

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO SUPERIOR DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

THIAGO GUESSER CORRÊA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE AGREGADOS MIÚDOS DE DIFERENTES
ORIGENS MINERALÓGICAS NO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO**

FLORIANÓPOLIS, 2020.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO SUPERIOR DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

THIAGO GUESSER CORRÊA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE AGREGADOS MIÚDOS DE DIFERENTES
ORIGENS MINERALÓGICAS NO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil

Professor Orientador: Alexandre Lima de Oliveira, Doutor

FLORIANÓPOLIS, NOVEMBRO DE 2020

Corrêa, Thiago

Estudo da influência de agregados miúdos de diferentes origens mineralógicas no módulo de elasticidade do concreto.

/ Thiago Corrêa ; orientação de Alexandre Oliveira.

- Florianópolis, SC, 2020.

87 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Civil. Departamento Acadêmico de Construção Civil.

Inclui Referências.

1. Concreto. 2. Módulo de Elasticidade. 3. Agregado Miúdo. 4. Origem Mineralógica. I. Oliveira, Alexandre. II. Instituto Federal de Santa Catarina. Departamento Acadêmico de Construção Civil. III. Título.

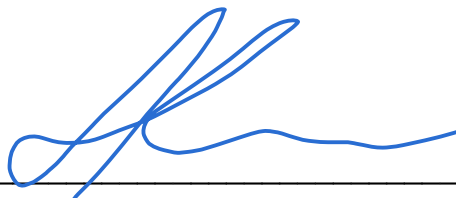
**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE AGREGADOS MIÚDOS DE DIFERENTES
ORIGENS MINERALÓGICAS NO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO**

THIAGO GUESSER CORRÊA

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Civil e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 06 de novembro de 2020.

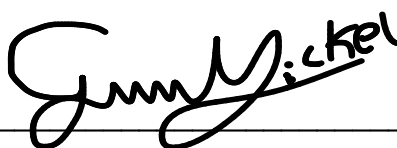
Banca Examinadora:



Alexandre Lima de Oliveira, Doutor



Luciana Maltez Calçada, Doutora



Guilherme Cardoso Hickel, Bacharel

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 meu pai, Pedro Corrêa, minha mãe, Bernadete Guesser Corrêa, e minha irmã Patricia Guesser Corrêa Raitz, por apoiar, suportar e me ajudar a perseverar até a conclusão deste trabalho, principalmente nos momentos de maiores dificuldades.

À minha parceira de vida, Tamila Cavaler, que sempre me auxiliou durante esta caminhada: a sua presença tornou todos os momentos leves.

Ao professor Alexandre Lima de Oliveira pela orientação no grupo de pesquisa e ao longo deste trabalho. Obrigado por compartilhar o conhecimento e pelas diversas oportunidades em participar de trabalhos científicos dentro e fora do ambiente acadêmico. Estas experiências geraram, sem dúvida, uma contribuição inestimável para a minha formação pessoal e profissional.

Ao amigo Guilherme Hickel, parceiro de pesquisa e de profissão, que sempre se mostrou disposto a auxiliar e ensinar os caminhos de um trabalho técnico e profissional.

Aos amigos de Laboratório: Rafael Souza, Ben-Hur Martins, Bruno Silva, Geraldo Duarte e Lucas Karkotli, que entre competições acadêmicas e pesquisas científicas, em muito contribuíram com este trabalho.

Às empresas: Maxmohr, PLM e, em especial, à Azul Argamassas e Concretos representada na pessoa de Marcos Roberto Rohde de Souza pela doação de materiais, e cessão de equipamentos e espaço físico, sem os quais a execução deste trabalho seria inviável.

À professora Luciana Maltez Calçada, que gentilmente aceitou participar desta banca de avaliação deste trabalho, contribuindo com correções e sugestões. Por fim, ao Laboratório de Materiais de Construção Civil do DACC, na pessoa do professor Jucelio Gonçalves, por ceder os equipamentos necessários para a execução deste trabalho.

RESUMO

O módulo de elasticidade é uma das propriedades mecânicas que regem o comportamento do concreto no estado endurecido. O módulo de elasticidade de um concreto depende de sua constituição; e em razão do concreto ser um compósito entre agregados e pasta de cimento hidratada dispostos em quantidades previamente estabelecidas, pode ser influenciado por diversos fatores, como: resistência à compressão, relação água/cimento na matriz cimentícia e na zona de transição, proporção entre agregados e pasta de cimento e fatores extrínsecos, como parâmetros do ensaio. Além destes, destaca-se a influência da origem mineralógica dos agregados que possuindo diferentes níveis de porosidade e massa específica, afetam diretamente o módulo de elasticidade do concreto. A ABNT NBR 6118:2014 reconhece a influência do agregado graúdo ao introduzir, na equação de cálculo de previsão do Módulo de Elasticidade Tangente Inicial, um coeficiente para representar a origem mineralógica da brita. No entanto, verifica-se uma escassez de estudos relacionados à influência da origem mineralógica do agregado miúdo nesta propriedade mecânica do concreto. Por esta razão, o presente trabalho se propôs a verificar experimentalmente a influência da origem mineralógica do agregado miúdo no módulo de elasticidade do concreto. Foram testadas duas areias de origens mineralógicas distintas, uma areia calcária compacta (alto módulo de elasticidade) e outra granítica (baixo módulo de elasticidade), sendo observados resultados significativamente dissonantes de módulo de elasticidade estático entre curvas de dosagens que diferiam apenas em seu agregado miúdo adotado. Entre concretos produzidos com brita de alto módulo de elasticidade, a diferença média foi de 11,7%, enquanto que nos concretos confeccionados com brita de baixo módulo, a diferença média atingiu 5,0%. Além disto, as equações da NBR 6118:2014 se mostraram incapazes de prever com precisão os resultados de módulo de elasticidade experimentalmente obtidos.

Palavras-chave: Concreto; Módulo de Elasticidade; Agregado Miúdo; Origens mineralógicas.

ABSTRACT

The modulus of elasticity is one of the mechanical properties that govern the behavior of concrete in the hardened state. The modulus of elasticity of a concrete depends on its constitution; and because the concrete is a composite between aggregates and hydrated cement mass spreads in a determined amount, it can be influenced by several factors, such as: compressive strength, water/cement ratio in the cement matrix and in the transition zone, proportion between aggregates and cement masses and extrinsic factors, as test parameters. In addition to these, the influence of the mineralogical origin of the aggregates is highlighted, which having different levels of porosity and specific mass, directly affect the concrete's elasticity module. ABNT NBR 6118: 2014 recognizes the influence of the coarse aggregate to the introduction, in the forecast calculation equation of the Initial Tangent Elasticity Module, a coefficient to represent a mineralogical origin of the crushed stone. However, there is a scarcity of studies related to the influence of the mineralogical origin of the fine aggregate on this mechanical property of concrete. For this reason, the present work aimed to experimentally verify the influence of the mineralogical fine aggregate origin in the concrete elasticity module. Two sands of different mineralogical origins were tested, a compact calcareous sand (high modulus of elasticity) and a granitic one (low modulus of elasticity), with significantly different results of static modulus of elasticity between dosage curves that differed only in their adopted aggregate. Among concretes complete with gravel with high modulus of elasticity, the average difference was 11.7%, while in concretes made with gravel with low modulus, the average difference reached 5.0%. In addition, the NBR 6118: 2014 equations are unable to accurately predict the results of the modulus of elasticity experimentally obtained.

Keywords: Concrete, Elasticity Module, Small Coarse Aggregate, Mineralogical Origin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Correlação entre força da ligação atômica e módulo de elasticidade	17
Figura 2: Gráfico tensão-deformação demonstrando a deformação elástica linear ..	18
Figura 3: Diagrama Tensão-deformação específica com comportamento elástico não linear	18
Figura 4: Diagrama tensão-deformação específica típico do concreto.....	19
Figura 5: Comportamento no diagrama tensão-deformação do concreto e seus componentes.....	19
Figura 6: Estágios de microfissuração da zona de transição	20
Figura 7: Fatores influenciadores no módulo de elasticidade do concreto.....	21
Figura 8: Gráfico do módulo de elasticidade versus o fator a/c (abatimento=cte).....	22
Figura 9: Influência do Teor de argamassa no módulo de Elasticidade	28
Figura 10: Gráfico do módulo de elasticidade x teor de agregados (m) (a/c = cte) ...	29
Figura 11: Influência da dimensão do CP no módulo de elasticidade do concreto ...	30
Figura 12: Influência da umidade do corpo de prova no seu módulo de deformação	31
Figura 13: Distribuição de esforços no corpo de prova	32
Figura 14: Influência dos Medidores de deformação.....	34
Figura 15: Gráfico comparativo Módulo de Elasticidade Experimental x Módulo de elasticidade Previsto pela Equação da NBR 6118:2014.	36
Figura 16: Módulo de elasticidade estáticos x Resistência à compressão – Resultados individuais por Vasconcellos (2018).....	37
Figura 17: Exemplo de ensaio de Módulo de Elasticidade com medidores <i>clip gages</i> em corpo de prova de argamassa.....	40
Figura 18: Agregado Miúdo - a) Granito; b) Calcário.....	47
Figura 19: a) Agregado Graúdo de granito; b) Agregado Graúdo de gnaïsse	48
Figura 20: Proporcionamento Volumétrico dos traços confeccionados em Argamassa	49
Figura 21: Proporcionamento Volumétrico dos traços confeccionados com brita de Gnaïsse	50
Figura 22: Proporcionamento Volumétrico dos traços confeccionados com brita de Granito	51

Figura 23 a) Corpo de prova com bolhas superficiais sendo ensaiado; b) Corpos de prova após ensaio com grande dispersão de módulo de elasticidade	59
Figura 24a), 33b), 33c) e 33d): Análises gráficas prévias dos resultados obtidos nos ensaios em estado endurecido:.....	61
Figura 25: Análise gráfica dos resultados obtidos nos concretos com brita de gnaiss	63
Figura 26: Análise gráfica dos resultados obtidos nos concretos com brita de granito	65
Figura 27: Rompimento de CP do Concreto 1:3,5, agregado miúdo de calcário, brita de granito e 58% de argamassa com detalhe no plano de ruptura na brita de granito	68
Figura 28 a), 28b), 28c) e 28d): Análises gráficas comparativas entre resultados experimentais e previstos pelas equações da NBR 8522	71
Figura 29: Curvas Granulométricas dos Agregados Miúdos adotados em argamassas	80
Figura 30: Caracterização física dos agregados miúdos após uniformização.....	80
Figura 31: Curvas Granulométricas dos Agregados Miúdos utilizados em concretos	81
Figura 32: Curva Granulométrica da Areia Natural Quartzosa	81
Figura 33: Curva Granulométrica dos agregados graúdos.....	82
Figura 34: Resultados do ensaio índice de consistência para argamassas e seus respectivos teores de aditivo superplastificante	83
Figura 35: Resultados do Ensaio de Slump-Test para concretos com teor de superplastificante	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Lista dos edifícios mais altos do Brasil, entre finalizados ou em construção	14
Tabela 2: Estágios do Processo de microfissuração de acordo com aplicação de Tensão	21
Tabela 3: Características físicas e mecânicas de rochas utilizadas na produção do concreto	24
Tabela 4: Resistência à compressão e módulo de deformação do testemunho de rochas	24
Tabela 5: Propriedade mecânicas de concretos confeccionados por Girardi (2018) utilizando de diferentes agregados graúdos.....	25
Tabela 6: Propriedade mecânicas de concretos confeccionados por Bilesky (2016) utilizando de diferentes agregados graúdos.....	25
Tabela 7: Natureza petrográfica declarada versus natureza petrográfica real	26
Tabela 8: Caracterização física dos agregados miúdos utilizados por Vasconcellos (2018).....	26
Tabela 9: Propriedade mecânicas de concretos confeccionados por Vasconcellos (2018) utilizando de diferentes agregados graúdos	27
Tabela 10: Tipos de Medidores de deformação para ensaios em concreto	33
Tabela 11: Equações de predição do Módulo de Elasticidade segundo a NBR 6118:2014	35
Tabela 12: Representação esquemática do programa experimental proposto	43
Tabela 13: Caracterização do cimento CP-IV-RS-32 Ensacado	45
Tabela 14: Caracterização física dos agregados miúdos utilizados	46
Tabela 15: Caracterização do cimento CP-II-F-40 Granel	47
Tabela 16: Caracterização física dos agregados miúdos utilizados	47
Tabela 17: Caracterização física dos agregados miúdos utilizados	48
Tabela 18: Frações Unitárias, em massa, dos materiais empregados nas argamassas	50
Tabela 19: Frações Unitárias, em massa, dos materiais empregados nos concretos	52
Tabela 20: Resultados dos Ensaios em Estado Fresco das Argamassas	53

Tabela 21: Resultados de Resistência à Compressão e Módulo de Elasticidade das argamassas.....	54
Tabela 22: Comparação Múltipla de Médias de argamassas de curvas granulom. naturais e uniformes.....	55
Tabela 23: Resultados das argamassas em estado endurecido para fins de compatibilização de Resistência à Compressão	56
Tabela 24: Comparação múltipla de médias de Resistência à Compressão e Módulo de Elasticidade entre argamassas com agregado miúdo de granito e calcário.....	56
Tabela 25: Resultados médios dos ensaios de Resistência à compressão e Módulo de Elasticidade Estático	58
Tabela 26: Comparação de Funções Lineares das análises gráficas prévias apresentadas na Figura 33	62
Tabela 27: Comparação de Funções Lineares da análise gráfica apresentadas na Figura 25.....	63
Tabela 28: Comparação de Funções Lineares da análise gráfica apresentadas na Figura 26.....	66
Tabela 29: Comparação dos traços em volume com brita fixada.....	67
Tabela 30: Resultados dos ensaios em estado endurecido dos concretos com composição de agregado miúdo	69
Tabela 31: Caracterização Física da Areia Natural Quartzosa	81
Tabela 32: Resultados Individuais dos Ensaios de Resistência à Compressão em Concreto.....	84
Tabela 33: Resultados Individuais dos ensaios de Módulo de Elasticidade em Concreto.....	85
Tabela 34: Comparação de Funções Lineares dos resultados dos ensaios em concreto	86
Tabela 35: Comparativo entre os resultados de módulo de elasticidade experimentais e módulos de elasticidade previstos por meio das equações da NBR 8522:2017	87

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1	MÓDULO DE ELASTICIDADE	17
2.2	MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO	19
2.3	FATORES INFLUENCIADORES DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO	21
2.3.1	Porosidade da matriz da pasta de cimento	22
2.3.2	Porosidade e composição da zona de transição	22
2.3.3	Influências do agregado	23
2.3.4	Parâmetros de Ensaio	29
2.4	MÉTODO DE PREDIÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE ACORDO COM A NBR 6118:2014	34
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	38
3.1	ESCOPO DA PESQUISA	38
3.1.1	Caracterização dos Agregados Miúdos e Graúdos	38
3.1.2	Etapa 1: Argamassa	38
3.1.3	Etapa 2: Concreto	41
3.2	MATERIAIS EMPREGADOS	45
3.2.1	Etapa 1: Argamassa	45
a)	Cimento Portland	45
b)	Agregados miúdos	45
3.2.2	Etapa 2: Concreto	46
a)	Cimento Portland	46
b)	Agregados miúdos	47
d)	Água	48
e)	Aditivo	49
3.3	PROPORCIONAMENTO DOS TRAÇOS	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
4.1	ETAPA 1: ENSAIOS EM ARGAMASSA	53

4.1.1	Argamassa no Estado Fresco	53
4.1.2	Argamassa no Estado Endurecido	54
4.2	ETAPA 2: ENSAIOS EM CONCRETO.....	57
4.2.1	Concreto em Estado Fresco.....	57
4.2.2	Concreto em Estado Endurecido.....	58
4.2.3	Comparações dos resultados experimentais de módulo de elasticidade estático aos previstos pela equação da NBR 6118:2014.....	70
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	73
5.1	CONCLUSÕES GERAIS	73
5.2	RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	74
6	REFERÊNCIAS	76
7	APÊNDICES	80

1 INTRODUÇÃO

A construção civil tem no concreto convencional de cimento Portland, o seu material de uso mais difundido no mundo. Segundo Mehta e Monteiro (2014), cimento e água correspondem a aproximadamente 12% e 8%, respectivamente, à massa da mistura do concreto. Os outros 80% dizem respeito aos agregados inertes, de grande importância na composição de custos e na obtenção de bons resultados nas propriedades do estado fresco e endurecido (SBRIGHI NETO, 2011).

Levando isso em conta, é papel do engenheiro buscar soluções menos onerosas, que aliem durabilidade, sustentabilidade e melhor desempenho aos materiais que possui a disposição. Por esta razão, a usinagem do concreto deve ser racionalizada para cada necessidade; ou seja, quanto maior a complexidade do projeto, mais avançadas devem ser as técnicas aplicadas e melhores devem ser os materiais utilizados.

Na área da construção civil, um dos ramos que mais necessitam de novas soluções de engenharia são os projetos de edifícios altos. Estes vêm se tornando cada vez mais comuns, e conforme a base de dados da *Council Tall Buildings and Urban Habitat* (CTBUH, 2019), oito entre dez dos mais altos edifícios do Brasil, entre em construção e finalizados, encontram-se na região de Balneário Camboriú/SC, todos eles utilizando o concreto como material primário, conforme descrito na Tabela 1.

Tabela 1: Lista dos edifícios mais altos do Brasil, entre finalizados ou em construção

Posição	Nome do Edifício	Cidade/Estado	Altura (m)	Nº de pavim.	Ano de finalização	Material	Uso
1	Yachthouse Residence Club by Pininfarina Tower 1	Balneário Camboriú/SC	280.3	81	2020	concreto	Residencial
1	Yachthouse Residence Club by Pininfarina Tower 2	Balneário Camboriú/SC	280.3	81	2020	concreto	Residencial
3	One Tower	Balneário Camboriú/SC	280	70	2022	concreto	Residencial
4	VR Tower	Itapema/SC	237	60	2023	concreto	Residencial
5	Infinity Coast Tower	Balneário Camboriú/SC	234.8	66	2019	concreto	Residencial
6	Amazon Tower	Iranduba/AM	226.7	49	-	concreto	hotel / office
7	Boreal Tower	Balneário Camboriú/SC	220	55	-	concreto	Residencial
8	Vitra Residence	Balneário Camboriú/SC	208.5	62	2021	concreto	Residencial
9	Órion Business & Health Complex	Goiânia/GO	191.5	44	2018	concreto	hotel / hospital / office
10	Epic Tower	Balneário Camboriú/SC	191.2	55	2019	concreto	Residencial

Fonte: <<https://www.skyscrapercenter.com/country/brazil>> Acessado em: 17/09/2019.

No que tange às construções de edifícios altos, o módulo de elasticidade tem destacada importância. Em razão de suas elevadas cargas solicitantes, necessitam de uma rigidez de estrutura ideal para evitar movimentações críticas. Por outro lado, a impossibilidade de obtenção de concretos com alto módulo de elasticidade pode gerar perda econômica pela necessidade de elementos estruturais de dimensões cada vez maiores para a obtenção de uma determinada rigidez.

Deste modo, a rigidez estrutural pode ser simplificada incrementada por três métodos: aumento do tamanho da seção transversal, inserção ou aumento da quantidade de armaduras de tração e/ou compressão das peças estruturais, aumentando o f_{ck} do concreto especificado em projeto ou, por fim, a realização de uma adequada seleção dos materiais constituintes do concreto (FRANÇA, 2003).

Logo, este trabalho tem por objetivos contribuir com os estudos na área de materiais e demonstrar a influência que os agregados miúdos de diferentes origens mineralógicas apresentam nos resultados de ensaios de módulo de elasticidade estáticos e dinâmicos de concretos.

1.1. Justificativa

Diversos são os fatores relativos à composição do concreto que influenciam no seu módulo de elasticidade. Dentre aqueles, tem-se verificado por meio de diversas pesquisas científicas - como Girardi (2018), Vasconcellos (2018), Lopes, et al (2017), entre outros - a influência que o agregado graúdo representa no módulo de deformação. Estes estudos se propuseram a comparar diversos concretos, alterando apenas a origem mineralógica do agregado graúdo. Desta forma apresentaram resultados incontestes de que as propriedades mecânicas de rochas de diferentes origens mineralógicas influenciam os resultados de módulos de elasticidade em medidas diferentes.

Além disto, os pesquisadores procuraram demonstrar que os resultados obtidos pelo ensaio de Módulo de Elasticidade Estático diferem em grande medida daqueles obtidos por meio da equação apresentada no item 8.2.8 da Norma Brasileira NBR 6118:2014. Esta se equivocaria ao aliar de forma simplista, resistência a compressão estipulada em projeto e, após a última revisão da norma técnica, a origem mineralógica do agregado graúdo.

As pesquisas citadas anteriormente realizaram comparações entre resultados experimentais e aqueles previstos pela equação da NBR 6118:2014, e apresentaram resultados divergentes entre si; alguns resultados experimentais ficam superiores à previsão (VASCONCELLOS, 2018), outros inferiores (GIRARDI, 2018) e ainda, ambas situações (LOPES, et al, 2017). Logo, a equação apresentada pela Norma Técnica não deteria condições suficientes para uma precisa previsão do módulo de elasticidade do concreto, podendo ocorrer deformações reais superiores àquelas previstas pela equação normativa.

Com este fim, o presente trabalho se propõe a analisar qual o nível de influência que o agregado miúdo representa na rigidez do compósito concreto. Esta é uma questão que vem sendo deixada de lado nos trabalhos científicos e que pode resultar em importantes ganhos na previsão do módulo de elasticidade do concreto.

1.2. Definição do Problema

A propriedade mecânica módulo de elasticidade, que vem sendo cada vez mais exigida em razão de projetos arrojados, também poderia ser influenciada pela escolha da origem mineralógica do agregado miúdo utilizado na confecção do concreto?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Principal

- Verificar a influência da origem mineralógica do agregado miúdo no resultado do ensaio do módulo de elasticidade do concreto.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Verificar a influência de dois teores de argamassa distintos nos módulos de elasticidade dos concretos, empregando-se duas areias com módulo de elasticidade distintos;
- Comparar resultados experimentais obtidos para o módulo de elasticidade do concreto com os valores calculados pela equação da NBR 6118:2014;
- Verificar se a utilização de agregados graúdos e miúdos de diferentes origens mineralógicas afeta a relação módulo de elasticidade/resistência à compressão do concreto.

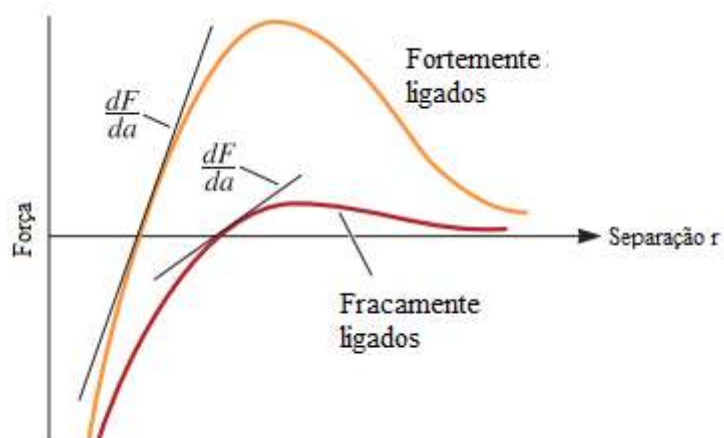
2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo abordará as principais questões relacionadas ao módulo de elasticidade do concreto: conceituação; características da propriedade no compósito concreto; os fatores influenciadores intrínsecos e extrínsecos, e o método de estimação do módulo de elasticidade apresentado pela NBR 6118:2014.

2.1 Módulo de Elasticidade

A capacidade de um material resistir à deformação diante de uma tensão nele aplicada depende de diversas características intrínsecas ao mesmo, como, por exemplo, a força de suas ligações atômicas. Isto pode ser verificado na Figura 01, onde quanto maior a força da ligação atômica, maior será a rigidez do material. Assim sendo, as deformações macroscópicas diante de uma tensão aplicada, nada mais são que o rearranjo dos átomos em sua estrutura reticulada (ASKELAND; PHULÉ, 2011).

Figura 1: Correlação entre força da ligação atômica e módulo de elasticidade



Fonte: Adaptado de Askeland;Phulé (2011)

Existem dois tipos de deformações: as elásticas e as plásticas (CALLISTER, 2002). O material que foi submetido a uma deformação elástica retorna às suas dimensões originais após a remoção da tensão (Figura 2). Porém, quando a tensão aplicada altera permanentemente as dimensões do material, chega-se à chamada fase da deformação plástica.

Figura 2: Gráfico tensão-deformação demonstrando a deformação elástica linear

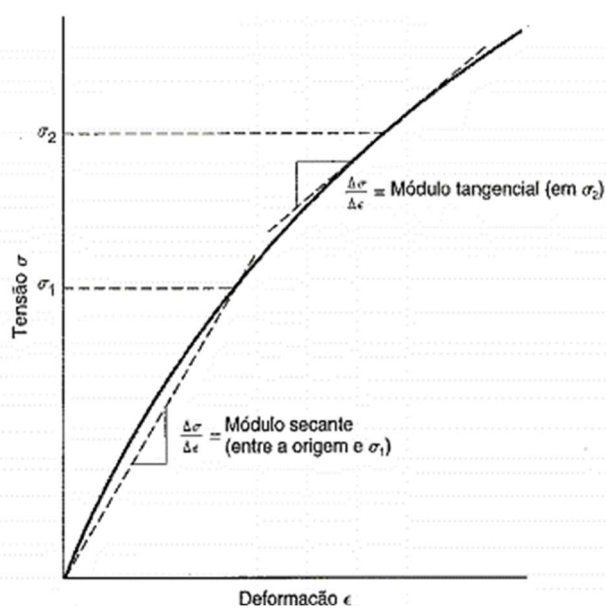


Fonte: Callister (2002)

O módulo de elasticidade nada mais é do que “a relação entre a tensão aplicada e deformação instantânea dentro de um limite proporcional adotado” (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Esta propriedade é normalmente expressa em Gigapascal (GPa) e quanto maior o coeficiente angular do diagrama tensão-deformação, menos deformável será o material diante da aplicação de uma carga (CALLISTER, 2002).

Materiais compósitos, como o concreto, no entanto, geram um diagrama tensão-deformação com uma fase elástica não-linear. Nestes casos, não há proporcionalidade entre tensão e deformação, conforme determina a Lei de Hooke aplicada a materiais. Logo, deve-se realizar a determinação do módulo de elasticidade por outros métodos, como o módulo tangencial, módulo tangente inicial ou ainda módulo secante (NEVILLE, 2013), conforme definidos na Figura 3:

Figura 3: Diagrama Tensão-deformação específica com comportamento elástico não linear



Fonte: Callister (2002).

2.2 Módulo de Elasticidade do Concreto

O diagrama tensão-deformação típico do concreto não apresenta uma fase elástica perfeita, ou seja, depois de ser tensionada, nem toda deformação é totalmente recuperada (NEVILLE, 2013). Além disso, não é linear, apresentando uma alteração na inclinação da curva, conforme o diagrama deformação-tensão típico do concreto apresentado a seguir na Figura 4:

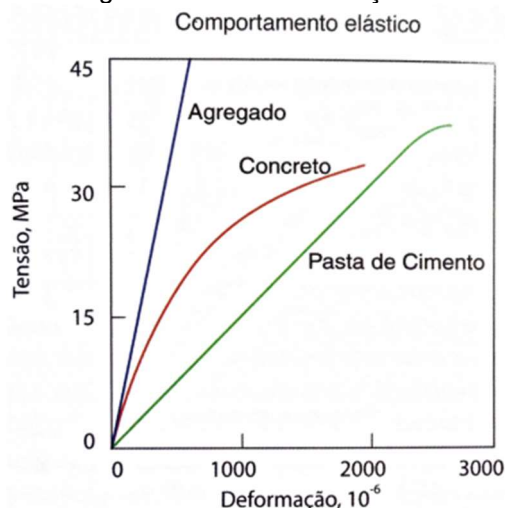
Figura 4: Diagrama tensão-deformação específica típico do concreto



Fonte: Adaptado de Neville (2013)

A não linearidade do concreto no diagrama tensão-deformação é explicada pelo fato de se tratar de um compósito complexo. O seu módulo não equivale à soma do comportamento dos materiais que o compõem (MEHTA; MONTEIRO; 2014). Estes (agregados e pasta de cimento) possuem diagramas essencialmente lineares, diferentemente do compósito resultante, como pode ser visualizado na Figura 5. Percebe-se que o módulo de elasticidade do agregado é consideravelmente maior do que o da pasta de cimento hidratada.

Figura 5: Comportamento no diagrama tensão-deformação do concreto e seus componentes



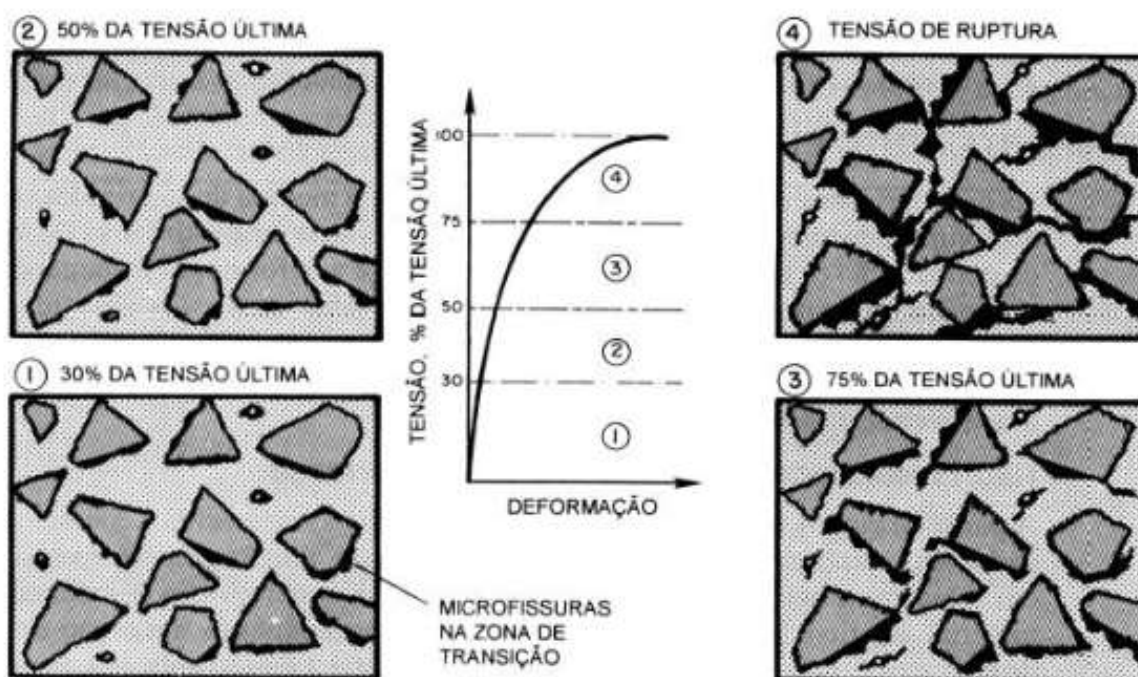
Fonte: Mehta e Monteiro (2014)

Barbosa (2009) e Gidrão (2015) afirmam que, em razão do concreto ser um material composto, o valor do módulo de elasticidade será afetado pela natureza, volume e característica dos seus integrantes. Logo, quanto maior a proporção de agregados sobre a pasta de cimento, maior será o módulo de elasticidade do compósito final.

Segundo Montija (2007), as deformações se distribuem desigualmente entre os materiais cristalinos e não cristalinos, uma vez que possuem composições, módulos de elasticidade, tamanhos e porosidades diferentes. Por esta razão, a existência das zonas de transição (ZT) nas interfaces entre os agregados graúdos e a matriz de argamassa são grandes influenciadores da não-linearidade do diagrama tensão-deformação do compósito, uma vez que, quando são aplicadas tensões sobre o concreto, o processo de microfissuração progressiva tenderá a ocorrer principalmente nestas regiões (MEHTA e MONTEIRO, 2014; HELENE, 2002).

O processo de microfissuração do concreto ocorre em quatro estágios distintos, conforme observa-se na Figura 6 (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Na Tabela 2, segue uma descrição detalhada do comportamento das microfissuras na zona de transição em cada um destes estágio de aplicação de tensão no concreto.

Figura 6: Estágios de microfissuração da zona de transição



Fonte: Mehta e Monteiro (2014)

Tabela 2: Estágios do Processo de microfissuração de acordo com aplicação de Tensão

Estágios	Percentual da tensão última	Avanço na microfissuração	Comportamento tensão-deformação
1	Até 30%	Fissuras permanecem estáveis	Permanece linear
2	De 30% a 50%	Sistema estável de microfissuras na ZT; Fissuração insignificante na matriz;	Começa a se desviar de linha reta
	De 50% a 60%	Novas fissuras surgem na matriz	
3	De 60% a 75%	Sistema de fissuração na ZT torna-se instável e propagação de fissuras na matriz.	Inclina-se consideravelmente para horizontal.
4	Acima de 75%	Nível crítico: crescimento espontâneo das fissuras na matriz e na ZT;	Rápida deformação até o rompimento;

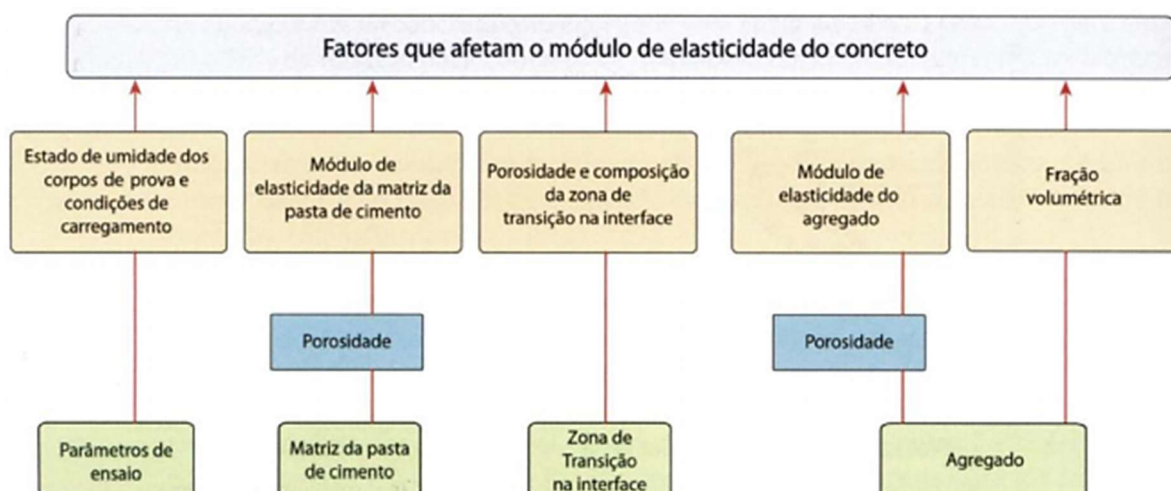
Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2014)

Em razão disto, a NBR 8.522 (ABNT, 2017), que trata da determinação dos módulos estáticos de elasticidade à compressão, limita a tensão aplicada para até 30% da resistência à compressão média. Infere-se que até este limite garante-se a proporcionalidade entre tensão-deformação e também que as microfissuras na zona de transição e matriz não influenciarão os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade estáticos.

2.3 Fatores Influenciadores do Módulo de Elasticidade do Concreto

Neville (2013) e Mehta e Monteiro (2014) elencam através da Figura 7 diversos parâmetros influenciadores do comportamento elástico do concreto. Estes se dividiriam em fatores intrínsecos (matriz de pasta de cimento, zona de transição de interface e agregados utilizados na composição) e extrínsecos (parâmetros de ensaio).

Figura 7: Fatores influenciadores no módulo de elasticidade do concreto



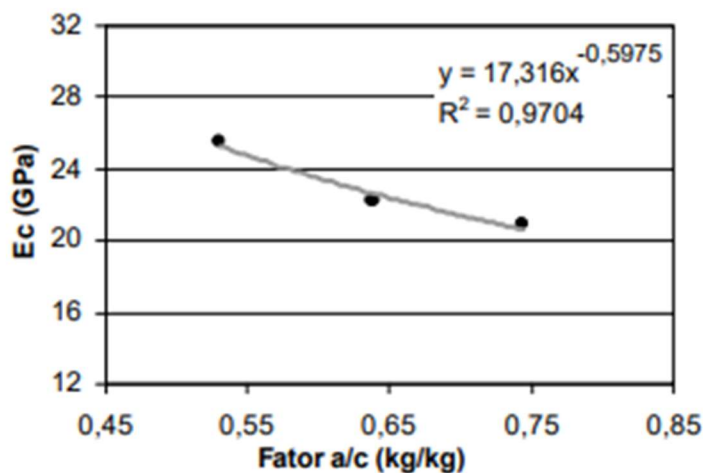
Fonte: Mehta e Monteiro (2014)

Diante das distintas formas de influência no resultado final para o módulo de elasticidade de um concreto, serão discutidos nos tópicos a seguir cada um destes fatores e como os mesmos exercem influência sobre o módulo de elasticidade do compósito

2.3.1 Porosidade da matriz da pasta de cimento

A relação água/cimento é o primeiro fator impactante ao Módulo de elasticidade apresentado por Mehta e Monteiro (2014). Conforme enunciado pela Lei de Abrams, o acréscimo deste fator altera a matriz da pasta de cimento, aumentando a sua porosidade e conseqüentemente, diminuindo a sua resistência à compressão. Assim, um concreto de baixa relação água/cimento tende a ser mais resistente e rígido em função de sua baixa porosidade; e por esta razão teria uma maior capacidade de resistir à deformações solicitantes (GIDRÃO, 2015). Esta tendência pode ser observada na Figura 8:

Figura 8: Gráfico do módulo de elasticidade versus o fator a/c (abatimento=cte)



Fonte: Helene (2002)

Arruda (2013) afirma que a forma mais prática para aumentar a rigidez da pasta seria através da redução da relação a/c. Logo, o enfraquecimento da matriz cimentícia ocorre em razão do aumento do teor de poros, diminuindo assim a resistência e o módulo de elasticidade do concreto.

2.3.2 Porosidade e composição da zona de transição

Em seus estudos, Mehta e Monteiro (2014) concluíram que durante o estado fresco do concreto, uma película de água se instala na superfície do agregado graúdo,

fenômeno este chamado de exsudação interna. Com isto, a relação a/c local tende a aumentar, ocorrendo uma maior formação de etringita e hidróxido de cálcio, em detrimento ao C-S-H (gel silicato de cálcio hidratado), que seria o responsável pelo aumento de resistência e rigidez da pasta (GIRARDI, 2018). Com isto a microestrutura desta zona de transição será sensivelmente mais porosa se comparada à região da matriz cimentícia.

Isto foi verificado experimentalmente por Paulon e Monteiro (1991), uma vez que ao utilizarem técnicas de microscopia eletrônica de varredura visualizaram maiores concentrações de cristais de hidróxido de cálcio próximos às superfícies dos agregados graúdos quando comparados aos resultados na matriz.

Desta forma, as superfícies das zonas de transição acabam por formar planos de orientação preferencial para a formação de cristais de hidróxido de cálcio (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Estes gerarão planos de fraqueza para a resistência e rigidez do concreto como um todo. Portanto, “as propriedades elásticas da zona de transição serão determinantes para a transferência de energia entre todos os componentes da mistura, influenciando assim, o módulo de elasticidade do concreto” (GIDRÃO, 2015).

2.3.3 Influências do agregado

Como citado anteriormente, a escolha correta dos agregados pode gerar tanto vantagens econômicas quanto técnicas, melhorando o desempenho quanto à resistência mecânica, durabilidade e estabilidade dimensional (SBRIGHI NETO, 2011). Algumas destas melhorias são decorrentes da escolha do traço do concreto, enquanto que outras são características inerentes ao agregado escolhido.

Sbrighi Neto e Helene (2017) destacam, que a origem petrográfica do agregado graúdo representa um dos fatores mais influentes na obtenção do módulo de elasticidade. Isto porque rochas de origens mineralógicas distintas possuem densidades próprias, resultando em módulos de elasticidade diversos. Esta influência pode ser visualizada na Tabela 03 por resultados de ensaios de módulo de elasticidade realizados por Sbrighi Neto (2005) sobre rochas de diferentes origens mineralógicas:

Tabela 3: Características físicas e mecânicas de rochas utilizadas na produção do concreto

Tipo de rocha	Massa específica (kg/m ³)	Absorção (%)	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Basalto	2750 – 2950	0,10 – 0,80	180 – 280	60 – 100
Quartzito	2550 – 2700	0,10 – 0,60	130 – 400	50 – 100
Gnaisse	2550 – 2700	0,20 – 0,80	100 – 240	40 – 70
Granito	2600 – 2700	0,10 – 0,80	100 – 240	40 – 70
Calcário	2600 – 2800	0,2 – 4,5	90 – 200	30 – 50
Xisto	2300 – 2500	1,2 – 4,5	100 – 180	25 – 40
Arenito	2200 – 2400	1,2 – 8,5	50 – 150	20 - 40

Fonte: Adaptado de Sbrighi Neto (2011)

Mehta e Monteiro (2014) confirmam que a relação entre porosidade/rigidez do agregado afeta diretamente a capacidade de restrição a deformações pelo mesmo. Neville (2013) complementa que o módulo de elasticidade do concreto será tanto maior quanto maior for o módulo de elasticidade da rocha mãe.

Esta informação de que a utilização de um agregado mais denso gerará um concreto de maior módulo de elasticidade já é matéria pacífica, tanto que no ano de 2014, a ABNT NBR 6118:2003 foi alterada a fim de incluir no item 8.2.8 o coeficiente “tipo de rocha” (α_E) no cálculo de previsão do módulo de elasticidade tangente inicial (E_{ci}).

Girardi (2018) realizou ensaios para determinar a influência do agregado graúdo no módulo de elasticidade. Sobre estes, o pesquisador realizou a extração de testemunhos das rochas mães dos agregados utilizados nos seus testes experimentais. Três foram os tipos de rochas utilizados: Granito, Basalto e Diabásio, conforme pode-se visualizar nos resultados dispostos na Tabela 4 a seguir:

Tabela 4: Resistência à compressão e módulo de deformação do testemunho de rochas

Tipo de Agregado Graúdo	Granito	Basalto	Diabásio
Resistência à compressão média (MPa)	133,37	129,8	194
Módulo de Elasticidade médio (GPa)	94,73	114,76	191,23

Fonte: Adaptado de Girardi (2018)

Em seguida, Girardi (2018) realizou ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade sobre concretos com os três tipos de agregados graúdos em três proporções distintas: 1:3, 1:5 e 1:7. Importante ressaltar que o único agregado miúdo utilizado nestes testes foi uma areia natural quartzosa. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5:

Tabela 5: Propriedade mecânicas de concretos confeccionados por Girardi (2018) utilizando de diferentes agregados graúdos

Tipo de Agregado Graúdo	Granito			Basalto			Diabásio		
Massa específica absoluta (g/cm ³)	2,62			2,80			3,11		
Teor de Argamassa (%)	0,54								
Traço (em Massa)	1:3	1:5	1:7	1:3	1:5	1:7	1:3	1:5	1:7
Consumo de cimento (kg/m ³)	551	393	305	551	393	305	551	393	305
Volume de pasta (%)	40,1	28,6	22,3	40,1	28,6	22,3	40,1	28,6	22,3
Abatimento do tronco de cone (mm)	125	180	70	130	190	75	155	215	75
Resistência à compressão média (MPa)	48,4	49,8	46,9	49,9	53,1	50,7	50,1	53,1	50,2
Módulo de Elasticidade (GPa)	25,5	28,5	29,1	27,5	31,8	34,0	33,7	36,0	39,3

Fonte: Adaptado de Girardi (2018)

Girardi (2018) conclui, portanto, que “a natureza do agregado é fundamental na definição do módulo do concreto, sendo este diretamente afetado pelo módulo do agregado”.

Bilesky (2016) estudou a mesma influência do agregado graúdo no módulo de elasticidade com agregados comercialmente identificados como diabásio, granito e calcário. Quanto ao agregado miúdo, utilizou-se de uma composição de 45% areia natural de quartzo e 55% de areia artificial de britagem de origem calcária. Os detalhes do programa experimental podem ser analisados na Tabela 6 a seguir:

Tabela 6: Propriedade mecânicas de concretos confeccionados por Bilesky (2016) utilizando de diferentes agregados graúdos

Tipo de Agregado Graúdo	Calcário					Granito					Diabásio				
Massa específica (g/cm ³)	2,76					2,65					2,85				
Relação a/c	0,30	0,45	0,55	0,60	0,90	0,30	0,45	0,55	0,60	0,90	0,30	0,45	0,55	0,60	0,90
Traço (em Massa)	1:1,2: 2,1	1: 2: 3	1:2,7: 3,6	1: 3: 3,8	1: 5: 5,5	1:1,2: 2,1	1: 2: 3	1:2,7: 3,6	1: 3: 3,8	1: 5: 5,5	1: 1,2: 2,1	1: 2: 3	1: 2,7: 3,6	1: 3: 3,8	1: 5: 5,5
Consumo de cimento (kg/m ³)	541	379	310	288	193	531	371	304	282	190	546	382	312	290	190
Abatimento médio (mm)	115	115	115	120	115	110	110	120	115	110	120	115	120	120	110
Adit. Polifuncional (%)	0,80	0,50	0,35	0,40	0,77	0,85	0,85	0,35	0,60	0,77	0,82	0,55	0,35	0,40	0,77
Adit. Plastificante (%)	-	-	-	-	1,3	-	-	-	-	1,2	-	-	-	-	1,24
Adit. Superplastificante (%)	0,38	-	-	-	-	0,42	-	-	-	-	0,37	-	-	-	-
Resistência à compressão (MPa)	76,8	50,2	39,4	37,6	19,9	79,0	52,9	44,1	41,7	22,8	81,0	51,8	47,3	42,5	23,5
Módulo de Elasticidade (GPa)	45,9	40,0	36,9	35,8	24,8	43,0	38,0	35,4	33,5	23,9	50,7	43,9	40,2	38,4	26,9

Fonte: Adaptado de Bilesky (2016)

Alguns dos resultados ensaiados por Bilesky (2016) geraram estranheza, uma vez que o calcário obteve resultados de massa específica e módulos de elasticidade superiores aos do granito. Esta seria uma apuração contraditória em relação aos estudos mais tradicionais da geologia.

Em razão destes resultados controversos, Bilesky (2017), juntamente com Helene e Sbrighi Neto, realizaram uma análise da natureza petrográfica dos agregados utilizados na sua dissertação. Desta forma descobriram o porque do calcário ter atingido resultados além do esperado: aquele agregado tinha natureza mineralógica diversa da qual era comercialmente denominado. Seguem os resultados da referida análise na Tabela 7:

Tabela 7: Natureza petrográfica declarada versus natureza petrográfica real

Identificação comercial	Classificação declarada no ensaio
Diabásio	Diabásio
Granito	Mozogranito protomilonítico
Calcário	Diopsídio-hornbrenda-epídoto-calcita mármore

Fonte: Adaptado de Bilesky (2018)

Este resultado demonstra o risco de se utilizar agregados sem o mínimo conhecimento de suas propriedades determinadas experimentalmente ou de sua real natureza mineralógica. Isto porque se a sua denominação comercial não for condizente com a realidade, a estimacão de módulo de elasticidade prevista na NBR 6118:2014 - que já não apresenta resultados muito precisos – estará completamente prejudicada.

Por fim, Vasconcellos (2018) realizou testes com agregados graúdos de granito e dois gnaisses de regiões geográficas diversas para verificar se gerariam resultados discrepantes entre si, uma vez que conforme a NBR 6118:2014, ambas rochas teriam o coeficiente (α_E) igual a 1,0 (um). Foram testados traços com três relações a/c diferentes (0,46; 0,57 e 0,71) e composições de 50/50 entre britas 0 e 1. Em relação ao agregado miúdo, Vasconcellos (2018) decidiu utilizar uma composição de 60% areia natural siltosa fina e 40% areia industrial de britagem de origem calcária de alto módulo, cujas propriedades físicas pode-se visualizar na Tabela 8 a seguir:

Tabela 8: Caracterização física dos agregados miúdos utilizados por Vasconcellos (2018)

Tipo de Agregado Graúdo	Areia natural fina	Areia Industrial Calcária
Massa específica	2,65 g/cm ³	2,80 g/cm ³
Módulo de finura	1,04	3,03
Teor de Pulverulento	0,71%	12,10%

Fonte: Adaptado de Vasconcellos (2018)

Para os seus experimentos, Vasconcellos (2018) realizou o proporcionamento volumétrico dos materiais, mantendo fixos apenas as frações dos agregados graúdos.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade obtidos pelo referido autor são apresentados na Tabela 9:

Tabela 9: Propriedade mecânicas de concretos confeccionados por Vasconcellos (2018) utilizando de diferentes agregados graúdos

Tipo de Agregado Graúdo	Granito			Gnaisse 1			Gnaisse 2		
Massa específica (g/cm ³)	2,60			2,78			2,85		
Relação a/c	0,46	0,57	0,71	0,46	0,57	0,71	0,46	0,57	0,71
Traço (em Massa)	1: 2,0: 2,8	1: 2,8: 3,5	1: 3,7: 4,4	1: 2,0: 3,0	1: 2,8: 3,7	1: 3,7: 4,7	1: 2,0: 3,1	1: 2,8: 3,8	1: 3,7: 4,8
Volume de pasta (%)	30,7	28,1	25,8	30,7	28,1	25,8	30,7	28,1	25,8
Consumo de cimento (kg/m ³)	383,94	306,51	242,87	385,91	308,45	243,05	381,77	307,5	243,17
Teor de aditivo (%)	0,21	0,23	0,44	0,26	0,13	0,22	0,21	0,15	0,17
Resistência à compressão (MPa)	38,3	30,6	22,6	40,5	31,9	20,4	40,8	31,6	20,9
Módulo de Elasticidade (GPa) E _{ci}	34,9	34,2	34,6	47,9	46,1	42,0	46,3	44,8	41,7

Fonte: Adaptado de Vasconcellos (2018)

Vasconcellos (2018) verificou, em seus resultados, que o fator origem do agregado graúdo influenciou significativamente os valores de módulo de elasticidade obtidos (diferença de até 30% entre os agregados de granito e gnaisse). O autor conclui, portanto, que a origem mineralógica do agregado graúdo influencia diretamente os resultados do módulo de elasticidade dos concretos.

Os resultados dos ensaios entre os dois agregados de origens mineralógicas semelhantes (gnaisses) atingiram valores de rigidez da mesma ordem de grandeza; no entanto é importante ressaltar que as duas pedreiras de onde estes agregados se originaram encontram-se a menos de 50 quilômetros de distância, o que poderia explicar os resultados semelhantes, uma vez que teriam basicamente a mesma formação geológica.

Diante desta pequena amostragem de recentes estudos científicos, verifica-se, portanto, a relação direta entre a densidade e o módulo de elasticidade da rocha mãe, de onde o agregado graúdo provém, e os resultados do módulo de elasticidade obtidos em concretos.

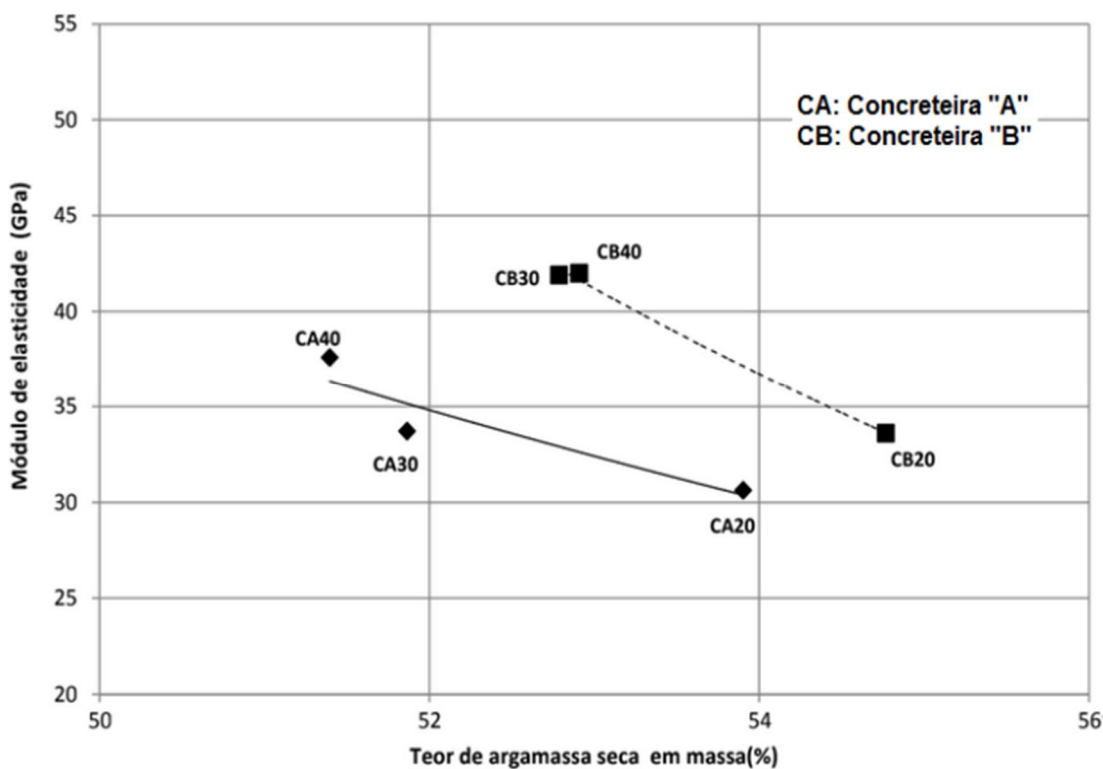
À respeito da dimensão máxima do agregado graúdo, Monteiro (1985) verificou, através de microscopia eletrônica, que a espessura da “auréola de transição” – ligação entre a pasta e o agregado – é determinada pelo tamanho dos agregados graúdos. Ou seja, a redução da dimensão máxima característica do agregado tende a reduzir a porosidade da zona de transição, aumentando a rigidez desta região e, portanto, o módulo de elasticidade do concreto.

Porém, também cabe ressaltar que a alteração da dimensão máxima do agregado também afeta a quantidade de água necessária para atingir uma dada consistência (MEHTA; MONTEIRO; 2014). Logo, uma substituição total por um agregado com menor dimensão máxima característica e igual granulometria necessitará de um maior teor de argamassa, e, conseqüentemente, um maior consumo de água, em função da maior superfície específica da mistura, resultando em resistências e módulos de elasticidade inferiores.

2.3.3.1 Teor de agregados e de argamassa:

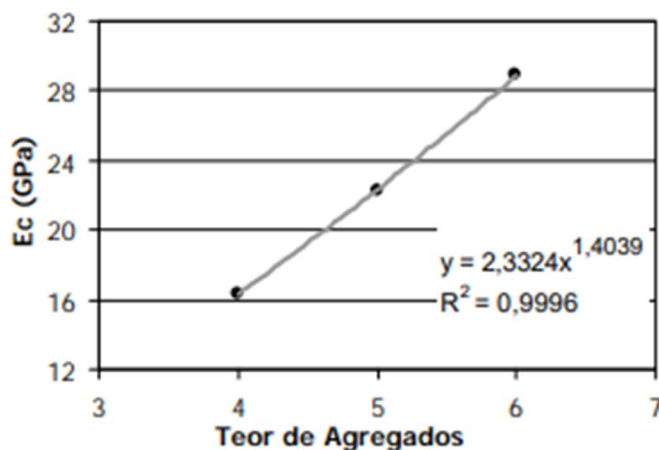
A quantidade e a velocidade de propagação das fissuras dependerão, principalmente, da proporção dos materiais utilizados e do teor de argamassa, mesmo quando comparando concretos de mesma resistência (GIDRÃO, 2015). Ou seja, o aumento do volume de pasta incrementaria as deformações sofridas pelo concreto, uma vez que esta possui menor módulo de elasticidade que os agregados. Esta relação também pode ser visualizada na figuras 9 e 10:

Figura 9: Influência do Teor de argamassa no módulo de Elasticidade



Fonte: LEAL (2012)

Figura 10: Gráfico do módulo de elasticidade x teor de agregados (m) (a/c = cte)



Fonte: HELENE (2002)

Para exemplificar este parâmetro, os resultados de GIRARDI (2018), já apresentados na Tabela 5, mostram que o aumento na proporção de agregados (1:3, 1:5 e 1:7) resultou em uma elevação gradativa no módulo de elasticidade nos três agregados utilizados (granito, basalto e diabásio). No entanto, em todos os resultados da proporção 1:7, ocorreram quedas de resistência nos concretos (o que é compreensível, em razão do excesso de agregados). Contudo, essa tendência de queda não foi acompanhada nos resultados de módulo de elasticidade, que continuaram a crescer. Portanto, a resistência à compressão não estaria, necessariamente, vinculada ao módulo de elasticidade no que tange ao parâmetro teor de agregados.

2.3.4 Parâmetros de Ensaio

Três são as normas técnicas que procuram parametrizar os procedimentos a dos ensaio de módulo de elasticidade: NBR 5738 (ABNT, 2015) que trata de técnicas de moldagem, cura e preparo das amostras; a NBR 5739 (ABNT, 2018) apresenta a metodologia de ensaio de resistência à compressão e requisitos dos equipamentos necessários; e por fim, a NBR 8522 (ABNT, 2017) apresenta os métodos de determinação dos módulos estáticos.

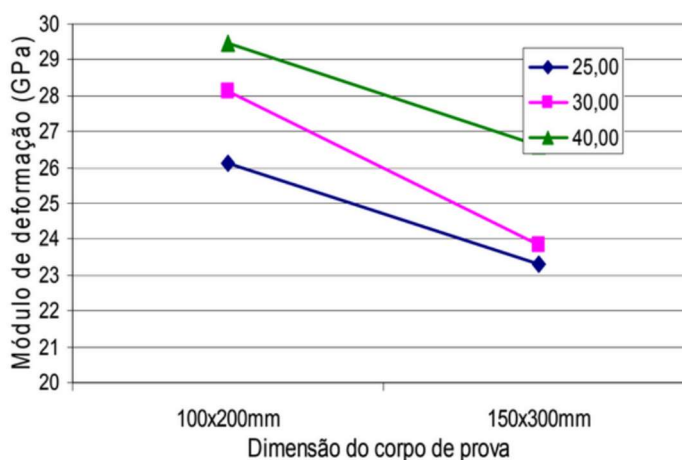
A NBR 8522:2017, entretanto, não fixou alguns parâmetros, cabendo ao usuário escolher o que lhe será mais conveniente, sendo fonte de variação na determinação do módulo de deformação do concreto. A seguir tratar-se-á a respeito de alguns destes parâmetros de ensaio não normatizados.

2.3.4.1 Dimensão do corpo de prova cilíndrico

A NBR 5738 (ABNT, 2015) não especifica um único tipo de molde cilíndrico, sendo que a única obrigatoriedade apresentada é que a sua altura deve ser igual ao dobro do seu diâmetro. Além disto, este último deve ser, no mínimo, três vezes maior que a dimensão nominal máxima do agregado graúdo. Atualmente, a dimensão mais usual dos corpos de prova é 100x200 mm, em razão do seu menor peso, menor quantidade de concreto necessário e pela menor capacidade exigida dos equipamentos de compressão, uma vez que a resistência à compressão dos concretos aumentou significativamente nas últimas décadas (GUJEL; et al, 2017).

Porém, a fim de estudar a influência do corpo de prova no ensaio de módulo de elasticidade, Martins (2008) moldou concretos de três classes de resistência à compressão (C25, C30 e C40) em corpos de prova cilíndricos de 100x200 mm e 150x300mm. A figura 11 apresenta os resultados obtidos:

Figura 11: Influência da dimensão do CP no módulo de elasticidade do concreto



Fonte: Martins (2008)

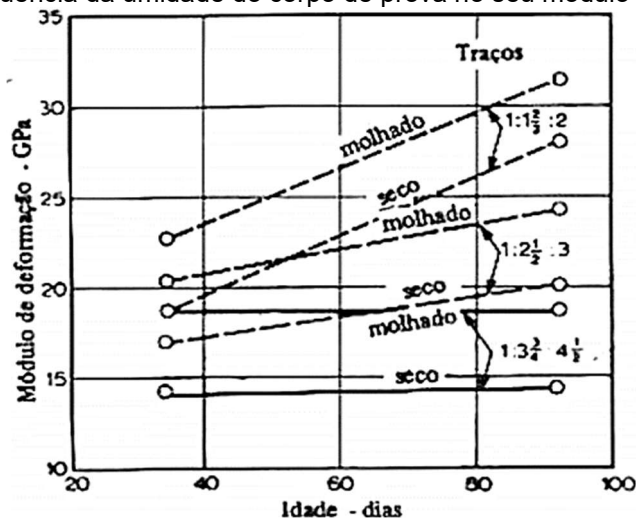
Martins (2008) concluiu que corpos de prova de dimensão 100x200 mm geraram módulos de deformação 10% acima daqueles moldados em corpos de prova 150x300 mm para todas as classes de resistência testadas. Segundo o autor, a justificativa para tal resultado estaria no maior volume de concreto contido no molde 150x300 mm, uma vez que este teria um teor de vazios maior em razão da dificuldade adensamento uniforme no momento da moldagem.

2.3.4.2 Cura úmida e Umidade no momento do ensaio

Dal Molin e Monteiro (1996) estudaram o efeito da cura em ambiente úmido no módulo de elasticidade de concretos. Os corpos de prova curados em câmara úmida

obtiveram resultados de módulo de elasticidade 3,4% superiores àqueles que permaneceram em ambiente seco. O mesmo comportamento foi verificado por Neville (1997) em idades distintas (28 e 90), conforme mostra a figura 12:

Figura 12: Influência da umidade do corpo de prova no seu módulo de deformação



Fonte: Neville (1997)

Outra questão importante a ser pontuada é a umidade dos corpos de prova no momento do ensaio. Isto porque quando são ensaiados úmidos apresentam resultados de módulo de elasticidade 15% maiores do que em estado seco (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Este comportamento é exatamente o contrário do que ocorre com a resistência a compressão, que apresenta o seu maior valor quando o corpo de prova se encontra seco.

Este fenômeno ocorreria porque no processo de secagem do concreto, a matriz cimentícia ganharia resistência em razão de um aumento nas forças de atração de Van der Waals nos produtos da hidratação; enquanto que na zona de transição, haveria o início do processo de microfissurações, afetando negativamente o comportamento tensão-deformação (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

2.3.4.3 Taxa de carregamento aplicada

O resultado do ensaio de módulo de elasticidade também é influenciado pela velocidade da aplicação da carga; quanto maior aquela for, menor será a capacidade de propagação de microfissuras em um mesmo nível de tensão, resultando em um resultado superior de rigidez (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Por esta razão, a NBR 8522 (ABNT, 2017) padronizou a velocidade de carregamento dos corpos de prova para uma taxa de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s. No entanto,

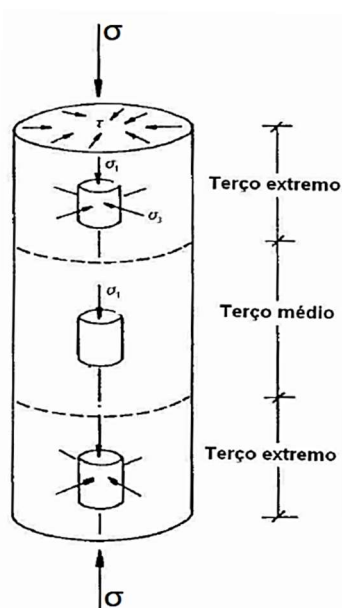
cabe ressaltar que não existe um consenso a respeito do tema entre as normas internacionais, o que impossibilita a comparação entre resultados realizados de acordo com normas diferentes (MONTIJA, 2007).

2.3.4.4 Equipamento de medição dos deslocamentos no Método Estático

A NBR 8522 (ABNT, 2017) define a base de medida como distância entre dois pontos ao longo da geratriz do corpo de prova sobre os quais estarão posicionados os equipamentos de medição. Aqueles devem ser equidistantes das extremidades; devem também possuir comprimento mínimo de dois terços ($2/3$) do diâmetro e no máximo, igual medida ao diâmetro do corpo de prova. Esta orientação busca diminuir as tensões residuais provenientes do contato do corpo de prova com os pratos de apoio do equipamento de compressão (GIRARDI, 2018).

Montija (2007) afirma que apenas o terço médio do corpo de prova estaria isento de esforços laterais; e por isso estaria sujeito às suas maiores deformações. Por esta razão, o autor deduz que o mau posicionamento dos medidores de deformação gerará resultados incorretos, uma vez que os terços extremos não estariam completamente livres de restrições à deformação, conforme se vê na figura 13:

Figura 13: Distribuição de esforços no corpo de prova




Fonte: Montija (2007)

Por estas razões, Montija (2007) reconhece a complexidade do ensaio de determinação de módulo de elasticidade, exigindo do operador cuidado e atenção durante todo o procedimento.

A NBR 8522 (ABNT, 2017) permite a utilização de qualquer equipamento de medição de deformação, desde que apresente resolução de $1 \cdot 10^{-3}$ mm e um erro relativo máximo inferior a 1%. Diante disto, na Tabela 10 apresenta-se uma apresentação dos tipos de medidores de deformação mais utilizados:

Tabela 10: Tipos de Medidores de deformação para ensaios em concreto

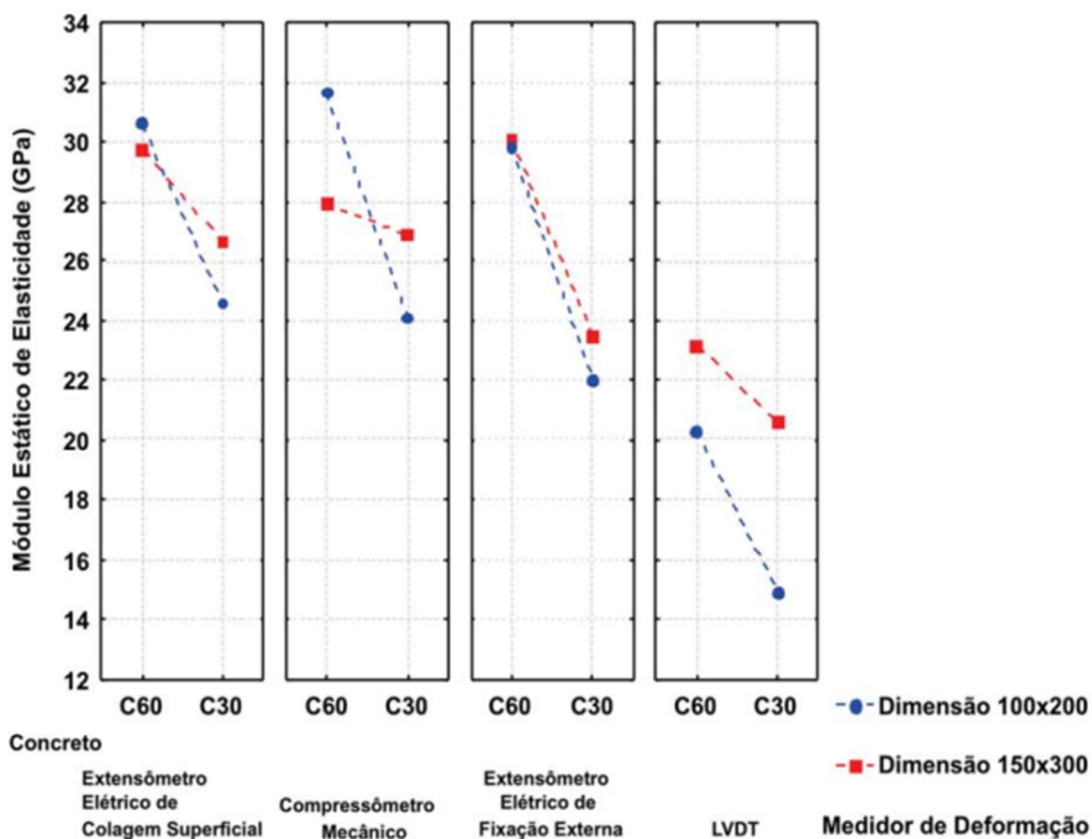
Medidor	Princípio Básico de Funcionamento	Representação Gráfica
Compressômetro	Consiste na reação de um pino de um relógio comparador que fica em contato com um suporte fixado no compressômetro e, mediante aplicação de carregamento no corpo de prova ocorre um deslocamento no pino sinalizando uma medida 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 eletromotrizas em bobinas montadas axialmente no interior do dispositivo devendo estar acoplado a um sistema de aquisição de dados.	
Strain gage	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. É descartado após o seu uso.	
Clip Gage	É uma variação do strain gage de superfície. Resumidamente, ao invés de colado na superfície do corpo de prova, o strain gage 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 strain gage que é dependente da rotação e do braço de alavanca da lâmina	

Fonte: Adaptado de Montija (2007), Araújo (2011), Arruda (2013) e Vasconcelos (2018).

Diversos estudos já foram realizados a fim de comparar os resultados de módulo entre diferentes medidores de deformação. Dentre eles pode-se citar, Araújo, Guimarães e Geyer (2012), que verificaram que o *Clip Gage* e o *Strain Gage* apresentaram as menores variações de resultados; já o LVDT (*Linear Variable*

Differential Transformer) obteve os menores resultados de módulo e as maiores dispersões, como pode-se observar na Figura 14:

Figura 14: Influência dos Medidores de deformação



Fonte: Araújo, Guimarães e Geyer (2012)

Corroborando com estes resultados, Lenz (2016), Montija (2007) e Cupertino *et al.* (2007) afirmam que os *clip gages* apresentam leituras de deformação com maior homogeneidade e precisão dentre os medidores estudados.

2.4 Método de Predição do Módulo de Elasticidade de acordo com a NBR 6118:2014

Diversos são os modelos de equações de previsão do módulo de elasticidade do concreto; estes geralmente apresentam como variável principal de entrada a resistência à compressão do concreto. Por exemplo, até 2014, quando recebeu uma necessária revisão, a NBR 6118 apresentava uma equação de estimativa do módulo de elasticidade que continha a resistência a compressão como sua única variável.

Segundo Silva (2003), as equações propostas para estimar módulos de elasticidade apresentam limitações uma vez que não avaliam diferentes proporções na mistura do concreto ou ainda idades superiores aos 28 dias. Araújo (2000) afirma que a diferença entre resultados experimentais e obtidos pelas referidas equações é muito grande; reitera também que resultados provenientes de fórmulas que correlacionem resistência a compressão com módulo de elasticidade devem ser considerados com alguma reserva.

Como já abordado anteriormente, após a revisão da NBR 6118 (ABNT, 2014) foi incluída, na equação, um coeficiente para representar o tipo de origem mineralógica do agregado graúdo a ser utilizado no concreto. A Tabela 11 apresenta as equações de previsão de módulo de elasticidade conforme a referida norma:

Tabela 11: Equações de previsão do Módulo de Elasticidade segundo a NBR 6118:2014

Tipo de módulo de Elasticidade	Fórmula	Observações
Módulo de Elasticidade Tangente Inicial (E_{ci})	De 20 MPa a 50 MPa $E_{ci} = \alpha_E * 5600 * \sqrt{f_{ck}}$	Sendo: $\alpha_E = 1,2$ para basalto e diabásio $\alpha_E = 1,0$ para granito e gnaisse $\alpha_E = 0,9$ para calcário $\alpha_E = 0,7$ para arenito
	De 55 MPa a 90 MPa $E_{ci} = 21,5 * 10^3 * \alpha_E * \left(\left(\frac{f_{ck}}{10} \right) + 1,25 \right)^{1/3}$	
Módulo de Elasticidade Secante (E_{cs})	$E_{cs} = \alpha_i * E_{ci}$ $\alpha_i = 0,8 * 0,2 * \left(\frac{f_{ck}}{80} \right) \leq 1,0$	E_{ci} e f_{ck} são dados em megapascal (MPa).

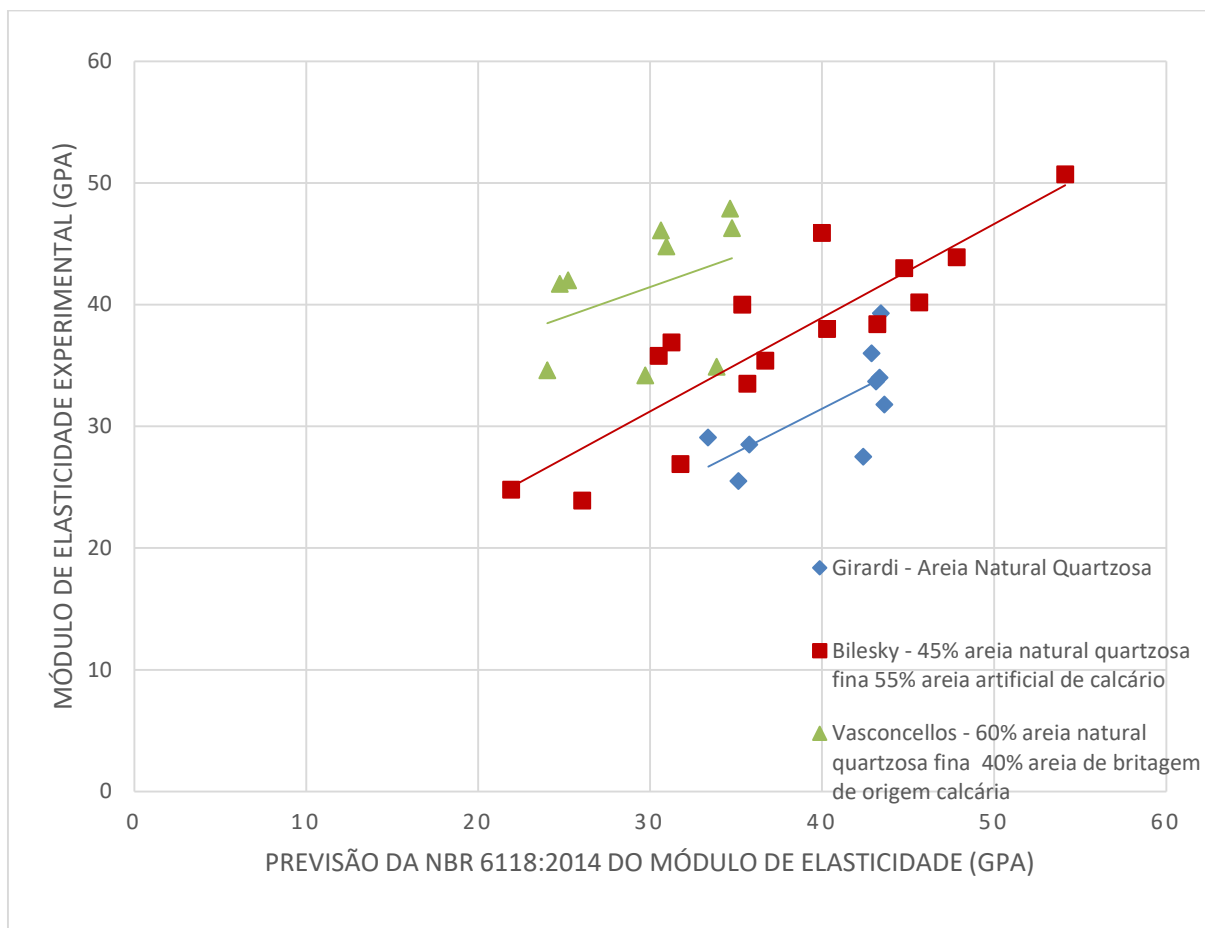
Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014)

A inclusão do coeficiente da origem mineralógica do agregado graúdo representou um avanço para a NBR 6118:2014, uma vez que este fator tem influência direta no resultado do módulo de elasticidade. No entanto, como será apresentado a seguir, ainda não é suficiente para prever de forma precisa esta propriedade.

Corrêa (2020) realizou uma análise conjunta dos resultados obtidos nos trabalhos de Girardi (2018), Bilesky (2016) e Vasconcellos (2018) com o objetivo de compará-los aos módulos de elasticidade previstos pelas equações da Norma Técnica. O autor verificou que os resultados das comparações não obedeceram critérios claros, sendo que alguns resultados experimentais ficaram acima e outros abaixo dos valores previstos pela equação normatizada. No entanto, um detalhe não passou despercebido da análise do autor: os diferentes agregados miúdos empregados nas referidas pesquisas.

Corrêa (2020) observou que ao filtrar os resultados obtidos nas pesquisas dos três autores citados por origem mineralógica dos agregados miúdos utilizados, poder-se-ia verificar uma tendência na qual este parâmetro estivesse influenciando os resultados de módulo de elasticidade, conforme apresentado na Figura 15:

Figura 15: Gráfico comparativo Módulo de Elasticidade Experimental x Módulo de elasticidade Previsto pela Equação da NBR 6118:2014.

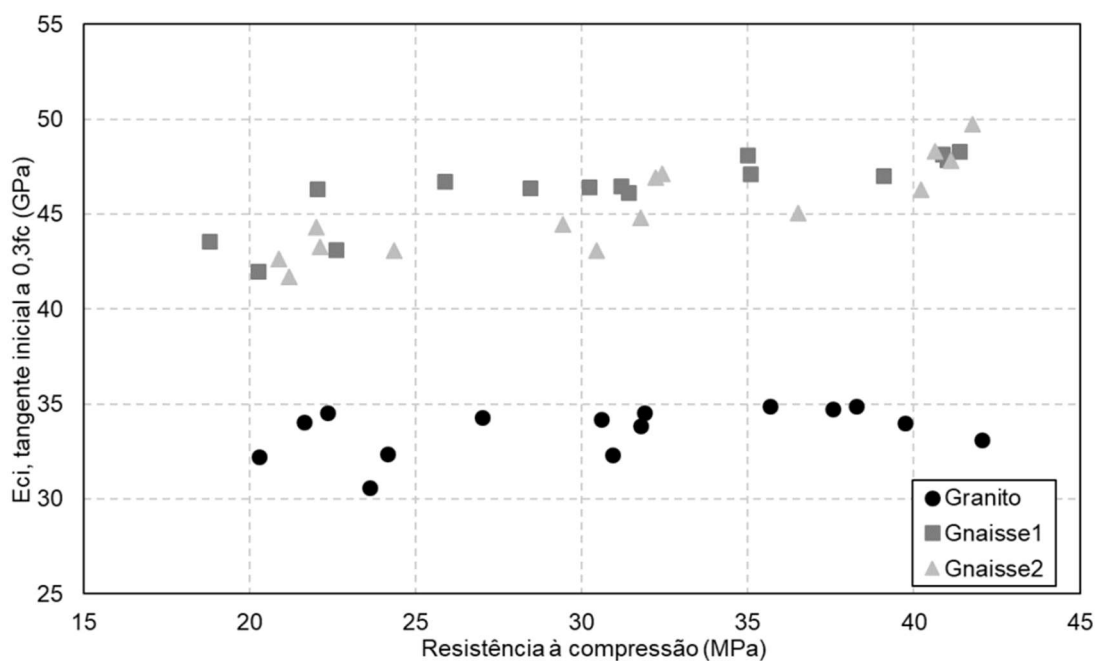


Fonte: Corrêa (2020)

Por conseguinte, analisando conjuntamente as nuvens de pontos formadas pelos resultados dos três trabalhos citados, sugere-se uma potencialidade da origem mineralógica do agregado miúdo influenciar acréscimos de módulo de elasticidade do concreto; isto teria passado despercebido pelas equações de previsão normatizadas em razão do foco indiscriminado destas na propriedade da resistência à compressão como principal influenciadora da rigidez do concreto.

A respeito disto, Vasconcellos (2018) também observou que os valores de módulo de elasticidade não atingiram os mesmos níveis de crescimento que a resistência à compressão. Este resultado pode ser verificado na Figura 16:

Figura 16: Módulo de elasticidade estáticos x Resistência à compressão – Resultados individuais por Vasconcellos (2018)



Fonte: Vasconcellos (2018)

Estas correlações entre módulo de elasticidade e resistência a compressão representaram uma quebra de expectativa, uma vez que o parâmetro relação água/cimento apresentou variações pouco significativas nos resultados de módulo. Assim, o autor alertou para o fato de que o aumento indiscriminado da resistência à compressão não será, necessariamente, acompanhado de um aumento do módulo de elasticidade (VASCONCELLOS, 2018). E por fim, recomendou a realização de estudos a respeito da influência dos agregados miúdos nos resultados do módulo de elasticidade, que é o objetivo principal deste trabalho.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Com base no levantamento realizado na revisão bibliográfica, propõe-se um programa experimental que envolve ensaios de módulos de elasticidade estáticos em concretos e argamassas, com o objetivo principal de verificar a influência da origem mineralógica do agregado miúdo no resultado de rigidez do concreto, expresso por seu módulo de elasticidade.

3.1 Escopo da Pesquisa

Este trabalho se dividiu em duas fases procedimentais, sendo que ambas foram precedidas pela caracterização física dos agregados coletados. Em seguida, iniciou-se a realização de testes e ensaios, primeiramente, em argamassas e, posteriormente, em concretos. A partir dos resultados de cada uma destas etapas, serão apresentadas conclusões e objetivos propostos no início deste trabalho.

3.1.1 Caracterização dos Agregados Miúdos e Graúdos

Foram realizados ensaios preliminares para caracterização dos agregados, dentre eles: Ensaio para determinação da composição granulométrica e módulo de finura de agregados miúdos, conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003); ensaio para a determinação do teor de material pulverulento por lavagem dos agregados miúdos, conforme a NBR NM 46 (ABNT, 2003); e ensaio para determinação da massa específica dos agregados miúdos e graúdos, conforme normatizado pelas NBR NM 52 e 53 (ABNT, 2009).

3.1.2 Etapa 1: Argamassa

Inicialmente, foram realizados ensaios em argamassa para obtenção de uma primeira confirmação da influência do agregado miúdo nos resultados de módulo de elasticidade. Para este fim, foram confeccionados e moldados corpos de prova de argamassas a partir de traços iguais e trabalhabilidades semelhantes, diferindo apenas na substituição volumétrica dos agregados miúdos empregados. Além disto, também foi avaliada a influência da composição granulométrica dos mesmos agregados nos ensaios de módulo de elasticidade das argamassas.

Para tanto, um primeiro lote de agregados miúdos foi coletado para fins de comparação. Ele foi composto de uma areia de britagem alta massa específica (calcário compacto) e outra areia de britagem baixa massa específica (granito). Estes agregados foram selecionados em função de resultados experimentais em campo, obtidas por concreteiras na região do Vale do Itajaí. Após a realização da caracterização física dos agregados miúdos, foram confeccionadas quatro argamassas a partir de um mesmo traço: duas delas continham areias de britagem com suas curvas granulométricas inalteradas, enquanto as outras duas foram confeccionadas após os dois agregados miúdos passarem por um processo de regularização de suas granulometrias.

Após 14 dias, estes corpos de prova foram ensaiados quanto à resistência a compressão e módulo de elasticidade. Estes testes foram realizados para verificar a influência da origem mineralógica no resultado do módulo de elasticidade da argamassa e a necessidade ou não da regularização das curvas granulométricas para a etapa de ensaios em concreto. A seguir será realizada uma descrição minuciosa do procedimento adotado para a confecção destas argamassas e, posteriormente, da realização dos ensaios em estado fresco e endurecido nas mesmas:

- a) **Ensaio em estado fresco de argamassa:** verificação da consistência por *flow table test*, conforme NBR 13276 (ABNT, 2016); e verificação da massa específica da argamassa em estado fresco, conforme a NBR 13278 (ABNT, 2005)

As argamassas foram confeccionadas em uma argamassadeira de movimento planetário modelo I-3010 de marca Contenco com capacidade de 5 litros. Elas continham inicialmente um traço em massa de 1:2,5:0,35 (cimento:areia de granito:água) com uma substituição volumétrica na mudança o agregado miúdo calcário. Apresentam-se a seguir os passos adotados na confecção das argamassas:

- 1º Minuto: Mistura seca do agregado miúdo e cimento;
- 2º Minuto: Adição da água à mistura;
- Interrupção para remistura manual;

- 3º Minuto até obtenção de uma argamassa coesa e trabalhável: Adição do aditivo superplastificante;
 - Realização da medida do índice de consistência visando o resultado de 250 ± 50 mm;
 - Verificação da massa específica da argamassa, conforme a NBR 13278:2015;
 - Moldagem de oito corpos de prova cilíndricos de dimensões 50x100mm;
 - A desmoldagem foi realizada após 3 dias e a cura dos CP's foi realizada ao ar;
 - Após 14 dias, os corpos de prova foram capeados em enxofre para regularização das suas faces para serem ensaiados no seu estado endurecido.
- b) **Ensaios em estado endurecido de argamassa:** o ensaio de resistência à compressão foi conforme a NBR 7215 (ABNT, 2019) e o ensaio de módulo estático pelo método tangente inicial a $0,3 \cdot f_c$, também foi adaptado conforme a NBR 8522 (ABNT, 2017). Os medidores de deformação utilizados foram os *clip gages*, conforme Figura 17:

Figura 17: Exemplo de ensaio de Módulo de Elasticidade com medidores *clip gages* em corpo de prova de argamassa



Fonte: Autor (2020)

Após a obtenção dos resultados, os mesmos passaram por um tratamento e análise estatística conforme preconiza a NBR 8522:2017. Para tanto, a dispersão máxima entre um resultado individual e a média dos resultados de módulo de elasticidade não deve ser superior a cinco por cento. Diante disto, a média dos resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade estático devem ser constituídos, respectivamente, de no mínimo, cinco e três resultados individuais válidos.

3.1.3 Etapa 2: Concreto

A fim de realizar esta etapa de ensaios em concretos, alguns parâmetros foram inicialmente estabelecidos para delimitação da pesquisa. Estes esclarecerão quais foram os materiais utilizados e questões relativas à confecção dos concretos estudados, quais sejam:

- Dosagens idênticas em volume dos agregados miúdos de diferentes massas específicas (substituição volumétrica dos agregados miúdos, mantendo-se fixo os demais materiais constituintes);
- Agregados: Foram escolhidos dois agregados miúdos para serem testados: um granito de baixa massa específica e um calcário compacto de alta massa específica. Quanto aos agregados graúdos, foram utilizados uma brita 1 de origem granítica e uma brita 1 de gnaise, possuindo, respectivamente, baixo e alto módulos de elasticidade. Todas as amostras de agregados foram retiradas de um único lote;
- A influência no módulo de elasticidade de concretos pelos agregados graúdos mencionados, já são de conhecimento do mercado produtor de concreto (usinas da região do Vale do Itajaí), que já fizeram uma série de testes para alguns dos prédios altos de Balneário Camboriú (testes com agregados graúdos).
- Composição do Agregado Miúdo: Composição de 100% da areia britagem de granito ou calcário;
- Teor de argamassa: Cada uma das combinações entre agregados miúdos e graúdos foram testada em dois teores de argamassas

distintos - um teor ideal mínimo e outro dez por cento mais argamassado; sendo que para cada brita foram definidos teores distintos em função da influência da circularidade e rugosidade das mesmas na consistência do concreto;

- Proporção de Agregados e relação água/cimento: Para cada um dos teores de argamassas definidos foram confeccionados concretos em três diferentes proporções, 1:3,5:0,35, 1:5,0:0,5 e 1:6,5:0,65, gerando curvas de dosagem para uma posterior análise de resultados;
- Tipo de cimento: utilização do cimento do tipo CP II-F, classe 40, à granel;
- Aditivo químico: Superplastificante para ajuste da consistência;
- Consistência do concreto no estado fresco: 120 ± 30 mm;
- Idade do ensaio: 28 dias;
- Dimensão do corpo de prova: foram empregados corpos de prova cilíndricos de 100x200mm;
- Tipo de cura: cura úmida por imersão em tanque de água saturada com cal até a idade do ensaio.

Com a finalidade de facilitar a verificação da influência dos agregado miúdo no módulo de elasticidade do concreto, escolheu-se por dois agregados com valores de massa específica bem distintas: granito e um calcário denso.

Além disso, os teores de argamassas ideais para cada brita foram definidos em um teste prévio a partir do traço 1,0:5,0:0,5 de duas combinações: Brita 1 de gnaiss e areia de calcário e Brita 1 de granito e areia de calcário. A partir destas ficou definido que o teor de argamassa ideal dos concretos com **brita 1 de origem gnaissica** seria **51%**, enquanto que o teor de argamassa ideal para concretos com **brita 1 de origem granítica** seria **48%**.

A partir disto, montou-se as combinações entre agregados miúdos e graúdos, conforme apresentado na Tabela 12:

Tabela 12: Representação esquemática do programa experimental proposto

Combinação 1: B1 gnaisse e areia de calcário	Combinação 2: B1 gnaisse e areia de granito	Combinação 3: B1 granito e areia de calcário	Combinação 4: B1 granito e areia de granito

Fonte: Autor (2020)

A ideia desse programa experimental foi de tornar possível a comparação de resultados de módulo de elasticidade entre:

- Concretos produzidos a partir traços e teor de argamassa iguais, diferindo apenas quanto ao agregado miúdo.
- Concretos com mesmos componentes constituintes e diferentes teores de argamassa;
- Concretos produzidos a partir de agregados graúdos de diferentes níveis de módulo de elasticidade e mesmos agregados miúdos.

Importante ressaltar que para atingir o índice de consistência definido como ideal no momento da confecção dos concretos, o teor de aditivo e a relação água/cimento variaram levemente dos traços inicialmente propostos. Por isso a ideia de se confeccionar curvas de dosagem. Esse fato foi motivado por conta dos testes em argamassa, onde percebeu-se que para uma mesma a/c, dependendo do agregado miúdo empregado, ocorreriam variações de resistência à compressão das misturas.

Durante a confecção dos concretos foram realizados os seguintes ensaios em estado fresco: verificação da consistência por *slump test*, conforme NBR NM 67 (ABNT, 1998); e moldagem e acondicionamento dos corpos de prova em cura úmida de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2008).

Logo, serão realizadas vinte e quatro rodadas de moldagem com diferentes combinações de agregados e teores de argamassa, contabilizando 144 (cento e quarenta e quatro) corpos de prova moldados até o final do experimento.

Aos 28 dias de moldagem, os seis corpos de prova de cada traço foram retirados do tanque de cura, e logo em seguida foram ensaiados úmidos quanto à:

- Resistência à compressão: foram rompidos dois corpos de prova de cada mistura, conforme a NBR 5739 (ABNT, 2014), para a obtenção do $0,3 \cdot f_c$, de acordo com o que preconiza a NBR 8522 (ABNT, 2017).
- Módulo de Elascidade Estático: Foi realizado o ensaio de módulo de elasticidade estático pelo método tangente inicial com a tensão fixa ao $0,3 \cdot f_c$ obtida pelo valor potencial de resistência à compressão. O tipo de medidores utilizados foram os *clip gages* uma vez que segundo a revisão bibliográfica apresentam menores dispersões de resultados.

Ao final da confecção das curvas propostas foram produzidos dois concretos extras repetindo um dos traços, diferindo apenas na composição do agregado miúdo: 40% de areia de britagem e 60% de areia natural quartzosa. Estes foram realizados para verificar se a influência da areia de britagem no módulo de elasticidade se mantêm mesmo quando presente em menores proporções (mistura com alguma areia natural para melhoria da trabalhabilidade do concreto, comumente empregado no mercado).

3.2 Materiais Empregados

Neste tópico serão descritos os insumos empregados neste trabalho através dos seus dados técnicos obtidos do fabricante ou de ensaios de caracterização realizados em laboratório. Importante ressaltar que as duas etapas de ensaios utilizaram dois lotes de agregados distintos, conforme detalhado a seguir.

3.2.1 Etapa 1: Argamassa

a) Cimento Portland

O cimento utilizado na Etapa 1 foi um cimento *Portland* ensacado do tipo CP IV-RS-32. As características físicas, químicas e mecânicas informadas pelo fabricante do cimento são apresentadas na Tabela 13:

Tabela 13: Caracterização do cimento CP-IV-RS-32 Ensacado

Caracterização	Ensaio	Unidade	Quantidade	Norma
Física	Massa específica	g/cm ³	2,86	NBR 16372
	Área específica Blaine	cm ² /g	N/A	NBR 16372
	Resíduo #200	%	0,39	NBR11579
	Resíduo #325	%	2,52	NBR 11579
	Tempo de Pega	Início (min)		256
Fim (min)			316	NM 65
Mecânica	Resistência à Compressão	1d (MPa)	11,2	NBR 7215
		3d (MPa)	21,9	NBR 7215
		7d (MPa)	27,5	NBR 7215
		28d (MPa)	37,3	NBR 7215
Química	Perda ao fogo	%	2,77	NM 14
	Resíduo insolúvel	%	N/A	NM 14
	MgO	%	5,19	NM 14
	SO ₃	%	1,68	NM 14

Fonte: Laudo Técnico de Ago/2020 da Supremo Cimentos

b) Agregados miúdos

Nesta etapa foram coletadas quantidades menores de agregados, em função da necessidade de uma menor demanda de volume pela confecção de corpos de prova 50x100mm. A areia de britagem de origem calcária (alto módulo de elasticidade) é proveniente de Botuverá/SC. Já a areia de britagem de origem granítica (baixo módulo de elasticidade) provêm de uma pedreira de Tijucas/SC. A Tabela 14 e a Figura 29 (APÊNDICE A) apresentam, respectivamente, os valores

obtidos na caracterização física e as curvas granulométricas das areias de britagem empregadas nesta primeira etapa do trabalho.

Tabela 14: Caracterização física dos agregados miúdos utilizados

Materiais	Massa Específica	Módulo de Finura
Areia de Britagem Granítica	2,628 g/cm ³	3,05
Areia de Britagem Calcária	2,751 g/cm ³	2,84

Fonte: Autor

Além destas granulometrias, realizou-se a regularização entre ambas curvas a fim de comparar os resultados de módulo de elasticidade obtidos entre argamassas com agregados com granulometrias originais e com agregados de granulometrias iguais. O resultado desta regularização pode ser visualizada na Figura 30 apresentado nos APÊNDICE A deste trabalho.

c) Água

A água utilizada na confecção de todas as argamassas foi proveniente da rede de abastecimento pública disponível no Laboratório de Solos e Tecnologia dos Materiais do DACC/IFSC, fornecida pela Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN).

d) Aditivo Químico

Nesta etapa de testes em argamassa, foi utilizado um aditivo superplastificante para ajuste da consistência. Conforme especificações técnicas apresentadas pela própria fabricante, o produto possui massa específica de $1,04 \pm 0,02$ g/cm³.

3.2.2 Etapa 2: Concreto

a) Cimento Portland

O cimento utilizado na Etapa 2 foi um cimento *Portland* composto do tipo CP II-F-40, à granel. Todo material necessário ao programa experimental foi retirado de um único lote para que este não gerasse novo parâmetro de influência aos resultados dos ensaios. Na Tabela 15 são apresentadas as características físicas, químicas e mecânicas informadas pela fabricante do cimento:

Tabela 15: Caracterização do cimento CP-II-F-40 Granel

Caracterização	Ensaio	Unidade	Quantidade	Norma
Física	Massa específica	g/cm ³	3,11	NBR 16372
	Área específica Blaine	cm ² /g	4593	NBR 16372
	Resíduo #200	%	0	NBR11579
	Resíduo #325	%	1,04	NBR 11579
	Tempo de Pega	Início (min)		248
Fim (min)			312	NM 65
Mecânica	Resistência à Compressão	1d (MPa)	22,9	NBR 7215
		3d (MPa)	36,1	NBR 7215
		7d (MPa)	41,3	NBR 7215
		28d (MPa)	47,8	NBR 7215
Química	Perda ao fogo	%	5,8	NM 14
	Resíduo insolúvel	%	2,3	NM 14
	MgO	%	5,7	NM 14
	SO ₃	%	2,4	NM 14

Fonte: Laudo Técnico de Ago/2020 da Supremo Cimentos

b) Agregados miúdos

Para os ensaios em concreto foram coletados novo lote dos mesmos agregados miúdos da etapa anterior. Enquanto as Figuras 18a) e 18b) ilustram os agregados miúdos utilizados, a Tabela 16 a seguir e a Figura 31 no APÊNDICE A, apresentam, respectivamente, os valores obtidos na caracterização física e as curvas granulométricas das areias de britagem empregadas na segunda etapa deste trabalho.

Figura 18: Agregado Miúdo - a) Granito; b) Calcário



Fontes: Autor (2020)

Tabela 16: Caracterização física dos agregados miúdos utilizados

Materiais	Massa Específica	Módulo de Finura	Pulverulento (%)
Areia de Britagem Granítica	2,601 g/cm ³	2,80	12,33
Areia de Britagem Calcária	2,768 g/cm ³	3,29	11,36

Fonte: Autor (2020)

Por fim, a areia natural quartzosa de Garopaba/SC que foi utilizada para testar uma composição de agregados miúdos ao final do programa experimental, tem a sua

caracterização física e curva granulométricas apresentadas, respectivamente, na Tabela 31 e Figura 32, localizada no APÊNDICE A deste trabalho.

c) Agregados Graúdos

Foram utilizados dois agregados graúdos distintos: um de origem granítica de baixo módulo de elasticidade, produzido em Tijucas/SC e um segundo de origem gnáissica de alto módulo de elasticidade produzido na região de Penha/SC. Para efeitos de limitação de variabilidade de ensaio, todo o material foi coletado em apenas um lote. As figuras 19a) e 19b) ilustram os agregados graúdos coletados para uso nesta etapa do trabalho.

Os agregados graúdos adotados apresentaram-se na zona granulométrica 9,5/25 (ABNT NBR 7211:2009), usualmente conhecida como brita 1. Assim como os agregados miúdos, as britas passaram por análise de composição granulométrica, módulo de finura e massa específica aparente com resultados apresentados na Tabela 17 e Figura 33, localizada no APÊNDICE A deste trabalho:

Figura 19: a) Agregado Graúdo de granito; b) Agregado Graúdo de gnaisse



Fontes: Autor (2020)

Tabela 17: Caracterização física dos agregados miúdos utilizados

Materiais	Massa Específica	Módulo de Finura
Brita 1 Granítica	2,629 g/cm ³	7,03
Brita 1 Gnáissica	2,891 g/cm ³	7,01

Fonte: Autor

d) Água

A água utilizada na confecção de todos os concretos foi proveniente da rede de abastecimento pública fornecida pela SAMAE Palhoça.

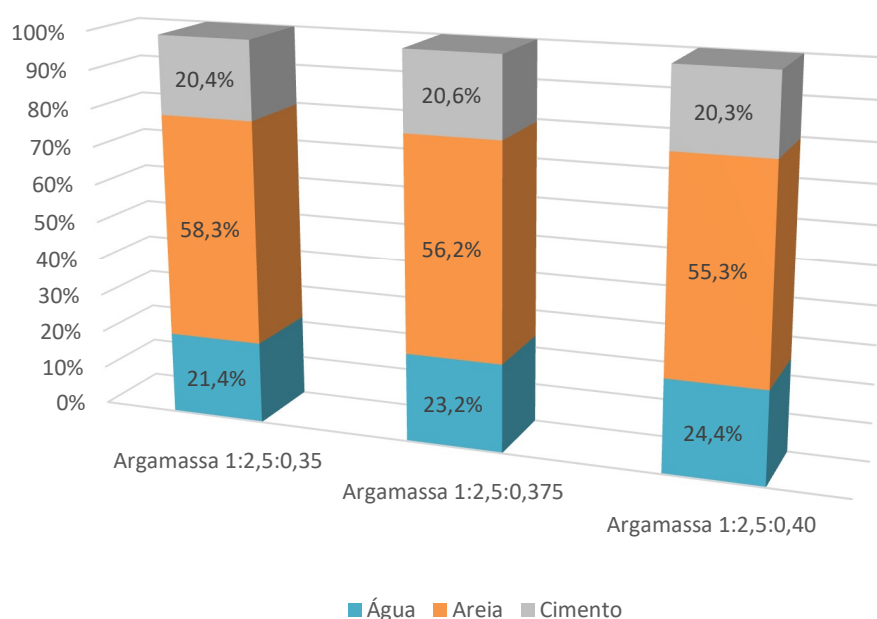
e) Aditivo

Para realizar o ajuste da consistência dos concretos confeccionados nesta etapa foi utilizado um aditivo superplastificante. Este aditivo químico possui em sua composição éter carboxílico e teve a sua dosagem limitada entre 0,2 e 0,4 por cento ao peso do cimento.

3.3 Proporcionalamento dos Traços

Conforme já tratado anteriormente, as dosagens das argamassas e concretos com diferentes agregados miúdos foram calculadas para serem volumetricamente equivalentes entre si. No caso das argamassas, todas foram inicialmente confeccionadas com o proporcionalamento volumétrico apresentado na coluna da Argamassa 1:2,5:0,35 da Figura 20. Outros dois proporcionalamentos ainda foram executados em função da ocorrência de resultados de resistência muito elevados nas argamassas com agregado miúdo calcário. Todas as frações unitárias, em massa, dos traços de argamassa também podem ser observadas na Tabela 18. O intuito dessa fase do trabalho, foi verificar a necessidade de uniformização das curvas granulométricas, verificando se estas exercem influência nos resultados de módulo de deformação.

Figura 20: Proporcionalamento Volumétrico dos traços confeccionados em Argamassa
Proporcionalamento Volumétrico dos Traços em Argamassa



Fonte: Autor (2020)

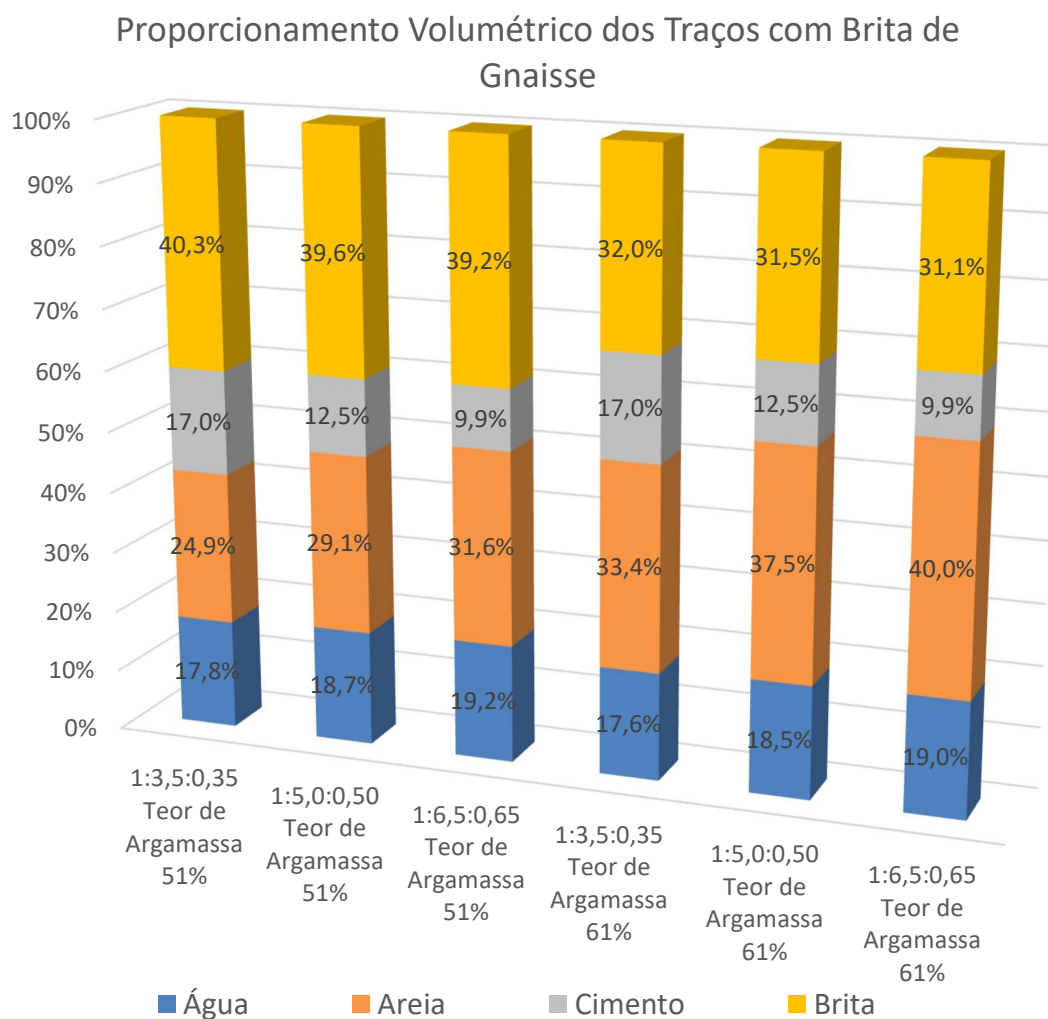
Tabela 18: Frações Unitárias, em massa, dos materiais empregados nas argamassas

Argamassa	Cimento (kg)	Água (kg)	Agregado Miúdo: Curva Granulométrica Natural (kg)		Agregado Miúdo: Curva Granulométrica Composta (kg)		Aditivo Superplast. (%)
			Areia Calcário	Areia Granito	Areia Calcário	Areia Granito	
1	1,00	0,35	-	2,50	-	-	1,23
2	1,00	0,35	-	-	-	2,50	2,49
3	1,00	0,35	2,62	-	-	-	1,01
4	1,00	0,35	-	-	2,62	-	1,83
5	1,00	0,375	2,62	-	-	-	0,81
6	1,00	0,40	2,62	-	-	-	0,57

Fonte: Autor (2020)

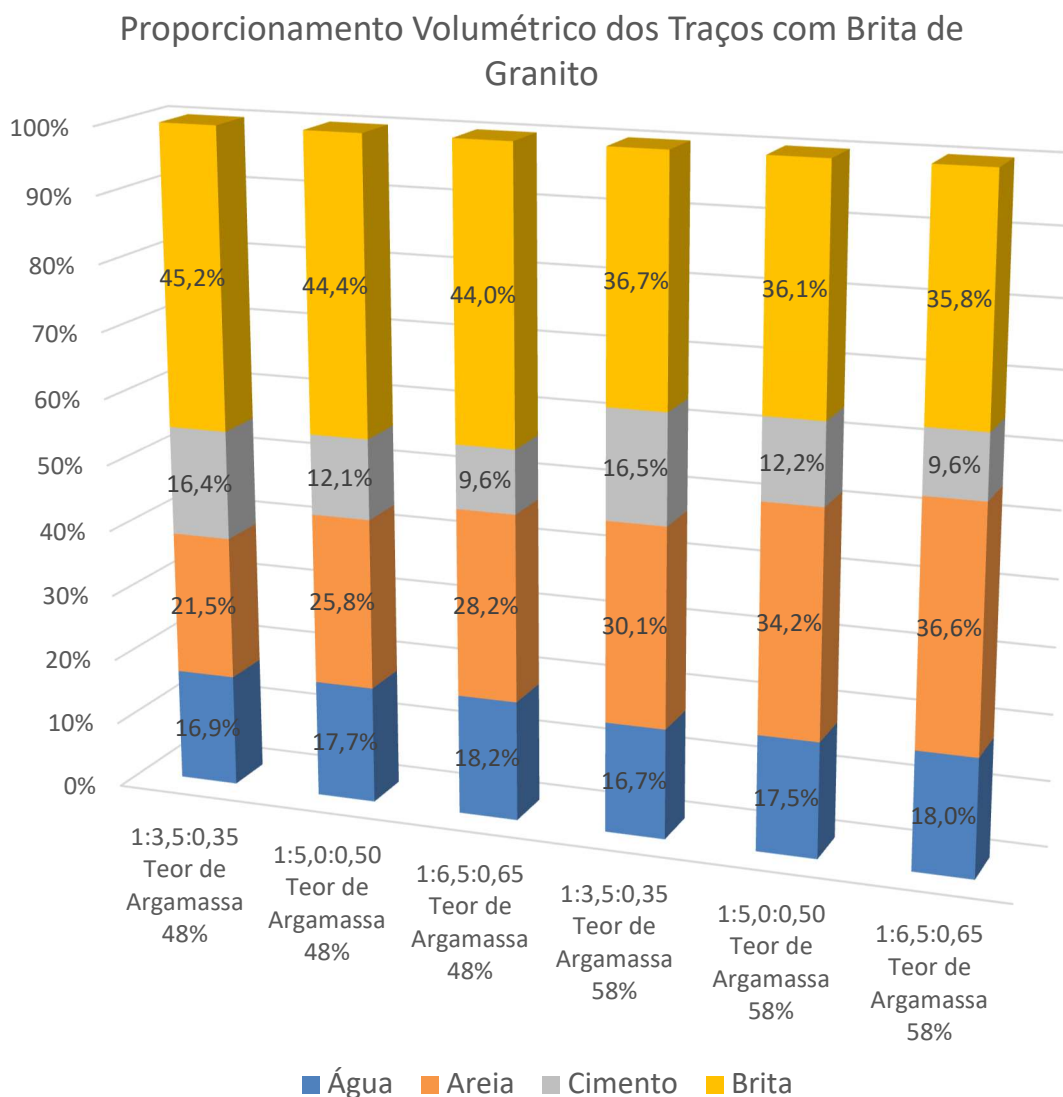
Em seguida, as Figura 21 e 22 apresentam o proporcionamento volumétrico dos diferentes traços confeccionados em concreto.

Figura 21: Proporcionamento Volumétrico dos traços confeccionados com brita de Gnaiss



Fonte: Autor (2020)

Figura 22: Proporcionamento Volumétrico dos traços confeccionados com brita de Granito



Fonte: Autor (2020)

A partir disto, consegue-se visualizar que para cada traço, há dois concretos rodados com agregados miúdos distintos, contendo exatamente a mesma fração volumétrica entre seus componentes. Dessa forma, os ensaios posteriores permitiram a visualização da influência dos agregados miúdos nos resultados de módulo de elasticidade a partir da construção de curvas de dosagem.

Por fim, segue a Tabela 19, com os traços unitários, em massa, relativos a cada concreto produzido e estudado. Esta também inclui a relação água/cimento final, os percentuais de aditivo superplastificante, uma vez que ambos variaram levemente para obtenção da faixa de consistência especificada – 120 ± 30 mm – e a apresentação do índice de abatimento que foi efetivamente obtido nos ensaios em estado fresco.

Tabela 19: Frações Unitárias, em massa, dos materiais empregados nos concretos

Concreto	α (%)	m	Cimento (kg)	Água (kg)	Agregado Miúdo (kg)			Agregado Graúdo (kg)		Aditivo (%)	Slump (cm)
					Areia Calcário	Areia Nat. Quartzosa	Areia Granito	B1 Gnaisse	B1 Granito		
1	51	3,5	1,00	0,40	1,31	-	-	2,21	-	0,3	10,0
2	51	5,0	1,00	0,50	2,09	-	-	2,94	-	0,2	10,5
3	51	6,5	1,00	0,65	2,86	-	-	3,67	-	0,2	13,0
4	61	3,5	1,00	0,37	1,77	-	-	1,75	-	0,3	10,0
5	61	5,0	1,00	0,53	2,70	-	-	2,34	-	0,2	12,0
6	61	6,5	1,00	0,65	3,63	-	-	2,92	-	0,2	10,0
7	51	3,5	1,00	0,40	-	-	1,23	2,21	-	0,3	10,0
8	51	5,0	1,00	0,53	-	-	1,95	2,94	-	0,3	10,0
9	51	6,5	1,00	0,65	-	-	2,68	3,67	-	0,2	13,0
10	61	3,5	1,00	0,40	-	-	1,65	1,75	-	0,3	10,0
11	61	5,0	1,00	0,53	-	-	2,52	2,34	-	0,3	13,0
12	61	6,5	1,00	0,66	-	-	3,39	2,92	-	0,2	10,0
13	48	3,5	1,00	0,38	1,18	-	-	-	2,34	0,3	11,0
14	48	5,0	1,00	0,49	1,91	-	-	-	3,12	0,2	10,5
15	48	6,5	1,00	0,66	2,64	-	-	-	3,90	0,2	12,0
16	58	3,5	1,00	0,37	1,63	-	-	-	1,89	0,3	10,5
17	58	5,0	1,00	0,50	2,51	-	-	-	2,52	0,2	10,0
18	58	6,5	1,00	0,65	3,40	-	-	-	3,15	0,2	11,0
19	48	3,5	1,00	0,36	-	-	1,10	-	2,34	0,3	10,0
20	48	5,0	1,00	0,48	-	-	1,78	-	3,12	0,4	11,0
21	48	6,5	1,00	0,67	-	-	2,46	-	3,90	0,4	11,0
22	58	3,5	1,00	0,40	-	-	1,52	-	1,89	0,3	10,0
23	58	5,0	1,00	0,52	-	-	2,35	-	2,52	0,2	10,0
24	58	6,5	1,00	0,64	-	-	3,17	-	3,15	0,2	10,0
25	58	6,5	1,00	0,69	1,35	2,16	-	-	3,14	0,3	10,0
26	58	6,5	1,00	0,71	-	2,16	1,26	-	3,14	0,3	10,0

Fonte: Autor (2020)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nos estados frescos e endurecidos das argamassas e concretos confeccionados no decorrer do programa experimental descrito. Inicialmente serão abordados os resultados obtidos na Etapa 1 na qual foram confeccionadas e ensaiadas argamassas e, posteriormente, serão apresentados os dados obtidos através dos ensaios realizados na Etapa 2 em concretos.

4.1 Etapa 1: Ensaios em Argamassa

Neste item, serão apresentados os resultados dos ensaios em argamassa em estado fresco, sendo seguidos pelos resultados dos ensaios em estado endurecido.

4.1.1 Argamassa no Estado Fresco

No momento da confecção das argamassas foram determinados o índice de consistência e a massa específica a fim de caracterizar o estado fresco. Estes estão compilados na Tabela 20:

Tabela 20: Resultados dos Ensaios em Estado Fresco das Argamassas

Argamassa	Tipo de Agregado Miúdo	Tipo de Granulometria	a/c	Aditivo (%)	Flow Table (mm)	Massa Específica (g/cm ³)
1	Areia Granito	Granulometria <i>in Natura</i> *	0,35	1,23	205,0	2,297
2	Areia Granito	Granulometria Ajustada**	0,35	2,49	210,0	2,272
3	Areia Calcário	Granulometria <i>in Natura</i>	0,35	1,01	295,0	2,390
4	Areia Calcário	Granulometria Ajustada	0,35	1,83	290,0	2,385
5	Areia Calcário	Granulometria <i>in Natura</i>	0,375	0,81	300,0	2,374
6	Areia Calcário	Granulometria <i>in Natura</i>	0,40	0,57	300,0	2,376

*Granulometria *in natura*: curvas granulométricas sem alteração; **Granulometria ajustada: curvas granulométricas das areias de granito e calcário que passaram por uniformização.

Fonte: Autor (2020)

Percebe-se que os resultados de consistência estão dentro do intervalo definido na metodologia para o ensaio. No entanto, é visível a diferença entre as consistências obtidas entre as argamassas de diferentes agregados miúdos. Tal resultado pode ser

visualizado na Figura 34 apresentada no APÊNDICE B deste trabalho em conjunto os teores de aditivo superplastificantes utilizados em cada argamassa.

Constata-se que as argamassas que tiveram as granulometrias de seus agregados finos uniformizadas, necessitaram um maior teor de aditivo para a obtenção da mesma consistência das demais. Isto porque partículas de diferentes tamanhos tendem a melhorar o “empacotamento da mistura”, além da maior presença de materiais finos nas argamassas uniformizadas (aumento da área superficial).

4.1.2 Argamassa no Estado Endurecido

Após 14 dias de cura, os corpos de prova foram capeados com enxofre a fim de terem suas faces regularizadas; em seguida, dois de cada conjunto foram ensaiados para determinação da resistência à compressão. A partir do resultado potencial de cada conjunto, calculou-se o $0,3 \cdot f_c$ para dar prosseguimento ao ensaio de módulo de elasticidade estático com os demais corpos de prova, conforme NBR 8522:2017.

A Tabela 21 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade estático para as argamassas estudadas, junto com as respectivas médias, valores potenciais e desvios padrões calculados.

Tabela 21: Resultados de Resistência à Compressão e Módulo de Elasticidade das argamassas

Argamassa contendo:	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)										
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	Valor Potencial	Média	Desvio Padrão
Granito Granulo. <i>In Natura</i> a/c 0,35	52,95	55,05	60,03	59,72	64,38	60,51	64,36**	59,30	64,38	60,79	2,06
Granito Granulo. Ajustada a/c 0,35	53,43	58,46	60,69	61,47	60,03	60,80	63,52	63,02	63,52	61,59	1,39
Calcário Granulo. <i>In Natura</i> a/c 0,35	68,60	64,55	67,26	64,42	71,91	73,51	70,19	62,23	73,51	68,25	4,40
Calcário Granulo. Ajustada a/c 0,35	26,56*	63,81	66,61	61,35	57,34	70,65	67,98	72,77	72,77	66,12	5,80

Argamassa contendo:	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)										
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	Valor Potencial	Média	Desvio Padrão
Granito Granulo. <i>In Natura</i> a/c 0,35	-	-	23,40	26,10	23,90	24,40	28,40*	23,90	26,10	24,34	1,05
Granito Granulo. Ajustada a/c 0,35	-	-	24,80	23,70	24,20	24,90	25,00	24,50	25,00	24,52	0,50
Calcário Granulo. <i>In Natura</i> a/c 0,35	-	-	32,80	30,70	33,60	30,50	31,80	32,20	33,60	31,93	1,20
Calcário Granulo. Ajustada a/c 0,35	-	-	31,80	32,60	31,70	31,20	33,10	33,10	33,10	32,25	0,80

*Valores descartados por não estarem dentro das margens estatísticas.

** Valores descartados por seus resultados em módulo de elasticidade estarem fora das margens estatísticas.

Fonte: Autor (2020)

A partir destes resultados já se verifica uma tendência inicial da influência da origem mineralógica do agregado miúdo no resultado do módulo de elasticidade. Além disso, percebe-se que houve uma convergência de resultados entre argamassas com agregados miúdos de mesma origem mineralógica com curvas granulométricas originais e regularizadas. Para verificar se houve dissonância estatística entre estes resultados foi realizado uma comparação múltipla de média com grau de confiabilidade de 95%. Com esta, foi possível a realização de testes de hipótese que compararam os resultados de módulo de elasticidade entre os dois grupos de argamassas para verificar a existência ou não de uma diferença significativa entre os resultados. O produto desta análise estatística pode ser verificado na Tabela 22.

Tabela 22: Comparação Múltipla de Médias de argamassas de curvas granulom. naturais e uniformes

Grupo de Argamassa	Comparação Múltipla de Médias: Módulo de Deformação				
	Módulo de Elasticidade Médio (Gpa)	Desvio Padrão	F calculado	F α (k-1, N-k)	Significância
Granito Granulom. Natural	24,34	1,05	0,14	F _{0,05} (1,9) = 5,12	Não
Granito Granulom. Uniforme	24,52	0,50			
Calcário Granulom. Natural	31,93	1,20	0,29	F _{0,05} (1,10) = 4,96	Não
Calcário Granulom. Uniforme	32,25	0,80			

Legenda: Fcalculado (razão entre Média Quadrática de Grupos (MQG) e Média Quadrática de Resíduos (MQR)); F α (distribuição F com valores tabelados); Significância (se Fcalculado > F tabelado existe diferença significativa entre os grupos). Grau de Confiabilidade de 95%.

Fonte: Autor (2020)

Com estes dados conclui-se que a granulometria dos agregados miúdos não influenciou significativamente os resultados de módulo de elasticidade das argamassas testadas. Portanto, a partir deste momento, as argamassas e concretos confeccionados não tiveram as suas curvas granulométricas regularizadas.

Em seguida, outras duas argamassas com agregados miúdos de calcário foram confeccionadas, com relações água/cimento de 0,375 e 0,40. Isto foi feito com a finalidade de obtenção de resultados na mesma classe de resistência à compressão da argamassa moldada com agregado miúdo de granito. Os resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade destas argamassas podem ser comparados pela observação dos dados da Tabela 23.

Tabela 23: Resultados das argamassas em estado endurecido para fins de compatibilização de Resistência à Compressão

Argamassa contendo:	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)										
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	Cp8	Valor Potencial	Média	Desvio Padrão
Granito Granulo. In Natura a/c 0,35	52,95	55,05	60,03	59,72	64,38	60,51	64,36**	59,30	64,38	60,79	2,06
Calcário Granulo. In Natura a/c 0,35	68,60	64,55	67,26	64,42	71,91	73,51	70,19	62,23	73,51	68,25	4,40
Calcário Granulo. In Natura a/c 0,40	51,52	48,47	56,96	56,90	52,55	56,97	55,36	51,35	56,97	55,02	2,48
Calcário Granulo. In Natura a/c 0,375	63,50	62,40	59,40	64,20	60,39	59,04	66,66	62,50**	66,66	61,94	3,34

Argamassa contendo:	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)										
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	Valor Potencial	Média	Desvio Padrão
Granito Granulo. In Natura a/c 0,35	-	-	23,40	26,10	23,90	24,40	28,40*	23,90	26,10	24,34	1,05
Calcário Granulo. In Natura a/c 0,35	-	-	32,80	30,70	33,60	30,50	31,80	32,20	33,60	31,93	1,20
Calcário Granulo. In Natura a/c 0,40	-	-	29,80	28,10	29,80	29,70	29,70	31,40	31,40	29,75	1,04
Calcário Granulo. In Natura a/c 0,375	-	-	30,10	30,30	30,20	30,00	29,60	35,50*	30,30	30,04	0,27

*Valores descartados por não estarem dentro das margens estatísticas.

** Valores descartados por seus resultados em módulo de elasticidade estarem fora das margens estatísticas.

Fonte: Autor (2020)

A partir destes resultados, percebe-se que a argamassa com agregado miúdo de calcário e relação a/c 0,375 obteve resultados de resistência à compressão compatíveis com aqueles da argamassa com agregado de granito – uma diferença de apenas de 1,9% entre a média de ambas. Logo, realizou-se mais uma vez comparação múltipla de médias, com grau de confiabilidade de 95% entre as médias de resistências à compressão e módulos de elasticidade destes dois conjuntos de valores. Este levantamento estatístico pode ser visualizado na Tabela 24:

Tabela 24: Comparação múltipla de médias de Resistência à Compressão e Módulo de Elasticidade entre argamassas com agregado miúdo de granito e calcário

Grupo de Argamassas	Comparação Múltipla de Médias: Resistência à Compressão				
	Resistência à Compressão Média (MPa)	Desvio Padrão	Fcalculado	F α (k-1, N-k)	Significância
Granito a/c 0,35	60,79	2,06	2,24	F0,05 (1,11) = 4,84	Não
Calcário a/c 0,375	61,94	3,34			

Grupo de Argamassas	Comparação Múltipla de Médias: Módulo de Deformação				
	Módulo de Elasticidade Média (GPa)	Desvio Padrão	Fcalculado	F α (k-1, N-k)	Significância
Granito a/c 0,35	24,34	1,05	139,3	F0,05 (1,8) = 5,32	Sim
Calcário a/c 0,375	30,04	0,27			

Legenda: Fcalculado (razão entre Média Quadrática de Grupos (MQG) e Média Quadrática de Resíduos (MQR)); F α (distribuição F com valores tabelados); Significância (se Fcalculado > Ftabelado existe diferença significativa entre os grupos). Grau de Confiabilidade de 95%.

Fonte: Autor (2020)

Assim, ficou demonstrado que não houve divergência significativa entre os resultados de resistência à compressão das duas argamassas em questão; ao mesmo tempo, verificou-se que os resultados de módulo de elasticidade apresentaram uma diferença estatística significativa de quase 20% entre os valores obtidos pelas argamassas com agregados miúdos de diferentes origens mineralógicas.

Logo, pode-se afirmar que a resistência à compressão e a tipologia mineralógica da areia são principais fatores influenciadores do módulo de elasticidade nas argamassas. Foram confeccionadas duas argamassas que, como observado na Tabela 24, convergiram estatisticamente quanto à resistência à compressão e divergiram quanto aos resultados de módulo de elasticidade. Logo, a origem mineralógica do agregado miúdo se tornou o principal influenciador do módulo de elasticidade nas argamassas.

Desta forma, estes resultados indicam uma influência significativa do módulo de elasticidade da areia nesta mesma propriedade do compósito argamassa. Portanto, na análise dos resultados da Etapa 2 deste trabalho buscar-se-á verificar se, em concretos, esta influência se mantém em razão da inclusão da brita.

4.2 Etapa 2: Ensaios em Concreto

A partir deste ponto, o trabalho o trabalho terá foco na apresentação dos resultados em estado fresco e estado endurecido dos concretos confeccionados nesta etapa. Importante salientar que em razão das conclusões obtidas através dos ensaios em argamassas, as curvas granulométricas dos agregados miúdos não foram uniformizadas para a confecção dos traços em concreto (uso do agregado miúdo *in natura*, sem alteração nas curvas granulométricas).

4.2.1 Concreto em Estado Fresco

Durante o estado fresco dos concretos confeccionados, foi realizado o ensaio do abatimento do tronco de cone, determinando a consistência do concreto. Os valores deste ensaio já foram apresentados na Tabela 19 e podem ser visualizados junto com o teor de aditivo plastificante aplicado na Figura 35 apresentada no APÊNDICE B deste trabalho.

4.2.2 Concreto em Estado Endurecido

Na Tabela 28 são apresentados os resultados de resistência à compressão média aos 28 dias, os resultados de módulo estático de elasticidade médios ($E_{ci,m}$) e seus respectivos valores de desvio padrão. Importante ressaltar que apenas valores de ensaio dentro das margens de tolerância definidas pela NBR 8522:2017 foram incluídos nos resultados apresentados na Tabela 25. A partir desta análise inicial serão realizadas alguns apontamentos que foram observados durante os ensaios que serão úteis na sequência para a análise dos dados obtidos.

Tabela 25: Resultados médios dos ensaios de Resistência à compressão e Módulo de Elasticidade Estático

Concreto	α (%)	m	Agregado Miúdo	Agregado Graúdo	Resistência à Compressão		Módulo de Elasticidade	
					$F_{c,m28}$ (MPa)	Desvio Padrão	$E_{ci,m}$ (GPa)	Desvio Padrão
1	51	3,5	Calcário	Gnaisse	56,81	2,38	40,83	1,77
2	51	5,0	Calcário	Gnaisse	44,31	3,33	38,07	0,80
3	51	6,5	Calcário	Gnaisse	34,98	3,44	34,97	1,66
4	61	3,5	Calcário	Gnaisse	60,55	2,18	41,37	1,75
5	61	5,0	Calcário	Gnaisse	46,56	1,20	37,70	2,02
6	61	6,5	Calcário	Gnaisse	38,01	0,58	35,50	1,15
7	51	3,5	Granito	Gnaisse	55,99	1,76	36,80	1,35
8	51	5,0	Granito	Gnaisse	44,55	0,62	35,57	0,65
9	51	6,5	Granito	Gnaisse	26,29	1,43	30,03	1,33
10	61	3,5	Granito	Gnaisse	56,66	1,67	33,57	1,16
11	61	5,0	Granito	Gnaisse	43,85	1,40	33,50	1,25
12	61	6,5	Granito	Gnaisse	42,17	1,00	35,03	0,80
13	48	3,5	Calcário	Granito	54,79	1,86	29,37	1,29
14	48	5,0	Calcário	Granito	45,10	0,76	27,93	1,34
15	48	6,5	Calcário	Granito	34,85	1,59	28,07	1,31
16	58	3,5	Calcário	Granito	57,01	1,37	31,18	1,16
17	58	5,0	Calcário	Granito	48,13	1,00	32,27	1,03
18	58	6,5	Calcário	Granito	36,79	0,89	29,00	0,28
19	48	3,5	Granito	Granito	54,93	1,37	29,00	1,25
20	48	5,0	Granito	Granito	46,83	2,47	27,63	0,70
21	48	6,5	Granito	Granito	32,08	1,29	25,93	1,82
22	58	3,5	Granito	Granito	57,57	2,77	30,33	0,32
23	58	5,0	Granito	Granito	47,93	0,99	28,37	1,04
24	58	6,5	Granito	Granito	39,59	0,88	28,00	1,56

Fonte: Autor (2020)

Realizando uma análise prévia dos resultados médios de módulo de elasticidade, já se observou a superioridade de todos os concretos confeccionados com areia de calcário sobre os seus respectivos pares que continham areia granítica.

De acordo com os proporcionamentos volumétricos dos traços apresentados nas Figuras 21 e 22, os consumos de cimento dos concretos ficaram confinados a três faixas: nos traços 1:3,5: de 506,2 a 527,7 kg/m³; nos traços 1:5: de 373,5 a 389,2kg/m³; e traços 1:6,5: de 297,5 a 308,4kg/m³. Como era esperado, estes valores de consumo de cimento se refletiram na formação de patamares de resistência à compressão, com exceção de alguns poucos resultados dissonantes.

As figuras 23a) e 23b) ilustram corpos de prova ensaiados e que apresentaram dispersões nos resultados de módulo de elasticidade entre seus pares; entre eles verifica-se a similaridade da existência de bolhas superficiais. Pode-se inferir, portanto, que apesar do cuidado do operador do ensaio em posicionar os *clip gages* em áreas menos afetadas no momento da preparação do ensaio, percebe-se que a superfície porosa de alguns corpos de prova pode ter afetado a medição de algumas leituras de deformação.

Figura 23 a) Corpo de prova com bolhas superficiais sendo ensaiado; b) Corpos de prova após ensaio com grande dispersão de módulo de elasticidade



Fontes: Autor (2020)

Em função destas dispersões entre os resultados de módulo de elasticidade, alguns extrapolaram a distância máxima de cinco por cento do valor médio e tiveram que ser descartados. E dentre todos os concretos confeccionados, houve uma combinação na qual se obteve apenas dois resultados válidos de acordo com a tolerância da NBR 8522:2017 (Concreto 18).

Todos os resultados individuais dos ensaio em estado endurecido podem ser visualizados nas Tabelas 32 e 33 localizadas no APÊNDICE C deste trabalho. Elas descrevem de forma completa os valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade estáticos obtidos e quais resultados foram excluídos da análise por não se enquadrarem na margem de tolerância da NBR 8522:2017.

Por fim, apesar da ocorrência dos incidentes anteriormente citados, optou-se pela análise dos dados por meio dos valores individuais válidos, ao invés da utilização de valores médios ou potenciais. Isto porque, para o tratamento estatístico, um maior conjunto amostral de dados comparados permite uma melhor avaliação da existência de diferenças significativas entre as linhas de tendência.

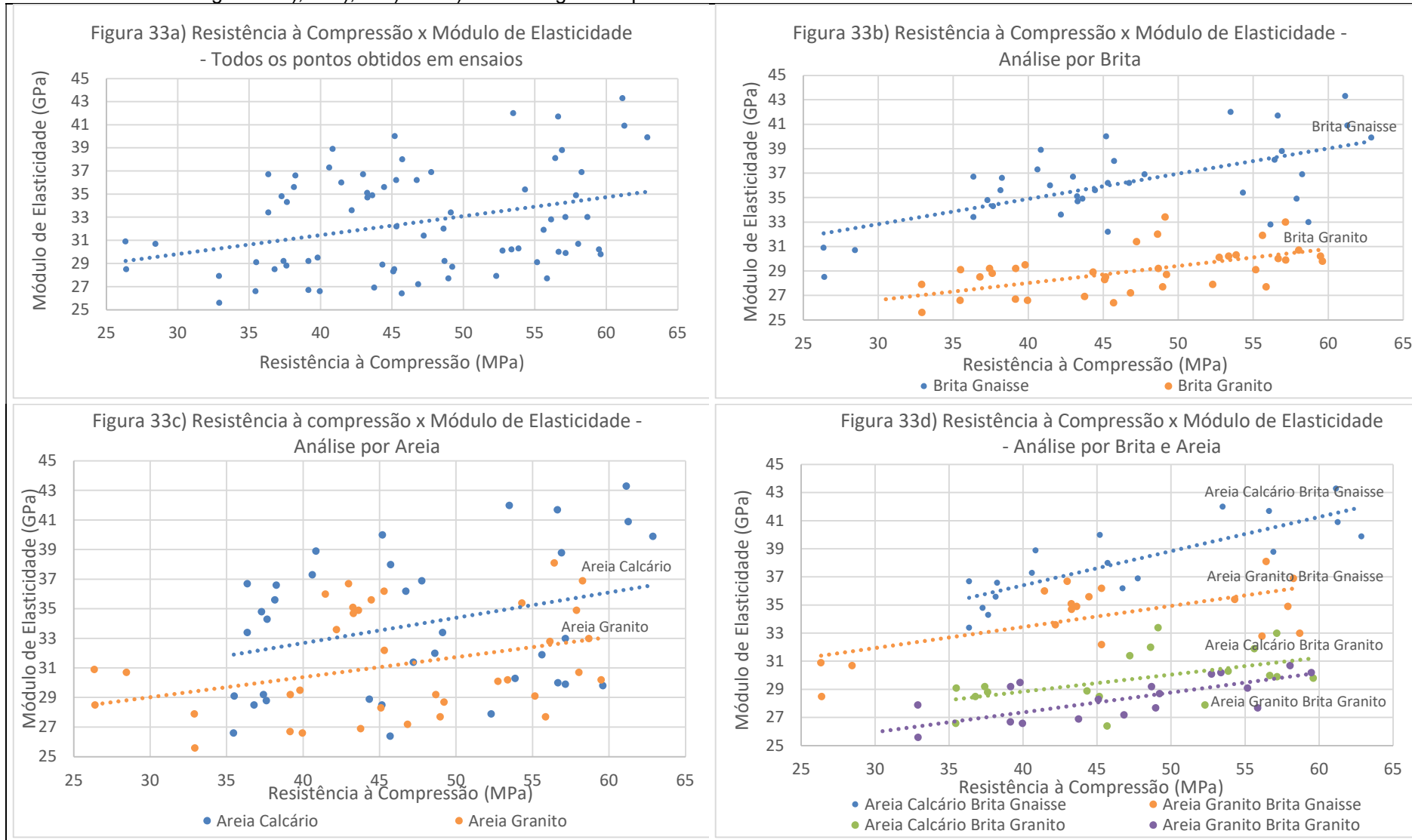
4.2.2.1 Análises gráfico-estatísticas iniciais dos resultados dos ensaios em concreto

Dessa forma, dar-se-á início a uma análise prévia dos dados obtidos nos ensaios de módulo de elasticidade estático. Nesta serão apresentados a totalidade dos resultados válidos, ou seja, todos os pontos formados por resistência à compressão e módulo de elasticidade, avaliados por meio de um filtro que permita melhor analisar os valores obtidos.

Iniciando a análise com a Figura 33a), trata-se da tentativa de definição de uma linha de tendência sobre todos os pontos obtidos nos ensaios, independentemente do tipo de brita, areia ou teor de argamassa. Como se percebe, esta análise gerou uma linha de tendência rica em dispersões. Isto porque este gráfico apresenta resultados de concretos com as mais diferentes características, pouco se aproximando, portanto, de uma linha de regressão ajustada. A partir dos gráficos seguintes, os resultados serão filtrados por um ou mais tipos de componentes do concreto a fim de tentar definir quais tendem a demonstrar maior influência no módulo de elasticidade do concreto.

Na Figura 33b) os resultados são apresentados de acordo com o tipo de brita que foi empregada. Já na Figura 33c), todos os resultados são organizados pelo tipo de areia empregada nos concretos, independentemente do tipo de brita ou teor de argamassa utilizado. Por fim, a Figura 33d) apresenta as linhas de tendência dos concretos de cada combinação entre areia e brita.

Figura 24a), 33b), 33c) e 33d): Análises gráficas prévias dos resultados obtidos nos ensaios em estado endurecido:



A partir de uma análise visual dos gráficos apresentados, consegue-se prever que, em função da Figura 33b) em conjunto da Figura 33d), a forte influência da origem mineralógica da brita nos resultados de módulo de elasticidade do concreto; além disto, demonstra-se de forma prévia, por meio das Figuras 33c) e 33d), uma influência do módulo de elasticidade da areia nos resultados de módulo de elasticidade do concreto.

A fim de demonstrar estatisticamente as referidas diferenças significativas ocorridas nestas análises prévias foram realizadas diversas comparações de funções lineares que serão apresentadas resumidamente na Tabela 26:

Tabela 26: Comparação de Funções Lineares das análises gráficas prévias apresentadas na Figura 33

Grupos de Dados Comparados	Comparação de Funções Lineares		
	F calculado	F α (a, b)	Significância
Figura 31b) Britas de Gnaiss e Brita de Granito	106,48	F _{0,05} (2,69) = 3,13	Sim
Figura 31c) Areias de Calcário e Areia de Granito	3,46	F _{0,05} (2,69) = 3,13	Sim
Figura 31d) Areia de Calcário + Brita de Gnaiss e Areia de Granito + Brita de Gnaiss	17,85	F _{0,05} (2,32) = 3,29	Sim
Figura 31d) Areia de Calcário + Brita de Granito e Areia de Granito + Brita de Granito	3,69	F _{0,05} (2,33) = 3,28	Sim

Obs: Significância: se $F_{\text{calculado}} > F_{\text{tabelado}}$ existe diferença significativa entre os grupos com grau de confiabilidade de 95%

Fonte: Autor (2020)

Como pode-se observar, todas as comparações de funções lineares realizadas apresentaram diferenças estatisticamente significativas. Dentre elas, vale destacar a comparação realizada na Figura 33c), na qual os resultados foram separados por areias. Mesmo apresentando resultados muito dispersos, em função do uso de diferentes britas e teores de argamassa, ficou demonstrada diferença estatisticamente significativa pela comparação de funções lineares.

Além disso, a confirmação da significância das funções lineares apresentadas na Figura 33d) já acusa a tendência que este trabalho objetiva demonstrar: que o módulo de elasticidade do agregado miúdo influencia significativamente o módulo de elasticidade do concreto. A partir do próximo item, serão apresentados os resultados e tendências separados por teores de argamassa.

4.2.2.2 Análises gráfico-estatísticas dos resultados dos ensaios em concreto por combinações de brita/areia/teor de argamassa

A fim de melhor definir o comportamento de cada combinação de concretos confeccionados, apresenta-se a Figura 25 com os resultados obtidos em concretos confeccionados com agregados graúdos de gnaise. Diferentemente das análises realizadas anteriormente, os resultados também foram divididos de acordo com o teor de argamassa adotado para cada combinação. E para iniciar a avaliação dos dados graficamente apresentados, a Tabela 27 traz as comparações estatísticas das funções lineares formadas pelos dados obtidos em ensaio.

Figura 25: Análise gráfica dos resultados obtidos nos concretos com brita de gnaise

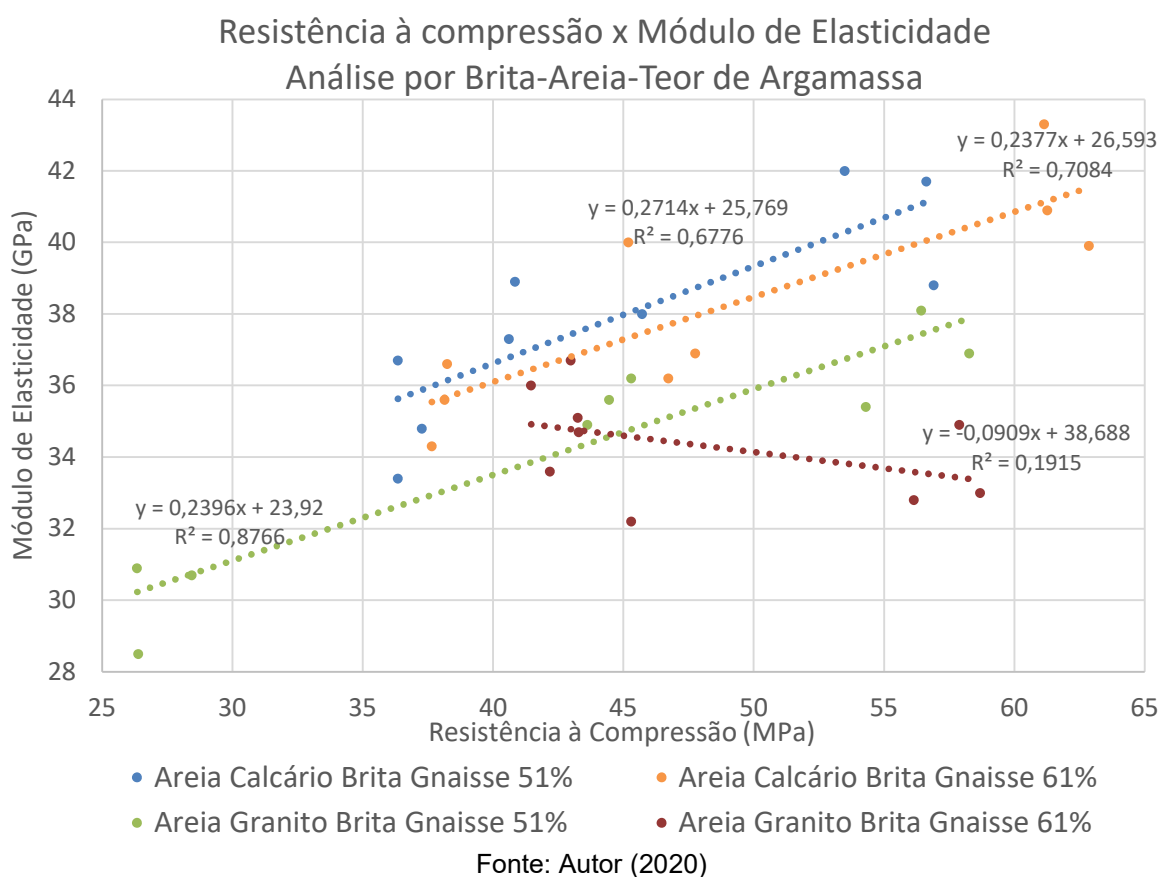


Tabela 27: Comparação de Funções Lineares da análise gráfica apresentadas na Figura 25

Agregado Graúdo	Agregado Miúdo	Teor de Argamassa (%)	Areia Calcário		Areia Granito	
			51%	61%	51%	61%
Gnaise	Calcário	51		NDS	DS	DS
	Calcário	61	NDS		DS	DS
	Granito	51	DS	DS		DS
	Granito	61	DS	DS	DS	

Legenda: DS – Difere significativamente; NDS – Não Difere Significativamente
Grau de Confiabilidade 95%

Fonte: Autor (2020)

Importante destacar que os resultados comparando as funções lineares está apresentada de forma descritiva na Tabela 34, localizada no APÊNDICE C deste trabalho. Neste momento será realizada uma análise dos resultados por meio do tratamento estatístico realizado.

Primeiramente, observa-se que não houve diferença significativa entre os resultados obtidos pelas combinações de Brita Gnaisse-Areia Calcário-51% de argamassa e Brita Gnaisse-Areia Calcário-61% de argamassa. Este foi um resultado interessante, uma vez que com o aumento do teor de argamassa ocorreu um decréscimo médio de 8,2% na fração volumétrica de brita e a manutenção do teor volumétrico de cimento. Com isto, esperava-se que os valores de módulo de elasticidade sofressem uma queda. No entanto, com o maior percentual volumétrico de areia de calcário compacto, os concretos com teores de 61% de argamassa mantiveram os resultados de módulo de elasticidade na mesma casa do concreto com 51% de argamassa (mais britado).

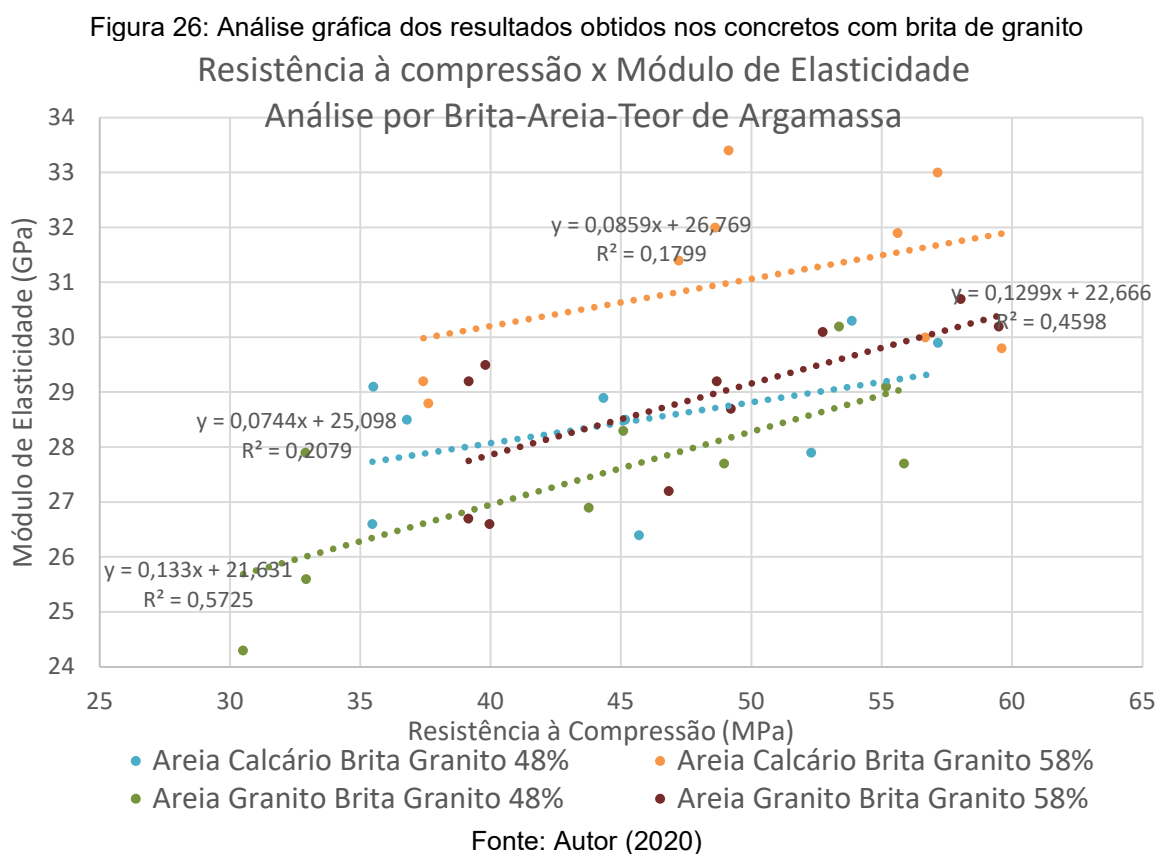
Em relação aos concretos produzidos com areia granítica e 51% de teor de argamassa, percebe-se significante distanciamento dos resultados obtidos pelas combinações de concreto que continham areia calcária, independentemente do teor de argamassa. Isto foi confirmado através da análise estatística que comparou as funções lineares obtidas pelas respectivas combinações de agregados. A fim de ilustrar a diferença entre os resultados de módulo de elasticidade da combinação de areia calcária com 51% de teor de argamassa e a combinação de areia granítica e mesmo teor de argamassa, na qual a única alteração de traço era o agregado miúdo substituído volumetricamente, destacam-se variações entre 7% à 16,45% entre os resultados médios de módulo de elasticidade ($E_{ci,m}$), resultando em um distanciamento médio entre as combinações de 3,8GPa.

No que tange à combinação de concretos com brita gnaissítica- areia granítica e 61% de teor de argamassa, verificou-se que esta não obteve uma boa correlação entre resistência à compressão e módulo de elasticidade. Seus resultados com alta resistência à compressão apresentaram módulos de elasticidade levemente inferiores aos verificados nos resultados em baixas resistências. Isto prejudicou a comparação de seus resultados com as demais combinações uma vez que não apresentou uma tendência de crescimento semelhante aos demais. Porém, pode-se observar que seus

módulos de elasticidade também não chegaram próximos daquelas combinações que continham areia calcária.

Pôde-se verificar também uma tendência expressiva no incremento do módulo de elasticidade juntamente à resistência à compressão. Ao realizar a diminuição da relação água/cimento de 0,65 para 0,35 na combinação com agregado miúdo de calcário e 51% de argamassa, a referida propriedade obteve, em média, um aumento de 16,7% (de 34,97GPa para 40,83GPa); já na combinação de agregado miúdo de calcário e 61% de argamassa observou-se um aumento de 17,8% (de 35,5GPa para 41,37GPa). Em relação à combinação com agregado miúdo de granito e 51% de teor de argamassa, obteve-se um acréscimo de 22,5% (30,03 GPa para 36,8GPa). Este comportamento está de acordo com as literaturas consagradas, uma vez que um dos parâmetros que influenciaria o módulo de elasticidade do concreto é o nível de porosidade da matriz cimentícia (NEVILLE, 1997; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A seguir, serão apresentados graficamente na Figura 26, os resultados individuais e as linhas de tendência formadas nos ensaios dos concretos com agregado graúdo de granito com seus respectivos agregados miúdos e teores de argamassa:



A fim de apresentar quais combinações obtiveram funções lineares com diferenças estatisticamente significantes, foi confeccionada a Tabela 28 apresentada a seguir. Ressalta-se novamente que os resultados completos da análise em questão encontram-se na Tabela 34, no APÊNDICE C deste trabalho.

Tabela 28: Comparação de Funções Lineares da análise gráfica apresentadas na Figura 26

Agregado Graúdo	Agregado Miúdo	Teor de Argamassa (%)	Areia Calcário		Areia Granito	
			48%	58%	48%	58%
Granito	Calcário	48		DS	NDS	NDS
	Calcário	58	DS		DS	DS
	Granito	48	NDS	DS		NDS
	Granito	58	NDS	DS	NDS	

Legenda: DS – Difere significativamente; NDS – Não Difere Significativamente
Grau de confiabilidade de 95%.

Fonte: Autor (2020)

Deste conjunto de funções lineares realizadas a partir de concretos com brita de granito apenas a combinação que continha areia de calcário e 58% de argamassa diferiu significativamente de todas as outras. Isto demonstra que a brita de granito empregada gerou um patamar inferior de módulo de elasticidade da qual apenas a combinação de concretos com 58% teor de argamassa e areia calcária de alto módulo de elasticidade conseguiu se dissociar.

A fim de comprovar a existência de um patamar de módulo de elasticidade da qual as três linhas tendência não conseguiram suplantar, foi realizado mais uma comparação estatística de funções lineares entre as três combinações citadas. O que se verificou foi que as funções lineares novamente não diferiram significativamente (vide resultado na Tabela 34, APÊNDICE C). Isto ajuda a demonstrar a forte influencia exercida pelo agregado graúdo de baixo módulo de elasticidade sobre o resultado do módulo de elasticidade do concreto.

Além disso, ao separar os resultados por teores de argamassa verificou-se nova ocorrência de diferença significativa entre os dois conjuntos de pontos ensaiados (vide resultado na Tabela 34, APÊNDICE C). Ou seja, os concretos com menores teores de argamassa apresentaram resultados significativamente inferiores de módulo de elasticidade e resistência à compressão quando comparados àqueles concretos que possuíam 58% de argamassa.

Seguindo por este raciocínio, uma explicação para que a linha de tendência da combinação Brita de granito-Areia de Granito e 58% de teor de argamassa tenha obtido valores superiores de módulo de elasticidade aos da combinação brita granito-areia granito e 48% de teor de argamassa estaria na comparação dos seus traços volumétricos com quantidades fixas de agregado graúdo.

Como os agregados empregados nestas combinações são subprodutos da britagem do mesmo tipo de rocha obtida na mesma pedreira e com massas específicas aparentes praticamente iguais, o acréscimo ou decréscimo do agregado miúdo no traço não deveria influenciar em grande medida o resultado do módulo de elasticidade do concreto. No entanto ao compará-los utilizando o traço volumétrico e fixando o volume de brita, observa-se por meio da Tabela 29 que haveria um aumento no volume de cimento nos traços de 58% de argamassa:

Tabela 29: Comparação dos traços em volume com brita fixada

	Traço 1:3,5 Brita de Granito + Areia de Granito + 48% de Teor de Argamassa	Traço 1:3,5 Brita de Granito + Areia de Granito + 58% de teor de argamassa
Traço unitário em massa	1: 1,16: 2,34	1: 1,61 : 1,89
Traço unitário em volume	1: 1,34 :2,66	1: 1,86: 2,15
Traço em volume com brita fixada	0,81: 1,08: 2,15	1: 1,86: 2,15

Fonte: Autor (2020)

Com isto, percebe-se que a matriz cimentícia da combinação de areia de granito e 58% de teor de argamassa possuiria uma matriz cimentícia mais rica que responderia pelos valores de módulo de elasticidade levemente superiores aos apresentados pela combinação com areia de granito e 48% de teor de argamassa.

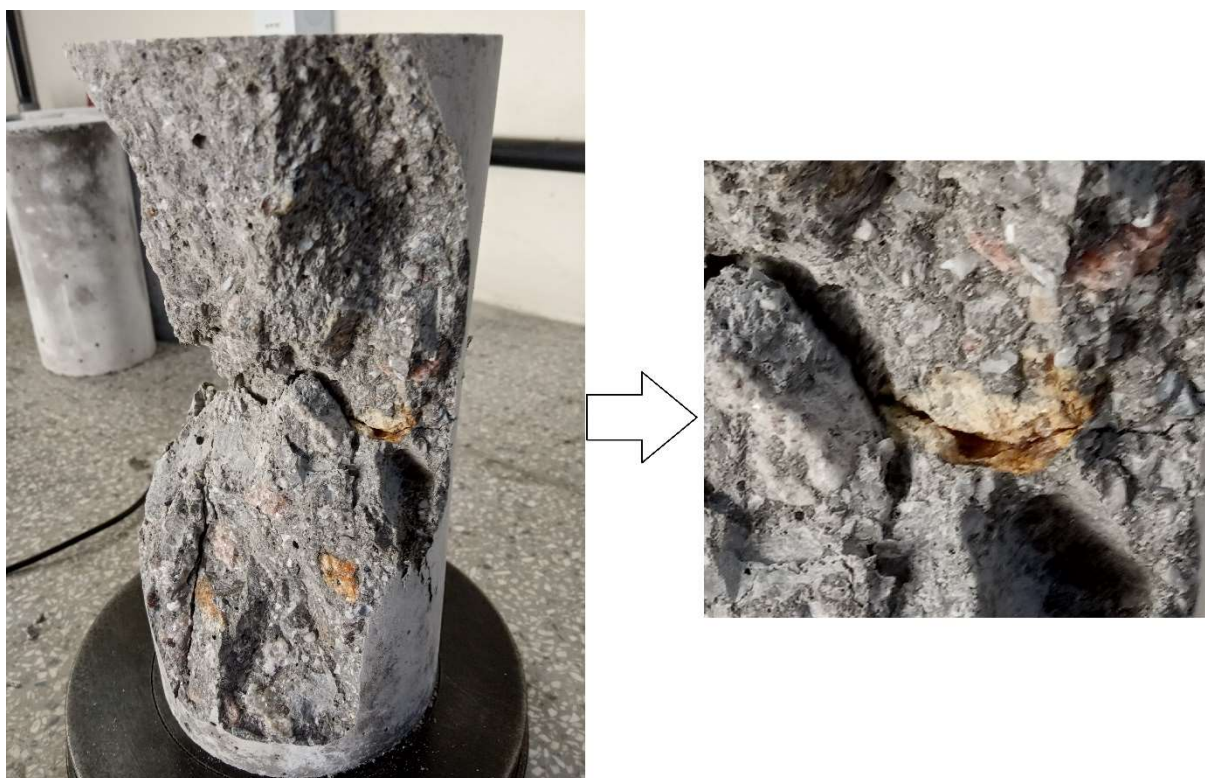
Em relação à diferença significativa apresentada entre os resultados de módulo de elasticidade das combinações contendo areia de calcário e diferentes teores de argamassa, pode-se argumentar que houve uma melhora significativa da qualidade das frações componentes dos concretos. Conforme ilustrado anteriormente nas Figuras 21 e 22, o aumento do teor de argamassa gerou uma mudança entre as duas combinações na qual houve um decréscimo médio de 8,3% da fração volumétrica da brita de granito e um acréscimo médio de 8,4% da fração volumétrica da areia de

calcário. Esta alteração na composição dos traços resultou em um aumento médio expressivo de 2,36 GPa entre os $E_{ci,m}$ das duas combinações.

No que se refere à comparação entre as combinações de areia de calcário de 58% de teor de argamassa e de areia de granito e mesmo teor de argamassa, no qual apenas foi realizada uma substituição volumétrica do agregado miúdo, também observou-se a influência positiva da areia de calcário sobre o módulo de elasticidade do concreto. Além da análise estatística validar a significativa diferença entre as duas funções lineares, pode-se determinar que a distância média entre os $E_{ci,m}$ obtidos entre as respectivas combinações foi de 1,92GPa, confirmando a influência positiva da origem mineralógica da areia no módulo de elasticidade do concreto.

Por fim, foram observados em diversos corpos de prova planos preferenciais de ruptura passando não pela zona de transição entre argamassa e agregado graúdo, e sim rompendo as próprias britas. Isto ocorreu principalmente nos traços de altas resistências com agregado miúdo de calcário, conforme visualizado na Figura 27 a seguir, demonstrando visualmente como a brita de granito era o elo fraco na composição deste concreto específico.

Figura 27: Rompimento de CP do Concreto 1:3,5, agregado miúdo de calcário, brita de granito e 58% de argamassa com detalhe no plano de ruptura na brita de granito



Fonte: Autor (2020)

4.2.2.3 Análise dos resultados dos ensaios em concretos com composição de agregados miúdos

Após a conclusão da confecção das curvas de dosagem planejadas, confeccionou-se dois concretos a partir de uma composição de 60% de areia natural quartzosa e 40% das areias de britagem de calcário e granito.

Em razão da maior quantidade de finos presentes na areia natural, os traços demandaram uma relação a/c maior para obtenção do abatimento procurado, ocasionando uma queda nos valores de resistência à compressão quando comparados aos respectivos resultados com 100% de areia de britagem. Além disto, Mehta e Monteiro (2014) lecionam que concretos confeccionados com agregados britados e rugosos tendem a apresentar resistências superiores em primeiras idades do que concretos contendo agregados lisos que sofreram intemperismos naturais, como a areia natural quartzosa utilizada na composição dos concretos 25 e 26. Isto se deveria a uma ligação física mais forte entre o agregado rugoso e a pasta de cimento hidratada.

No entanto, percebe-se através dos resultados apresentados na Tabela 30 que houve uma manutenção na tendência já observada nas curvas de dosagem discutidas anteriormente; o módulo de elasticidade do concreto com areia calcária se mostrou superior àquele que continha agregado miúdo granítico, mesmo quando presentes em menor proporção volumétrica em função da composição com areia natural quartzosa.

Tabela 30: Resultados dos ensaios em estado endurecido dos concretos com composição de agregado miúdo

Concreto	α (%)	m	Agregado Miúdo	Agregado Graúdo	Resistência à Compressão		Módulo de Elasticidade	
					$F_{c,m28}$ (MPa)	Desvio Padrão	$E_{ci,m}$ (GPa)	Desvio Padrão
25	58	6,5	40% Calcário 60% Natural Quartzosa	Granito	34,19	0,72	30,37	0,67
26	58	6,5	40% Granito 60% Natural Quartzosa	Granito	30,91	0,82	25,20	0,75

Fonte: Autor (2020)

Ressalta-se que o traço escolhido para ser replicado foi o 1:6,5:0,65 com 58% de teor de argamassa e brita granítica de baixo módulo. Diante do que foi observado nas tendências estudadas anteriormente, confirmou-se que em teores de argamassa mais altos não houve formação de um patamar de módulo de elasticidade como influência negativa do módulo de elasticidade da brita de granito.

Portanto, mesmo com a inclusão de uma areia de baixo módulo de elasticidade na composição do agregado miúdo e diminuindo o proporcionamento volumétrico das

areias de britagem de 36,6% para 14,2% no volume do traço, houve um grande distanciamento entre os resultados dos concretos ensaiados chegando a representar 20,5% sobre os valores médios de módulo de elasticidade ($E_{ci,m}$).

4.2.3 Comparações dos resultados experimentais de módulo de elasticidade estático aos previstos pela equação da NBR 6118:2014.

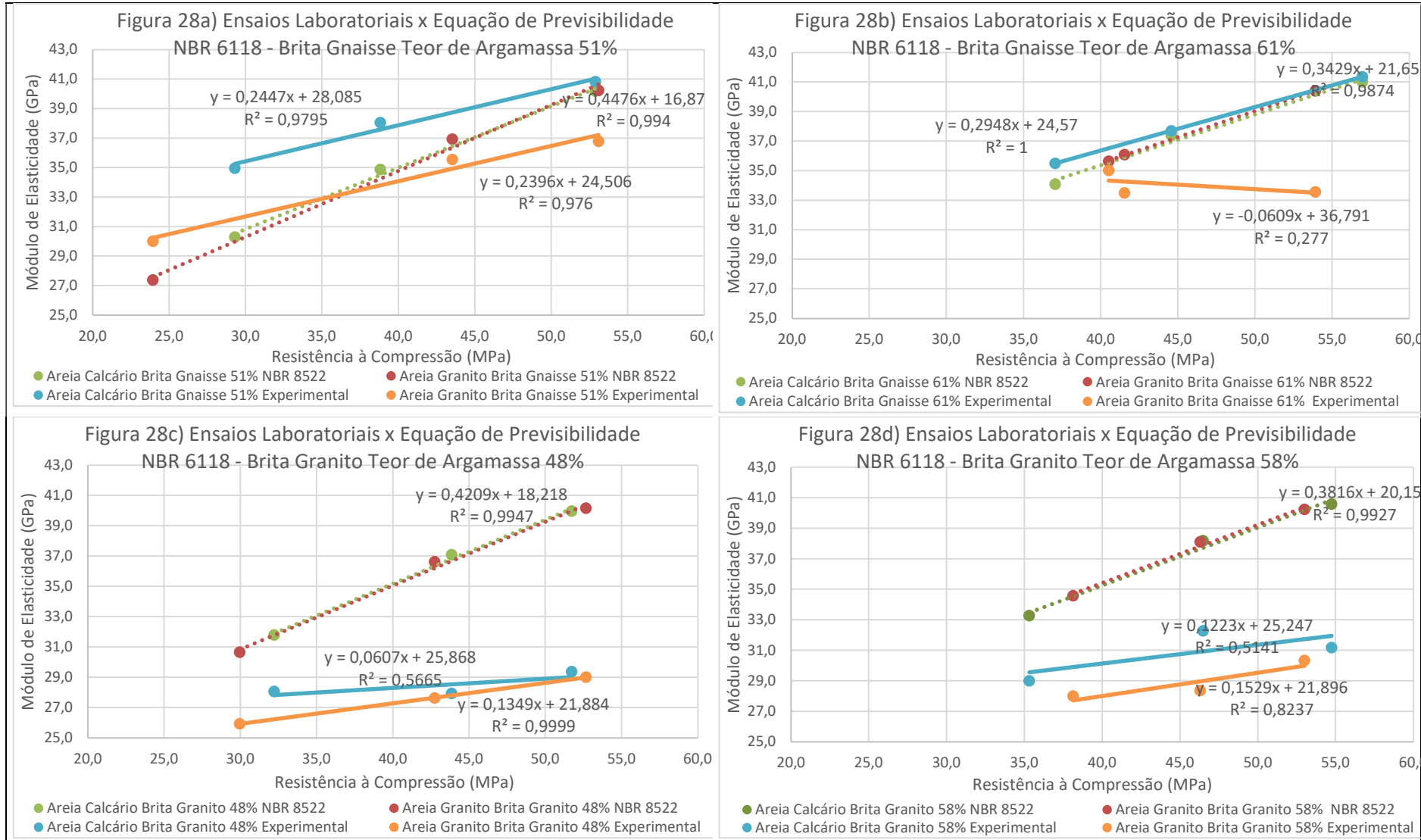
Conforme discutido na revisão bibliográfica, existiriam certas defasagens nas equações de previsão de módulo de elasticidade da NBR 6118:2014, nas quais os valores previstos raramente eram compatíveis quando comparados com resultados experimentais obtidos por meio de ensaios laboratoriais. Neste momento será realizada a apresentação da comparação dos resultados experimentais obtidos neste trabalho com os respectivos valores previstos pela norma a partir dos fatores resistência à compressão característica (F_{ck}) e origem mineralógica da brita utilizada no concreto (α_E).

Este último fator apresentou uma dissonância com os resultados experimentais logo no início da análise, uma vez que foram utilizadas britas de duas origens mineralógicas distintas que, segundo a norma mereceriam o mesmo coeficiente multiplicador (α_E), gnaisse e granito. No entanto, verificou-se experimentalmente que ambas apresentaram massas específicas e módulos de elasticidade muito distintos, resultando em um superdimensionamento dos módulos de elasticidade previstos para os concretos com brita granítica. Isto ocorreu porque estes apresentaram altas resistências à compressão – similares aos obtidos nos concretos com brita gnáissica – obtendo, porém, baixos módulo de elasticidade nos ensaios experimentais.

Na Tabela 35, localizada nos Anexos deste trabalho, são apresentados os valores de F_{ck} de cada concreto, os seus respectivos módulos de elasticidade tanto experimentais quanto previstos pela equação da NBR 6118:2014 e, por fim, uma relação entre o módulo de elasticidade experimental e o previsto pela norma.

Para facilitar a visualização desta análise, plotou-se os gráficos apresentados nas figuras 28a), 28b), 28c) e 28d), nos quais foram agrupados os resultados de módulo de elasticidade experimentais e previstos para cada conjunto de combinações com mesma brita e teor de argamassas. Ressalta-se a falta de sensibilidade das linhas de tendência definidas pela equação da norma – todas cobrindo praticamente os mesmos pontos, uma vez que a equação iguala britas de granito e gnaisse e os resultados de F_{ck} entre os concretos foram similares entre as combinações testadas.

Figura 28 a), 28b), 28c) e 28d): Análises gráficas comparativas entre resultados experimentais e previstos pelas equações da NBR 8522



Fonte: Autor (2020)

Percebe-se que a única combinação de concreto que obteve todos os resultados experimentais de módulo de elasticidade superiores aos resultados previstos pela NBR 6118:2014 foi composta por brita de gnaiss, areia de calcário e teor de 51% de argamassa, conforme visualizado na Figura 28a). Além desta, foram observados diversos tipos de comportamentos das linhas de tendência diante dos resultados de módulo de elasticidade previstos pelas equações da referida norma, dentre os quais destacam-se os seguintes:

- Valores de módulo de elasticidade experimentais inicialmente superiores, sendo depois ultrapassados pela linha de tendência da NBR 6118:2014 (Brita Gnaiss+Areia Granito+51% de teor de argamassa – Figura 28a);
- Linhas de tendência quase se encaixando, havendo pouco distanciamento entre resultados experimentais e resultados previstos (Brita Gnaiss+Areia Calcário+61% de teor de argamassa – Figura 28b);
- Valores de módulos de elasticidade foram superestimados pela equação da NBR 6118 (Brita Gnaiss+areia granito 61% de teor de argamassa – Figura 37b – e todas as combinações com brita de granito – Figuras 28c e 28d).

Ou seja, ao utilizar diferentes britas com o mesmo coeficiente de correção ($\alpha_E = 1,00$) e obter concretos com padrões similares de resistência à compressão (F_{ck}), foi possível observar diversos tipos de comportamentos de resultados de módulo de elasticidades experimentais em relação aos valores previstos pela NBR 6118:2014.

Além disto, percebe-se que os coeficientes angulares das funções definidas pelas equações da NBR 6118:2014 sempre apresentam valores superiores aos das funções com resultados obtidos experimentalmente. Isto acaba resultando em uma distorção na qual quanto maior a resistência à compressão, mais significativa será a distância entre os resultados de módulo de elasticidade previstos e experimentais.

Por fim, como foi visto nos estudos apresentados na revisão bibliográfica (TAÏRA, 2018; BILESKY, 2016; e GIRARDI, 2018) e nas discussões dos resultados deste trabalho, percebe-se que a taxa de crescimento do módulo de elasticidade e o seu patamar alcançado é em grande parte definido pelos seus agregados graúdos, e em menor medida, pelos agregados miúdos. Portanto, verifica-se a necessidade da realização de novos estudos para a atualização das equações de previsibilidade do módulo de elasticidade da NBR 6118:2014.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentará as principais conclusões obtidas a partir do programa experimental realizados neste trabalho e na sequência serão apresentadas sugestões para trabalhos futuros em relação ao tema.

5.1 Conclusões Gerais

A respeito do início do programa experimental proposto, onde foram realizados ensaios de módulo de elasticidade estático em argamassas, percebeu-se que houve formação de patamares claramente definidos que podem ter sido influenciados pela origem mineralógica do agregado miúdo. A fim de confirmar a referida influência, foi realizada uma avaliação estatística para análise de variância das médias entre duas argamassas com diferentes agregados miúdos e semelhantes resistências à compressão. Por fim, restou comprovada estatisticamente a diferença significativa entre os módulos de elasticidade de argamassas com diferentes agregados miúdos.

Em relação aos testes realizados em concreto, mesmo com a ocorrência de certos problemas nas leituras dos ensaios de módulo de elasticidade estáticos, o grande conjunto amostral de pontos individuais permitiu a obtenção de linhas de tendências definidas. Foi verificada uma grande influência do agregado graúdo no módulo de elasticidade, separando os resultados dos concretos confeccionados com brita de gnaiss e de granito por uma distância média de 25,0%. No entanto, quando os resultados são separados por agregado miúdo (calcário e granito), observou-se uma diferença de 11,2% nas combinações com britas de gnaiss e de 6,0% com britas de granito.

Estas diferenças foram demonstradas estatisticamente por variadas comparações de funções lineares que constataram diferenças significativas entre os concretos produzidos com diferentes agregados miúdos. Verificou-se que para as combinações de britas de gnaiss, o teor de argamassa não influenciou significativamente nos resultados, uma vez que se trocou um material de alto módulo de elasticidade (brita de gnaiss) por outro material de propriedades semelhantes (areia de calcário compacto).

Entretanto, o mesmo não ocorreu nos concretos com brita de granito, no qual o teor de argamassa apresentou relevância estatística para a definição do módulo de elasticidade. Para os teores de 48% de argamassa, a referida propriedade foi fortemente influenciada pela baixa performance da brita, ocorrendo a formação de um nível inferior de resultados de módulo de elasticidade tanto para as areias de granito quanto calcário. Até mesmo a combinação com maior teor de argamassa de areia de granito não se destacou do patamar citado, uma vez que ambos agregados possuíam baixos módulos de elasticidade. Por fim, a combinação com areia de calcário e 58% de teor de argamassa se distanciou do referido patamar, demonstrando claramente que a substituição da brita de baixo módulo por areia de alto módulo de elasticidade foi responsável pela significativa elevação dos resultados.

Em relação aos dois concretos rodados com uma composição de agregados miúdos de 60% de areia natural quartzosa e 40% de areia de britagem, verificou-se uma forte influência dos agregados miúdos nos resultados de módulo de elasticidade; o concreto contendo agregado miúdo de calcário obteve resultados 20,5% superiores os atingidos pelo concreto com agregado miúdo de granito.

Por fim, deve-se ressaltar que as equações apresentadas na NBR 6118:2014 se apresentaram insuficientes para prever as tendências de módulo de elasticidade experimentalmente verificadas. Logo de início houve uma distorção das previsões, uma vez que a norma define britas de granito e gnaisse como o mesmo coeficiente de correção (α_E), quando na realidade apresentaram resultados muito distintos de módulo de elasticidade. Em segundo lugar, os patamares de módulo de elasticidade do concreto também foram definidos, em menor medida, pelo módulo de elasticidade dos agregados miúdos; no entanto, este fator é completamente ignorado pela NBR 8522:2017 gerando resultados previstos com baixíssimo nível de precisão.

5.2 Recomendações de Trabalhos Futuros

A partir dos resultados obtidos, percebe-se a necessidade de novas pesquisas e de intenso aprofundamento sobre o tema para que sejam melhor definidos os fatores influenciadores do comportamento elástico do concreto. Para tanto, seguem as seguintes sugestões de estudos:

- Estudos com outros agregados graúdos e miúdos de diversas regiões do estado de Santa Catarina e de outros estados para averiguação da influência e comportamento dos agregados em relação ao módulo de elasticidade, uma vez que as suas características são eminentemente regionais;
- Estudos com os materiais normatizados do IPT para melhor demonstração da influência do agregado miúdo nos resultados de módulo de elasticidade;
- Avaliação mais detalhada da influência de composições de agregados miúdos no módulo de elasticidade do concreto;
- Inclusão de outras metodologias não destrutivas de avaliação do módulo de elasticidade (módulo dinâmico) para comparação dos resultados.
- Determinação do valor real do módulo de deformação das rochas (origem mineralógica) e sua influência no módulo de deformação do concreto.

6 REFERÊNCIAS

ARAÚJO, J. M. **O módulo de deformação longitudinal do concreto**. Teoria e Prática na Engenharia Civil, nº1, 2000.

ARAÚJO, S. S; GUIMARÃES, G. N.; GEYER, A. L.B. **Influência do tipo de medição na determinação do módulo estático de elasticidade do concreto**. Revista IBRACON Structures and Materials Journal, Vol. 5, n. 5, 2012.

ARRUDA, A. M. D. **Módulo de elasticidade de concretos produzidos com formações rochosas do triângulo mineiro**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Uberlândia. 166 fls. Uberlândia/MG, 2013.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: Abnt, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: Abnt, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto. Rio de Janeiro: Abnt, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: Abnt, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro: Abnt, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802**: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: Abnt, 2019.

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: Abnt, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: Abnt, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro: Abnt, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro: Abnt, 2005.

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: Abnt, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 46**: Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 micrômetro. Rio de Janeiro: Abnt, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – determinação da massa específica aparente. Rio de Janeiro: Abnt, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: Abnt, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: Abnt, 2003.

BARBOSA, I. L. S. **Influência dos agregados graúdos da região de Goiânia no módulo de deformação tangente inicial do concreto**. Dissertação de Mestrado (Curso de Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Goiás. Goiânia/GO. 135 fls. Goiânia/GO, 2009.

BILESKY, P. C. **Contribuição aos estudos do módulo de elasticidade do concreto**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) do Estado de São Paulo. 137 fls. São Paulo/SP, 2016.

BILESKY, P. C.; HELENE, P.; SBRIGHI NETO, C.; **Influência da Natureza Petrográfica do Agregado Graúdo no Módulo de Elasticidade do Concreto**. São Paulo/SP: IBRACON, 2017.

CALLISTER, W. D. **Materials science and engineering: an introduction**. [S.l.]: 5a Edição, LTC Editora, São Paulo/SP, 2002.

CORRÊA, T. G.; HICKEL, G. C; *et al.* **Módulo de Elasticidade do Concreto: Sugestão de revisão à equação de previsibilidade da NBR 6118**. In: Anais do 62º Congresso Brasileiro do Concreto, Florianópolis, Brasil, 2020.

CTBUH - COUNCIL ON TALL BUILDINGS AND URBAN HABITAT. **CTBUH: lista dos edifícios altos do Brasil**. <https://skyscrapercenter.com/country/brazil>, acessado em 20/10 às 17h16, 2019.

CUPERTINO, M. A. L. et al. **Avaliação de fatores de ensaio que interferem nos resultados de módulo de elasticidade do concreto**. Anais do 49º Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON). Bento Gonçalves/RS, 2007.

DAL MOLIN, D. C. C.; MONTEIRO, P. J. M. **Contribuição ao Estudo do módulo de deformação de concretos de alta resistência com e sem adições de microssilica**. Boletim Técnico nº 159 – EPUSP, São Paulo/SP, 1996.

FRANÇA, Ricardo Leopoldo e Silva. **Deformações estruturais em concreto e soluções**. [S.l.]: Revista Técnica, edição 81. Dez/2003. Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/81/artigo285621-1.aspx>>. Acessado em 17/09/2019.

GCP Applied Technologies; **ADVA FLOW 20 Aditivo Superplastificante – Especificações Técnicas**. Disponível em: <<https://gcpat.com.br/pt-br/solutions/products/adva-high-range-water-reducers/adva>> Acesso em 10/09/2020.

GIDRÃO, G. M. S. **Propriedades dinâmicas do concreto e relações com sua microestrutura**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Universidade de São Paulo. 132 fls. São Carlos/SP, 2015.

GIRARDI, Ricardo; **Avaliação da Influência de Diferentes Parâmetros de Dosagem sobre o Módulo de Deformação do Concreto de cimento Portland**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil; Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Porto Alegre/RS, 238 fls., 2018.

GUJEL, D. A.; KAZMIERCZAK, C. S.; MASUERO, J. R.. **Diagrama tensão-deformação específica em concretos com agregados reciclados de concreto: análise da metodologia proposta pela NBR 8522**. Rev. IBRACON Estrut. Mater., São Paulo, v. 10, n. 3, p. 547-567, June 2017.

LEAL, A. C. F. S. **Investigação experimental do módulo de elasticidade nos concretos produzidos em Brasília**. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília. 151 fls. Brasília/DF, 2012.

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

LOPES, JOÃO B. de 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 6118:2014**. São Paulo: IBRACON, 2017.

MARTINS, D. G. **Influência do tamanho do corpo de prova nos resultados de ensaios de módulo de deformação e resistência à compressão e suas correlações para concretos produzidos em Goiânia – GO**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Goiás. Goiânia/GO. 112 fls, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo/SP: IBRACON, 2ª ed. (português), 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**. In: 44º Congresso Brasileiro do Concreto, Belo Horizonte, Brasil, 2002.

MONTEIRO, P. J. M., MASO, J. C.; OLLIVIER, J.P. **Particle Siza Analysis of the Sand**. Cement and Concrete Research. V. 15, p.953-958, 1985.

MONTIJA, F. C. **Aspectos da variabilidade experimental do ensaio de módulo de deformação do concreto**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica de São Paulo. 260 fls. São Paulo/SP, 2007.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. Tradução de Salvador E. Giammusso. 2ª ed. São Paulo/SP: PINI, 1997.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. Tradução Ruy Alberto Cremonini. 2ª ed. Porto Alegre/RS: Bookman, 2013.

PAULON, V. A.; MONTEIRO, P. J. M. **Estudos da microestrutura da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado**. Boletim Técnico nº 43 – EPUSP, São Paulo/SP, 1991.

PEDROSO, Fábio Luís. **Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem**. Concreto e Construções, Mar. de 2009. Disponível em: <http://ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/pdf/Revista_Concreto_53.pdf>. Acesso em: 16/09/2019.

SBRIGHI NETO, C. **Agregados para Concreto**. In: Isaia, G. C. (Ed). Concreto, Ensino, Pesquisa e Realizações. 1ª ed. São Paulo/SP, 2005.

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

SHEHATA, Medhat. **Deformações Instantâneas do Concreto**. In: G. C. Isaia (Ed.); Concreto, ensino, Pesquisa e realizações. São Paulo: Ibracon ed., p. 631-685, 2005.

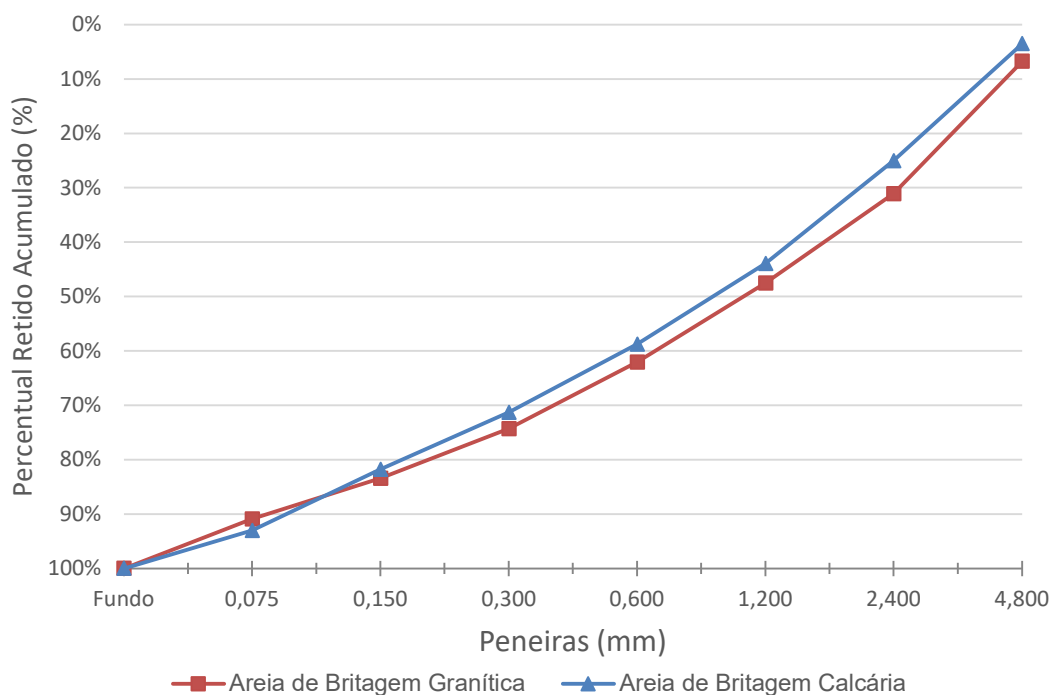
SILVA, K. J. D. **Estudo do comportamento do módulo de deformação de concretos com um ano de idade, produzidos com diferentes agregado graúdos**. Monografia de Conclusão de Curso em Engenharia Civil. Centro Federal de Educação Tecnológico de Goiás. Goiânia/GO, 2003.

VASCONCELLOS, Alex T. de; **Estudo da variabilidade do módulo de elasticidade de concretos produzidos com diferentes tipos de agregados graúdos**. Dissertação (Curso de Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis/SC. 122 fls, 2018.

7 APÊNDICES

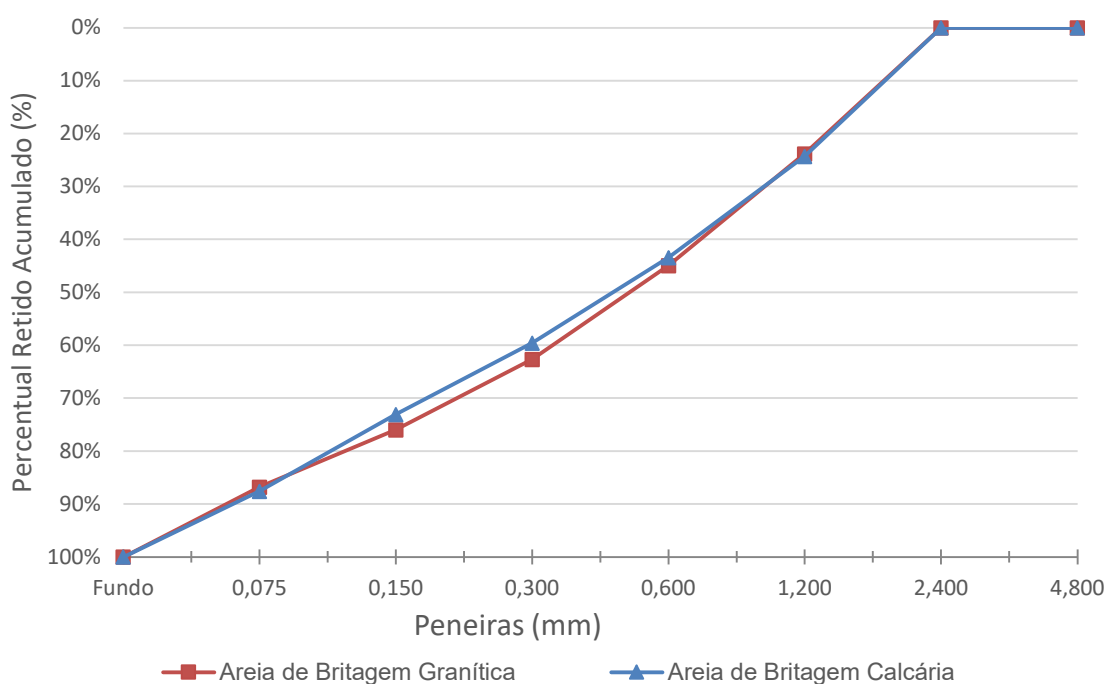
APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS EMPREGADOS

Figura 29: Curvas Granulométricas dos Agregados Miúdos adotados em argamassas



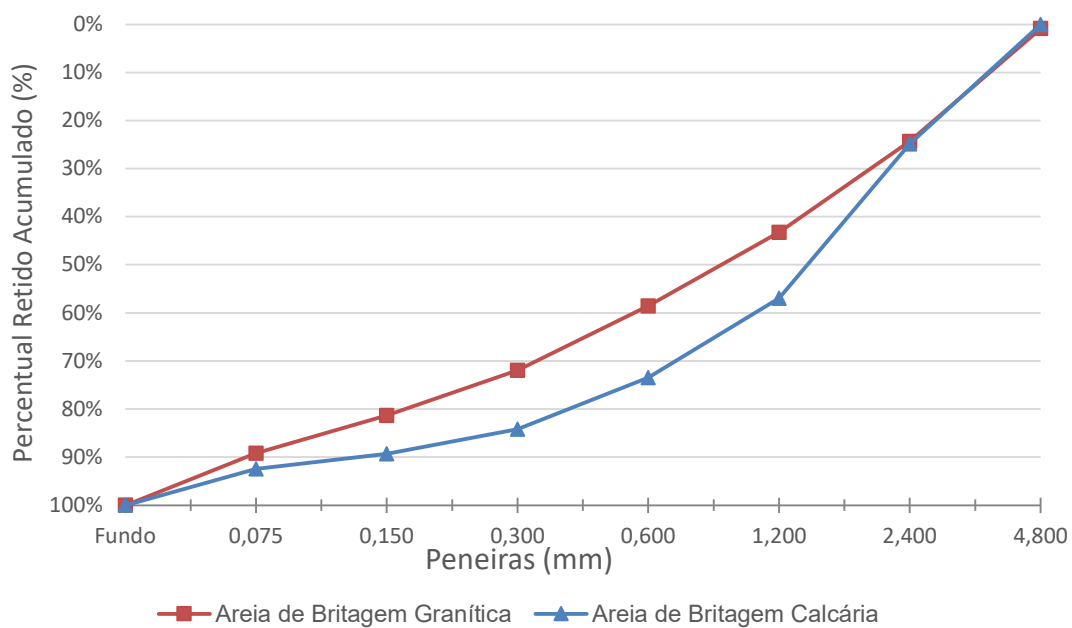
Fonte: Autor

Figura 30: Caracterização física dos agregados miúdos após uniformização



Fonte: Autor

Figura 31: Curvas Granulométricas dos Agregados Miúdos utilizados em concretos



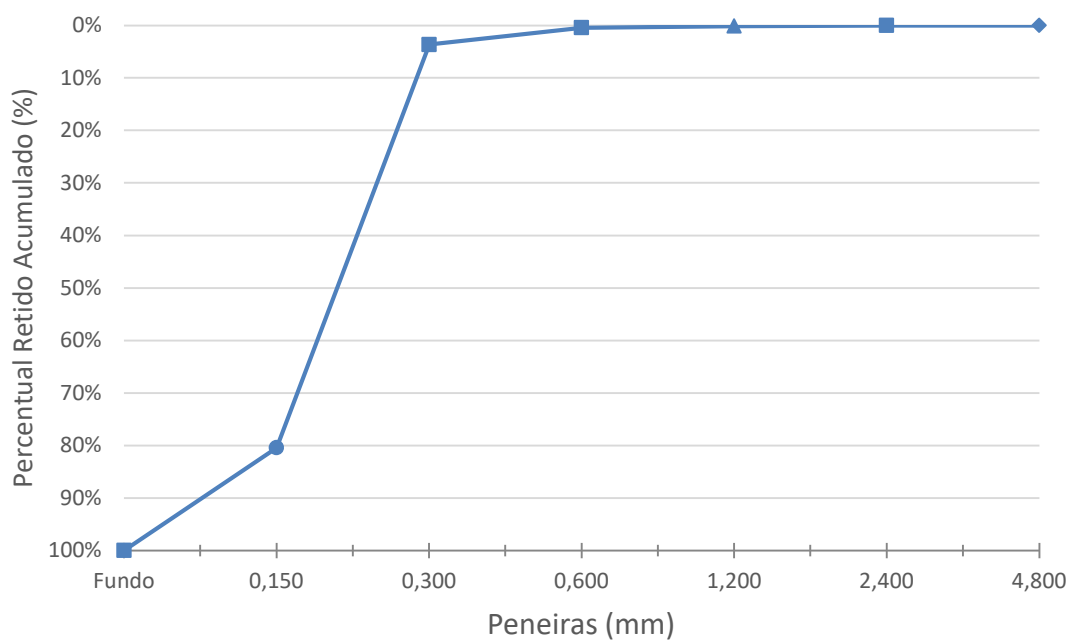
Fonte: Autor

Tabela 31: Caracterização Física da Areia Natural Quartzosa

Material	Massa Específica	Módulo de Finura
Areia Natural Quartzosa	2,632 g/cm ³	0,85

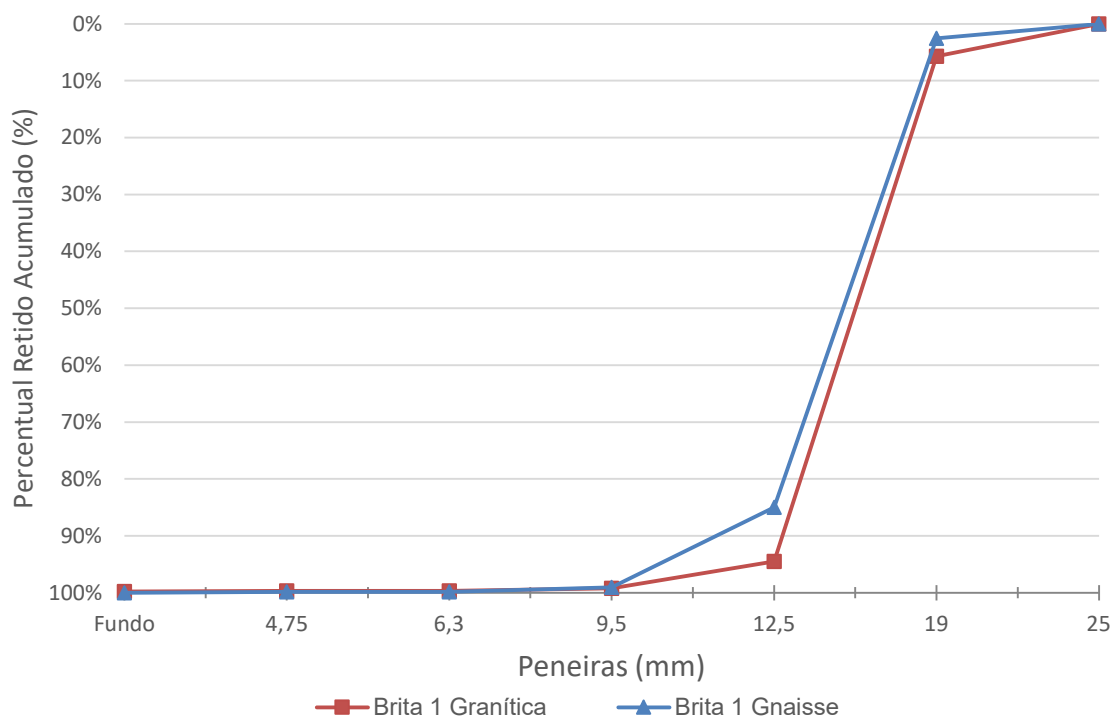
Autor (2020)

Figura 32: Curva Granulométrica da Areia Natural Quartzosa



Fonte: Autor (2020)

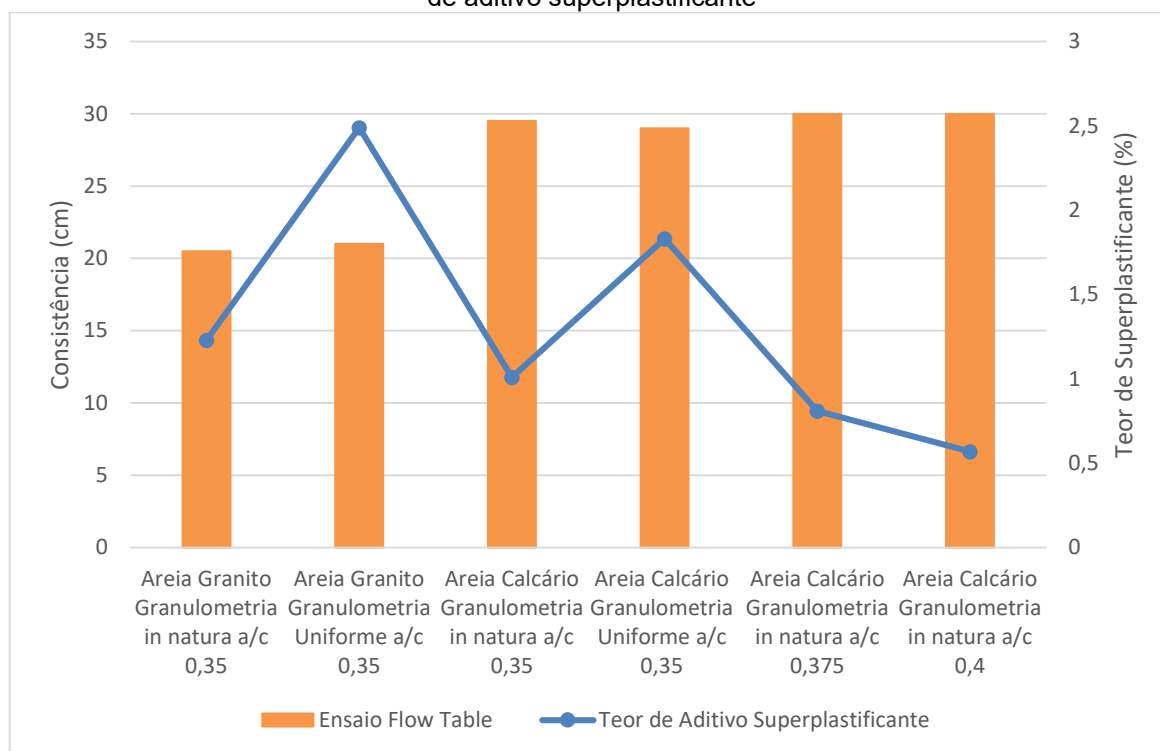
Figura 33: Curva Granulométrica dos agregados graúdos



Fonte: Autor

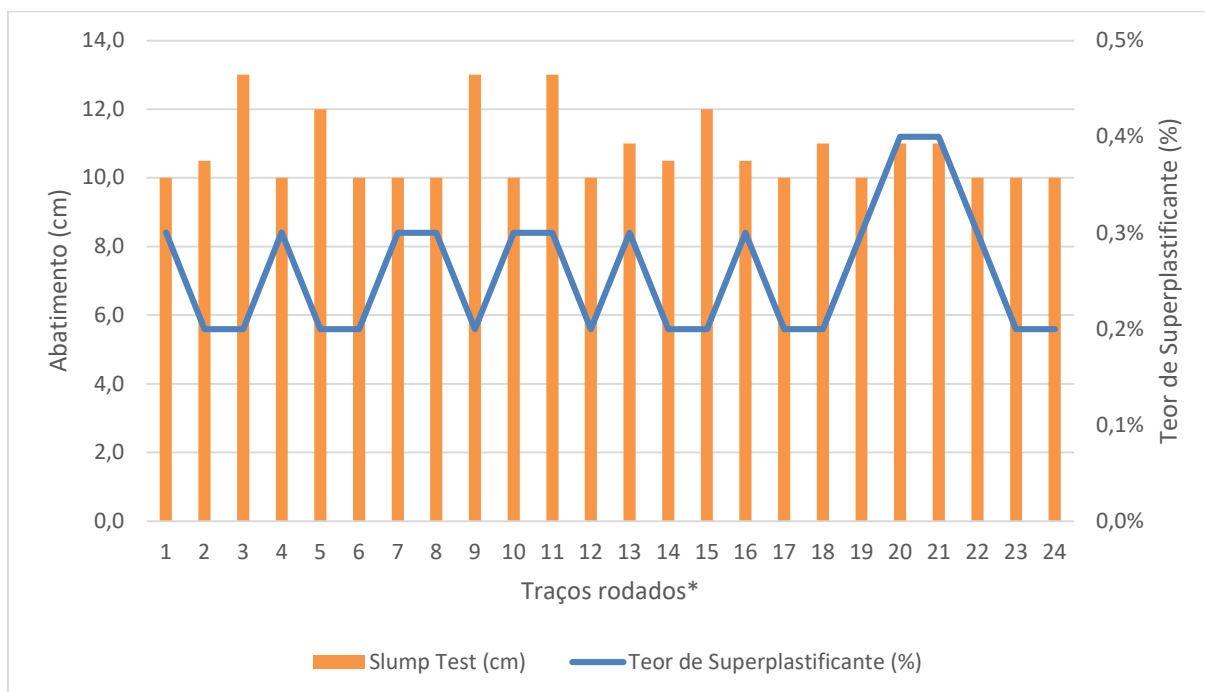
APÊNDICE B – RESULTADOS DOS ENSAIOS EM ESTADO FRESCO

Figura 34: Resultados do ensaio índice de consistência para argamassas e seus respectivos teores de aditivo superplastificante



Fonte: Autor (2020)

Figura 35: Resultados do Ensaio de Slump-Test para concretos com teor de superplastificante



*Numeração dos traços conforme Tabela 23.

Fonte: Autor (2020)

APÊNDICE C – RESULTADOS DOS ENSAIOS EM ESTADO ENDURECIDO

Tabela 32: Resultados Individuais dos Ensaios de Resistência à Compressão em Concreto

Concreto	Traço	α (%)	Agregado Miúdo	Agregado Graúdo	Resistência à Compressão (MPa)											
					Cp1	Cp2	Cp3	Cp4	Cp5	Cp6	Potencial	Média	Limite Inferior	Limite Superior	Desv Pad	C.V. (%)
1	1:3,5	51%	Calcário	Gnaisse	60,2	56,8	56,9	53,5	56,6	56,5	60,2	56,81	48,2	72,3	2,38	4,19%
2	1:5,0	51%	Calcário	Gnaisse	47,0	47,4	40,6	40,9	37,6	45,7	47,4	44,31	37,9	56,9	3,33	7,52%
3	1:6,5	51%	Calcário	Gnaisse	28,9	36,0	37,3	36,5	36,4	36,4	37,3	34,98	28,8	43,2	3,44	9,84%
4	1:3,5	61%	Calcário	Gnaisse	57,0	60,5	62,9	61,3	61,1	-	62,9	60,55	48,4	72,6	2,18	3,60%
5	1:5,0	61%	Calcário	Gnaisse	38,7	32,9	47,7	45,2	46,7	47,8	47,8	46,56	38,2	57,2	1,20	2,57%
6	1:6,5	61%	Calcário	Gnaisse	38,8	37,2	37,7	38,3	38,2	-	38,8	38,01	29,8	44,7	0,58	1,54%
7	1:3,5	51%	Granito	Gnaisse	44,2	55,0	54,3	56,4	58,3	-	58,3	55,99	44,0	66,0	1,76	3,14%
8	1:5,0	51%	Granito	Gnaisse	44,8	44,5	44,5	45,3	43,6	-	45,3	44,55	35,6	53,5	0,62	1,38%
9	1:6,5	51%	Granito	Gnaisse	25,8	24,5	25,9	26,4	28,5	26,4	28,5	26,29	19,6	29,4	1,43	5,43%
10	1:3,5	61%	Granito	Gnaisse	54,4	56,1	58,1	56,2	57,9	58,7	58,7	56,66	44,9	67,4	1,67	2,95%
11	1:5,0	61%	Granito	Gnaisse	29,4	44,6	42,2	45,3	43,3	-	45,3	43,85	35,7	53,6	1,40	3,18%
12	1:6,5	61%	Granito	Gnaisse	42,2	40,9	40,9	43,0	41,5	43,3	43,3	42,17	32,7	49,1	1,00	2,37%
13	1:3,5	48%	Calcário	Granito	54,8	55,9	57,2	53,9	52,3	-	57,2	54,79	44,7	67,1	1,86	3,40%
14	1:5,0	48%	Calcário	Granito	44,3	46,0	45,7	45,2	44,3	38,6	46,0	45,10	36,8	55,2	0,76	1,68%
15	1:6,5	48%	Calcário	Granito	32,8	33,6	35,5	35,1	36,8	35,5	36,8	34,85	26,9	40,3	1,59	4,58%
16	1:3,5	58%	Calcário	Granito	56,7	56,3	57,2	55,6	56,7	59,6	59,6	57,01	45,0	67,6	1,37	2,41%
17	1:5,0	58%	Calcário	Granito	48,8	46,9	47,2	49,1	48,6	-	49,1	48,13	37,5	56,3	1,00	2,07%
18	1:6,5	58%	Calcário	Granito	36,4	35,7	37,6	37,4	37,8	34,3	37,8	36,79	28,6	42,8	0,89	2,43%
19	1:3,5	48%	Granito	Granito	56,6	53,7	55,2	49,2	53,4	55,9	56,6	54,93	43,0	64,4	1,37	2,50%
20	1:5,0	48%	Granito	Granito	49,6	46,8	45,1	43,8	49,0		49,6	46,83	37,4	56,1	2,47	5,28%
21	1:6,5	48%	Granito	Granito	30,9	33,2	24,8	32,9	32,9	30,5	33,2	32,08	24,7	39,9	1,29	4,01%
22	1:3,5	58%	Granito	Granito	58,3	59,2	59,5	58,0	52,7	-	59,5	57,57	47,4	71,1	2,77	4,81%
23	1:5,0	58%	Granito	Granito	47,3	47,7	46,8	48,7	49,2	-	49,2	47,93	38,2	57,2	0,99	2,07%
24	1:6,5	58%	Granito	Granito	38,5	41,0	39,2	39,2	39,8	40,0	41,0	39,59	32,8	49,2	0,88	2,23%
25	1:6,5	58%	60% Natural Quartzosa 40% Calcário	Granito	33,4	34,2	34,0	34,4	35,5	33,7	35,5	34,19	27,4	41,1	0,72	2,10%
26	1:6,5	58%	60% Natural Quartzosa 40% Granito	Granito	31,8	31,5	30,4	31,0	29,8	-	31,8	30,91	25,2	37,8	0,82	2,65%

Fonte: Autor (2020)

Tabela 33: Resultados Individuais dos ensaios de Módulo de Elasticidade em Concreto

Concreto	Traço	α (%)	Agregado Miúdo	Agregado Graúdo	Módulo de Deformação (GPa)											
					Cp1	Cp2	Cp3	Cp4	Cp5	Cp6	Potencial	Média	Limite Inferior	Limite Superior	Desv Pad	C.V. (%)
1	1:3,5	51%	Calcário	Gnaisse	-	-	38,8	42,0	41,7	37,2	42,0	40,83	38,8	42,9	1,77	4,33%
2	1:5,0	51%	Calcário	Gnaisse	-	-	37,3	38,9	38,7	38,0	38,9	38,07	36,2	40,0	0,80	2,11%
3	1:6,5	51%	Calcário	Gnaisse	-	-	34,8	40,7	33,4	36,7	36,7	34,97	33,2	36,7	1,66	4,74%
4	1:3,5	61%	Calcário	Gnaisse	-	-	39,9	40,9	43,3	-	43,3	41,37	39,3	43,4	1,75	4,22%
5	1:5,0	61%	Calcário	Gnaisse	-	-	44,6	40,0	36,2	36,9	40,0	37,70	35,8	39,6	2,02	5,36%
6	1:6,5	61%	Calcário	Gnaisse	-	-	34,3	36,6	35,6	-	36,6	35,50	33,7	37,3	1,15	3,25%
7	1:3,5	51%	Granito	Gnaisse	-	-	35,4	38,1	36,9	-	38,1	36,80	35,0	38,6	1,35	3,68%
8	1:5,0	51%	Granito	Gnaisse	-	-	35,6	36,2	34,9	-	36,2	35,57	33,8	37,3	0,65	1,83%
9	1:6,5	51%	Granito	Gnaisse	-	-	24,3	28,5	30,7	30,9	30,9	30,03	28,5	31,5	1,33	4,43%
10	1:3,5	61%	Granito	Gnaisse	-	-	37,9	32,8	34,9	33,0	34,9	33,57	31,9	35,2	1,16	3,45%
11	1:5,0	61%	Granito	Gnaisse	-	-	33,6	32,2	34,7	-	34,7	33,50	31,8	35,2	1,25	3,74%
12	1:6,5	61%	Granito	Gnaisse	-	-	32,3	36,7	36,0	35,1	36,7	35,03	33,3	36,8	0,80	2,29%
13	1:3,5	48%	Calcário	Granito	-	-	29,9	30,3	27,9	-	30,3	29,37	27,9	30,8	1,29	4,38%
14	1:5,0	48%	Calcário	Granito	-	-	26,4	28,5	28,9	34,0	28,9	27,93	26,5	29,3	1,34	4,81%
15	1:6,5	48%	Calcário	Granito	-	-	26,6	26,0	28,5	29,1	29,1	28,07	26,7	29,5	1,31	4,65%
16	1:3,5	58%	Calcário	Granito	-	-	33,00	31,90	30,00	29,80	33,0	31,18	29,6	32,7	1,16	3,72%
17	1:5,0	58%	Calcário	Granito	-	-	31,4	33,4	32,0	-	33,4	32,27	30,7	33,9	1,03	3,18%
18	1:6,5	58%	Calcário	Granito	-	-	28,8	29,2	33,7	36,5	29,2	29,00	27,6	30,5	0,28	0,98%
19	1:3,5	48%	Granito	Granito	-	-	29,1	30,1	30,2	27,7	30,2	29,00	27,6	30,5	1,25	4,32%
20	1:5,0	48%	Granito	Granito	-	-	28,3	26,9	27,7	-	28,3	27,63	26,3	29,0	0,70	2,54%
21	1:6,5	48%	Granito	Granito	-	-	20,3	25,6	27,9	24,3	27,9	25,93	24,6	27,2	1,82	7,03%
22	1:3,5	58%	Granito	Granito	-	-	30,2	30,7	30,1	-	30,7	30,33	28,8	31,9	0,32	1,06%
23	1:5,0	58%	Granito	Granito	-	-	27,2	29,2	28,7	-	29,2	28,37	26,9	29,8	1,04	3,67%
24	1:6,5	58%	Granito	Granito	-	-	26,7	29,2	29,5	26,6	29,5	28,00	26,6	29,4	1,56	5,59%
25	1:6,5	58%	60% Natural Quartzosa 40% Calcário	Granito	-	-	30,7	27,5	29,6	30,8	30,8	30,37	28,8	31,9	0,67	2,19%
26	1:6,5	58%	60% Natural Quartzosa 40% Granito	Granito	-	-	24,5	25,1	26,0	-	26,0	25,20	23,9	26,5	0,75	3,00%

Fonte: Autor (2020)

Tabela 34: Comparação de Funções Lineares dos resultados dos ensaios em concreto

Grupos de Dados Comparados	Comparação de Funções Lineares		
	F calculado	F α (a, b)	Significância
A. C. + B. GN. 51% e A. C. + B. GN. 61%	0,47	F _{0,05} (2,14) = 3,74	Não
A. C. + B. GN. 51% e A. G. + B. GN. 51%	10,54	F _{0,05} (2,14) = 3,74	Sim
A. C. + B. GN. 51% e A. G. + B. GN. 61%	19,76	F _{0,05} (2,14) = 3,74	Sim
A. C. + B. GN. 61% e A. G. + B. GN. 51%	6,31	F _{0,05} (2,14) = 3,74	Sim
A. C. + B. GN. 61% e A. G. + B. GN. 61%	18,63	F _{0,05} (2,14) = 3,74	Sim
A. G. + B. GN. 51% e A. G. + B. GN. 61%	10,14	F _{0,05} (2,14) = 3,74	Sim
A. C. + B. G. 48% e A. C. + B. G. 58%	4,83	F _{0,05} (2,14) = 3,74	Sim
A. C. + B. G. 48% e A. G. + B. G. 48%	1,37	F _{0,05} (2,14) = 3,74	Não
A. C. + B. G. 48% e A. G. + B. G. 58%	0,31	F _{0,05} (2,14) = 3,68	Não
A. C. + B. G. 58% e A. G. + B. G. 48%	8,43	F _{0,05} (2,14) = 3,74	Sim
A. C. + B. G. 58% e A. G. + B. G. 58%	4,74	F _{0,05} (2,14) = 3,74	Sim
A. G. + B. G. 48% e A. G. + B. G. 58%	1,27	F _{0,05} (2,15) = 3,68	Não
A. C. + B. G. 48%; A. G. + B. G. 48% e A. G. + B. G. 58%	1,02	F _{0,05} (2,22) = 2,82	Não
A. C. + B. G. 48% + A. G. + B. G. 48% e A. C. + B. G. 58% + A. G. + B. G. 58%	4,05	F _{0,05} (2,33) = 3,28	Sim

Legenda: A. C. – Areia Calcário; A. G. – Areia Granito; B. GN. – Brita Gnaisse; B. G. – Brita Granito.

Obs1: Significância: se Fcalculado > Ftabelado existe diferença significativa entre os grupos.

Obs2: Grau de confiabilidade de 95%.

Fonte: Autor (2020)

Tabela 35: Comparativo entre os resultados de módulo de elasticidade experimentais e módulos de elasticidade previstos por meio das equações da NBR 8522:2017

Concreto	α (%)	m	Areia	Brita	Resistência à Compressão		Módulo de Elasticidade Experimental		Módulo de Elasticidade NBR 8522 (GPa)	Relação $E_{ci\ NBR}/E_{ci\ exp}$
					Fck (MPa)	Desvio Padrão	$E_{ci,m}$ (GPa)	Desvio Padrão		
1	51	3,5	Calcário	Gnaisse	52,89	2,38	40,83	1,77	40,20	0,98
2	51	5,0	Calcário	Gnaisse	38,82	3,33	38,07	0,80	34,89	0,92
3	51	6,5	Calcário	Gnaisse	29,29	3,44	34,97	1,66	30,31	0,87
4	61	3,5	Calcário	Gnaisse	56,96	2,18	41,37	1,75	41,02	0,99
3	61	5,0	Calcário	Gnaisse	44,58	1,20	37,70	2,02	37,39	0,99
6	61	6,5	Calcário	Gnaisse	37,05	0,58	35,50	1,15	34,09	0,96
7	51	3,5	Granito	Gnaisse	53,09	1,76	36,80	1,35	40,25	1,09
8	51	5,0	Granito	Gnaisse	43,54	0,62	35,57	0,65	36,95	1,04
9	51	6,5	Granito	Gnaisse	23,94	1,43	30,03	1,33	27,40	0,91
10	61	3,5	Granito	Gnaisse	53,90	1,67	33,57	1,16	40,41	1,20
11	61	5,0	Granito	Gnaisse	41,55	1,40	33,50	1,25	36,10	1,08
12	61	6,5	Granito	Gnaisse	40,52	1,00	35,03	0,80	35,65	1,02
13	48	3,5	Calcário	Granito	51,72	1,86	29,37	1,29	39,96	1,36
14	48	5,0	Calcário	Granito	43,85	0,76	27,93	1,34	37,08	1,33
15	48	6,5	Calcário	Granito	32,22	1,59	28,07	1,31	31,79	1,13
16	58	3,5	Calcário	Granito	54,74	1,37	31,18	1,16	40,58	1,30
17	58	5,0	Calcário	Granito	46,49	1,00	32,27	1,03	38,18	1,18
18	58	6,5	Calcário	Granito	35,31	0,89	29,00	0,28	33,28	1,15
19	48	3,5	Granito	Granito	52,67	1,37	29,00	1,25	40,16	1,38
20	48	5,0	Granito	Granito	42,75	2,47	27,63	0,70	36,61	1,32
21	48	6,5	Granito	Granito	29,96	1,29	25,93	1,82	30,65	1,18
22	58	3,5	Granito	Granito	53,00	2,77	30,33	0,32	40,23	1,33
23	58	5,0	Granito	Granito	46,29	0,99	28,37	1,04	38,10	1,34
24	58	6,5	Granito	Granito	38,13	0,88	28,00	1,56	34,58	1,24

Fonte: Autor (2020)