Massa Específica (kg/m³)	Resistência à Compressão (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Basalto	2750 – 2950	180 – 280	60 – 100
Quartzito	2550 – 2700	130 – 400	50 – 100
Gnaisse	2550 – 2700	100 – 240	40 – 70
Granito	2600 – 2700	100 – 240	40 – 70
Calcário	2600 – 2800	90 – 200	30 – 50
Xisto	2300 – 2500	100 – 180	25 – 40
Arenito	2200 – 2400	50 – 150	20 – 40

Fonte: Adaptado de SBRIGHI NETO (2011)

Observa-se, a partir da Tabela 4, a variabilidade existente nas propriedades mecânicas das rochas, evidenciando a tendência de que concretos com diferentes tipos de agregados apresentem comportamentos diferenciados no que diz respeito ao módulo de elasticidade. Sendo assim, diversos pesquisadores, ao longo dos últimos anos, têm estudado a influência da origem dos agregados no comportamento do módulo de elasticidade dos concretos.

Os resultados da bibliografia consultada, na grande maioria, evidenciaram a influência significativa do tipo do agregado no módulo de elasticidade, independente se o concreto estudado foi convencional, autoadensável ou de alta resistência. Basicamente, as pesquisas mostraram que agregados com baixa porosidade (mais densos) produzem concretos com módulo mais elevados quando comparados com agregados alta porosidade (menos densos). Nesse contexto, a Tabela 5 apresenta uma descrição sucinta das referências consultadas que estudaram, dentre outros parâmetros, a influência de diversos tipos de agregados graúdos em diferentes tipos de concreto.

Tabela 5: Quadro-resumo de estudos que avaliaram a influência do tipo de agregado graúdo no comportamento elástico dos concretos

Descrição sucinta dos estudos	Síntese dos resultados
Mendes (2002) estudou a influência do diabásio, calcário e granito disponíveis na região metropolitana de Curitiba em Concretos de Alto Desempenho.	Concreto produzido com granito apresentou maiores valores de resistência, entretanto, menores valores de módulo. Concreto com diabásio apresentou menor resistência, porém, maior módulo. O uso de equações a partir da resistência não é apropriado para estimar o módulo.
Kliszczewicz e Ajdukiewicz (2002) estudaram a influência do granito, basalto e seixo em concretos com diferentes resistências características à compressão.	Tipo de agregado graúdo influência significativamente no módulo de elasticidade. Em comparação com o modelo internacional, os valores experimentais foram em 13% superiores para os concretos com basaltos e 21% inferiores para os concretos com granito.
Beshr, Almusallam e Maslehuddin (2003) estudaram o efeito do tipo de agregado graúdo nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência.	Pôde-se concluir que o tipo de agregado graúdo é mais significante no módulo de elasticidade quando comparado com a resistência à compressão.
Nunes (2005) investigou a adequação das expressões da norma brasileira (6118:2003) nas propriedades mecânicas dos concretos produzidos no Rio de Janeiro.	Não foram observadas diferenças significativas nos valores de módulo de elasticidade para os concretos produzidos com agregados graúdos de sienito e gnaisse. Os resultados de norma superestimam os valores experimentais de módulo de elasticidade.
Alhadas (2008) estudou a influência diferentes tipos de agregado graúdo nas propriedades mecânicas do concreto produzidos em Minas Gerais.	Os resultados obtidos demonstraram que o tipo de agregado graúdo exerceu influência significativa tanto no módulo de elasticidade quanto na resistência à compressão dos concretos avaliados.

Continua na página seguinte

Tabela 5 – *Continuação da tabela anterior*

Descrição sucinta dos estudos	Síntese dos resultados
Barbosa (2009) estudou a influência dos agregados graúdos provenientes da região de Goiânia na resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto.	O fator agregado graúdo influenciou mais significativamente que o fator resistência à compressão. A norma supe-restima os valores de módulo para concre-tos com granulito e micaxisto, no en-tanto, para basalto os valores são infe-riores aos obtidos experimentalmente.
Gagliardo, Vidal e Ga-gliardo (2010) utilizaram agregados graúdos de ba-salto e de gnaisse para veri-ficar a influência no módulo de elasticidade dos concre-tos.	Concretos com basalto apresentaram maiores valores de módulo comparados com concretos produzidos com gnaisses. Os valores experimentais são supe-riores (cerca de 20%) para os concretos com agregados de basaltos e inferiores (cerca de 3%) para os de gnaisse quando comparados com o valor estimado pela norma NBR 6118:2003.
Pompeu Neto, Oliveira e Ramos (2011) avaliaram o módulo de elasticidade de concretos de alta resistên-cia produzidos com diferen-tes tipos de agregados graú-dos.	O módulo de elasticidade foi influenci-ado significativamente pela origem do agregado graúdo utilizado. Foram ob-servados valores de módulo superiores para os concretos produzidos com agre-gados graúdos de basalto (em torno de 20%) quando comparado com os concre-tos de granito.
Yildirim e Sengul (2011) os autores avaliaram o módulo de elasticidade de concre-tos utilizando diferentes ti-pos de agregados graúdos disponíveis na região de Is-tambul, Turquia.	Os concretos produzidos agregados de calcário apresentaram valores inferiores (em cerca de 6%) quando comparados com os concretos produzidos com ou-tros tipos de agregados. Os códigos internacionais subestimaram os valores de módulo de elasticidade dos concretos com resistências convencionais.

Continua na página seguinte

Tabela 5 – *Continuação da tabela anterior*

Descrição sucinta dos estudos	Síntese dos resultados
Uysal (2012) estudou a influência do basalto, mármore, dolomito, calcário e arenito nas propriedades do concreto autoadensável.	O concreto produzido com agregado de basalto apresentou valores superiores (em torno de 15%) para os módulos de elasticidade. Foi possível concluir que o tipo de agregado graúdo é mais significativo no módulo de elasticidade quando comparado com a resistência à compressão.
Arruda (2013) estudou a influência do basalto e dolomito provenientes da região do triângulo Mineiro de concretos convencionais em diferentes níveis de resistência.	Os resultados de módulo dos concretos produzidos com dolomito foram inferiores, em cerca de 6%, quando comparados com os valores dos concretos produzidos com basalto. Os valores estimados pela norma foram inferiores aos obtidos experimentalmente.
Beushausen e Dittmer (2015) estudaram a influência do andesito e do granito disponíveis em regiões da África do Sul em concretos com distintas resistências característica à compressão.	Concretos produzidos com agregados de andesito apresentaram diferenças bastantes expressivas (de até 50%) quando comparados com os concretos produzidos com agregados de granito para os diferentes níveis de resistência estudados.
Bilesky (2016) estudou a influência da natureza petrográfica dos agregados graúdos disponíveis no Estado de São Paulo.	Valores de módulo do concreto com agregado de calcário foram superiores (em torno de 7%) aos valores de módulo com agregado de granito, contrário aos modelos da norma brasileira NBR 6118:2014.
Lopes et al. (2017) avaliaram concretos convencionais produzidos com agregados graúdos de basalto, granito e gnaisse.	O módulo dos concretos produzidos com basalto foram superiores em cerca de 8% para concretos produzidos com agregados de gnaisse e de 27% para os concretos produzidos com granito para as mesmas relações a/c.

Continua na página seguinte

Tabela 5 – *Continuação da tabela anterior*

Descrição sucinta dos estudos	Síntese dos resultados
Piasta, Góra e Budzyński (2017) estudaram concretos convencionais e de alto desempenho produzidos com agregados de basalto, granito, dolomito e quartzito	Os maiores valores de módulos foram observados nos concretos com agregados de dolomitos. Os resultados obtidos experimentalmente foram divergentes quando comparado com o código internacional.

Fonte: Autor, 2018

Cita-se como exemplo, o estudo realizado por Beushausen e Dittmer (2015) que avaliaram o comportamento elástico do concreto de variadas resistências à compressão utilizando agregados graúdos de andesito e granito disponíveis na África do Sul. Os resultados obtidos do módulo de elasticidade para a resistência à compressão de 30 MPa e 60 MPa dos concretos produzidos com agregados graúdos de andesito foram iguais a 31,8 GPa e 44,8 GPa, respectivamente. Já para os concretos produzidos com agregados de granito os resultados obtidos foram de 23,8 GPa e 27,0 GPa. Fica evidente, mais uma vez, a importância dos agregados nos valores de módulo de elasticidade dos concretos, demonstrando que pode não ser uma medida eficaz se aumentar a resistência à compressão com vistas a se obter um módulo de elasticidade bem mais elevado.

3.2.2 Fração volumétrica

Em relação ao teor de agregados, Melo Neto e Helene (2002) relatam duas situações distintas no comportamento do módulo de elasticidade. Na primeira, observaram uma diminuição nos valores do módulo quando fixaram o parâmetro abatimento e aumentaram o teor de agregados. Por exemplo, no traço 1:4 (cimento:materiais secos) o módulo de elasticidade foi em torno de 25,5 GPa enquanto que, no traço 1:6 o módulo foi de 20,9 GPa. Na outra situação, os autores observaram um aumento no módulo de elasticidade do concreto quando aumentaram a fração de agregado com uma relação a/c constante, e dessa maneira, o resultado do módulo foi de 16,4 GPa para o traço 1:4 e de 29,0 GPa para o traço 1:6. A primeira situação é explicado pelo fato de que é necessário aumentar a relação a/c para manter fixo o abatimento, acarretando numa matriz cimentícia mais porosa e, conseqüentemente, em

um menor módulo de elasticidade, enquanto que, o segundo comportamento é justificado pelo fato de que ocorre um aumento na fração de agregado graúdo que apresenta um módulo de elasticidade superior ao módulo da pasta de cimento (MELO NETO; HELENE, 2002).

3.2.3 Dimensão máxima característica

Yildirim e Sengul (2011) avaliaram o efeito da dimensão máxima dos agregados da região de Istambul, Turquia, no comportamento do módulo de elasticidade. Neste estudo, os autores analisaram misturas com agregados de calcário com dimensão máxima de 32, 16, 8 e 4mm e observaram que, para as misturas produzidas com agregados com dimensão de 32, 16 e 8mm não ocorreram mudanças substanciais no módulo de elasticidade (por exemplo, para relações a/c em torno de 0,55 os resultados obtidos do módulo variaram de 41 a 44 GPa), no entanto, para as misturas com agregados de 4mm o resultado obtido para o módulo foi cerca de 35 GPa. Os autores justificam que, para uma mesma fração volumétrica de agregado, a diminuição da dimensão máxima do agregado aumenta a área superficial total e, conseqüentemente, maiores regiões de interface do agregado com a matriz de cimento e, como resultado, observa-se a tendência de valores menores para o módulo de elasticidade quanto menor for a dimensão do agregado.

Parte dos estudos de Rohden (2011) também consistiu em verificar a influência do parâmetro dimensão máxima característica dos agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Porto Alegre/RS no módulo de elasticidade dos concretos. Sucintamente, foram confeccionados concretos de alto desempenho com agregados graúdos do tipo de basalto com distintas resistências à compressão da rocha-mãe, com diferentes consumos de água por m^3 e, ainda, com cinco níveis de dimensão máxima característica: 6,3, 9,5, 12,5, 19 e 25mm. Os resultados obtidos estiveram na faixa de 40 GPa independente do fator dimensão e, desta forma, semelhantemente ao estudado por Yildirim e Sengul (2011), o autor observou que não houve diferença significativa estatisticamente nos valores do módulo de elasticidade dos concretos de alto desempenho em função das dimensões máximas característica avaliadas.

3.3 PARÂMETROS DE ENSAIO

Como já mencionado anteriormente, Shehata (2011) descreve que existem parâmetros extrínsecos ao concreto que também influenciam nos resultados do módulo de elasticidade e , basicamente, podem ser relativos aos corpos de prova e relativos aos procedimentos de ensaio tanto para obtenção do módulo estático quanto dinâmico.

3.3.1 Tamanho do corpo de prova

A NBR 8522 (2008) em vigor atualmente, recomenda que os corpos de prova sejam cilíndricos, com diâmetro equivalente a 150mm e altura igual a 300mm. No entanto, a norma permite ainda, que sejam utilizadas outras dimensões, desde que cumpram os requisitos das normas de moldagem NBR 5738 (2008) ou de testemunho extraído NBR 7680 (2015), de forma a garantir que a proporção entre comprimento/diâmetro (L/d) seja igual a dois e, ainda, orienta que o diâmetro máximo do agregado graúdo deve ser menor ou inferior a 1/4 do diâmetro do corpo de prova.

O estudo de Cupertino et al. (2009) consistiu em uma análise dos resultados obtidos no XV Programa Interlaboratorial de Ensaio em Concreto Endurecido, sob a coordenação do Laboratório de Concreto de FURNAS. Em parte do estudo, os autores buscaram verificar as possíveis diferenças entre os resultados do módulo de elasticidade de concretos moldados em corpos de prova de tamanho 100 x 200 mm e 150x300mm. Para os concretos moldados em corpos de prova com dimensão de 100 x 200 mm, a média obtida foi igual a 30,2 GPa e um desvio-padrão de 3,5 GPa e, para os moldados com dimensão de 150 x 300 mm a média do módulo obtida foi de 28,6 GPa e desvio-padrão de 3,0 GPa e, de acordo com os autores, o fator dimensão geométrica dos corpos de prova, não apresentaram diferenças significativas após o tratamento estatístico.

3.3.2 Velocidade ou taxa de aplicação da carga

Mehta e Monteiro (2014) comentam que a taxa de propagação das fissuras e, conseqüentemente, o grau de não-linearidade do diagrama tensão-deformação dependem da velocidade ou da taxa de aplicação da carga. Dessa forma, quanto maior for a velocidade da aplica-

ção da carga, menor será a capacidade de propagação das microfissuras e acomodações microestruturais das deformações o que resultará em um módulo de elasticidade maior (MONTIJA, 2007).

Nesse contexto, as normas especificam uma faixa de velocidade para a determinação do módulo de elasticidade. Entretanto, o que se observa é que não há um consenso entre as mesmas. Por exemplo, a norma brasileira especifica a velocidade de ensaio em $0,45 \pm 0,15$ MPa/s, enquanto o CEB-*fib* Model Code 2010 especifica em $0,6 \pm 0,4$ MPa/s e isso, por si só e em conjunto com os demais parâmetros normativos já mencionados, impossibilita a comparação entre os resultados de módulo de elasticidade obtidos por meio de normas distintas (MONTIJA, 2007).

3.3.3 Instrumentação utilizada

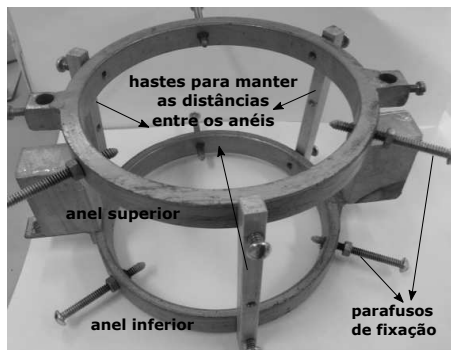
A NBR 8522 (2008) não especifica um procedimento de instrumentação e de medição de deformação. Entretanto, determina que esses mecanismos devam apresentar resolução de 1.10^{-3} mm e erro relativo máximo inferior a 1%. Nesse contexto, se faz necessário primeiramente conhecer os tipos de medidores bem como o princípio básico de funcionamento para, posteriormente, verificar a influência no módulo de elasticidade.

Inicialmente, pôde-se citar o compressômetro (Figura 13) que, basicamente, consiste num aparato que ancora os medidores para as leituras de deformação da amostra. Pode estar dotado, ainda, de um outro dispositivo complementar denominado expansômetro que é utilizado para a medição da deformação transversal do corpo de prova (utilizada na determinação do coeficiente de Poisson do concreto) (MONTIJA, 2007). O compressômetro pode ser dividido:

- nos anéis, ou garras (inferior e superior) que sustentam o(s) medidor(es) de deformação(ões);
- nos parafusos que garantem a fixação do aparato ao corpo de prova e;
- nas hastes que determinam e mantêm a distância entre os anéis o que, equivale na prática, ao comprimento inicial (também denominadas de bases de medida);

Especificamente em relação aos medidores de deformação, de acordo com Almeida (2004), um dispositivo que é capaz de receber

Figura 13: Detalhe do compressômetro para dois medidores de deformação confeccionado pela equipe GTec/UFSC





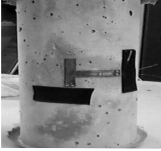

Fonte: Autor, 2018

um sinal, seja ele mecânico, elétrico, acústico ou óptico e, processá-lo em outro para controlar processos físicos e/ou realizar medições é chamado de transdutor e os mais utilizados na determinação do módulo de elasticidade são os relógios comparadores, os transdutores elétricos de deslocamento indutivos (LVDT, *linear variable differential transformer*), os transdutores (ou extensômetros) elétricos resistivos do tipo *strain gages* de colagem superficial ou ainda, sua variação, denominado de *clip gage* de fixação externa. A Tabela 6 a seguir, resume os tipos de medidores de deformação e o princípio básico de funcionamento de cada um.

Araújo, Guimarães e Geyer (2012) estudaram a influência dos medidores de deformação no módulo de elasticidade. Sucintamente, foram analisados como instrumentos de medição o compressômetro com dois relógios comparadores acoplados, o transdutor elétrico de colagem superficial (*strain gage*), o de fixação externa (*clip gage*) e, ainda, o LVDT.

Os autores analisaram os resultados obtidos estatisticamente e verificaram que o tipo de medidor influencia no módulo de elasticidade. As leituras com os menores coeficientes de variação foram obtidos com os medidores elétricos do tipo *strain gage* (coef. de variação = 11%) e o *clip gage* (coef. de variação = 14,4%) contra 16,1% para o compressômetro mecânico e 18,2% para o LVDT, além de uma maior facilidade de operação e uma menor influência externa por parte do operador (ARAÚJO; GUIMARÃES; GEYER, 2012). Cabe salientar, ainda, que o menor resultado de módulo foi obtido utilizando o medidor do tipo

Tabela 6: Descrição dos tipos de medidores de deformação comumente utilizados no ensaio de módulo de elasticidade de concretos

Medidor	Princípio básico de funcionamento	Ilustração
Relógio comparador	Consiste na reação de um pino que fica em contato com um suporte fixado no compressômetro e, mediante aplicação de carregamento no corpo de prova ocorre um deslocamento no pino sinalizando uma medida de deformação, geralmente em milímetro, que corresponde a uma leitura de deformação analógica ou digital, dependendo do modelo utilizado.	
LVDT	Transdutores elétricos de deslocamento indutivos, compreende, basicamente, em uma corrente elétrica induzindo uma diferença de forças eletromotrizes em bobinas montadas axialmente no interior do dispositivo devendo estar acoplado a um sistema de aquisição de dados.	
<i>Strain gages</i>	Geralmente, são colados na superfície dos corpos de prova. Em síntese, são constituídos de filamentos condutores metálicos isolados e aderidos na superfície do material e, com a aplicação de carga ocorre a deformação do corpo de prova que, por sua vez, gera uma diferença de potencial elétrico nesses filamentos transformando-os em sinais elétricos que são acondicionadas e, posteriormente, relacionadas com medidas de deformação.	
<i>Clip gage</i>	É uma variação do <i>strain gage</i> de superfície. Resumidamente, ao invés de colado na superfície do corpo de prova, o <i>strain gage</i> é colado na extremidade de uma lâmina metálica, que por sua vez, está ancorada num aparato fixado no corpo de prova e, dessa forma, a leitura de deformação do material será inferida pelo <i>strain gage</i> que é dependente da rotação e do braço de alavanca da lâmina	

Fonte: Adaptado de Almeida (2004), Montija (2007), Araújo (2011), Arruda (2013)

LVDT (19,8 GPa e, os demais medidores obtiveram valores na ordem de 27,0 GPa), apresentando também o maior coeficiente de variação. Sendo assim, o LVDT foi considerado, pelos autores, o menos preciso dos medidores analisados e o mais difícil de ser utilizado devido, principalmente, à necessidade constante de manutenção e pela dificuldade de calibração do dispositivo.

Por fim, ainda se tratando da instrumentação utilizada na determinação do módulo cabe destacar, a influência da máquina utilizada no ensaio. Marchi (2011) cita que quanto maior a capacidade nominal de carga das máquinas maior é a dificuldade para alcançar níveis de tensões e/ou deformações baixos o suficiente para a realização do ensaio de módulo.

3.4 PARÂMETROS NOS ENSAIOS DINÂMICOS

Do mesmo modo como ocorre no método de ensaio estático e como já mencionado anteriormente, fatores intrínsecos e extrínsecos afetam os parâmetros para obtenção dos módulos dinâmicos. Os fatores externos que influenciam na obtenção da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas e nas frequências de vibração podem ser citados abaixo (IRRIGARAY, 2012; PACHECO et al., 2014; SOUZA, 2017):

- Umidade da amostra;
- Vibração do meio;
- Meio a que a estrutura exposta;
- Temperatura ambiente;
- Largura da peça a ser ensaiada;
- Modo de acoplamento dos transdutores na superfície (para o ensaio de ultrassom);
- Orientação do impacto e captação da frequência natural de vibração (para o ensaio por meio de impulso);
- Condição da superfície a ser testada;

3.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Como visto até o momento, inúmeros fatores afetam o comportamento elástico do concreto. Podem estar relacionados à parâmetros intrínsecos aos próprios materiais constituintes e/ou à condições e procedimentos adotados durante os ensaios e, desta forma, se torna bastante complexo, restringir e quantificar a parcela de influência de cada um.

Neste capítulo buscou-se averiguar a influência desses parâmetros isoladamente no módulo de elasticidade. Sucintamente, foi constatado que os fatores que influenciam a resistência à compressão do concreto também influenciam o módulo de elasticidade, porém não na mesma intensidade e, pôde ser observado que o tipo e a quantidade de agregado apresentam uma importante contribuição nos resultados do módulo de elasticidade.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental desta dissertação objetivou estudar a variabilidade do módulo de elasticidade em concretos produzidos com diferentes agregados graúdos, por meio de ensaios estático e dinâmicos. Foram escolhidos três agregados, um granito e dois gnaisses. Todos eles provêm de pedreiras localizadas próximas ao litoral norte do Estado de Santa Catarina com capacidade para atender as centrais dosadoras da região.

Este capítulo está dividido em quatro seções. A primeira se concentra na explanação e contextualização do escopo da pesquisa onde são definidas e apresentadas as variáveis de respostas, os fatores controláveis e a matriz experimental. Na segunda parte, são abordados os materiais utilizados durante todo o trabalho com suas respectivas caracterizações físicas e químicas. Na terceira parte, são apresentados os traços utilizados nas confecções dos concretos e descritos os procedimentos de ensaios que delinearão a etapa de produção bem como os ensaios no estado fresco e endurecido, com as normas correspondentes e as observações relevantes. Por fim, explana-se brevemente a respeito das análises estatísticas utilizadas para avaliar os resultados obtidos.

Os ensaios foram desenvolvidos no laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), no laboratório de Aplicações de Nanotecnologia em Construção Civil (NANOTEC) e, nas dependências do Grupo de Pesquisas em Ensaios não Destrutivos (GPEND), pertencentes à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) localizados em Florianópolis, Santa Catarina.

4.1 ESCOPO DA PESQUISA

O programa experimental foi planejado com a finalidade de estudar a variabilidade do módulo de elasticidade de concretos produzidos com diferentes agregados graúdos. Para tal, foram coletadas cinco lotes distintos de cada tipo de agregado para a produção dos concretos.

Dado o objetivo proposto nesta pesquisa, não se pretendeu verificar todas as variáveis que podem influenciar nos resultados do módulo de elasticidade. Assim, foram estabelecidos fatores que foram controlados durante todo o desenvolvimento do programa experimental. Os parâmetros fixados foram:

- Dosagem idênticas em volume para os concretos com agregados

gráudos de diferentes massas específicas.

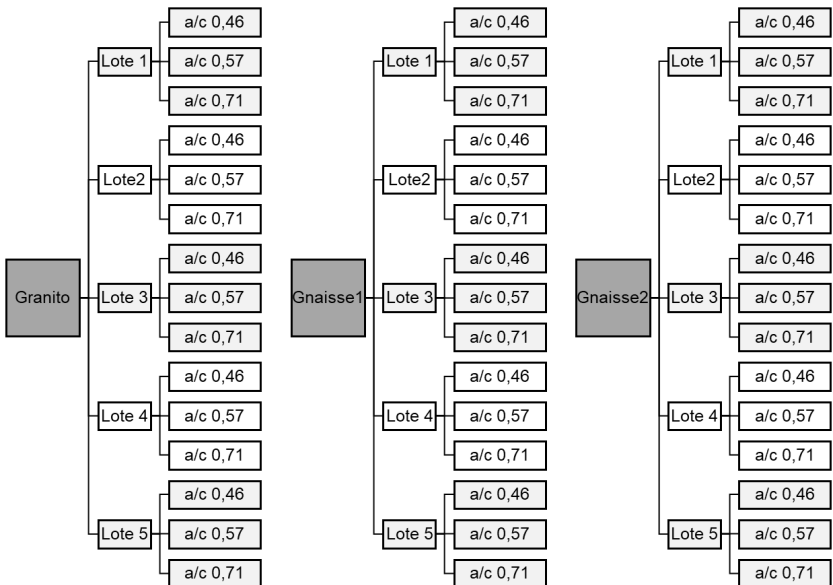
- Agregado gráudo: três origens distintas coletadas em cinco períodos de tempo. A escolha de origens distintas (um granito e dois gnaisses), consiste em verificar a influência da natureza dos agregados gráudos nos resultados do módulo de elasticidade. Já a definição de dois agregados gráudos com mesma origem mineralógica porém de procedências distintas (denominados nesta pesquisa como gnaissel e gnaisse2), se justifica em decorrência do interesse em verificar a existência da variabilidade do módulo de elasticidade a partir de um mesmo grupo de rocha mas com massas específicas distintas;
- Resistência à compressão: foram determinados três níveis de resistências com três relações água/cimento, iguais a 0,46, 0,57 e 0,71;
- Tipo de cimento: os concretos foram produzidos com cimento *Portland* pozolânico do tipo IV, classe 32. Ampliou-se o escopo deste trabalho com o estudo em concretos produzidos com cimento CP-V ARI;
- Consistência do concreto no estado fresco: 150 ± 30 mm;
- Idade de ensaio: 28 dias;
- Agregado miúdo: composição de uma areia natural fina com uma areia industrial;
- Dimensão do corpo de prova: cilíndricos com dimensões nominais de 100x200 mm, por serem mais usuais entre os laboratórios e empresas de serviços de concretagem;
- Tipo de cura: imerso em tanque de água com cal até a idade de ensaio;
- Módulo de elasticidade estático: tangente inicial por meio da metodologia A (tensão fixa a 30% da resistência de referência) utilizando compressômetro acoplado com dois relógios comparadores de base independente;
- Módulo de elasticidade dinâmico: por meio do impulso longitudinal utilizando o equipamento Sonelastic[®] e por meio do pulso ultrassônico, utilizando o equipamento PunditLab+[®] pelo método de aquisição direto.

Definidos os fatores controláveis e com vistas no atendimento dos objetivos propostos dentro de condições exequíveis, foram determinadas as variáveis de respostas a serem estudadas nesta dissertação:

- Resistência à compressão aos 28 dias;
- Módulos de elasticidade estático (tangente inicial a 0,3fc);
- Módulos dinâmicos (pulso ultrassônico e impulso longitudinal).

Adotadas estas premissas, a Figura 14 abaixo resume as combinações de misturas com suas respectivas nomenclaturas. Foram avaliadas nove combinações (45 traços de concreto), variando três relações a/c e três tipos de agregado graúdo (coletados entre os meses de janeiro a maio de 2017, totalizando cinco repetições).

Figura 14: Representação esquemática do programa experimental proposto.



Fonte: Autor, 2018

4.2 MATERIAIS EMPREGADOS

Nesta seção, serão apresentados os materiais empregados neste trabalho. Salienta-se que, os critérios para a utilização dos materiais

eram de que os mesmos atendessem aos requisitos normativos e que estivessem sendo comumente empregados pelas empresas de serviços de concretagem localizados no Estado de Santa Catarina.

4.2.1 Cimento *Portland*

O cimento utilizado para o desenvolvimento deste programa foi o cimento *Portland* pozolânico tipo IV, classe 32, da Votorantim Cimentos, proveniente da fábrica localizada em Itajaí/SC. O cimento possui massa específica igual $2,86 \text{ kg/dm}^3$. As propriedades físicas, químicas e mecânicas foram fornecidos pelo próprio fabricante de cimento e podem ser vistas na Tabela 7.

Tabela 7: Caracterização do cimento CP-IV utilizado no trabalho.

Caracterização	Ensaio	Unidade	Qt de	Limite	Norma
Física	Área Específica Blaine	cm^2/g	4380	N/A	NBR 16372
	Exp. a quente	mm	0,00	$\leq 5,0$	NBR 11582
	Resíduo #200	%	0,55	$\leq 8,0$	NBR 11579
	Resíduo #325	%	2,92	N/A	NBR 11579
	Tempo de pega	Início (min) fim (min)	253 321	≥ 60 ≤ 600	NM65 NM65
Mecânica	Resistência à compressão	3d (MPa)	25,4	> 10	NBR 7215
		7d (MPa)	31,2	≥ 20	NBR 7215
		28d (MPa)	43,3	$\geq 32; < 49$	NBR 7215
Química	Perda ao fogo	%	3,24	$\leq 4,5$	NM 14
	Resíduo insolúvel	%	26,1	N/A	NM 14
	MgO	%	5,06	$\leq 6,5$	NM 14
	SO ₃	%	2,59	$\leq 4,0$	NM 14

N/A - Não aplicável

Para complementar os estudos e avaliar a influência do tipo de cimento no módulo de elasticidade, foram confeccionados concretos utilizando um cimento CP-V ARI. O cimento possuía massa específica de $3,12 \text{ kg/dm}^3$ e, na Tabela 8, são apresentadas as características físicas, químicas e mecânicas informadas pelo fabricante do cimento, estando em conformidade com as normalizações vigentes.

Tabela 8: Caracterização do cimento CP-V ARI utilizado em estudos complementares.

Caracterização	Ensaio	Unidade	Qtde	Limite	Norma
Física	Área Específica Blaine	cm ² /g	4071	≥ 3000	NBR 16372
	Exp. a quente	mm	0,20	N/A	NBR 11582
	Resíduo #200	%	0,47	≥ 6	NBR 11579
	Resíduo #325	%	3,05	N/A	NBR 11579
	Tempo de pega	Início (min)	145	≥ 60	NM65
		fim (min)	183	≤ 480	NM65
Mecânica	Resistência à compressão	1d (MPa)	22,4	≥ 11	NBR 7215
		3d (MPa)	37,5	≥ 24	NBR 7215
		7d (MPa)	42,8	≥ 34	NBR 7215
		28d (MPa)	51,1	N/A	NBR 7215
Química	Perda ao fogo	%	2,93	N/A	NM 14
	Resíduo insolúvel	%	0,64	N/A	NM 14
	MgO	%	4,51	N/A	NM 14
	SO ₃	%	2,85	N/A	NM 14

N/A - Não aplicável

4.2.2 Agregados miúdos

Nesta pesquisa não foi avaliada a influência do agregado miúdo nos resultados do módulo de elasticidade. Foi utilizada a combinação de duas areias: uma areia natural fina produzida no município de Imbituba/SC e outra areia industrial de britagem produzida no município de Botuverá/SC, utilizadas nas confecções dos concretos na região de Santa Catarina. Ambas para foram coletadas uma única vez nas pilhas de armazenamento da central dosadora de serviços de concretagem, e podem ser visualizadas na Figura 15.

Figura 15: Agregados miúdos utilizados: areia natural e areia industrial



Fonte: Autor, 2018

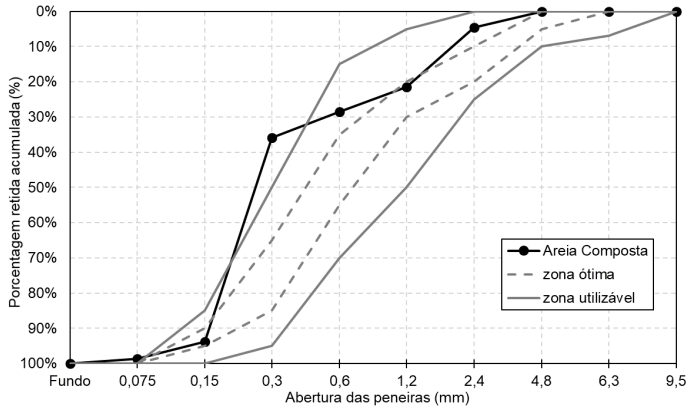
Para a produção dos concretos, foi estabelecida uma composição

de 60% da areia natural quartzosa fina e 40% de uma areia industrial de britagem. A caracterização dos agregados miúdos foi realizada por meio dos ensaios de teor de material pulverulento NBR NM 46 (2003), composição granulométrica e módulo de finura, de acordo com a norma NBR NM 248 (2003). A massa específica aparente foi determinada conforme recomendações da norma NBR NM 52 (2009). A caracterização física dos agregados miúdos pode ser vista na Tabela 9 e a curva granulométrica da areia composta na Figura 16.

Tabela 9: Caracterização física dos agregados miúdos utilizados.

Material	Massa específica	Módulo de Finura	Teor de Pulverulento
Areia natural	2,65 kg/dm ³	1,04	0,71%
Areia industrial	2,80 kg/dm ³	3,03	12,10%

Figura 16: Curva granulométrica da areia composta.



Fonte: Autor, 2018

Apesar da areia de britagem ter apresentado teor de pulverulento acima do indicado pela NBR 7211 (2009), observa-se que este valor é calculado sobre a massa da amostra do agregado miúdo de origem de britagem ensaiado e que, conforme permitido com a nota 3 da Tabela 7, do item 6.2, da referida norma, esta porcentagem de material passante deve ser recalculada sobre a quantidade de agregado total.

4.2.3 Agregados graúdos

Conforme já exposto anteriormente, neste trabalho foram utilizados três agregados graúdos distintos: um de origem granítica, produzido na região de Tijucas/SC e dois de origem gnáissica, denominados gnaissel produzido na região de Blumenau/SC e gnaisse2, produzido em Gaspar/SC, todos no Estado de Santa Catarina e próximos à região de Balneário Camboriú, conforme observado na Figura 17. Lembra-se ainda que, para efeito da análise da variabilidade do módulo de elasticidade em função dos agregados graúdos, foram coletados cinco lotes de diferentes épocas.

Figura 17: Locais das empresas produtoras de agregados para concreto localizados próximos à Balneário Camboriú, Santa Catarina



Fonte: Adaptado de GOOGLE MAPS (2016)

Os agregados graúdos utilizados apresentaram duas faixas granulométricas distintas, classificadas conforme ABNT NBR 7211 (2009) como: zona granulométrica 4,75/12,5 (denominada comercialmente como Brita 0) e zona granulométrica 9,5/25 (conhecida como Brita 1). Analogamente aos agregados miúdos, foram realizados ensaios composição granulométrica e módulo de finura conforme a norma NBR NM 248 (2003) e massa específica aparente, determinada de acordo com NBR NM 53 (2009).

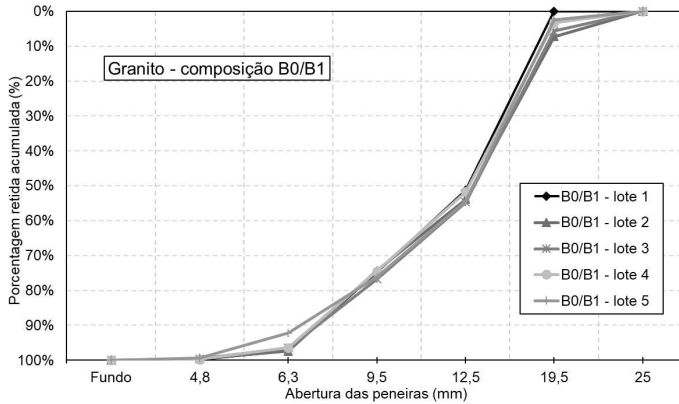
Nesta pesquisa, optou-se por uma composição dos agregados

grãos (50% de brita 0 e 50% de brita 1). A caracterização física dos agregados grãos utilizados pode ser vista na Tabela 10 e as curvas granulométricas das composições das britas estão apresentadas nas Figuras 18 a 20.

Tabela 10: Caracterização física dos agregados miúdos utilizados.

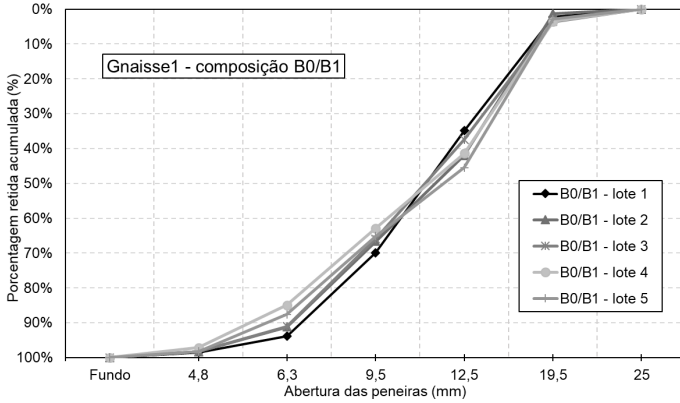
Materiais	Ensaios	Lote 1	Lote 2	Lote 3	Lote 4	Lote 5	Média
Granito - B0	Massa específica (kg/dm ³)	2,60	2,60	2,62	2,62	2,62	2,61
	Módulo de Finura	6,42	6,44	6,46	6,45	6,42	6,44
Granito - B1	Massa específica (kg/dm ³)	2,61	2,60	2,63	2,62	2,62	2,62
	Módulo de Finura	6,98	7,09	7,10	7,06	7,03	7,05
Gnaiss1 - B0	Massa específica (kg/dm ³)	2,75	2,78	2,76	2,78	2,80	2,77
	Módulo de Finura	6,35	6,24	6,21	5,89	6,02	6,14
Gnaiss1 - B1	Massa específica (kg/dm ³)	2,78	2,78	2,76	2,77	2,80	2,78
	Módulo de Finura	6,97	6,94	6,92	7,02	7,03	6,98
Gnaiss2 - B0	Massa específica (kg/dm ³)	2,85	2,85	2,81	2,84	2,80	2,83
	Módulo de Finura	6,02	6,09	4,98	6,12	5,68	5,78
Gnaiss2 - B1	Massa específica (kg/dm ³)	2,85	2,85	2,81	2,84	2,78	2,83
	Módulo de Finura	6,98	6,94	6,97	2,05	7,01	5,99

Figura 18: Curva granulométrica do agregado grão composto, granito.



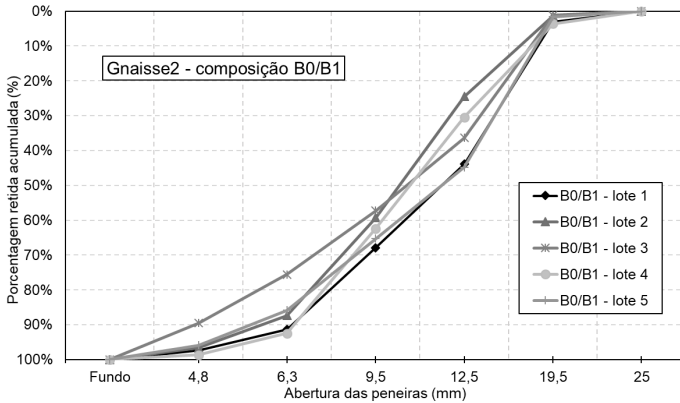
Fonte: Autor, 2018

Figura 19: Curva granulométrica do agregado graúdo composto, gnaissel.



Fonte: Autor, 2018

Figura 20: Curva granulométrica do agregado graúdo composto, gnaissel2.



Fonte: Autor, 2018

4.2.4 Água

A água utilizada na confecção de todos os concretos foi proveniente da rede de abastecimento pública disponível no LMCC/UFSC, fornecida pela Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CA-SAN).

4.2.5 Aditivo

Neste estudo, foi empregado um aditivo plastificante polifuncional à base de policarboxilato, comumente utilizado na produção dos concretos nas empresas de serviços de concretagem. O aditivo é denominado comercialmente como TEC MULT 40, fabricado pela empresa Grace Brasil Ltda. e na Tabela 11 encontra-se as especificações disponibilizadas pelo fabricante.

Tabela 11: Especificação do aditivo utilizado na produção dos concretos.

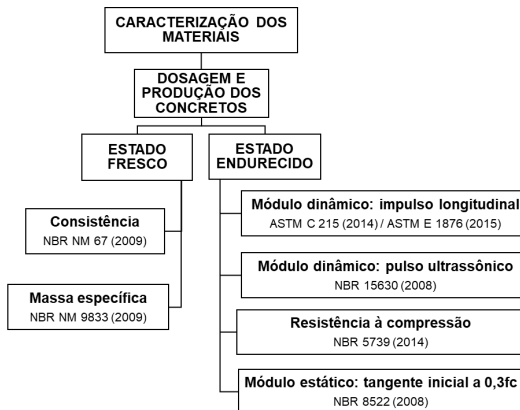
Aditivo	Categoria	Sigla	Base	Massa específica	Apectos/ cor	Teor
TEC MULT 40	Polifuncional	PN	Policarboxilato	$1,08 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$	Líquido amarelo a ambar	0,4 a 0,8%

4.3 MÉTODOS DE ENSAIOS

Nesta seção, são apresentados os métodos de ensaios estabelecidos neste trabalho. Aqui são apresentados as proporções das misturas, os procedimentos adotados para produção das misturas e os ensaios escolhidos para determinar as propriedades no estado fresco e no estado endurecido dos concretos estudados nesta dissertação.

A Figura 21 apresenta o resumo de todos os ensaios realizados nos concretos. Os procedimentos e detalhes pertinentes a cada ensaio serão apresentados nos itens a seguir.

Figura 21: Sequência de ensaios adotada nas propriedades do estado fresco e endurecido dos concretos estudados.

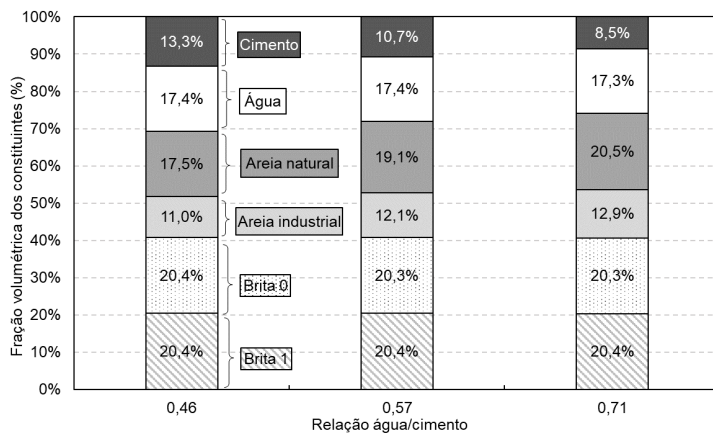


4.3.1 Proporções das misturas

Vale ressaltar que não era objetivo desta dissertação realizar um estudo de dosagem dos concretos. Nesse sentido, com base nas premissas fixadas anteriormente, foram determinados os traços de referência e, reproduzidos para as demais repetições com os diferentes tipos de agregados graúdos.

As dosagens dos concretos com diferentes agregados graúdos foram idênticas volumetricamente, de modo a garantir a mesma quantidade de agregado graúdo no interior do concreto. É apresentada na Figura 22 a quantidade dos materiais constituintes dos traços, em frações volumétricas, para cada relação água/cimento.

Figura 22: Proporção, em volume, dos materiais para as diferentes relações água/cimento.



Fonte: Autor, 2018

Como já mencionado, no total foram preparados 45 concretos, variando o tipo, o lote do agregado e a relação a/c. Os traços unitários empregados nos concretos são apresentados na Tabela 12. Como as substituições foram feitas em volumes, as massas dos agregados graúdos apresentam variações em função das diferentes massas específicas.

Tabela 12: Proporção, em massa, dos materiais empregados na produção dos concretos.

n	Descrição		Cimento (kg)	Água (kg)	Areias (kg)	Agregado graúdo (kg)			Aditivo* (%)
	Brita	Lote				Granito	Gnaisse1	Gnaisse2	
1	Granito	1	1	0,71	3,72	4,35	-	-	0,23
2	Gnaisse1	1	1	0,71	3,72	-	4,63	-	0,35
3	Gnaisse2	1	1	0,71	3,72	-	-	4,76	0,21
4	Granito	2	1	0,71	3,72	4,39	-	-	0,44
5	Gnaisse1	2	1	0,71	3,72	-	4,65	-	0,22
6	Gnaisse2	2	1	0,71	3,72	-	-	4,76	0,17
7	Granito	3	1	0,71	3,72	4,38	-	-	0,44
8	Gnaisse1	3	1	0,71	3,72	-	4,62	-	0,26
9	Gnaisse2	3	1	0,71	3,72	-	-	4,70	0,51
10	Granito	4	1	0,71	3,72	4,38	-	-	0,36
11	Gnaisse1	4	1	0,71	3,72	-	4,64	-	0,18
12	Gnaisse2	4	1	0,71	3,72	-	-	4,79	0,40
13	Granito	5	1	0,71	3,72	4,39	-	-	0,34
14	Gnaisse1	5	1	0,71	3,72	-	4,68	-	0,24
15	Gnaisse2	5	1	0,71	3,72	-	-	4,67	0,20
16	Granito	1	1	0,57	2,76	3,47	-	-	0,18
17	Gnaisse1	1	1	0,57	2,76	-	3,69	-	0,21
18	Gnaisse2	1	1	0,57	2,76	-	-	3,80	0,12
19	Granito	2	1	0,57	2,76	3,50	-	-	0,23
20	Gnaisse1	2	1	0,57	2,76	-	3,71	-	0,13
21	Gnaisse2	2	1	0,57	2,76	-	-	3,80	0,15
22	Granito	3	1	0,57	2,76	3,49	-	-	0,23
23	Gnaisse1	3	1	0,57	2,76	-	3,68	-	0,18
24	Gnaisse2	3	1	0,57	2,76	-	-	3,75	0,22
25	Granito	4	1	0,57	2,76	3,50	-	-	0,24
26	Gnaisse1	4	1	0,57	2,76	-	3,70	-	0,14
27	Gnaisse2	4	1	0,57	2,76	-	-	3,82	0,21
28	Granito	5	1	0,57	2,76	3,50	-	-	0,24
29	Gnaisse1	5	1	0,57	2,76	-	3,73	-	0,16
30	Gnaisse2	5	1	0,57	2,76	-	-	3,72	0,14
31	Granito	1	1	0,46	2,02	2,79	-	-	0,26
32	Gnaisse1	1	1	0,46	2,02	-	2,96	-	0,22
33	Gnaisse2	1	1	0,46	2,02	-	-	3,05	0,17
34	Granito	2	1	0,46	2,02	2,81	-	-	0,21
35	Gnaisse1	2	1	0,46	2,02	-	2,98	-	0,26
36	Gnaisse2	2	1	0,46	2,02	-	-	3,05	0,21
37	Granito	3	1	0,46	2,02	2,80	-	-	0,21
38	Gnaisse1	3	1	0,46	2,02	-	2,95	-	0,25
39	Gnaisse2	3	1	0,46	2,02	-	-	3,01	0,33
40	Granito	4	1	0,46	2,02	2,81	-	-	0,33
41	Gnaisse1	4	1	0,46	2,02	-	2,97	-	0,24
42	Gnaisse2	4	1	0,46	2,02	-	-	3,07	0,30
43	Granito	5	1	0,46	2,02	2,81	-	-	0,31
44	Gnaisse1	5	1	0,46	2,02	-	2,99	-	0,32
45	Gnaisse2	5	1	0,46	2,02	-	-	2,99	0,19

*teor de aditivo variável em função da trabalhabilidade.

4.3.2 Parâmetros de produção dos concretos

As misturas foram realizadas em um misturador com capacidade máxima de aproximadamente 35 litros fabricado pela empresa Beto- maq (Figura 23). Para verificação das propriedades no estado fresco e preenchimento dos moldes dos corpos de prova para, posteriormente a realização dos ensaios no estado endurecidos, foram produzidos cerca de 15 litros de concreto por traço.

Figura 23: Detalhe do misturador fabricado pela empresa Beto- maq que foi utilizado para a produção dos concretos.



Fonte: Autor, 2018

Previamente, era determinado o teor de umidade das areias (através do método de secagem rápida em que a amostra é levada ao fogo) e, desta forma, corrigida a quantidade de água da mistura. Em seguida, eram pesados todos os materiais (cimento, areias, britas e aditivo). Foi adotada a seguinte sequência de mistura para a fabricação dos concretos:

1. O recipiente de mistura em condição de superfície úmida antes das adições dos materiais;
2. Inicialmente adicionava-se as areias e o cimento e, com o misturador em funcionamento, adicionava-se toda a água prevista na

mistura;

3. Após a homogeneização da argamassa, adicionava-se os agregados graúdos (brita 0 e brita 1);
4. Após a homogeneização de todos os constituintes, ajustava-se a trabalhabilidade do concreto com o aditivo;
5. Por fim, retirou-se parte da mistura e realizava-se o ensaio de abatimento de tronco de cone;

Após o término da mistura, eram realizados os demais ensaios no estado fresco (item a seguir) e, então, procedia-se com a moldagem dos corpos de prova para os ensaios no estado endurecido na idade de 28 dias. O tempo total da mistura esteve entre 10 e 15 minutos, contados a partir da adição do cimento no recipiente.

4.3.3 Ensaios no estado fresco

A seguir, são descritos os ensaios que foram realizados para a caracterização dos concretos no estado fresco e as normas pertinentes a cada ensaio.

4.3.3.1 Ensaio de consistência

O ensaio era realizado logo após o término da mistura dos materiais e o objetivo era a verificação da trabalhabilidade do concreto proposto nesta dissertação, através do controle pelo abatimento do tronco de cone, conforme a norma NBR NM 67 (2009).

4.3.3.2 Massa específica do concreto

O ensaio também foi realizado após a finalização da mistura e o ensaio de determinação da massa específica do concreto era realizado de acordo com o preconizado na norma NBR 9833 (2009).

4.3.3.3 Moldagem e cura dos corpos de prova

Para a moldagem dos concretos, foram utilizadas fôrmas cilíndricas de plástico de dimensões de 100 mm x 200 mm. Os procedimentos

de moldagem e de cura úmida foram realizados conforme a NBR 5738 (2008). Ainda, como já mencionado, para cada traço eram moldados corpos de prova para ensaios na idade de 28 dias que eram cobertos com tampas plásticas para evitar a perda de umidade pela superfície superior até o momento da desmoldagem, os quais podem ser visualizadas na Figura 24(a).

Em seguida, os corpos de prova eram acondicionados imersos em tanques com água e cal até a data de ensaio (Figura 24(b)). Os topos eram retificados por polimento na fresa disponibilizada no LMC-C/UFSC afim de promover contato pleno entre o corpo de prova e os pratos da prensa.

Figura 24: (a) detalhe do acondicionamento dos corpos de prova de concreto nas primeiras horas e, posteriormente, (b) armazenamento em tanques com água e cal.



Fonte: Autor, 2018

4.3.4 Ensaios no estado endurecido

Os ensaios das propriedades dos concretos no estado endurecido foram todos realizados aos 28 dias de idade. Ressalta-se que os ensaios de módulo dinâmico (obtidos por impulso e por pulso ultrassônico) foram nos mesmos corpos de prova moldados destinados para os ensaios estáticos.

A sequência geral adotada neste trabalho foi a realização dos ensaios dinâmicos (primeiramente o impulso seguido do pulso ultrassônico) e posteriormente o ensaio estático.

4.3.4.1 Módulo estático de elasticidade

A instrumentação utilizada foi constituída do compressômetro de bases independentes confeccionado pela equipe GTec/UFSC, com uma distância entre os anéis de 83,5 mm (base de medida) acoplado com dois relógios comparadores com precisão de 1×10^{-3} mm, ambos descritos na Seção 3.3.3.

Para a realização destes ensaios, foi utilizada a prensa hidráulica modelo UH-2000 KN da marca Shimadzu. A rotina de ensaio foi a metodologia A, conforme especificações contidas na norma NBR 8522 (2008). De posse dos valores de tensão e deformação provenientes dos ensaios experimentais, realizou-se o cálculo do módulo de elasticidade tangente inicial (E_{ci} , em GPa) de acordo com a equação abaixo:

$$\Delta\varepsilon = \frac{\varepsilon_b - \varepsilon_a}{L_o}$$

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \cdot 10^{-3} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\Delta\varepsilon} \cdot 10^{-3}$$

Onde:

ε_b = deformação específica no ponto B (em mm/mm);

ε_a = deformação específica no ponto A (tensão de 0,5 MPa, em mm/mm);

L_o = base de medida entre os anéis (em mm);

E_{ci} = Módulo estático de elasticidade, tangente inicial (em GPa);

σ_b = Tensão no ponto B (neste trabalho, 30% da carga de ruptura, em MPa);

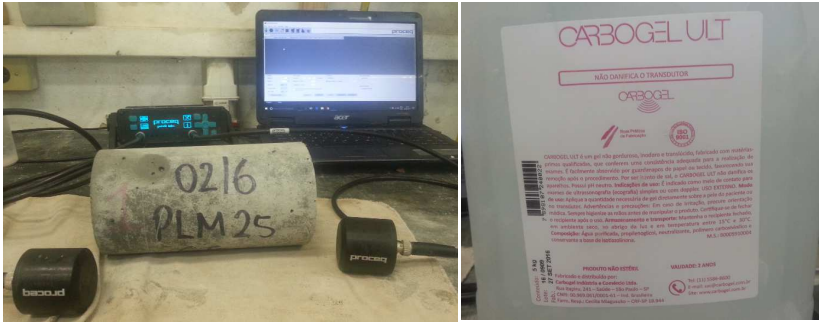
4.3.4.2 Módulo dinâmico obtido por meio do pulso ultrassônico

O equipamento utilizado para a determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas foi o PUNDIT Lab⁺ (*Portable Ultrasonic Non Destructive Digital Indicating Tester*) fabricado pela PROCEQ. Os transdutores utilizados em todos os corpos de prova possuíam frequência de 54 kHz e diâmetro de 50mm. O contato externo dos transdutores com a superfície da amostra foi um gel condutor fabricado por *Carbogel Indústria e Comércio Ltda.*

Detalhes do equipamento e do gel utilizado nos ensaios podem ser visualizados na Figura 25.

O módulo de elasticidade dinâmico obtido por pulso ultrassônico

Figura 25: Detalhe do equipamento utilizado para a determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e do gel de acoplamento utilizado nos ensaios.



Fonte: Autor, 2018

foi calculado com as equações recomendadas pela NBR 15630 (2008) apresentadas a seguir:

$$V = \frac{L}{t}$$

$$E_{d,ult} = V^2 \cdot \rho \cdot \frac{(1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu)}{1 - \mu}$$

Onde:

V = Velocidade de propagação da onda ultrassônica (mm/ μ s);

L = Distância entre os pontos de acoplamento dos transdutores (mm);

t = tempo registrado (μ s);

$E_{d,ult}$ = Módulo de elasticidade dinâmico obtido por pulso ultrassônico (GPa);

ρ = densidade de massa aparente do corpo de prova (kg/m^3);

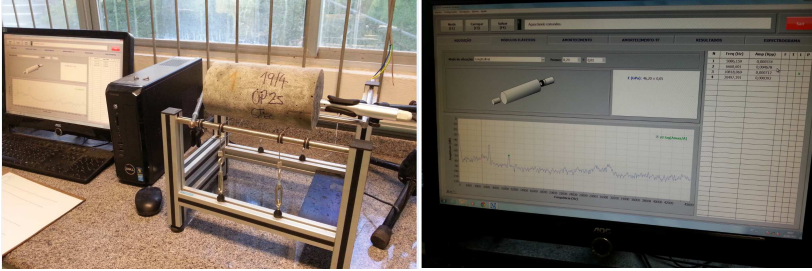
μ = coeficiente de Poisson, igual a 0,2 (adotado);

4.3.4.3 Módulo dinâmico obtido por meio do impulso longitudinal

O equipamento utilizado para a obtenção da resposta acústica obtida por impulso foi o Sonelastic[®], desenvolvido e fabricado pela empresa ATP Engenharia Física, conforme pode ser observado em detalhes na Figura 26.

A metodologia de ensaio foi a seguinte:

Figura 26: Detalhe do equipamento utilizado para obtenção da frequência acústica do ensaio de impulso longitudinal.



Fonte: Autor, 2018

1. Os corpos de prova cilíndricos, com dimensões conhecidas, eram devidamente apoiados em um suporte próprio por intermédio de cabos metálicos ajustáveis tal qual a amostra ficava apoiada na posição dos nós da ressonância fundamental (localizados em $0,224.L$ de cada extremidade);
2. Posicionava-se o transdutor receptor de frequência próximo a uma das extremidades do corpo de prova e, em seguida, procedia-se com o impulso através do pulsador na outra extremidade de modo a obter a frequência longitudinal. Foram ensaiadas oito amostras para cada mistura e, para cada uma delas, eram realizadas três medições para, desta forma, obter-se os valores médios;
3. De posse dos valores de frequência e dimensões dos corpos de prova realizava-se o cálculo do módulo de elasticidade por meio das equações, dispostas no item 10.1.3 da ASTM E1876 (2015) expostas a seguir:

$$K = 1 - \left(\frac{\pi^2 \cdot \mu^2 \cdot D^2}{8 \cdot L^2} \right)$$

$$E_{d,impulso} = 16 \cdot m \cdot f_1^2 \cdot \left(\frac{L}{\pi \cdot D^2 \cdot K} \right)$$

Onde:

$E_{d,impulso}$ = Módulo de elasticidade obtido por impulso (GPa);

m = massa do corpo de prova (g);

L = comprimento do corpo de prova (mm);

D = diâmetro do corpo de prova (mm);

f_1 = frequência de ressonância fundamental longitudinal (Hz);

μ = coeficiente de Poisson, igual a 0,2 (adotado).

4.4 TRATAMENTO E ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

Os resultados de resistência à compressão dos concretos receberam tratamento estatístico e são apresentados a média de pelo menos cinco resultados individuais obtidos durante o ensaio de módulo de elasticidade estático e os respectivos valores de desvios padrão e coeficiente de variação.

Os resultados do módulo estático são apresentados como a média de pelo menos três valores individuais, conforme preconizado pela normalização vigente do ensaio.

Já os resultados do módulo dinâmico obtidos por meio do pulso ultrassônico provêm da média de quatorze pulsos individuais coletados a cada 5 microssegundos em cada corpo de prova. Para o concreto em questão, foi adotada a média de oito corpos de prova.

Os resultados do módulo dinâmico obtido por meio de impulso também receberam tratamento estatístico. Em cada corpo de prova, foram realizadas três leituras individuais e adotado o valor médio. Essas medições foram realizadas em oito exemplares e, o módulo dinâmico considerado foi a média desses oito corpos de prova.

Foi utilizado o modelo de experimentos fatoriais para análise de variância (ANOVA), que possibilitou, por meio dos testes de hipóteses, verificar a influência de cada parâmetro demonstrando a existência ou não de relações entre as variáveis. Por fim, para a apresentação dos resultados e análises de variâncias, foram elaboradas tabelas nas quais constam os seguintes termos:

- SQ (Soma Quadráticas) = soma dos quadrados dos resíduos das médias de cada grupo em relação à média total;
- GDL (Grau de Liberdade) = número de variações menos 1;
- MQ (Médias Quadráticas) = razão entre SQ e GDL;
- Fcalculado = razão entre MQ do fator e MQ do resíduo;
- p = distribuição F com 95% de confiabilidade;
- Significância = $p < 0,05$ existe diferença significativa (sim).

Caso o valor calculado de p fosse inferior a 0,05, era possível afirmar que a variável em análise apresentava influência significativa, para uma confiabilidade de 95% (ou significância de 5%).

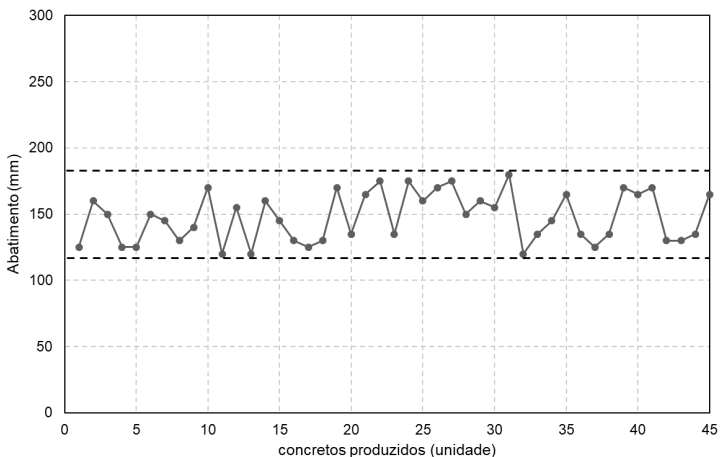
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo apresenta os resultados dos ensaios no estado fresco e no estado endurecido dos concretos produzidos para cumprir com o programa experimental proposto. Inicialmente, foram apresentados e discutidos os resultados no estado fresco seguido dos resultados no estado endurecido, resistência à compressão e módulo de elasticidade. A apresentação e discussão dos resultados de módulo foram divididos em duas partes: ensaio estático e ensaios dinâmicos.

5.1 RESULTADOS DE ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

Os resultados de ensaios no estado fresco são apresentados nos gráficos das Figuras 27 a 30 a seguir. Em todos os concretos, foi analisada a sua consistência por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump-test*) em consonância com a norma NBR NM 67 (2009) e os valores dos mesmos podem ser visualizados na Figura 27.

Figura 27: Valores de consistência obtidos pelo ensaio de abatimento do tronco de cone de todos os concretos.



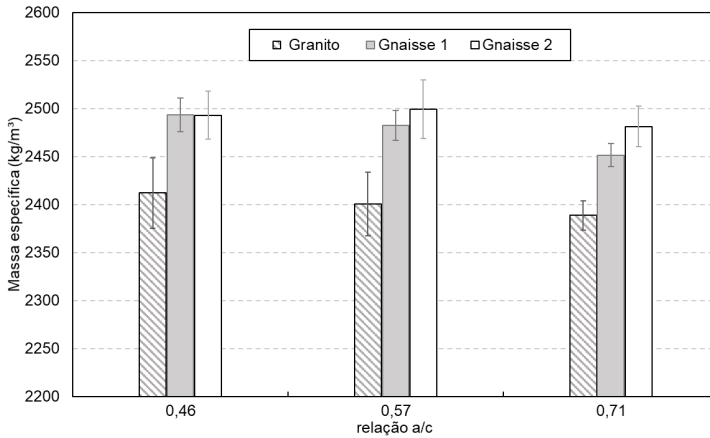
Fonte: Autor, 2018.

Conforme proposto no programa experimental, os concretos estudados apresentaram consistência dentro da faixa especificada de 150 ± 30 mm. Esta faixa de consistência possibilita o bombeamento dos

concretos em edifícios de elevadas alturas e um adequado adensamento.

Foi realizado também o ensaio para a determinação das massas específicas dos concretos, de acordo com a norma NBR 9833 (2009). Os resultados são apresentados na Figura 28 e correspondem a média de cinco valores dos concretos produzidos com os mesmos agregados porém de diferentes partidas.

Figura 28: Massa específica aparente dos concretos produzidos com diferentes agregados graúdos, valores médios.

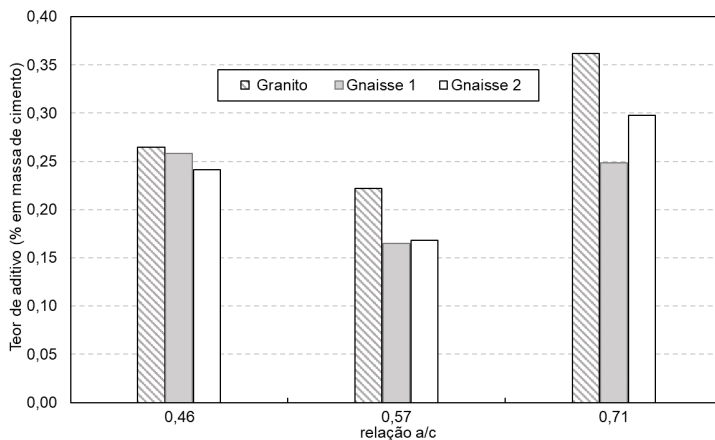


Fonte: Autor, 2018.

No gráfico da Figura 28, observa-se que os valores médios da massa específica dos concretos produzidos com agregados graúdos de granito estiveram na faixa de 2385 e 2415 kg/m³ nas relações água/-cimento de 0,71 e 0,46. Já os resultados médios de massa específica para ambos gnaisses utilizados variaram de 2450 a 2493 kg/m³. Como esperado, as massas específicas dos concretos produzidos com granitos foram inferiores em virtude da menor massa específica, neste trabalho em cerca de 3,5% em relação aos concretos confeccionados com agregados de gnaisse.

É apresentado na Figura 29, a média dos consumos de aditivos dos concretos em relação a massa de cimento. Ressalta-se que, para esta pesquisa, o consumo de água por m³ foi considerado constante para os diferentes traços e o aditivo foi o parâmetro utilizado para ajustar a consistência dos concretos para atingir a trabalhabilidade almejada.

Figura 29: Teor de aditivo (em %) em relação a massa de cimento dos concretos produzidos com diferentes agregados graúdos, valores médios.



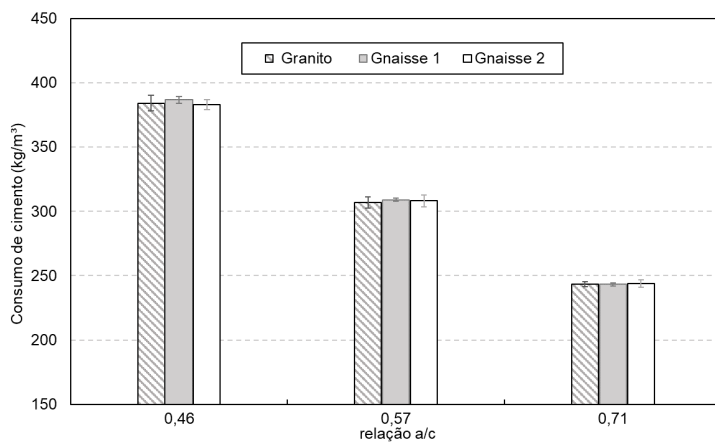
Fonte: Autor, 2018.

O teor de aditivo variou de 0,16% a 0,36% (valores médios) em relação à massa de cimento para diferentes relações a/c e tipos de agregados graúdos. Dos resultados obtidos na Tabela 29, pode ser observado que o consumo de aditivo não seguiu uma tendência linear de comportamento. Nos traços pobres, tem-se um menor volume de pasta e, conseqüentemente, um maior volume de agregado, o que resulta, possivelmente, num maior atrito entre as partículas demandando uma maior quantidade de aditivo para garantir a mesma faixa de fluidez dos concretos.

Por fim, foi calculado o consumo de cimento dos concretos produzidos, conforme a NBR 9833 (2009) e os resultados médios podem ser vistos na Figura 30.

Também como esperado, consumos maiores foram obtidos para concretos com menores relações a/c. Os resultados variaram, em média, de 243 kg de cimento por m^3 para os traços com relação a/c 0,71 a 387 kg de cimento por m^3 para os concretos com a/c 0,46. Do gráfico, é observado que os consumos são praticamente equivalentes independentemente do tipo de agregado graúdo utilizado. Assim, foi possível inferir que não ocorreu uma incorporação diferenciada de ar nos concretos nem como variações expressivas na absorção de água por parte dos agregados.

Figura 30: Consumo de cimento dos concretos produzidos com diferentes agregados graúdos, valores médios.

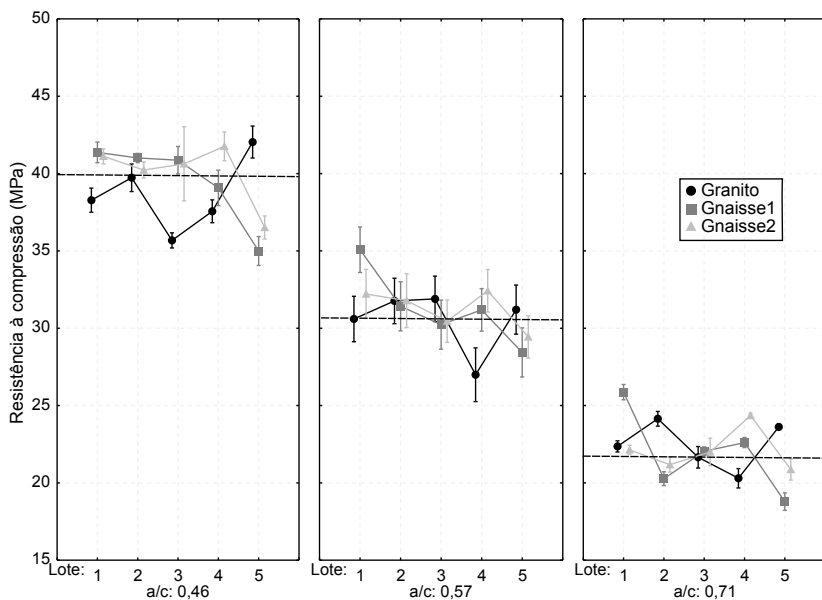


Fonte: Autor, 2018.

5.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A Figura 31 resume os resultados de resistência à compressão aos 28 dias de idade dos concretos produzidos com diferentes agregados graúdos em diferentes lotes. Os valores apresentados correspondem a média de todos os resultados obtidos por meio dos ensaios de módulo de elasticidade.

Figura 31: Resultados de resistência à compressão média, aos 28 dias, em função da relação a/c dos concretos produzidos com diferentes tipos de agregados graúdos, em diferentes lotes.



Fonte: Autor, 2018.

De maneira geral, as médias das resistências à compressão dos concretos foram aproximadamente de 40,0, 31,1 e 22,2 MPa para as relações água/cimento iguais a 0,46, 0,57 e 0,71, respectivamente. Baseado na análise dos dados experimentais é possível destacar ainda, que o desvio padrão da resistência à compressão variou de 2,1 a 3,4 MPa e o coeficiente de variação esteve entre 8,8 e 9,6% para as diferentes relações a/c.

Para comprovar estatisticamente a influência de cada fator, foi realizada uma análise de variância, apresentada na Tabela 13.

Tabela 13: ANOVA - influência da relação a/c e agregado para os resultados de resistência à compressão dos concretos.

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	p	Significância
água/cimento (A)	14884,168	2	7442,084	1908,247	0,000	Sim
agregado (B)	19,262	2	9,631	2,470	0,087	Não
lote (C)	217,733	4	54,433	13,957	0,000	Sim
AB	31,088	4	7,772	1,993	0,096	Não
AC	36,995	8	4,624	1,186	0,308	Não
BC	585,486	8	73,186	18,766	0,000	Sim
ABC	197,940	16	12,371	3,172	0,000	Sim
Erro	1013,989	260	3,900			
Total	16986,661	304				

É consagrado no meio técnico e científico, que a resistência do concreto depende essencialmente da sua relação água/cimento e de sua compactação e há inúmeros estudos que comprovam este comportamento (NEVILLE, 1997). Diminuir a relação água/cimento do concreto significa reduzir a porosidade da pasta de cimento endurecida que, por sua vez, apresenta uma relação inversa com a resistência do material (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Como esperado, percebe-se claramente a influência da relação água/cimento, que neste trabalho significa o aumento da quantidade de cimento por m^3 pois o consumo de água foi mantido constante para todas as misturas. Com os materiais utilizados e os traços definidos, alterar a relação a/c de 0,71 para 0,46, o que representa um aumento de aproximadamente de 60% no consumo de cimento, que variou de 240 kg/m^3 a 380 kg/m^3 , em média. Como consequência imediata, isto resultou em um ganho de praticamente o dobro nos resultados de resistência mecânica (cerca de 22 MPa para 40 MPa).

Buscou-se também, verificar a influência da natureza mineralógica do agregado graúdo na resistência à compressão. Primeiramente convém salientar que, para concretos convencionais, geralmente o agregado graúdo não é um fator preponderante na resistência à compressão dos concretos. Isto ocorre, principalmente pelo fato de que a resistência à compressão das rochas é superior à resistência da matriz cimentícia e da zona de transição na interface e, a ruptura do concreto é governada pelo elo mais fraco das fases constituintes. No entanto, é conhecido que as características dos agregados graúdos, dentre outras a mineralogia, e alguns estudos comprovam que este parâmetro pode afetar os resultados de resistência à compressão (MEHTA; MONTEIRO, 2014; BEUSHAUSEN; DITTMER, 2015; BILESKY, 2016; NIST-1963, 2017; PIASTA; GÓRA; BUDZYŃSKI, 2017).

Neste trabalho, em que as dosagens dos concretos foram idênticas (em volume) para diferentes naturezas mineralógicas, estatisticamente não se pôde afirmar que houve uma influência da origem do agregado nos resultados de resistência, com 95% de confiança, conforme a análise de variância já apresentada na Tabela 13.

Ainda, cabe uma análise da variabilidade dos resultados de resistência à compressão em função dos lotes. É possível observar na Figura 31 e estatisticamente confirmado na análise de variância, a queda de resistência em função dos lotes. Isto ocorreu, possivelmente, em virtude da diferença de tempo para a produção dos concretos e do período de armazenamento do cimento (já que foi mantido constante para todas as misturas produzidas).

De maneira complementar e com intuito de constatar a influência da ‘qualidade da pasta’ na resistência à compressão e, posteriormente, no módulo de elasticidade, foi realizado concretos com as mesmas proporções volumétricas, apenas alterando o tipo de cimento e os resultados podem ser vistos na Tabela 14.

Tabela 14: Valores comparativos de resistência à compressão de concretos produzidos com cimento CP-IV com concretos confeccionados com cimento CP-V ARI, aos 28 dias.

Agregado	Traço		fc,m (MPa)	Desvio (MPa)	CV (%)
	a/c	cimento			
Granito	0,46	CP IV	37,6	1,65	4,4
		CP V	52,1	2,85	5,5
	0,57	CP IV	27,0	1,24	4,6
		CP V	43,9	1,90	4,3

Os resultados de resistência à compressão dos concretos produzidos com CP-V ARI apresentaram desempenhos superiores em cerca de 50% quando comparados com concretos confeccionados com CP-IV. Sucintamente, as diferenças observadas podem estar associadas ao fato do cimento CP-IV possuir em sua composição pozolanas que reagem em idades superiores à 28 dias aumento a resistência do concreto posteriormente.

5.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE

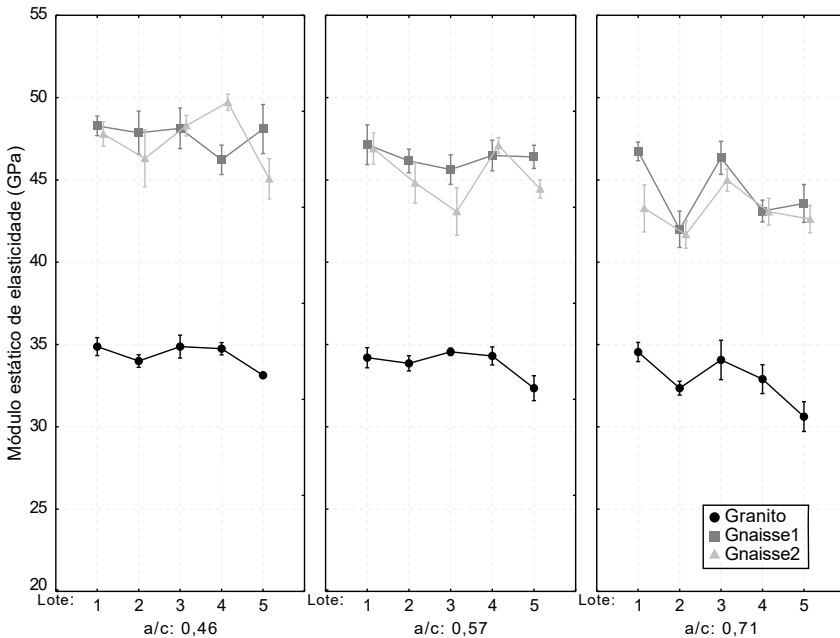
Os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade (estático e dinâmicos) estão apresentados nesta seção. Inicialmente, são apresenta-

dos e discutidos os resultados dos ensaios estáticos. Em seguida, foram realizadas comparações com as equações de estimativas propostas pelas normas e também com modelos micromecânicos. Foram apresentados e discutidos os resultados de módulo obtidos por meio dos ensaios dinâmicos (impulso longitudinal e de velocidade de pulso ultrassônico). Por fim, foi realizada uma comparação entre os ensaios realizados.

5.3.1 Módulo estático de elasticidade a $0,3f_c$

A Figura 32 apresenta os resultados médios dos ensaios de módulo estático de elasticidade tangente inicial a $0,3f_c$ dos concretos produzidos com agregados graúdos de granitos em diferentes lotes (Apêndice A).

Figura 32: Valores médios obtidos para o módulo estático de elasticidade de todos os concretos em diferentes lotes aos 28 dias de idade.



Fonte: Autor, 2018

Com auxílio do software *Statistica* (versão 13.2), para uma confiabilidade de 95%, os resultados experimentais acima foram submetidos

a uma análise de variância para comprovar estatisticamente a existência ou inexistência de influências significativas de cada parâmetro proposto, bem como analisar suas interações. Importante destacar que os valores utilizados nas análises estatísticas foram os valores individuais e a análise de variância realizada pode ser visualizada na Tabela 15.

Tabela 15: ANOVA - influência da relação a/c, agregado e lote no parâmetro módulo de elasticidade estático a 0,3fc para todos os concretos.

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	p	Significância
água/cimento (A)	311,891	2	155,945	39,959	0,000	Sim
agregado (B)	6309,730	2	3154,865	808,386	0,000	Sim
lote (C)	109,964	4	27,491	7,044	0,000	Sim
AB	49,060	4	12,265	3,143	0,016	Sim
AC	65,488	8	8,186	2,098	0,039	Sim
BC	66,650	8	8,331	2,135	0,035	Sim
ABC	67,578	16	4,224	1,082	0,376	Não
Erro	643,940	165	3,903			
Total	7624,302	209				

A análise de variância (ANOVA) indicou para uma confiabilidade de 95% que ocorreram diferenças significativas dos valores de módulo estático de elasticidade para os fatores: relação a/c, tipo de agregado e o lote, bem como as interações entre eles. A combinação dos três fatores não se mostrou significativa para um nível de 95% de confiabilidade. Os efeitos principais e as interações dos fatores entre si são discutidos nos tópicos que se seguem.

5.3.1.1 Efeito do fator ‘agregado graúdo’ no módulo estático

O efeito do tipo do agregado graúdo nas propriedades elásticas do concreto foi evidenciada pela análise de variância sintetizada na Tabela 15 e visualizada na Figura 32. É possível observar que o fator agregado graúdo influenciou mais significativamente no módulo de elasticidade do que propriamente a relação água/cimento e, conseqüentemente, o nível de resistência à compressão do concreto, com 95% de confiabilidade.

Como já citado na revisão bibliográfica fatores como densidade, módulo de elasticidade e fração volumétrica dos principais constituintes, a zona de transição na interface, são preponderantes na definição do comportamento elástico dos materiais heterogêneos como o concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Neste trabalho, buscou-se analisar a parcela de contribuição apenas da origem do agregado graúdo con-

siderando constantes as demais variáveis envolvidas na produção. É possível inferir, nesse contexto, que os concretos produzidos com agregados graúdos de granito obtiveram resultados de módulo estático de elasticidade cerca de 30% inferiores quando comparados com os concretos produzidos com agregados graúdos de gnaiss, independente do nível de resistência (relação a/c adotada) e do lote.

Nesta pesquisa, foi possível observar que ocorreu um comportamento distinto do parâmetro agregado graúdo na resistência à compressão e no módulo de elasticidade. Conforme exposto na Tabela 13, o parâmetro agregado graúdo não foi significativo para influenciar os valores de resistência à compressão enquanto que, no módulo de elasticidade o fator agregado foi significativo (Tabela 15) e os valores obtidos foram distintos somente alterando a tipologia do agregado. Trabalhos consultados na literatura como, por exemplo, Rashid et al. (2002), Barbosa (2009), Ahmad e Alghamdi (2012), Uysal (2012), Beushausen e Dittmer (2015), Lopes et al. (2017) confirmam este efeito, isto é, que a origem do agregado graúdo influencia diretamente nos resultados de módulo de elasticidade dos concretos.

Foi realizada também uma análise múltipla de médias pelo teste de Duncan (Tabela 16) para averiguar se dentro do grupo dos agregados de gnaisses (agrupando todos os lotes), os mesmos apresentam diferenças significativas, com 95% de confiabilidade.

Tabela 16: Resultado do teste de Duncan para o módulo estático de elasticidade para os agregados graúdos de gnaiss.

Traço		Eci,m	Desvio	0,71	0,71	0,57	0,57	0,46	0,46
a/c	Agregado	(GPa)	(GPa)	GN1	GN2	GN1	GN2	GN1	GN2
0,71	GN1	44,3	2,52		NDS	DS	NDS	DS	DS
0,71	GN2	43,0	2,36	NDS		DS	DS	DS	DS
0,57	GN1	46,4	1,93	DS	DS		NDS	NDS	NDS
0,57	GN2	45,4	2,29	NDS	DS	NDS		DS	DS
0,46	GN1	47,6	1,87	DS	DS	NDS	DS		NDS
0,46	GN2	47,4	2,72	DS	DS	NDS	DS	NDS	

Legenda: DS - Difere Signif.; NDS - Não Difere Significativamente

Interessante constatar da análise de média acima que, para as mesmas relações a/c não foram observadas diferenças significativas dentro do grupo dos concretos confeccionados com agregados de gnaisses. Nesse sentido, é possível inferir que para os dois gnaisses de procedências distintas, os valores de módulo de elasticidade estão na mesma ordem de grandeza e não diferiram significativamente.

Em suma, um dos pontos elencados na introdução desta disser-

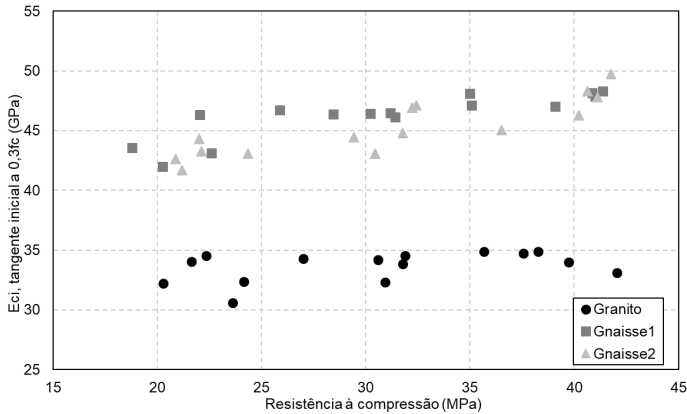
tação refere-se à discrepância observada no módulo de elasticidade dos concretos quando utilizados diferentes agregados graúdos. A partir dos resultados obtidos, confirmou-se então, que concretos idênticos substituindo o tipo de agregado resultam em diferenças expressivas no módulo de elasticidade. Portanto, fica evidente a importância de ensaios experimentais com o intuito de mapear os agregados utilizados na produção dos concretos que, por sua vez, estão intimamente relacionados com as características intrínsecas de origem bem como aos locais de extração do agregado graúdo.

5.3.1.2 Efeito do fator ‘relação a/c’ no módulo estático

Em relação ao fator água/cimento, de uma maneira geral, foi confirmado a tendência do decréscimo dos valores de módulo de elasticidade em função do aumento da relação a/c, com 95% de confiança. Este comportamento concorda com as literaturas consagradas consultadas no qual sugere que o módulo de elasticidade é uma propriedade influenciada, dentre outros parâmetros, pela propriedade da matriz da pasta de cimento (NEVILLE, 1997; MEHTA; MONTEIRO, 2014). Por sua vez, os fatores que alteram a matriz, como neste caso a relação água/cimento, afetam o comportamento elástico dos concretos.

No entanto, foram observadas tendências menos expressivas da variação do módulo em função da alteração da relação água/cimento nesta dissertação. Por exemplo, para os concretos produzidos com agregados graúdos de granito, apesar de diferentes estatisticamente, diminuir a relação a/c (de 0,71 para 0,46) significou um incremento nos valores de módulo estático de elasticidade apenas de cerca de 3% (de 33,0 GPa para 34,0 GPa) para os concretos confeccionados com agregados de granito. Este comportamento também foi observado para os concretos produzidos com agregados de gnaïsse (de 44,3 GPa para 47,6 GPa para gnaïsse 1), como pode ser observado na Figura 33.

Figura 33: Valores médios dos módulos estáticos de elasticidade em função das resistências à compressão obtidas.



Fonte: Autor, 2018.

Diminuir a relação a/c significa melhorar a qualidade da pasta de cimento endurecida, o que é traduzido em uma menor porosidade do concreto, conseqüentemente, tendendo a tornar a pasta e, o concreto como um todo, um material mais rígido. Quando analisado em termos de volume de material na composição dos concretos, esta alteração (mantendo o consumo de água fixo, como estabelecido nesta dissertação) resulta em um aumento do volume do cimento em torno de 5% (cerca de 26% do traço com relação a/c igual a 0,71 para 31% do traço com relação a/c 0,46). Nesse contexto, este incremento de 5% no volume de pasta de cimento, não pareceu contribuir expressivamente nos resultados de módulo de elasticidade dos concretos produzidos nesta dissertação.

Por outro lado, reduzir o volume da pasta de cimento também significa aumentar o volume do restante dos materiais o que de maneira indireta continuam exercendo influência no comportamento elástico do concreto como um todo. Por exemplo, ao diminuir o volume de pasta (reduzindo a quantidade de cimento), conseqüentemente aumenta-se em agregado miúdo (já que o volume de agregado graúdo e água se mantiveram fixos entre os traços). Dessa forma, o decréscimo nos valores de módulo ocasionado pelo aumento da relação a/c é, de certa forma, compensado, pela contribuição do acréscimo da quantidade e da capacidade de rigidez do agregado miúdo.

Portanto, a inobservância de aumento mais expressivos nos resultados de módulo estático de elasticidade obtidos nesta dissertação,

é possivelmente justificado pela sobreposição dos efeitos supramencionados.

Os resultados obtidos previamente por Graeff e Prudêncio Jr. (2016) e também observados nesta pesquisa, ressaltam que, alterar a resistência do concreto não significa, necessariamente, em aumento nos valores de módulo de elasticidade. Sendo assim, a tendência em aumentar indiscriminadamente o nível da resistência à compressão (basicamente, aumentando a quantidade de cimento) para garantir o aumento do módulo de elasticidade do concreto como é praticado atualmente no mercado da construção civil não é garantia de atendimento aos valores especificados em projeto.

5.3.1.3 Efeito do fator ‘lote’ no módulo estático

Outro ponto elencado nesta dissertação diz respeito à variabilidade dos resultados de módulo de elasticidade. Atualmente, os valores experimentais são frutos de ensaios pontuais e determinísticos no qual é desconhecida, a variabilidade desta propriedade ao longo do tempo. Por isso, dado o conjunto de materiais, esta dissertação buscou determinar a variabilidade no módulo de elasticidade em função de diferentes coletas dos agregados graúdos.

Nesse cenário, quando analisado o parâmetro lote, foi verificada também a existência de influência significativa no módulo estático de elasticidade dos concretos, com 95% de confiabilidade como observadas nas análises realizadas individualmente por agregado nas Tabelas 17 a 19.

Tabela 17: Análise de variância (ANOVA) dos parâmetros a/c e lote no módulo estático a 0,3fc de elasticidade. Agregado de granito.

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	p	Significância
água/cimento (A)	23,495	2	11,747	5,728	0,006	Sim
lote (B)	52,093	4	13,023	6,350	0,000	Sim
AB	9,930	8	1,241	0,605	0,769	Não
Erro	108,693	53	2,051			
Total	194,210	67				

Apesar de uma menor influência em relação aos demais parâmetros (tipo de agregado e relação a/c), a partir das análises de variâncias supracitadas, é possível inferir que, para uma mesma tipologia de agregado graúdo existe uma variação nos resultados de módulo estático

Tabela 18: Análise de variância (ANOVA) dos parâmetros a/c e lote no módulo estático a 0,3fc de elasticidade. Agregado de gnaisse(1)

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	p	Significância
água/cimento (A)	117,883	2	58,942	15,211	0,000	Sim
lote (B)	43,087	4	10,772	2,780	0,036	Sim
AB	45,549	8	5,694	1,469	0,191	Não
Erro	201,496	52	3,875			
Total	408,015	66				

Tabela 19: Análise de variância (ANOVA) dos parâmetros a/c e lote no módulo estático a 0,3fc de elasticidade. Agregado de gnaisse(2)

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	p	Significância
água/cimento (A)	219,170	2	109,585	22,864	0,000	Sim
lote (B)	78,653	4	19,663	4,103	0,005	Sim
AB	69,774	8	8,722	1,820	0,092	Não
Erro	277,991	58	4,793			
Total	426,419	70				

de elasticidade decorrente de diferentes lotes de coletas dos agregados graúdos, com 95% de confiabilidade.

A análise deste comportamento sugere então, a aplicabilidade de um conceito probabilístico para o módulo de elasticidade. Isto também foi sugerido em estudos realizados por Montija (2007), Marchi (2011), Borin, Bauer e Figueiredo (2012). Nesse sentido, considerando o módulo de elasticidade como uma variável aleatória, esta pode assumir inúmeros padrões de frequência em função dos dados amostrais. Quando se trata de dados experimentais, existe a tendência de considerar que os mesmos seguem a distribuição normal. Para tal, é necessário verificar se o conjunto de dados aderem a normalidade por meio de testes gráficos e/ou analíticos (MONTGOMERY; RUNGER; CALADO, 2003).

Nesta dissertação, foi utilizado o teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S) no qual, sucintamente, consiste na comparação das frequências acumuladas observadas com as distribuições teóricas. A maior diferença observada (D_{max}) é, então, comparada com o valor de $D_{\alpha(n)}$ dado pela Tabela V de Nanni que depende do nível de probabilidade e do tamanho da amostra. Caso, D_{max} seja menor ou igual a $D_{\alpha(n)}$ a hipótese da normalidade não pode ser rejeitada (PRUDÊNCIO JR., 2015).

Tabela 20: Teste da normalidade de Kolmogorov-Smirnov dos valores de módulo estático.

Traço	Eci,m (GPa)	Desvio (GPa)	n (unid)	Teste K-S			
				D_{max}	$D_{\alpha(n)}$	Status	
0,46	GR	34,4	1,25	21	0,1815	0,188	Normal
0,57		33,9	1,28	22	0,1211	0,186	Normal
0,71		33,0	2,12	25	0,1207	0,180	Normal
0,46	GN1	47,6	1,87	21	0,1176	0,188	Normal
0,57		46,4	1,93	23	0,1776	0,184	Normal
0,71		44,3	2,52	23	0,1041	0,184	Normal
0,46	GN2	47,4	2,72	25	0,1430	0,180	Normal
0,57		45,4	2,29	23	0,1060	0,184	Normal
0,71		43,0	2,36	25	0,1077	0,180	Normal

De acordo com os resultados obtidos, o valor de D_{max} foi inferior a $D_{\alpha(n)}$, demonstrando que os dados se ajustaram satisfatoriamente a distribuição normal e, portanto, com 95% de confiabilidade não é possível rejeitar a hipótese da normalidade para os conjuntos de valores experimentais.

Pode existir, então, uma probabilidade associada de se obterem valores de módulo de elasticidade superiores (ou em alguns casos, inferiores) ao especificado pela equação da norma brasileira. Baseado nos resultados obtidos dos módulos estáticos de elasticidade, a Tabela 21 apresenta os valores dos módulo de elasticidade estimados pela norma (Eci, NBR 6118), as médias dos módulos obtidos experimentalmente (Eci,m, Exper.), as probabilidades dos experimentais serem superiores ao estimado (Prob. Eci,exp>Eci,nbr) e os valores de módulo característicos (Eck, Exper.), calculados com 95% de confiança a partir da distribuição t-student.

Tabela 21: Cálculo da probabilidade dos valores experimentais e estimativa dos módulos de elasticidade característicos.

Traço	fc,m (MPa)	Desvio (MPa)	Classe	Eci NBR 6118	Eci,m Exper. (GPa)	Desvio (GPa)	n (unid)	t	Prob. (%)	Eck Exper.
0.46 GR	38,4	2,80	30	30,7	34,4	1,25	21	-13,763	100,0	32,3
0.57 GR	30,7	2,10	25	28,0	33,9	1,28	22	-21,586	100,0	31,7
0.71 GR	22,3	1,90	15	21,7	33,0	2,12	25	-26,717	100,0	29,4
0.46 GN1	39,3	3,29	30	30,7	47,6	1,87	21	-41,549	100,0	44,4
0.57 GN1	31,4	2,60	25	28,0	46,4	1,93	23	-45,622	100,0	43,1
0.71 GN1	22,1	2,63	15	21,7	44,3	2,52	23	-43,033	100,0	40,0
0.46 GN2	40,0	3,92	30	30,7	47,4	2,72	25	-30,836	100,0	42,8
0.57 GN2	31,2	2,02	25	28,0	45,4	2,29	23	-36,456	100,0	41,5
0.71 GN2	22,2	1,86	15	21,7	43,0	2,36	25	-45,218	100,0	39,0

Nesta pesquisa em específico, para a faixa de resistência considerada e agregados graúdos utilizados, a probabilidade da média dos valores obtidos serem maiores que o estimado pela norma é igual a 100% para todos os concretos estudados. Isto é, para estes concretos, os resultados estimados pela equação da norma seriam 100% conservadores em relação aos resultados dos módulos de elasticidade experimentais.

Contudo, cabe ressaltar que as variabilidades correspondem à somatória de contribuição das variabilidades intrínsecas aos materiais constituintes dos concretos bem como, a fatores de produção e de ensaio para determinação do módulo de elasticidade. No que tange a variabilidade dos materiais, optou-se nessa dissertação não levar em consideração às variações dos demais insumos e observar apenas a variação de diferentes coletas dos agregados graúdos. Ainda assim, fica demonstrado que o módulo de elasticidade assume características probabilísticas com distribuição normal.

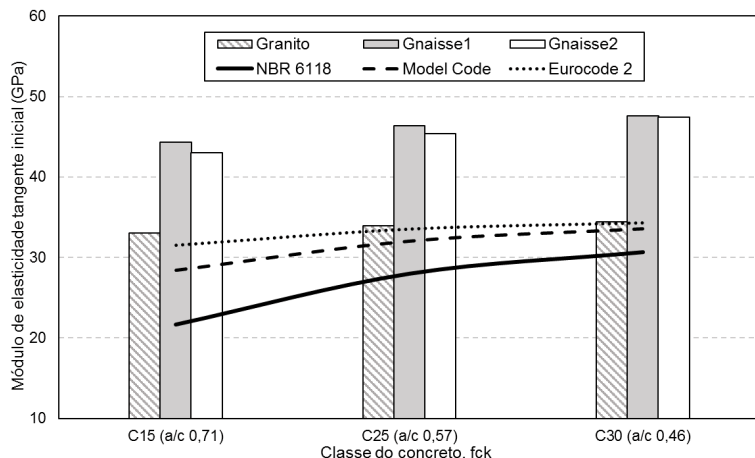
Nesse contexto, é possível calcular valores de módulo de elasticidade característicos (Eck) isto é, valores médios experimentais que fossem obtidos em ensaios subsequentes teriam 95% de probabilidade de serem superiores ao Eck calculado. Dessa forma, para este conjunto específico de materiais, poderiam ser dosados concretos que atendessem esses valores de módulo de elasticidade característicos estimados e mesmo assim, atenderiam os valores propostos pelas normas. Ressalta-se ainda que, estes valores característicos poderiam ser utilizados no momento de concepção das estruturas e no controle e aceitação do módulo em obra.

5.3.1.4 Comparativo com os estimadores de previsão normativos

Como citado na revisão bibliográfica, outro modo de obtenção dos valores de módulo de elasticidade é por meio das equações propostas pelas normas. Foram calculados os valores de módulo de elasticidade tangente, a partir das equações de previsão especificadas pela norma brasileira e pelos principais códigos internacionais e podem ser observadas na Figura 34.

É possível notar, dentro das limitações dos estudos, que os valores experimentais obtidos foram superiores aos previstos pelas expressões das normas e códigos internacionais, independente da classe do concreto e do agregado graúdo utilizado. Os valores teóricos (tanto o nacional quanto os internacionais) ajustaram-se mais próximos dos valores experimentais dos concretos produzidos com granito. Já para

Figura 34: Valores de módulo de elasticidade tangente inicial estimados pelas normas e obtidos experimentalmente.



Fonte: Autor, 2018.

o agregado de gnaiss, os valores estimados são conservadores e, no caso da norma brasileira NBR 6118 (2014), em torno de 55% inferiores quando comparados com resultados dos concretos produzidos com agregados de gnaisses.

Ainda, como mencionado anteriormente, o módulo apresenta um comportamento probabilístico e desta forma, o risco de não atendimento do valor de módulo especificado em projeto é maior quando o concreto é dosado com agregado graúdo de granito do que quando dosado com agregado de gnaiss.

Um ponto a se destacar é que a norma brasileira NBR 6118 (2014), atualmente em vigor, orienta a utilização de um coeficiente de correção do valor do módulo em função do tipo de agregado. Tanto para granito como para gnaiss, este valor é igual a 1,0. No entanto, como foi possível observar neste trabalho, diferenças significativas foram observadas nos resultados dos módulos produzidos com esses agregados.

Bilesky (2016) estudou dentre outros fatores, a influência da natureza petrográfica dos agregados graúdos. Foram produzidos concretos com agregados graúdos de calcário, granito e diabásio provenientes do Estado de São Paulo. Além das diferenças observadas entre os agregados, os resultados obtidos permitiram concluir que os módulos dos concretos com agregados de calcário não foram inferiores aos resultados de módulo dos concretos produzidos com agregados de granito como

prediz os modelos das equações e o coeficiente de correção da norma NBR 6118 (2014).

Lopes et al. (2017) compararam os resultados de módulo de concretos produzidos com agregados graúdos provenientes de diferentes rochas com o modelo teórico proposto pela norma NBR 6118 (2014). Os autores concluem que, para concretos produzidos com basalto e granito, os valores teóricos são subestimados nas resistências mais baixas e superestimados nas resistências mais elevadas enquanto que, apenas para os concretos produzidos com agregados graúdos de gnaiss, os resultados teóricos foram inferiores aos experimentais.

Fica evidente, nos estudos citados e nos resultados obtidos nesta dissertação, a discrepância em relação às estimativas propostas pela norma brasileira. Possivelmente, por ser de abrangência nacional, os coeficientes de correção dos agregados podem gerar distorções localizadas dos resultados experimentais com os estimados, devido à variabilidade das características intrínsecas das rochas.

5.3.1.5 Comparativo com os modelos micromecânicos bifásicos

Com o intuito de elucidar e complementar os estudos referentes ao módulo de elasticidade dos concretos, foram realizados ensaios individuais nas argamassas enquanto que, os módulos individuais das rochas (granito e gnaiss) foram obtidos por meio de relatórios de ensaios cedidos por uma das empresas de serviços de concretagem da região e estão apresentados na Tabela 22.

Tabela 22: Fração volumétrica e módulo de elasticidade das argamassas e das rochas utilizadas nos concretos.

Traços	Argamassa		Agregado graúdo		
	Volume (%)	Módulo (GPa)	Volume (%)	Módulo (GPa)	
				Granito	Gnaiss
a/c 0,46	59,2	31,8	40,8		
a/c 0,57	59,2	31,3	40,8	49,9	90,0
a/c 0,71	59,3	28,1	40,7		

Diante do exposto até o momento, cabe lembrar que a resistência à compressão é fundamentalmente influenciada pela qualidade da pasta do concreto que, por sua vez, está relacionada com a quantidade de poros/vazios presentes no volume da pasta (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Os resultados obtidos alterando a relação a/c e o tipo

de cimento nesta dissertação corroboraram para evidenciar este comportamento. Entretanto, a ‘qualidade da pasta’ parece exercer um peso diferente nos resultados de módulo de elasticidade do que na resistência à compressão.

O módulo é influenciado pela quantidade e pelas propriedades elásticas de seus constituintes. A partir dos resultados mencionados acima, intuitivamente espera-se que os valores de módulo dos concretos sejam muito mais influenciados pelos diferentes módulos de elasticidade dos agregados graúdos do que pelas outras variáveis que se mantiveram praticamente constantes para os diferentes traços estudados, conforme exposto na Tabela 22. De posse desses valores e, com auxílio das equações dos diversos modelos micromecânicos bifásicos, foi possível estimar o módulo de elasticidade e compará-los com os resultados obtidos experimentalmente (Tabela 23).

Tabela 23: Comparativo dos módulos de elasticidade obtidos por meio dos modelos micromecânicos bifásicos com os resultados experimentais.

Traço	Modelos de previsão (GPa)					Ec, exp (GPa)
	Voigt	Reuss	Hirsch	Hansen	Counto	
0,46	39,2	37,4	38,3	38,2	38,4	34,4
0,57	38,9	36,9	36,9	37,8	38,0	33,9
0,71	37,0	34,2	34,2	35,4	35,7	33,0
0,46	55,6	43,2	48,6	47,2	48,5	47,6
0,57	55,2	42,6	48,1	46,7	48,0	46,4
0,71	53,3	39,1	45,1	43,4	44,8	44,3

*grau de adesão igual a 0,5 (adotado).

Em uma análise geral, os resultados estimados por meio dos modelos bifásicos, foram superiores aos resultados experimentais. Isto se justifica, pois estes modelos não levam em consideração a existência de uma terceira fase, a zona de transição na interface, além da matriz cimentícia e agregados que, sem dúvida, exerce uma contribuição negativa no que tange a rigidez dos concretos (MONTIJA, 2007). Mesmo assim, sem levar em consideração a influência desta fase, é possível notar as pequenas variações nos resultados entre os diferentes traços propostos (níveis de resistências e agregados graúdos utilizados) nos diversos modelos bifásicos.

Também pode ser observado o peso de influência do módulo da fase agregado no comportamento elástico do compósito. Independente do modelo adotado, os valores utilizando o módulo do agregado graúdo de granito são, cerca de 30% inferiores, aos resultados dos modelos calculados com o módulo do agregado de gnaiss, condizentes com os

resultados obtidos experimentalmente.

É importante destacar, a contribuição do agregado miúdo na capacidade de rigidez dos concretos estudados neste trabalho. Alterar a quantidade de pasta (isto é, a relação a/c) não produziu diferenças significativas nos valores de módulo de elasticidade das argamassas. A possível sobreposição de efeitos na contribuição do módulo do concreto (diminuição da pasta e aumento do agregado miúdo) já mencionado anteriormente foi, mais uma vez, evidenciado nos resultados de módulo de elasticidade das argamassas.

Dessa maneira, os modelos bifásicos complementam as observações realizadas e corroboram com os resultados obtidos nesta dissertação, demonstrando a importância das características individuais das fases constituintes (frações volumétricas e módulo de elasticidade) principalmente do módulo do agregado graúdo (associado à origem do material) na contribuição do módulo do concreto como um todo.

Paralelamente, buscou-se avaliar a influência do tipo de cimento nos resultados de módulo. Para isso, foram dosados concretos idênticos, em volume, produzidos com cimento CP-V ARI e comparados com o cimento CP-IV, ambos produzidos com agregados graúdos de granito. Os resultados de resistência à compressão já foram discutidos anteriormente no qual foram observadas diferenças bastantes significativas entre estes concretos. Entretanto, não foram anotadas influências expressivas do tipo de cimento no módulo de elasticidade, como pode ser visto na Tabela 24.

Tabela 24: Comparativo dos valores de módulo estático de elasticidade de concretos produzidos com cimento CP-V ARI e CP-IV.

Traço		Eci	Desvio	CV	
Agregado	a/c cimento				(GPa)
Granito	0,46	CP IV	34,7	0,64	1,9
		CP V	34,4	1,00	2,9
	0,57	CP IV	34,3	0,95	2,8
		CP V	33,0	1,18	3,6

Isto pode ser justificado pois, apesar dos níveis de resistências terem sido distintos, os volumes de pasta foram iguais para os dois concretos o que, possivelmente, proporcionou a mesma parcela contributiva no módulo de elasticidade. E, ainda, quando analisada a contribuição de todos os constituintes do concreto, a parcela da pasta não foi significativa para proporcionar mudanças expressivas nos valores de módulo de elasticidade dos concretos.

5.3.2 Módulo de elasticidade dinâmico

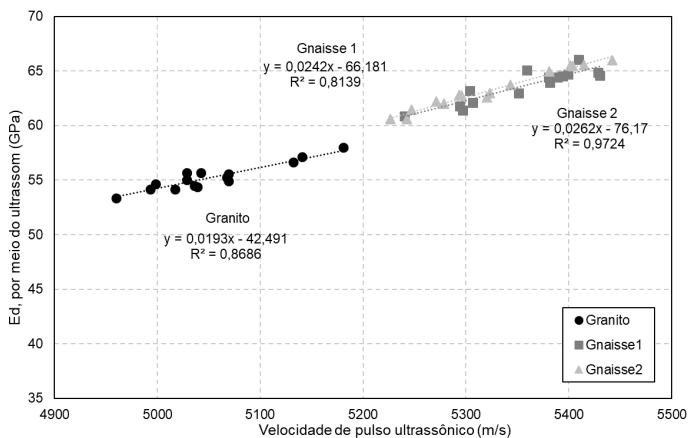
Esta dissertação apresentou duas formas experimentais distintas de se obter valores de módulo de elasticidade dinâmicos, sendo eles: ensaios por meio de pulso ultrassônico e ensaios por meio de impulso longitudinal. Os resultados são apresentados e discutidos nos itens a seguir.

5.3.2.1 Módulo dinâmico por meio do pulso ultrassônico

A partir do ensaio de pulso ultrassônico são obtidos valores de velocidades que correspondem ao tempo necessário para a onda ultrassônica percorrer a distância entre os transdutores (Apêndice B).

Em função das velocidades, são calculados os valores dos módulos de elasticidade dinâmico a partir da equação de correlação existente na norma NBR 8802 (2013). Os resultados podem ser visualizadas na Figura 35. Os desvios obtidos foram de 1,5, 1,8 e 1,7 GPa para os concretos produzidos com granito, gnaissel e gnaissel2, respectivamente.

Figura 35: Valores médios de módulos de elasticidade dinâmico dos concretos em função da velocidade de pulso, obtidos por meio do ensaio de pulso ultrassônico.



Fonte: Autor, 2018

Para os concretos produzidos com agregados de granito, as velocidades variaram de 4960 a 5180 m/s. Em relação aos concretos com

agregados de gnaiss¹, as velocidades foram de 5240 a 5230 m/s. Para os concretos produzidos com gnaiss², as velocidades obtidas estiveram entre 5226 e 5442 m/s. É possível observar que as médias das velocidades foram sempre superiores para os concretos produzidos com agregados de gnaiss quando comparadas com os valores dos concretos com agregados de granito.

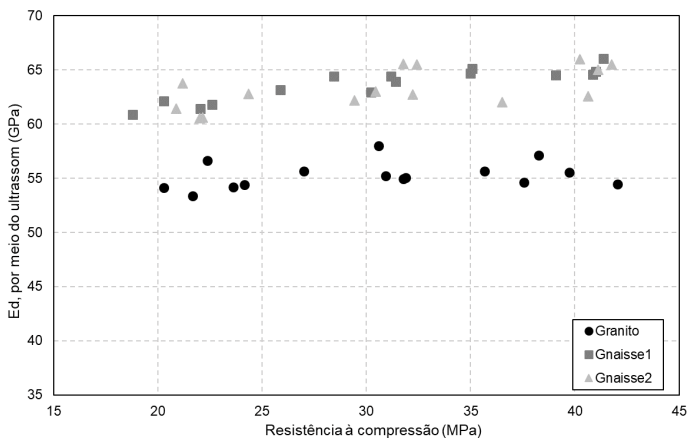
Irrigaray (2012), em sua pesquisa, realizou ensaios de velocidade de pulsos ultrassônicos em rochas da região de Santa Catarina em função de diversas condições de saturação. Foram realizados ensaios em quatro tipos distintos de granitos e um diabásio e os resultados mostraram que as velocidades foram superiores para as rochas em condições de saturado superfície seca, alcançando valores que variaram de 5700 a 6100 m/s para rochas de granito.

Assumindo, a priori, que a ordem de grandeza para as velocidades de pulso ultrassônico das rochas utilizadas nesta pesquisa também esteja em 6000 m/s como na pesquisa anteriormente mencionada e, considerando que o volume do agregado graúdo ocupou cerca da metade do volume do concreto, a tendência esperada é de que a velocidade do compósito seja mais influenciada pelo agregado graúdo da mesma maneira como ocorreu para a determinação do módulo de elasticidade.

Os resultados demonstraram a mesma tendência de comportamento dos valores estáticos. Igualmente, é possível observar que os módulos dinâmicos foram influenciados pelo tipo de agregado graúdo utilizado, ou seja, nesta pesquisa os agregados de granito resultaram em valores de módulo dinâmicos inferiores aos dos concretos com agregados de gnaiss. Quanto à variação em função da relação a/c, também foi constatado a tendência de aumento dos valores de módulo em função da diminuição da relação água/cimento.

Os resultados de módulo de elasticidade dinâmico em função da resistência à compressão podem ser visualizados na Figura 36.

Figura 36: Valores médios de módulo de elasticidade dinâmico dos concretos em função da resistência à compressão, obtidos por meio do ensaio de pulso ultrassônico.



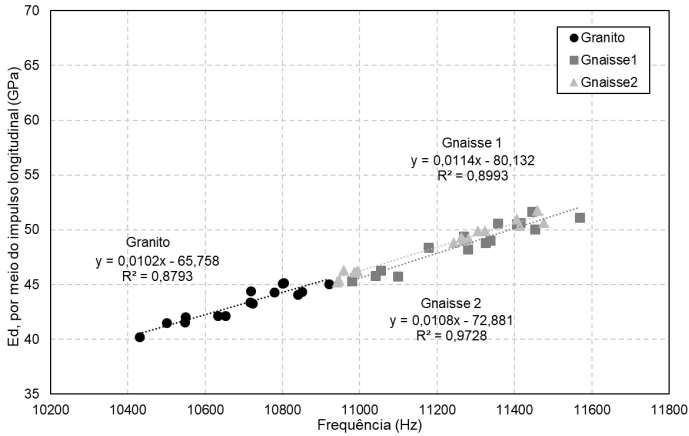
Fonte: Autor, 2018

5.3.2.2 Módulo dinâmico por meio do impulso longitudinal

A partir do ensaio de impulso longitudinal são obtidos valores de frequências naturais (Apêndice C). Para os concretos produzidos com agregados de granito, as frequências variaram de 10430 a 10921 Hz. Em relação aos concretos com agregados de gnaissel, as frequências foram de 10980 a 11570 Hz. Por fim, para os concretos produzidos com gnaisse2, as frequências obtidas estiveram entre 10942 e 11476 Hz.

É possível observar que as médias das frequências foram sempre superiores para os concretos produzidos com agregados de gnaisse quando comparadas com os valores dos concretos com agregados de granito, seguindo a mesma tendência já observada nos ensaios anteriores (estático e por pulso ultrassônico). A Figura 37 apresenta os valores dos módulos de elasticidade que foram calculados a partir da equação de correlação em função das frequências obtidas.

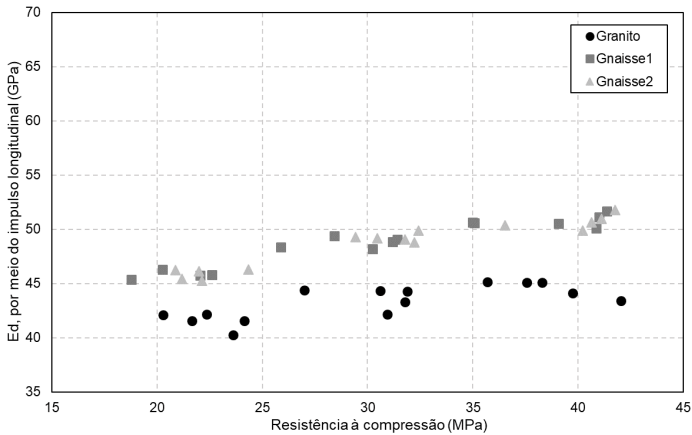
Figura 37: Módulo de elasticidade dinâmico dos concretos em função da frequências naturais, obtidos por meio do ensaio de impulso longitudinal.



Fonte: Autor, 2018

Os resultados de módulo de elasticidade dinâmico em função da resistência à compressão podem ser visualizados na Figura 38.

Figura 38: Módulo de elasticidade dinâmico dos concretos em função da resistência à compressão, obtidos por meio do ensaio de impulso longitudinal.



Fonte: Autor, 2018

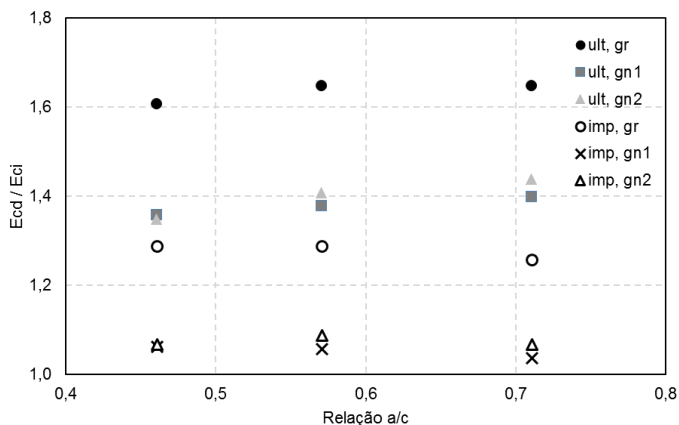
Como é possível observar na Figura 38, analogamente ao comportamento obtido nos ensaios estático e dinâmico de pulso ultrassô-

nico, os resultados de ensaios por meio do impulso longitudinal também apresentaram a mesma tendência de comportamento do ensaio estático, isto é, foram influenciados pelo tipo de agregado utilizado e pela relação a/c .

5.3.3 Comparativo entre ensaios estático e dinâmicos

A Figura 39 apresenta as diferenças obtidas, neste estudo, entre os resultados de módulo de elasticidade tangente inicial realizados por meio de ensaios estáticos com os valores obtidos por meio de ensaios dinâmicos. Os ensaios dinâmicos foram superiores aos resultados obtidos nos ensaios estáticos independente da relação a/c , do tipo de agregado e do lote, confirmando o observado nas literaturas.

Figura 39: Resumo das variações observadas dos resultados de módulo dinâmicos em relação aos valores de módulo obtidos por meio do ensaio estático.



Fonte: Autor, 2018

É possível observar, no entanto, que houve diferenças no quanto estes valores são superiores. A partir dos resultados é possível inferir que, independente do ensaio, existem diferenças nas variações quando utilizado agregados de origem diferentes. Para o ensaio de ultrassom, foram observados que os valores de módulo dinâmicos foram superiores aos estáticos em até 65%, em média, utilizando agregado de granito enquanto que, para os agregados de gnaíse, estes valores estiveram em torno de 40%, em média. Já para o ensaio de impulso longitudinal, os valores foram na ordem de 28% superiores em relação ao estático para

concretos produzidos com granito e 7% para concretos com gnaíse.

Shehata (2011) e Mehta e Monteiro (2014) comentam que os valores de módulo podem variar de 20% a 40% superiores aos resultados estáticos dependendo, essencialmente, do nível de resistência à compressão. Diferentemente nesta dissertação, o quanto o módulo dinâmico varia em função do módulo estático, possivelmente está associado às características individuais das fases constituintes (da origem do agregado graúdo) bem como ao tipo de ensaio dinâmico executado (pulso ultrassônico ou impulso longitudinal) e não somente a resistência à compressão. Como já comentado na revisão bibliográfica, Jurowski e Grzeszczyk (2015) também encontraram diferenças no quanto o módulo dinâmico é superior ao estático.

Cabe ainda, uma análise em relação aos desvios-padrões e os coeficientes de variações obtidos por meio dos ensaios estáticos e dinâmicos. Os mesmos podem ser visualizados na Tabela 25 abaixo.

Tabela 25: Resumo das variações observadas dos desvios padrões dos módulos de elasticidade (estático e dinâmicos).

Ensaio	Agregado	a/c 0,46		a/c 0,57		a/c 0,71	
		Desv (GPa)	CV (%)	Desv (GPa)	CV (%)	Desv (GPa)	CV (%)
Estático	Granito	1,25	3,6	1,28	3,8	2,12	6,4
	Gnaíse1	1,87	3,9	1,93	4,2	2,52	5,7
	Gnaíse2	2,72	5,7	2,29	5,0	2,36	5,5
Ultrassom	Granito	1,22	2,2	1,21	2,2	1,21	2,2
	Gnaíse1	1,98	3,0	1,64	2,6	1,65	2,7
	Gnaíse2	1,78	2,8	1,48	2,3	1,75	2,8
Impulso	Granito	0,13	0,3	0,11	0,2	0,10	0,2
	Gnaíse1	0,04	0,1	0,03	0,1	0,03	0,1
	Gnaíse2	0,03	0,1	0,03	0,1	0,04	0,1

Como esperado, as maiores variações foram observadas nos resultados realizados por meio de ensaio estático e o coeficiente de variação do ensaio esteve entre 3,7% e 6,42%. Em seguida, o ensaio de ultrassom apresentou variações entre 2,2% a 3,0%.

No que diz respeito as variações dos valores do módulo dinâmico obtidos utilizando o equipamento desenvolvido pela ATCP – Engenharia Física as variações foram inferiores a 1% para todos os concretos assim como observado no trabalho de Diógenes et al. (2011). Desde que aprofundado o conhecimento à respeito dos parâmetros que influenciam na aquisição das frequências naturais de vibração e realizados estudos interlaboratoriais de modo a validar os resultados, este tipo de ensaio pode se tornar uma opção viável e confiável para a determinação das propriedades elásticas dos concretos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, são apresentadas as principais considerações sobre os resultados obtidos no programa experimental proposto nesta dissertação. Em seguida, constam sugestões de trabalhos futuros que possam contribuir para os estudos que tangem o comportamento elástico dos concretos. É importante ressaltar que, dado a numerosa quantidade de variáveis que interferem no módulo de elasticidade dos concretos, as conclusões aqui apresentadas se aplicam somente para os materiais, traços e metodologias especificadas neste trabalho.

6.1 CONCLUSÕES GERAIS

Em relação ao módulo de elasticidade obtido por meio de ensaios estáticos, foi possível avaliar a influência do tipo de agregado, da relação água/cimento e do lote ao longo do tempo.

No que diz respeito propriamente à variabilidade do módulo em função das diferentes coletas dos agregados graúdos, foi possível observar diferenças significativas nos resultados com 95% de confiança. Isto permitiu sugerir que o módulo de elasticidade não deve ser tratado como um parâmetro determinístico e, sim, probabilístico. A partir dos resultados obtidos aqui, pôde-se inferir que a distribuição dos dados experimentais segue a normalidade e que existe uma probabilidade intrínseca dos mesmos não atenderem às especificações calculados pela NBR 6118 (2014), que pode ser quantificada.

Ainda, foi possível notar que os resultados experimentais foram superiores aos obtidos a partir dos modelos previstos pelas normas e pelos códigos internacionais, independente da relação a/c e do tipo de agregado utilizado. No entanto, cabe destacar a possibilidade de distorções dos resultados quando utilizados agregados graúdos de granito e gnaisse em concretos em função do coeficiente de correção em função do tipo do agregado (α_E) adotar o mesmo valor paras esses agregados.

Foram verificadas diferenças significativas nos resultados quando utilizados agregados de diferentes origens e, nesta dissertação, concretos com agregados de granito resultaram em valores inferiores, em até 30%, em relação aos concretos produzidos com agregados de gnaisse. Não foram observadas diferenças significativas nos resultados para os concretos produzidos com agregados de gnaisses provenientes de diferentes localidades, com 95% de confiança.

O parâmetro relação água/cimento também ocasionou variações significativas nos resultados de módulo. Percebeu-se, no entanto, variações menos expressivas nos módulos. A partir disto foi possível concluir que, aumentar a resistência à compressão indiscriminadamente não significa, necessariamente, em um aumento nos valores de módulo de elasticidade.

Com relação aos ensaios dinâmicos, pôde-se inferir que os resultados obtidos foram superiores aos estáticos. No entanto, observou-se o quanto os valores dinâmicos eram superiores aos estáticos variaram em função do tipo de agregado graúdo utilizado bem como, propriamente do ensaio adotado. Os menores desvios obtidos foram observados nos ensaios de impulso longitudinal, seguido do pulso ultrassônico e do estático.

6.2 RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Dos resultados obtidos, observa-se a necessidade de ampliar e aprofundar o conhecimento a respeito dos fatores que influenciam no comportamento elástico dos concretos. É sugerido, então, os seguintes estudos:

- Estudos com outros agregados graúdos da região de Santa Catarina e de outros Estados, com o intuito de caracterizar e mensurar a influência dos mesmos no módulo de elasticidade, uma vez que a característica do agregado graúdo é eminentemente regional;
- Estudo da influência dos agregados miúdos no módulo de elasticidade dos concretos;
- Avaliar o módulo de elasticidade em outros níveis de resistências à compressão;
- Continuar a análise e verificação da variabilidade dos demais materiais no módulo de elasticidade;
- Pesquisas relacionadas aos ensaios dinâmicos afim de ajustar e afinar os parâmetros que influenciam no módulo de elasticidade dos concretos.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.
NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro/RJ, 2003.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.
NBR NM 46: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 μm , por lavagem. Rio de Janeiro/RJ, 2003.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.
NBR 15630: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro/RJ, 2008.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.
NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova. Rio de Janeiro/RJ, 2008.

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

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.
NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro/RJ, 2009.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.
NBR 9833: Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro/RJ, 2009.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.
NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro/RJ, 2009.

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

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro/RJ, 2009.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.** Rio de Janeiro/RJ, 2013.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento.** Rio de Janeiro/RJ, 2014.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7680: Concreto – Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto Parte 1: Resistência à compressão axial.** Rio de Janeiro/RJ, 2015.

ACI COMMITTEE AND AMERICAN CONCRETE INSTITUTE AND INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ACI 318-14: Building code requirements for structural concrete (ACI 318-14) and commentary.** [S.l.], 2014.

AHMAD, S.; ALGHAMDI, S. **A study on effect of coarse aggregate type on concrete.** [S.l.]: Arab Sci J Eng, vol. 37, pg. 1777-86, 2012.

ALHADAS, M. F. S. **Estudo da influência do agregado graúdo de diferentes origens mineralógicas nas propriedades mecânicas do concreto.** [S.l.]: Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte/MG, 2008.

ALMEIDA, P. d. O. **Transdutores para medida de deslocamentos lineares. Notas de aula de PEF-7594—Análise Experimental de Estruturas da EPUSP.** São Paulo, 2004.

ANDREUCCI, R. **Ensaio por ultrassom: manual de aspectos básicos.** [S.l.]: Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos. Rio de Janeiro/RJ, 2016.

ARAÚJO, J. M. d. **Modelos para previsão do módulo de deformação longitudinal do concreto: NBR-6118 versus CEB Models for prevision of the modulus of elasticity of concrete:**

NBR-6118 versus CEB. Teoria e Prática na Engenharia Civil, n. 12, p. 81–91, 2008.

ARAÚJO, S. S. **Influência do tipo de medição na determinação do módulo estático de elasticidade do concreto**. [S.l.]: Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Goiás. Goiânia/GO, 2011.

ARAÚJO, S. S.; GUIMARÃES, G. N.; GEYER, A. L. B. **Influence of the type of measuring device in determining the static modulus of elasticity of concrete**. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, SciELO Brasil, v. 5, n. 5, p. 555–575, 2012.

ARRUDA, A. M. **Módulo de elasticidade de concretos produzidos com formações rochosas do triângulo mineiro**. [S.l.]: Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia/MG, 2013.

ASKELAND, D. R.; PHULÉ, P. P. **Ciência e engenharia dos materiais**. [S.l.]: Cengage Learning, 2008.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E1876: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration**. West Conshohocken/PA, 2015.

BARBOSA, A. H. **Contribuição ao estudo sobre a obtenção do módulo de elasticidade do concreto utilizando modelagem micromecânica**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife/PE, 2010.

BARBOSA, I. L. S. **Influência dos agregados graúdos da Região de Goiânia no módulo de deformação tangente inicial do concreto**. [S.l.]: Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Goiás. Goiânia/GO, 2009.

BATTAGIN, I. L. S. **Módulo de Elasticidade do Concreto Como Analisar e Especificar**. [S.l.]: Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados da ABNT (CB-18), 2007.

BESHR, H.; ALMUSALLAM, A.; MASLEHUDDIN, M. **Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete**. *Construction and Building Materials*, v. 17, n. 2, p. 97–103, 2003.

- BEUSHAUSEN, H.; DITTMER, T. **The influence of aggregate type on the strength and elastic modulus of high strength concrete**. [S.l.]: Construction and Building Materials, vol. 74, pg. 132-139, 2015.
- BILESKEY, P. C. **Contribuição aos estudos do módulo de elasticidade do concreto**. [S.l.]: Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. São Paulo/SP., 2016.
- BORIN, L. A.; BAUER, R. J. F.; FIGUEIREDO, A. D. de. **Risco de rejeição de concretos devido à não conformidade com os parâmetros normalizados para o módulo de elasticidade**. CONSTRUINDO, v. 4, n. 02, 2012.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **Eurocode 2: Eurocode 2: Design of Concrete Structures: Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings**. [S.l.], 2004.
- CALLISTER, W. D. **Materials science and engineering: an introduction**. [S.l.]: 5ª Edição, LTC Editora, São Paulo/SP, 2002.
- CEB-FIB. **Model Code: Model Code 2010 - final draft, volume 1 Bulletin 65**. [S.l.], 2010.
- CTBUH - COUNCIL ON TALL BUILDINGS AND URBAN HABITAT. **CTBUH: lista dos edifícios altos do Brasil**. <https://skyscrapercenter.com/country/brazil>, acessado em 30/11 às 17h16, 2016.
- CUPERTINO, M. A. L. et al. **Análise da influência das alterações da norma ABNT NBR 8522:2008 no resultado do módulo de elasticidade**. [S.l.]: 51º Congresso Brasileiro do Concreto. Curitiba/PR, IBRACON, 2009.
- DIÓGENES, H. et al. **Determination of modulus of elasticity of concrete from the acoustic response**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. volume 4, number 5. pg 803–813. SciELO Brasil., 2011.
- FRANÇA, R. **Deformações estruturais em concreto e soluções**. [S.l.]: Revista Técnica, edição 81. Dez/2003. <http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/81/artigo285621-1.aspx>, Acessado em 29/11/2016 às 23h, 2003.

GAGLIARDO, D. P.; VIDAL, P. A.; GAGLIARDO, J. C. **Influência da granulometria do agregado graúdo no módulo de elasticidade do concreto de cimento Portland**. [S.l.]: 52º Congresso Brasileiro do Concreto. Fortaleza/CE, IBRACON, 2010.

GRAEFF, E. **Avaliação térmica de blocos de fundação em concreto armado**. [S.l.]: Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis/SC, 2013.

GRAEFF, E.; Prudêncio Jr., L. R. **Determinação do módulo de elasticidade dos concretos da central de Itajaí da Maxmohr**. [S.l.]: Relatório técnico, 2016.

HELENE, P. **Estudo da variação do módulo de elasticidade do concreto com a composição e características do concreto fresco e endurecido**. [S.l.]: Relatório técnico para Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), 1998.

IRRIGARAY, M. **Estimativa da resistência do concreto à compressão por meio da velocidade de propagação dos pulsos ultrassônicos na pasta do concreto**. [S.l.]: Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis/SC, 2012.

JUNCKES, R. **Influência da adição de cinza volante na elevação de temperatura de concretos aplicados em blocos de fundação**. [S.l.]: Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis/SC, 2015.

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

KLISZCZEWICS, A.; AJDUKIEWICZ, A. **Differences in instantaneous deformability of HS/HPC according to the kind of coarse aggregate**. [S.l.]: *Cement and Concrete Composites*. volume 24, pg 263-267, 2002.

LOPES, J. B. d. O. et al. **Estudo do módulo de elasticidade em concretos produzidos com agregados graúdos proveniente de diferentes rochas: comparação com o cálculo teórico da NBR 611:2014**. [S.l.]: 59º Congresso Brasileiro do Concreto. Bento Gonçalves/RS, IBRACON, 2017.

MARCHI, R. D. **Estudo sobre a variabilidade do módulo de deformação do concreto associada a fatores intrínsecos à**

produção do material. [S.l.]: Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo/SP, 2011.

MEHTA, P.; MONTEIRO, P. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** [S.l.]: 2º ed. São Paulo, IBRACON, 2014.

Melo Neto, A. A.; HELENE, P. R. L. **Módulo de elasticidade: dosagem e avaliação de modelos de previsão do módulo de elasticidade de concretos.** [S.l.]: 44º Congresso Brasileiro do Concreto. Belo Horizonte/MG, IBRACON, 2002.

MENDES, S. E. S. **Estudo experimental de concreto de alto desempenho utilizando agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba.** [S.l.]: Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba/PR, 2002.

MONTGOMERY, D.; RUNGER, G. C.; CALADO, V. **Estatística Aplicada e Probabilidade Para Engenheiros.** [S.l.]: 2 Edição. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2003.

MONTIJA, F. C. **Aspectos da variabilidade experimental do ensaio de módulo de deformação do concreto.** [S.l.]: Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo/SP, 2007.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** [S.l.]: 2 edição. Editora Pini. São Paulo, 1997.

NIST 1963 - NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY TECHNICAL NOTE 1963. **NIST-1963: Influence of aggregate characteristics on concrete performance.** Department of Commerce/U.S., 2017.

NUNES, F. W. G. **Resistência e módulo de elasticidade de concretos usados no Rio de Janeiro.** [S.l.]: Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

PACHECO, J. et al. **Considerações sobre o Módulo de Elasticidade do Concreto.** [S.l.]: 56º Congresso Brasileiro do Concreto. Natal/RN, IBRACON, 2014.

PIASTA, W.; GÓRA, J.; BUDZYŃSKI, W. **Stress-strain relationships and modulus of elasticity of rocks and of ordinary and high performance concretes.** [S.l.]: Construction and Building Materials, vol. 153, pg. 728-739, 2017.

Pompeu Neto, B. B.; OLIVEIRA, D. R. C.; RAMOS, D. **Efeitos do tipo, tamanho e teor de agregado graúdo no módulo de deformação do concreto de alta resistência.** [S.l.]: Revista Matéria, volume 16, pg. 690 - 702, 2011.

PRUDÊNCIO JR., L. **Apostila métodos estatísticos.** Notas de aula ECV4227000 – Métodos estatísticos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina., 2015.

RASHID, M. et al. **Correlations between mechanical properties of high-strength concrete.** [S.l.]: Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 14, pg. 230-238, 2002.

ROHDEN, A. B. **Efeito da resistência e da dimensão máxima característica do agregado graúdo nas propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho.** [S.l.]: Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre/RS, 2011.

SALUM, P. L. **Efeito da elevação de temperatura sobre a resistência à compressão de concretos massa com diferentes teores de cinza volante.** [S.l.]: Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis/SC, 2016.

SBRIGHI NETO, C. **Agregados naturais, britados e artificiais para concreto.** [S.l.]: Concreto: ciência e tecnologia São Paulo: IBRACON, 2011. 633–654 p.

SHEHATA, L. D. **Deformações instantâneas do concreto.** [S.l.]: Concreto: ciência e tecnologia São Paulo: IBRACON, 2011. 633–654 p.

SILVA, D. S.; PELISSER, F. **A influência do tipo de agregado, do cimento e da relação água/cimento no módulo de elasticidade do concreto.** [S.l.]: 47º Congresso Brasileiro do Concreto. Recife/PE, IBRACON, 2005.

SOUZA, F. C. **Avaliação do preenchimento com sistema epóxi de fendas induzidas em estruturas de concreto pela análise do sinal ultrassônico.** [S.l.]: Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis/SC, 2017.

TOCHETTO, E. **Dosagem e estudo da evolução da temperatura de concreto massa destinado à confecção de**

blocos de fundação. [S.l.]: Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis/SC, 2010.

UYSAL, M. **The influence of coarse aggregate type on mechanical properties of fly ash additive self-compacting concrete.** [S.l.]: Construction and Building Materials, vol. 37, pg. 533 - 540, 2012.

VAN VLACK; LAWRENCE, H. **Princípios de ciência e tecnologia dos materiais.** [S.l.], 2003.

VASCONCELOS, A. C.; GIAMUSSO, S. E. **O misterioso módulo de elasticidade.** [S.l.]: 40º Congresso Brasileiro do Concreto, Rio de Janeiro, IBRACON, 1998.

YILDIRIM, H.; SENGUL, O. **Modulus of elasticity of substandard and normal concretes.** [S.l.]: Construction and Building Materials, vol. 25, pg. 1645 - 1652, 2011.

**APÊNDICE A – Resultados individuais: determinação do
módulo estático de elasticidade**

Moldagem	a/c	Brita	Lote	nº CP	Def 0,5 MPa			Def 0,3.fc		0,3*fc	Def. esp (mm)	fc,ef (Mpa)	fóduo (GP)	fc,ef/c*
29/03/2017	0,71	GN1	1	6	0,008	0,000	0,022	0,012	7,77	0,0001557	26,2	46,7	1,009	
				8	0,008	-0,004	0,024	0,007	7,77	0,0001617	27,4	45,0	1,056	
				7	0,015	-0,005	0,031	0,004	7,77	0,0001497	26,9	48,6	1,039	
				5	0,006	0,003	0,012	0,023	7,77	0,0001557	23,4	46,7	0,903	
				2	0,003	0,001	0,009	0,021	7,77	0,0001557	25,5	46,7	0,983	
29/03/2017	0,57	GN1	1	5	0,001	0,003	0,020	0,021	10,75	0,0002216	33,3	46,3	0,931	
				6	0,004	0,002	0,025	0,018	10,75	0,0002216	34,4	46,3	0,959	
				1	-0,001	0,010	0,024	0,018	10,75	0,0001976	35,4	51,9	0,989	
				4	0,007	0,000	0,025	0,019	10,75	0,0002216	36,0	46,3	1,004	
				8	0,005	0,000	0,025	0,018	10,75	0,0002275	34,8	45,0	0,971	
29/03/2017	0,46	GN1	1	4	0,004	0,000	0,021	0,024	12,46	0,0002455	41,2	48,7	0,992	
				6	0,005	0,000	0,033	0,014	12,46	0,0002515	43,1	47,6	1,038	
				5	0,006	-0,001	0,034	0,014	12,46	0,0002575	41,1	46,5	0,988	
				3	0,000	0,006	0,013	0,034	12,46	0,0002455	37,9	48,7	0,913	
				7	0,008	-0,002	0,036	0,010	12,46	0,0002395	43,2	49,9	1,040	
31/03/2017	0,71	GN2	1	3	0,006	0,008	0,021	0,015	6,60	0,0001317	21,5	46,3	0,978	
				4	0,004	0,003	0,017	0,016	6,60	0,0001557	22,0	39,2	0,999	
				7	0,005	0,005	0,024	0,012	6,60	0,0001557	21,5	39,2	0,976	
				6	0,014	0,004	0,029	0,013	6,60	0,0001437	22,0	42,4	1,002	
				8	0,000	0,005	0,006	0,021	6,60	0,0001317	24,1	46,3	1,097	
31/03/2017	0,57	GN2	1	5	0,001	0,006	0,010	0,019	6,60	0,0001317	22,0	46,3	0,998	
				5	-0,002	0,004	0,004	0,030	9,41	0,0001916	34,4	46,5	1,096	
				6	-0,002	0,012	0,020	0,020	9,41	0,0001796	33,3	49,6	1,061	
				7	0,012	-0,002	0,034	0,009	9,41	0,0001976	31,5	45,1	1,004	
				8	0,018	-0,010	0,034	0,006	9,41	0,0001916	31,5	46,5	1,003	
29/03/2017	0,46	GN2	1	5	0,000	0,002	0,026	0,018	12,62	0,0002515	39,0	48,2	0,928	
				4	0,004	0,001	0,020	0,027	12,62	0,0002515	40,0	48,2	0,950	
				6	0,003	0,000	0,024	0,021	12,62	0,0002515	42,5	48,2	1,011	
				8	0,006	-0,001	0,020	0,030	12,62	0,0002695	41,3	45,0	0,983	
				7	0,007	0,005	0,016	0,037	12,62	0,0002455	40,8	49,4	0,970	
06/04/2017	0,71	GN1	2	1	0,000	0,011	0,013	0,021	6,02	0,0001377	21,1	40,1	1,051	
				2	-0,005	0,004	0,012	0,010	6,02	0,0001377	18,5	40,1	0,922	
				6	-0,002	0,006	-0,001	0,026	6,02	0,0001257	20,4	43,9	1,016	
				5	0,001	0,001	0,009	0,014	6,02	0,0001257	21,5	43,9	1,072	
				2	-0,002	0,002	0,017	0,015	9,13	0,0001916	30,4	45,0	1,000	
06/04/2017	0,57	GN1	2	4	0,001	-0,001	0,014	0,018	9,13	0,0001916	31,6	45,0	1,040	
				5	0,012	0,007	0,024	0,025	9,13	0,0001796	33,2	48,0	1,090	
				6	-0,002	0,003	0,013	0,019	9,13	0,0001856	32,4	46,5	1,065	
				6	0,004	0,000	0,021	0,027	12,52	0,0002635	40,6	45,6	0,972	
				3	-0,006	0,014	0,010	0,040	12,52	0,0002515	40,5	47,8	0,970	
06/04/2017	0,46	GN1	2	4	0,008	0,000	0,026	0,022	12,52	0,0002395	40,5	50,2	0,971	
				4	0,001	0,008	0,016	0,017	6,55	0,0001437	22,7	42,1	1,040	
				3	0,003	0,010	0,010	0,026	6,55	0,0001377	21,1	43,9	0,966	
				5	0,009	-0,003	0,016	0,015	6,55	0,0001497	19,5	40,4	0,894	
				6	0,011	-0,001	0,023	0,012	6,55	0,0001497	20,2	40,4	0,924	
07/04/2017	0,71	GN2	2	4	0,002	0,003	0,011	0,027	9,64	0,0001994	32,3	45,8	1,005	
				5	-0,006	0,010	-0,013	0,053	9,64	0,0002156	31,2	42,4	0,970	
				6	0,007	-0,001	0,029	0,010	9,64	0,0001976	31,2	46,2	0,972	
				3	0,008	0,001	0,027	0,024	11,75	0,0002515	39,8	44,7	1,016	
				4	-0,023	0,025	-0,009	0,048	11,75	0,0002216	40,6	50,8	1,037	
07/04/2017	0,46	GN2	2	5	0,003	0,001	0,028	0,016	11,75	0,0002395	41,8	47,0	1,068	
				6	0,015	-0,002	0,063	-0,006	11,75	0,0002635	40,8	42,7	1,040	
				8	0,007	-0,001	0,021	0,008	6,60	0,0001377	18,8	44,3	0,853	
				1	0,004	0,006	0,016	0,017	6,60	0,0001377	23,3	44,3	1,056	
				5	0,010	-0,002	0,025	0,005	6,60	0,0001317	23,9	46,3	1,087	
12/04/2017	0,71	GN2	3	4	0,013	-0,001	0,013	0,034	9,18	0,0002096	26,9	41,4	0,879	
				8	0,002	-0,003	0,025	0,007	9,18	0,0001976	29,6	43,9	0,969	
				4	0,007	-0,004	0,033	0,001	9,18	0,0001856	33,3	46,7	1,088	
				7	-0,008	0,011	-0,010	0,049	9,18	0,0002156	31,5	40,3	1,029	
				4	0,007	-0,001	0,018	0,024	11,27	0,0002156	35,7	49,9	0,950	
12/04/2017	0,46	GN2	3	1	0,006	0,001	0,030	0,015	11,27	0,0002275	44,6	47,3	1,188	
				2	0,005	-0,001	0,007	0,018	6,53	0,0001257	21,2	47,9	0,976	
				5	0,005	0,004	0,019	0,012	6,53	0,0001317	22,4	45,7	1,030	
				7	0,005	0,000	0,012	0,014	6,53	0,0001257	22,9	47,9	1,052	
				6	0,006	0,001	0,016	0,014	6,53	0,0001377	22,2	43,8	1,022	
19/04/2017	0,71	GN1	3	8	0,010	0,001	0,022	0,020	9,03	0,0001856	26,6	45,9	0,885	
				6	0,003	0,003	0,019	0,020	9,03	0,0001976	29,5	43,2	0,979	
				1	0,006	0,004	0,020	0,020	9,03	0,0001796	32,3	47,5	1,075	
				2	0,007	0,000	0,022	0,016	9,03	0,0001856	32,8	45,9	1,089	
				5	0,003	0,002	0,027	0,019	12,29	0,0002455	44,2	48,0	1,079	
19/04/2017	0,46	GN1	3	6	0,009	-0,002	0,032	0,014	12,29	0,0002335	41,2	50,5	1,005	
				1	0,006	-0,004	0,020	0,026	12,29	0,0002635	39,9	44,8	0,973	
				2	0,005	0,003	0,016	0,032	12,29	0,0002395	38,0	49,2	0,927	

Moldagem	a/c	Brita	Lote	nº CP	Def 0,5 MPa	Def 0,3.fc	0,3*fc	Def. esp (mm)	fc,ef (Mpa)	fóculo (GP)	fc,ef/ft²		
31/05/2017	0,71	GN2	4	1	-0,001	0,009	0,002	0,030	7,15	0,0001437	24,5	46,3	1,028
				2	0,000	0,006	0,014	0,018	7,15	0,0001557	24,2	42,7	1,017
				3	-0,005	0,007	0,006	0,023	7,15	0,0001617	24,5	41,1	1,026
				6	0,007	0,001	0,021	0,014	7,15	0,0001617	24,4	41,1	1,023
				7	0,002	0,007	0,006	0,028	7,15	0,0001497	24,6	44,4	1,032
				8	-0,001	0,004	0,019	0,010	7,15	0,0001557	25,0	42,7	1,047
				7	0,005	-0,001	0,023	0,013	9,71	0,0001916	32,1	48,1	0,993
				8	0,009	-0,003	0,011	0,029	9,71	0,0002036	33,4	45,2	1,032
31/05/2017	0,57	GN2	4	4	0,006	0,000	0,021	0,018	9,71	0,0001976	32,1	46,6	0,993
				3	0,009	-0,001	0,022	0,018	9,71	0,0001916	32,9	48,1	1,016
				2	0,005	0,000	0,021	0,016	9,71	0,0001916	34,3	48,1	1,060
				1	0,007	-0,003	0,021	0,016	9,71	0,0001976	29,8	46,6	0,921
				7	0,002	0,003	0,026	0,019	12,35	0,0002395	43,5	49,5	1,057
				8	0,004	0,002	0,027	0,018	12,35	0,0002335	42,5	50,8	1,031
				5	0,005	0,001	0,025	0,022	12,35	0,0002455	36,0	48,3	0,875
				4	0,004	-0,002	0,019	0,024	12,35	0,0002455	41,8	48,3	1,014
31/05/2017	0,46	GN2	4	1	0,000	0,007	0,018	0,028	12,35	0,0002335	43,7	50,8	1,062
				2	-0,003	0,007	0,022	0,021	12,35	0,0002335	44,2	50,8	1,074
				3	0,007	-0,003	0,018	0,011	6,99	0,0001497	23,0	43,3	0,989
				4	0,001	0,004	0,014	0,018	6,99	0,0001617	22,3	40,1	0,956
				5	0,006	-0,003	0,019	0,009	6,99	0,0001497	20,9	43,3	0,896
				6	0,008	-0,006	0,023	0,004	6,99	0,0001497	21,8	43,3	0,936
				8	0,006	-0,005	0,016	0,010	6,99	0,0001497	23,6	43,3	1,011
				7	0,003	0,000	0,020	0,007	6,99	0,0001437	22,7	45,1	0,975
01/06/2017	0,71	GN1	4	3	0,006	-0,001	0,028	0,010	9,48	0,0001976	33,2	45,5	1,051
				4	-0,001	0,002	0,015	0,019	9,48	0,0001976	31,4	45,5	0,992
				5	-0,006	0,009	0,005	0,029	9,48	0,0001856	29,8	48,4	0,944
				6	0,003	0,000	0,015	0,019	9,48	0,0001856	31,0	48,4	0,982
				7	0,003	0,001	0,007	0,028	9,48	0,0001856	30,9	48,4	0,978
				8	0,004	0,002	0,022	0,019	9,48	0,0002096	30,0	42,9	0,948
				7	0,011	0,000	0,029	0,024	12,11	0,0002515	35,7	46,1	0,886
				5	0,003	0,003	0,014	0,032	12,11	0,0002395	35,0	48,5	0,868
01/06/2017	0,46	GN1	4	6	0,014	-0,010	0,030	0,016	12,11	0,0002515	42,9	46,1	1,062
				8	-0,001	0,004	0,021	0,023	12,11	0,0002455	37,5	47,3	0,930
				4	0,003	-0,002	0,035	0,011	12,11	0,0002695	41,7	43,1	1,033
				1	0,004	0,002	0,012	0,024	6,46	0,0001796	22,3	33,2	1,037
				3	-0,006	0,008	0,010	0,022	6,46	0,0001796	21,2	33,2	0,987
				5	0,004	0,000	0,020	0,013	6,46	0,0001737	21,8	34,3	1,013
				6	0,003	0,002	0,024	0,010	6,46	0,0001737	23,5	34,3	1,091
				7	0,004	0,006	0,020	0,017	6,46	0,0001617	23,7	36,8	1,099
02/06/2017	0,71	GR	2	8	0,019	-0,010	0,033	0,004	6,46	0,0001677	23,4	35,5	1,086
				4	0,004	0,001	0,035	0,014	9,17	0,0002635	31,0	32,9	1,013
				6	-0,002	0,006	0,018	0,028	9,17	0,0002515	28,4	34,5	0,930
				5	-0,004	0,006	0,028	0,018	9,17	0,0002635	30,1	32,9	0,985
				7	0,006	0,000	0,033	0,013	9,17	0,0002395	31,1	36,2	1,018
				8	0,002	0,006	0,018	0,032	9,17	0,0002515	32,4	34,5	1,059
				6	0,001	0,004	0,028	0,031	11,43	0,0003234	37,2	33,8	0,976
				5	0,004	0,000	0,041	0,017	11,43	0,0003234	36,3	33,8	0,953
02/06/2017	0,46	GR	2	8	0,004	0,002	0,033	0,023	11,43	0,0002994	36,3	36,5	0,953
				7	0,006	0,001	0,029	0,031	11,43	0,0003174	42,1	34,4	1,104
				2	0,006	0,000	0,030	0,027	11,43	0,0003054	39,8	35,8	1,045
				3	0,011	-0,008	0,025	0,004	6,95	0,0001557	18,8	41,4	0,812
				4	0,008	-0,002	0,022	0,008	6,95	0,0001437	22,6	44,9	0,974
				5	0,011	-0,005	0,023	0,008	6,95	0,0001497	21,1	43,1	0,912
				6	0,006	0,001	0,013	0,018	6,95	0,0001437	18,7	44,9	0,805
				7	0,006	0,002	0,026	0,009	6,95	0,0001617	20,3	39,9	0,877
06/06/2017	0,71	GN2	5	8	0,012	-0,004	0,030	0,004	6,95	0,0001557	19,1	41,4	0,824
				3	0,005	0,000	0,019	0,019	8,97	0,0001976	31,3	42,8	1,047
				4	0,008	-0,003	0,024	0,014	8,97	0,0001976	27,1	42,8	0,905
				5	0,007	-0,003	0,021	0,015	8,97	0,0001916	30,9	44,2	1,034
				6	0,008	0,000	0,025	0,014	8,97	0,0001856	30,4	45,6	1,017
				7	0,004	0,005	0,014	0,026	8,97	0,0001856	27,5	45,6	0,919
				8	-0,007	0,009	0,006	0,027	8,97	0,0001856	28,6	45,6	0,957
				3	0,006	-0,004	0,019	0,023	10,85	0,0002395	32,1	43,2	0,888
06/06/2017	0,46	GN2	5	4	0,006	-0,005	0,018	0,026	10,85	0,0002575	38,9	40,2	1,075
				5	0,002	0,003	0,024	0,017	10,85	0,0002156	35,7	48,0	0,987
				6	0,009	-0,010	0,035	0,002	10,85	0,0002275	37,1	45,5	1,026
				7	0,005	-0,001	0,021	0,021	10,85	0,0002275	37,4	45,5	1,033
				8	0,006	-0,004	0,024	0,014	10,85	0,0002156	38,7	48,0	1,069
				2	0,005	-0,002	0,005	0,015	5,12	0,0001018	20,1	45,4	1,176
				4	0,008	-0,009	0,010	0,006	5,12	0,0001018	19,2	45,4	1,126
				5	-0,009	0,009	-0,008	0,027	5,12	0,0001138	19,6	40,6	1,145
07/06/2017	0,71	GN1	5	7	0,017	-0,015	0,027	-0,007	5,12	0,0001078	19,7	42,9	1,155

Moldagem	a/c	Brita	Lote	nº CP	Def 0,5 MPa			Def 0,3.fc		0,3*fc	Def. esp (mm)	fc,ef (Mpa)	fóculo (GP)	fc,ef/fc*
07/06/2017	0,57	GN1	5	4	0,003	-0,002	0,014	0,014	8,00	0,0001617	28,7	46,4	1,076	
				5	0,001	0,005	0,001	0,031	8,00	0,0001557	29,8	48,2	1,119	
				6	0,000	0,004	0,007	0,025	8,00	0,0001677	30,7	44,7	1,153	
				8	-0,008	0,008	0,008	0,019	8,00	0,0001617	28,1	46,4	1,052	
07/06/2017	0,46	GN1	5	4	0,000	0,004	0,009	0,030	10,87	0,0002096	34,6	49,5	0,955	
				6	0,010	-0,011	0,027	0,011	10,87	0,0002335	38,6	44,4	1,066	
				7	0,000	0,005	0,014	0,026	10,87	0,0002096	35,3	49,5	0,975	
				8	0,007	-0,006	0,020	0,019	10,87	0,0002275	35,2	45,6	0,972	
09/06/2017	0,71	GR	3	3	0,001	0,000	0,013	0,026	10,87	0,0002275	29,5	45,6	0,814	
				6	0,006	-0,002	0,014	0,024	7,08	0,0002036	23,7	32,3	1,004	
				5	-0,003	0,006	0,014	0,024	7,08	0,0002096	23,0	31,4	0,975	
				7	0,003	0,001	0,023	0,014	7,08	0,0001976	25,5	33,3	1,080	
09/06/2017	0,57	GR	3	8	0,010	-0,007	0,026	0,010	7,08	0,0001976	26,3	33,3	1,113	
				2	0,002	0,001	0,019	0,019	7,08	0,0002096	23,3	31,4	0,988	
				4	0,005	0,003	0,021	0,031	9,82	0,0002635	31,6	35,4	0,967	
				5	-0,003	0,008	0,014	0,037	9,82	0,0002754	30,5	33,8	0,932	
09/06/2017	0,46	GR	3	6	0,006	0,006	0,036	0,024	9,82	0,0002874	30,5	32,4	0,931	
				7	0,007	-0,002	0,031	0,020	9,82	0,0002754	31,8	33,8	0,970	
				8	0,002	0,004	0,023	0,029	9,82	0,0002754	32,5	33,8	0,994	
				5	0,010	-0,003	0,050	0,014	12,05	0,0003413	36,5	33,8	0,909	
09/06/2017	0,46	GR	3	6	-0,007	0,011	0,009	0,052	12,05	0,0003413	39,2	33,8	0,977	
				7	-0,001	0,007	0,014	0,050	12,05	0,0003473	42,1	33,3	1,047	
				8	0,004	0,005	0,023	0,041	12,05	0,0003293	40,3	35,1	1,002	
				4	-0,004	0,009	-0,001	0,032	6,35	0,0001557	21,0	37,6	0,993	
15/06/2017	0,71	GR	4	1	0,003	0,003	0,018	0,018	6,35	0,0001796	25,1	32,6	1,186	
				2	0,007	0,003	0,020	0,019	6,35	0,0001737	21,0	33,7	0,991	
				6	0,001	0,001	0,023	0,023	9,47	0,0002635	30,9	34,1	0,979	
				4	0,004	0,007	0,022	0,032	9,47	0,0002575	31,5	34,9	0,996	
15/06/2017	0,57	GR	4	2	-0,002	0,005	0,023	0,023	9,47	0,0002575	29,9	34,9	0,948	
				4	-0,003	0,006	0,022	0,028	10,98	0,0002814	33,5	37,2	0,914	
				3	0,003	0,001	0,019	0,037	10,98	0,0003114	34,3	33,7	0,937	
				1	-0,006	0,012	0,007	0,047	10,98	0,0002874	35,4	36,5	0,966	
22/06/2017	0,71	GR	5	2	0,005	0,001	0,035	0,021	10,98	0,0002994	37,8	35,0	1,031	
				2	-0,001	0,005	-0,001	0,035	6,16	0,0001796	17,8	31,5	0,867	
				1	-0,002	0,006	0,002	0,030	6,16	0,0001677	21,8	33,8	1,060	
				4	0,001	0,005	0,010	0,024	6,16	0,0001677	17,6	33,8	0,858	
22/06/2017	0,57	GR	5	3	-0,002	0,008	-0,002	0,038	6,16	0,0001796	22,6	31,5	1,102	
				5	-0,008	0,011	-0,008	0,042	6,16	0,0001856	21,2	30,5	1,031	
				6	-0,003	0,009	0,013	0,019	6,16	0,0001557	20,3	36,4	0,991	
				6	0,005	-0,001	0,030	0,011	7,89	0,0002216	26,5	33,4	1,007	
22/06/2017	0,46	GR	5	4	0,006	-0,002	0,021	0,019	7,89	0,0002156	29,2	34,3	1,110	
				3	0,006	0,000	0,027	0,014	7,89	0,0002096	26,7	35,3	1,013	
				8	0,002	0,009	0,019	0,046	11,73	0,0003234	37,1	34,7	0,948	
				5	-0,002	0,007	0,018	0,040	11,73	0,0003174	35,9	35,4	0,917	
09/08/2017	20MPa	GR	1	4	-0,008	0,008	0,018	0,037	11,73	0,0003293	36,6	34,1	0,936	
				3	0,012	-0,004	0,035	0,006	7,04	0,0001976	23,5	33,1	1,001	
				4	0,010	0,000	0,029	0,017	7,04	0,0002156	23,4	30,3	0,996	
				5	0,001	0,003	0,018	0,024	7,04	0,0002275	24,3	28,7	1,035	
09/08/2017	30MPa	GR	1	6	0,001	0,004	0,014	0,027	7,04	0,0002156	23,6	30,3	1,008	
				3	0,004	0,004	0,017	0,037	9,06	0,0002754	32,3	31,1	1,070	
				5	0,006	0,005	0,021	0,036	9,06	0,0002754	31,0	31,1	1,026	
				6	0,002	0,004	0,023	0,025	9,06	0,0002515	31,0	34,0	1,027	
09/08/2017	40MPa	GR	1	7	0,012	-0,003	0,028	0,024	9,06	0,0002575	32,6	33,2	1,079	
				3	0,009	0,006	0,019	0,058	12,67	0,0003713	45,4	32,8	1,076	
				4	0,004	0,005	0,033	0,037	12,67	0,0003653	41,2	33,3	0,976	
				5	-0,001	0,004	0,033	0,031	12,67	0,0003653	39,1	33,3	0,926	

**APÊNDICE B - Resultados: Determinação do módulo
dinâmico por meio do pulso ultrassônico**

a/c	Brita	Lote	veloc. (m/s)	Ed,ult (GPa)	Desv (%)	CV (%)
0,71	GN1	1	5304	63,2	1,91	3,03
0,71	GN1	2	5306	62,1	2,35	3,79
0,71	GN1	3	5297	61,4	1,08	1,75
0,71	GN1	4	5294	61,8	1,64	2,65
0,71	GN1	5	5240	60,9	1,28	2,11
0,57	GN1	1	5359	65,1	2,64	4,05
0,57	GN1	2	5382	63,9	1,60	2,50
0,57	GN1	3	5351	63,0	1,09	1,73
0,57	GN1	4	5389	64,4	1,75	2,71
0,57	GN1	5	5380	64,4	1,13	1,75
0,46	GN1	1	5410	66,1	3,95	5,98
0,46	GN1	2	5428	64,8	1,05	1,61
0,46	GN1	3	5430	64,6	1,91	2,95
0,46	GN1	4	5394	64,5	1,77	2,74
0,46	GN1	5	5399	64,7	1,22	1,88
0,71	GN2	1	5227	60,6	1,23	2,04
0,71	GN2	2	5343	63,7	2,46	3,87
0,71	GN2	3	5243	60,6	1,16	1,91
0,71	GN2	4	5293	62,8	1,99	3,17
0,71	GN2	5	5247	61,4	1,92	3,13
0,57	GN2	1	5296	62,7	1,32	2,10
0,57	GN2	2	5415	65,6	0,93	1,42
0,57	GN2	3	5323	63,0	2,46	3,91
0,57	GN2	4	5404	65,5	1,85	2,82
0,57	GN2	5	5271	62,2	0,87	1,40
0,46	GN2	1	5381	65,0	1,55	2,39
0,46	GN2	2	5442	66,0	2,13	3,23
0,46	GN2	3	5320	62,6	1,58	2,52
0,46	GN2	4	5402	65,5	1,83	2,79
0,46	GN2	5	5279	62,0	1,81	2,93
0,71	GR	1	5132	56,6	1,72	3,03
0,71	GR	2	5039	54,4	1,08	1,99
0,71	GR	3	4960	53,3	0,61	1,15
0,71	GR	4	4993	54,1	1,03	1,91
0,71	GR	5	5017	54,2	1,62	2,99
0,57	GR	1	5181	58,0	1,71	2,95
0,57	GR	2	5069	54,9	0,93	1,69
0,57	GR	3	5028	55,0	0,91	1,66
0,57	GR	4	5042	55,6	0,86	1,54
0,57	GR	5	5067	55,2	1,62	2,94
0,46	GR	1	5141	57,1	2,00	3,50
0,46	GR	2	5069	55,6	0,99	1,78
0,46	GR	3	5028	55,7	0,93	1,67
0,46	GR	4	4998	54,6	0,67	1,22
0,46	GR	5	5036	54,5	1,54	2,82

**APÊNDICE C - Resultados: Determinação do módulo
dinâmico por meio do impulso longitudinal**

a/c	Brita	Lote	Freq. (Hz)	Ed,imp (GPa)	Desv (%)	CV (%)
0,71	GN1	1	11177	48,4	0,027	0,055
0,71	GN1	2	11054	46,3	0,022	0,047
0,71	GN1	3	11098	45,7	0,029	0,063
0,71	GN1	4	11041	45,8	0,029	0,063
0,71	GN1	5	10979	45,3	0,049	0,109
0,57	GN1	1	11357	50,6	0,020	0,039
0,57	GN1	2	11337	49,0	0,060	0,122
0,57	GN1	3	11280	48,2	0,019	0,040
0,57	GN1	4	11325	48,8	0,036	0,074
0,57	GN1	5	11270	49,4	0,033	0,068
0,46	GN1	1	11446	51,7	0,028	0,055
0,46	GN1	2	11569	51,1	0,017	0,033
0,46	GN1	3	11454	50,1	0,025	0,049
0,46	GN1	4	11406	50,5	0,078	0,155
0,46	GN1	5	11414	50,7	0,028	0,056
0,71	GN2	1	10941	45,2	0,061	0,134
0,71	GN2	2	10947	45,4	0,054	0,119
0,71	GN2	3	10986	46,1	0,020	0,044
0,71	GN2	4	10959	46,3	0,015	0,033
0,71	GN2	5	10994	46,2	0,043	0,093
0,57	GN2	1	11243	48,8	0,020	0,041
0,57	GN2	2	11267	49,0	0,039	0,079
0,57	GN2	3	11281	49,2	0,016	0,032
0,57	GN2	4	11324	49,9	0,014	0,028
0,57	GN2	5	11263	49,3	0,060	0,122
0,46	GN2	1	11405	51,0	0,018	0,036
0,46	GN2	2	11306	49,9	0,023	0,047
0,46	GN2	3	11476	50,6	0,025	0,050
0,46	GN2	4	11460	51,8	0,029	0,057
0,46	GN2	5	11413	50,4	0,039	0,078
0,71	GR	1	10632	42,1	0,033	0,078
0,71	GR	2	10501	41,5	0,039	0,093
0,71	GR	3	10548	41,6	0,135	0,324
0,71	GR	4	10548	42,1	0,129	0,306
0,71	GR	5	10430	40,2	0,144	0,357
0,57	GR	1	10850	44,3	0,133	0,299
0,57	GR	2	10723	43,3	0,083	0,192
0,57	GR	3	10778	44,3	0,117	0,265
0,57	GR	4	10718	44,4	0,100	0,224
0,57	GR	5	10652	42,1	0,112	0,267
0,46	GR	1	10920	45,1	0,115	0,255
0,46	GR	2	10840	44,1	0,082	0,186
0,46	GR	3	10804	45,2	0,163	0,362
0,46	GR	4	10800	45,1	0,149	0,330
0,46	GR	5	10717	43,4	0,148	0,341