

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

Pedro Carlos Bilesky

Contribuição aos estudos do módulo de elasticidade do concreto

**São Paulo
2016**

Pedro Carlos Bilesky

Contribuição aos estudos do módulo de elasticidade do concreto

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Habitação: Planejamento e Tecnologia.

Data da aprovação ____/____/____

Prof. Dr. Paulo R. do L. Helene (Orientador)
Mestrado Habitação: Planejamento e
Tecnologia

Membros da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Paulo Roberto do Lago Helene (Orientador)
Mestrado Habitação: Planejamento e Tecnologia

Prof. Dr. Cláudio Sbrighi Neto (Membro)
IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto

Prof. Dr. Alessandra Lorenzetti de Castro (Membro)
USP – Universidade de São Paulo

Pedro Carlos Bilesky

Contribuição aos estudos do módulo de elasticidade do concreto

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Habitação: Planejamento e Tecnologia.

Área de Concentração: Tecnologia de Construção de Edifícios - TCE

Orientador: Prof. Dr. Paulo R. do L. Helene

São Paulo
Dez./2016

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Departamento de Acervo e Informação Tecnológica – DAIT
do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT

B595c

Bilesky, Pedro Carlos

Contribuição aos estudos do módulo de elasticidade do concreto. / Pedro Carlos Bilesky. São Paulo, 2016.
137p.

Dissertação (Mestrado em Habitação: Planejamento e Tecnologia) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Área de concentração: Tecnologia em Construção de Edifícios.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto do Lago Helene

1. Concreto 2. Elasticidade do concreto 3. Ensaio estático 4. Ensaio dinâmico 5. Ensaio comparativo 6. Materiais de construção 7. Tese I. Helene, Paulo Roberto do Lago, orient. II. IPT. Coordenadoria de Ensino Tecnológico III. Título

17-04

CDU 666.97(043)

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, responsável pelo meu crescimento profissional e que me forneceu o apoio necessário para o desenvolvimento deste trabalho. Aos colegas, professores, engenheiros pesquisadores, técnicos, auxiliares e funcionários administrativos, sem os quais, seria impossível a realização deste trabalho.

Ao Professor Doutor Paulo Helene, (me lembro com carinho, do início da minha carreira quando, já com inconfundível maestria, me ensinou a amar os mistérios da tecnologia de concreto), pela sua brilhante participação como meu orientador, me conduzindo e motivando sempre durante a realização deste trabalho, que acredito se presta a colaborar para o melhor entendimento de todos, quanto às questões que envolvem o tema.

Aos Professores Doutores, Alessandra Lorenzetti de Castro e Cláudio Sbrighi Neto, que tiveram uma participação não menos importante no meu crescimento pessoal e profissional, por participarem das bancas de qualificação e apresentação final desta dissertação, enobrecendo-as.

À PhD Engenharia, empresa que aprendi a amar com a mesma intensidade que amei o IPT, durante os muitos anos que ali trabalhei. A todos os seus Diretores e funcionários o meu sincero muito obrigado, não só pelos ensaios realizados para esta pesquisa, mas principalmente pela convivência e pelo carinho com os quais me receberam.

À empresa de serviços de concretagem Engemix, do Grupo Votorantim, pelas dosagens e moldagens dos copos de prova.

À Dona Alda, que mesmo me olhando de outra dimensão, tenho certeza, está feliz em me ver aqui, hoje.

Aos meus queridos e amados filhos, Gabriel e Daniel, pelo companheirismo e carinho.

Em especial à minha esposa Rosana, por sempre transmitir com carinho o seu importante incentivo e por ter a compreensão exata e necessária para entender todas as dificuldades que encontrei durante todo este período e, que muitas vezes roubaram o nosso tempo de convívio. Amo você, obrigado por existir.

*“Cuando creas que tú tienes un sueño imposible....
Déjate llevar por la coreografía de tu alma....
A tus sueños dales fantasías....
Tu felicidad no es una meta.... sino un trayecto al andar...”*

Castorino, Toto, Rojas – Junio 2006.

RESUMO

Apesar de ser um parâmetro tradicional de cálculo das estruturas de concreto, ser fundamental na consideração dos estados limites de serviço ELS das estruturas de concreto e, de estar considerado na norma de desempenho de edificações, ABNT NBR 15575 (2013) no item limite de deformações, o módulo de elasticidade do concreto ainda é de difícil previsão dando margem a controvérsias. Dois pontos, frequentemente alvo de polêmicas são a influência da natureza dos agregados e as dificuldades encontradas pelos laboratórios para realização e entrega dos resultados destes ensaios. Visando contribuir no esclarecimento desses aspectos, foi planejado um vasto programa experimental, onde se estudaram três famílias de concreto, com cinco relações água/cimento, produzidas com agregados graúdos de naturezas petrográficas distintas e comumente comercializados e disponíveis no estado de São Paulo, como diabásio, granito e calcário. Foram assim avaliados, comparativamente, o método de ensaio estático para determinação dos módulos de elasticidade e deformação aos métodos dinâmicos de determinação do módulo de elasticidade, por vibração acústica e por propagação de ondas ultrassônicas, em resistências à compressão que variaram de 20 MPa a 80 MPa. Em conformidade com a bibliografia consultada, os resultados obtidos por ensaios denominados de módulo dinâmico, foram superiores aos resultados obtidos em ensaios denominados de módulo estático. Contrariamente ao previsto pelo modelo prescrito na ABNT NBR 6118 (2014), os resultados obtidos de módulo de elasticidade de concretos com agregado calcário, não foram inferiores aos de concreto com granito. A influência da resistência à compressão do concreto também se mostrou significativa e superior à influência da natureza dos agregados. A repetitividade dos resultados foi avaliada estatisticamente e os resultados mostraram-se adequados.

Palavras chave: Ensaios em concreto; módulo de elasticidade; ensaios estáticos; ensaios dinâmicos; ensaios comparativos.

ABSTRACT

Contribution to the studies of the modulus of elasticity of concrete

In spite of being a conventional parameter in concrete structure design, of its relevance when considering a concrete structure's service limit, and of the fact that ABNT NBR 15575's limits of deformation takes it into account, the young's module of concrete is considerably hard to predict, often causing controversy. Two of the key discussion points are the impact of the aggregate's attributes and the significant troubles faced by laboratories to carry and report those test. Aiming to better understand those aspects, a broad experimental plan was developed, in which three concrete families were studied, each with five different water to cement ratios, mixed with different coarse aggregates commonly employed in constructions in São Paulo. Each of those aggregates, such as granite, diabase and limestone, presented distinct petrographic qualities. Through the aforementioned program, the static test method of determining the Young's module and the deformation module was compared to the dynamic test methods, that is, the acoustic vibration method and the ultrasonic waves' method. Such comparison used concrete samples whose compression strength ranged from 20 to 80 MPa. In accordance with the referenced bibliography, the results from dynamic tests were higher than the ones obtained through static measuring. Despite the model described in ABNT NBR 6118 (2014), however, the Youngs' modules observed in concrete samples mixed with limestone were not smaller than the ones observed in the granite samples. Also, the results showed that, in concrete, the resistance to compression is a more decisive factor than the aggregate used. The result's recurrence was statistically evaluated and the results proved themselves adequate.

Keywords: Tests in concrete; Young's module; static tests; dynamic tests; comparative tests.

Lista de Ilustrações

Figura 1– Desvios padrões - Programa Interlaboratorial do INMETRO.	25
Figura 2 – Coeficientes de variação - Programa Interlaboratorial do INMETRO.	25
Figura 3 – Valores para módulo de elasticidade tangente inicial, conforme proposto pelos diferentes estimadores.....	33
Figura 4 – Valores para módulo de deformação secante, conforme proposto pelos diferentes estimadores.	34
Figura 5 – Fluxograma de atividades do programa experimental.....	50
Figura 6 – Distribuição granulométrica da areia de quartzo.	61
Figura 7 – Resultado – Reatividade potencial, método acelerado.	61
Figura 8 – Distribuição granulométrica da areia artificial de calcário.....	62
Figura 9 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo composto utilizado.	64
Figura 10 – Distribuição granulométrica da brita de diabásio.....	66
Figura 11 – Resultado – Reatividade potencial, método de barras, acelerado.	66
Figura 12 – Verificação da mitigação da reatividade potencial, método de barras, acelerado.....	67
Figura 13 – Distribuição granulométrica da brita de granito.	68
Figura 14 – Resultado – Reatividade potencial, método de barras, acelerado.	68
Figura 15 – Verificação da mitigação da reatividade potencial, método de barras, acelerado.....	69
Figura 16 – Distribuição granulométrica da brita de calcário.....	70
Figura 17 – Resultado – Reatividade potencial, método de barras acelerado.	71
Figura 18 – Índice de consistência médio, determinado.	79
Figura 19 – Massas específicas aparentes, médias determinadas.	79
Figura 20 – Teor de ar aprisionado determinado e limites definidos por Geyer e De Sá, para concretos convencionais, (2006).	80
Figura 21– Teor de ar aprisionado teórico.	80
Figura 22 – Teor de ar aprisionado determinado e teórico.....	81
Figura 23 – Consumo de cimento médio.....	81
Figura 24 – Resultados médios de absorção de água e limites propostos por Helene (1983).....	83
Figura 25 – Resultados médios do índice de vazios permeáveis e limites propostos por Helene (1993).	84
Figura 26 – Resultados médios de massa específica seca e limites da ABNT NBR 6118 (2014).....	89
Figura 27 – Resultados médios de massa específica saturada.	89
Figura 28 – Resultados médios de massa específica real e valor sugerido pela ABNT NBR 6118 (2014), para projeto, 2,40 kg/dm ³	90
Figura 29 – Resistências à compressão médias.	92
Figura 30 – Resultados médios do módulo de elasticidade, E_{ci} 0,3 f_c versus relações água cimento. Todas as naturezas petrográficas estudadas.	96
Figura 31 – Resultados médios do módulo de elasticidade, E_{ci} 0,3 f_c , versus resistência à compressão. Todas as naturezas petrográficas estudadas.	97

Figura 32 – Resultados médios do módulo de deformação, $E_{cs} 0,3 f_c$, versus relações água/cimento. Todas as naturezas petrográficas estudadas.....	99
Figura 33 – Resultados médios do módulo de deformação, $E_{CS} 0,3 f_c$, versus resistência à compressão. Todas as naturezas petrográficas estudadas.....	100
Figura 34 – Resultados médios do módulo de elasticidade dinâmico, E_d Ultrassom versus relações água cimento. Todas as naturezas petrográficas estudadas.	103
Figura 35 – Resultados médios do módulo de elasticidade dinâmico, E_d Ultrassom versus resistência à compressão. Todas as naturezas petrográficas estudadas....	103
Figura 36 – Resultados médios do módulo de elasticidade dinâmico, E_d Impulso L versus relações água/cimento. Todas as naturezas petrográficas estudadas.	106
Figura 37 – Resultados médios do módulo de elasticidade dinâmico, E_d Impulso L versus resistência à compressão. Todas as naturezas petrográficas estudadas....	107
Figura 38 – Resultados médios do módulo de elasticidade dinâmico, E_d Impulso T versus água/cimento. Todas as naturezas petrográficas estudadas.....	109
Figura 39 – Resultados médios do módulo de elasticidade dinâmico, E_d Impulso T versus resistência à compressão. Todas as naturezas petrográficas estudadas....	110
Figura 40 – Valores do módulo de elasticidade, $E_{ci} 0,3 f_c$, calculados por regressão, para as classes de resistência do concreto C20 a C80.....	114
Figura 41 – Valores do módulo de deformação, $E_{cs} 0,3 f_c$, calculados por regressão, para as classes de resistência do concreto C20 a C80.....	114
Figura 42 – Valores do módulo de elasticidade dinâmico, E_d Ultrassom, calculados por regressão, para as classes de resistência do concreto C20 a C80.....	115
Figura 43 – Valores do módulo de elasticidade dinâmico, E_d Impulso L, calculados por regressão, para as classes de resistência do concreto C20 a C80.....	115
Figura 44 – Valores do módulo de elasticidade dinâmico, E_d Impulso T, calculados por regressão, para as classes de resistência do concreto C20 a C80.....	116
Figura 45 – Valores do módulo de deformação, $E_{cs} 0,3 f_c$, comparados aos resultados do módulo de elasticidade, $E_{ci} 0,3 f_c$, calculados por regressão, para as classes de resistência do concreto C20 a C80, agregado graúdo de diabásio.....	120
Figura 46 – Valores do módulo de deformação, $E_{cs} 0,3 f_c$, comparados aos resultados do módulo de elasticidade, $E_{ci} 0,3 f_c$, calculados por regressão, para as classes de resistência do concreto C20 a C80, agregado graúdo de granito.	120
Figura 47 – Valores do módulo de deformação, $E_{cs} 0,3 f_c$, comparados aos resultados do módulo de elasticidade, $E_{ci} 0,3 f_c$ calculados por regressão, para as classes de resistência do concreto C20 a C80, agregado graúdo de calcário.....	121
Figura 48 – Valores dos módulos de elasticidade dinâmicos comparados aos resultados do módulo de elasticidade, $E_{ci} 0,3 f_c$, calculados por regressão, para as classes de resistência do concreto C20 a C80, agregado graúdo de diabásio.	122
Figura 49 – Valores dos módulos de elasticidade dinâmicos comparados aos resultados do módulo de elasticidade, $E_{ci} 0,3 f_c$, calculados por regressão, para as classes de resistência do concreto C20 a C80, agregado graúdo de granito.	123
Figura 50 – Valores dos módulos de elasticidade dinâmicos comparados aos resultados do módulo de elasticidade, $E_{ci} 0,3 f_c$, calculados por regressão, para as classes de resistência do concreto C20 a C80, agregado graúdo de calcário.	123

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Valores de módulo conforme os diversos estimadores apresentados. Valores sem os fatores propostos para correções referentes à natureza petrográfica dos agregados graúdos.....	33
Tabela 2– Traços de concreto dosados com agregado graúdo de diabásio.	50
Tabela 3 - Traços de concreto dosados com agregado graúdo de granito.	51
Tabela 4 – Traços de concreto dosados com agregado graúdo de calcário.	51
Tabela 5 – Ensaio químicos.	53
Tabela 6 – Ensaio físicos e mecânicos.	54
Tabela 7 – Ensaio de caracterização dos agregados.....	55
Tabela 8 – Caracterização dos aditivos.	55
Tabela 9 – Ensaio de caracterização do concreto no estado fresco.	56
Tabela 10 – Ensaio de caracterização do concreto endurecido.	56
Tabela 11 – Resultados da quantidade total do material passante na # 75 µm, por traço.	64
Tabela 12 – Parâmetros do traço e suas propriedades no estado fresco, concretos com agregado graúdo de diabásio.	73
Tabela 13 – Consumos e parâmetros calculados de acordo com a ABNT NBR 9833 (2009), concretos com agregado graúdo de diabásio.	74
Tabela 14 – Parâmetros do traço e suas propriedades no estado fresco, concretos com agregado graúdo de granito.	75
Tabela 15 – Consumos e parâmetros calculados de acordo com a ABNT NBR 9833 (2009), concretos com agregado graúdo de granito.....	76
Tabela 16 – Parâmetros do traço e suas propriedades no estado fresco, concretos com agregado graúdo de calcário.	77
Tabela 17 – Consumos e parâmetros calculados de acordo com a ABNT NBR 9833 (2009), concretos com agregado graúdo de calcário.	78
Tabela 18 – Propriedades no estado endurecido, concretos com agregado graúdo de diabásio.	86
Tabela 19 – Propriedades no estado endurecido, concretos com agregado graúdo de granito.	87
Tabela 20 – Propriedades no estado endurecido, concretos com agregado graúdo de calcário.....	88
Tabela 21 – Avaliação estatística dos ensaios à compressão.	91
Tabela 22 – Resistência à compressão média, concretos com agregado graúdo de diabásio.	92
Tabela 23 – Resistência à compressão média, concretos com agregado graúdo de granito.	93
Tabela 24 – Resistência à compressão média, concretos com agregado graúdo de calcário.....	93
Tabela 25 – Resultados médios, (GPa), do módulo de elasticidade, E_{ci} $0,3 f_c$, desvios padrões, coeficientes de variação e semelhança estatística. Agregado graúdo de diabásio.....	95

Tabela 26 – Resultados médios, (GPa), do módulo de elasticidade, $E_{ci} 0,3 f_c$, desvios padrões, coeficientes de variação e semelhança estatística. Agregado graúdo de granito.	95
Tabela 27 – Resultados médios, (GPa), do módulo de elasticidade, $E_{ci} 0,3 f_c$, desvios padrões, coeficientes de variação e semelhança estatística. Agregado graúdo de calcário.....	96
Tabela 28 – Resultados médios, (GPa), do módulo de deformação, $E_{cs} 0,3 f_c$, desvios padrões, coeficientes de variação e semelhança estatística. Agregado graúdo de diabásio.....	98
Tabela 29 – Resultados médios, (GPa), do módulo de deformação, $E_{cs} 0,3 f_c$, desvios padrões, coeficientes de variação e semelhança estatística. Agregado graúdo de granito.	98
Tabela 30 – Resultados médios, (GPa), do módulo de deformação, $E_{cs} 0,3 f_c$, desvios padrões, coeficientes de variação e semelhança estatística. Agregado graúdo de calcário.....	99
Tabela 31 – Resultados médios, (GPa), do módulo de elasticidade dinâmico, E_d ultrassom, desvios padrões, coeficientes de variação e semelhança estatística. Agregado graúdo de diabásio.	101
Tabela 32 – Resultados médios, (GPa), do módulo de elasticidade dinâmico, E_d ultrassom, desvios padrões, coeficientes de variação e semelhança estatística. Agregado graúdo de granito.....	101
Tabela 33 – Resultados médios, (GPa), do módulo de elasticidade dinâmico, E_d ultrassom, desvios padrões, coeficientes de variação e semelhança estatística. Agregado graúdo de calcário.	102
Tabela 34 – Resultados médios, (GPa), do módulo de elasticidade dinâmico, E_d Impulso L, desvios padrões, coeficientes de variação e semelhança estatística. Agregado graúdo de diabásio.	104
Tabela 35 – Resultados médios, (GPa), do módulo de elasticidade dinâmico, E_d Imulso L, desvios padrões, coeficientes de variação e semelhança estatística. Agregado graúdo de granito.	105
Tabela 36 – Resultados médios, (GPa), do módulo de elasticidade dinâmico, E_d Imulso L, desvios padrões, coeficientes de variação e semelhança estatística. Agregado graúdo de calcário.....	105
Tabela 37 – Resultados médios, (GPa), do módulo de elasticidade dinâmico, E_d Impulso T, desvios padrões, coeficientes de variação e semelhança estatística. Agregado graúdo de diabásio.	108
Tabela 38 – Resultados médios, (GPa), do módulo de elasticidade dinâmico, E_d Impulso T, desvios padrões, coeficientes de variação e semelhança estatística. Agregado graúdo de granito.....	108
Tabela 39 – Resultados médios, (GPa), do módulo de elasticidade dinâmico, E_d Impulso T, desvios padrões, coeficientes de variação e semelhança estatística. Agregado graúdo de calcário.	109

Tabela 40 - Equações polinomiais de regressão adotadas, coeficientes de determinação e valores estimados de módulo, estático ou dinâmico, para cada classe de resistência, ABNT NBR 8953 (2015). (<i>Continua</i>).....	112
Tabela 41 - Resumo das variações entre os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade, $E_{ci} 0,3 f_c$, comparados aos obtidos para os ensaios realizados em concretos com agregado graúdo de granito.	117
Tabela 42 - Resumo das variações anotadas entre os resultados dos ensaios de módulo de deformação, $E_{cs} 0,3 f_c$, comparados aos obtidos para os ensaios realizados em concretos com agregado graúdo de granito.....	117
Tabela 43 - Resumo das variações anotadas entre os ensaios de módulo de elasticidade dinâmico, E_d Ultrassom, comparados aos obtidos para os ensaios realizados em concretos com agregado graúdo de granito.....	118
Tabela 44 - Resumo das variações anotadas entre os ensaios de módulo de elasticidade dinâmico, E_d Impulso L, comparados aos obtidos para os ensaios realizados em concretos com agregado graúdo de granito.....	118
Tabela 45 - Resumo das variações anotadas entre os ensaios de módulo de elasticidade dinâmico, E_d Impulso T, comparados aos obtidos para os ensaios realizados em concretos com agregado graúdo de granito.....	119
Tabela 46 - Resumo das variações anotadas entre os resultados dos ensaios de módulo de deformação, $E_{cs} 0,3 f_c$, comparados aos resultados dos ensaios de módulo de elasticidade, $E_{ci} 0,3 f_c$	121
Tabela 47 - Resumo das variações anotadas entre os resultados dos ensaios dos módulos de elasticidade dinâmicos quando comparados aos resultados dos ensaios de módulo de elasticidade estático, $E_{ci} 0,3 f_c$, concretos dosados com agregados graúdos de diabásio.	124
Tabela 48 - Resumo das variações anotadas entre os resultados dos ensaios dos módulos de elasticidade dinâmicos quando comparados aos resultados dos ensaios de módulo de elasticidade estático, $E_{ci} 0,3 f_c$, concretos dosados com agregados graúdos de granito.	124
Tabela 49 - Resumo das variações anotadas entre os resultados dos ensaios dos módulos de elasticidade dinâmicos quando comparados aos resultados dos ensaios de módulo de elasticidade estático, $E_{ci} 0,3 f_c$, concretos dosados com agregados graúdos de calcário.	125
Tabela 50- Resumo geral das variações anotadas entre os resultados dos ensaios dos ensaios de módulo quando comparados aos resultados dos ensaios de módulo de elasticidade estático, $E_{ci} 0,3 f_c$. Todas as naturezas petrográficas.....	125
Tabela 51 - Resumo das variações nos resultados dos ensaios dinâmicos propostas por Almeida (2008) e Mehta e Monteiro (2014).....	126

Lista de Abreviaturas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

ACI - *American Concrete Institute*

CP – Cimento Portland

CV – Coeficiente de variação

EUROCODE - *European Committee for Standardization*

DP – Desvio padrão

FIB Model Code - *The International Federation for Structural Concrete. Comite Euro-international du Beton*

GPa - Gigapascal

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

ISO - *International Standard Organization*

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S. A.

MPa – Megapascal

NBR – Norma Brasileira

RBLE – Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaios

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Definições	16
1.2 Importância do tema.....	17
1.3 Objetivos da pesquisa	17
1.4 Estrutura do trabalho	18
1.5 Limitações do estudo	19
2 MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO	20
2.1 Fatores que influenciam na sua determinação.....	20
2.2 Como estimar	28
2.2.1 ABNT NBR 6118 (2014).....	29
2.2.2 <i>fib</i> (CEB-FIP) Model Code (2013)	30
2.2.3 Eurocode2 (2004).....	31
2.2.4. ACI 318 (2011)	32
2.3 Como medir	34
2.3.1 Métodos estáticos	34
2.3.1.1 ABNT NBR 8522 (2008).....	35
2.3.1.2 ASTM 469 (2014).....	38
2.3.1.3 ISO EN 1920 -10 (2010).....	39
2.3.2 Métodos dinâmicos	40
2.3.2.1 Métodos da tomada da velocidade do pulso ultrassônico.....	40
2.3.2.1.1 ABNT NBR 8802 (2013).....	41
2.3.2.1.2 ABNT NBR 15630 (2008)	43
2.3.2.1.3 ASTM C597 (2016).....	44
2.3.2.2 Método da aquisição da resposta acústica provocada por impulso, ASTM 215 (2014) e ASTM E1876 (2015)	45
2.4 Correlações	47
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	48
3.1 Planejamento.....	48
3.2 Caracterizações dos materiais utilizados.	52
3.2.1 Cimento Portland.....	53
3.2.2 Agregados	54
3.2.3 Aditivos.....	55

3.3	Caracterização do concreto no estado fresco.....	56
3.4	Caracterização do concreto no estado endurecido	56
3.5	Apresentações, tratamento e análise dos resultados.....	57
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	59
4.1	Caracterização dos materiais constitutivos	59
4.1.1	Cimento Portland CP II E 40	59
4.1.2	Agregado miúdo	60
4.1.2.1	Areia de quartzo	60
4.1.2.2	Areia artificial de calcário.....	62
4.1.2.3	Agregado miúdo composto.....	63
4.1.3	Agregados graúdos	65
4.1.3.1	Agregado graúdo de diabásio	65
4.1.3.2	Agregado graúdo de granito	67
4.1.3.3	Agregado graúdo de calcário	69
4.1.4	Aditivos.....	71
4.2	Caracterização dos concretos estudados.....	71
4.2.1	Concreto no estado fresco.	72
4.2.2	Concreto no estado endurecido.	82
4.2.2.1	Índices físicos.....	82
4.2.2.2	Resistência à compressão.	90
4.2.2.3	Módulos estáticos e dinâmicos.....	94
4.2.2.3.1	Módulo estático de elasticidade, $E_{ci} 0,3 f_c$	94
4.2.2.3.2	Módulo estático de deformação, $E_{cs} 0,3 f_c$	97
4.2.2.3.3	Módulo de elasticidade dinâmico através da velocidade de propagação ultrassônica, E_d Ultrassom.....	100
4.2.2.3.4	Módulo de elasticidade dinâmico através do estímulo por Impulso longitudinal, E_d Impulso L.....	104
4.2.2.3.5	Módulo de elasticidade dinâmico através do estímulo por impulso transversal, E_d Impulso T.....	107
4.3	Comparações dos resultados de módulo por classe de resistência	110
5	CONCLUSÕES	127
5.1	Quanto aos resultados obtidos.....	127
5.2	Quanto ao investimento e retorno.....	128
5.3	Sugestões para continuidade da pesquisa.....	129

5.4 Transferência ao meio técnico	129
REFERÊNCIAS.....	130
ANEXOS	139

1 INTRODUÇÃO

As propriedades mecânicas do concreto, mais comumente controladas por ensaios específicos, dependendo da sua aplicação, são, além da sua resistência à compressão axial, parâmetro obrigatório utilizado para aceite definitivo de uma estrutura de acordo com a ABNT NBR 6118 (2014), sua resistência à tração e, mais recentemente, o seu módulo de elasticidade, devido principalmente à evolução das resistências dos concretos que mudaram os padrões construtivos e arquitetônicos até então praticados, Melo Neto e Helene (2002); Martins (2008).

Atentos a esta necessidade do mercado, no Brasil, pesquisadores da área de tecnologia de concreto, tem se desdobrado em estudar a melhor forma de determinar os valores dos módulos, estáticos ou dinâmicos, buscando aumentar a confiabilidade dos resultados obtidos e a eficiência dos laboratórios. Dentre estes pesquisadores nacionais, destacam-se Dal Molin (1995), Andrade *et al* (1997), Helene (1998), Cunha (2000), Costa e Prado (2001), Leite (2001), Melo Neto e Helene (2002), Helene (2002), Silva (2003), Farias *et al* (2004), Ferreira *et al* (2004), Regis (2004), Bilesky e Tango (2005), Garcia (2005), Jacintho e Giongo (2005), Lima (2005), Nunes (2005), Oliveira (2005), Shehata (2005), Gonçalves Jr. *et al* (2006), Pacheco (2006), Prado (2006), Arndt (2007), Cupertino *et al* (2007; 2008), Montija (2007), D'avila (2007), Silva (2007), Martins (2008), Vieira *et al* (2008), Barbosa (2009), Borges (2009), Vasconcelos e Guiammusso (2009), Almeida *et al* (2010), Ishikawa (2010), Pinheiro *et al* (2010), Moraes (2012), Araújo (2014), Pacheco *et al* (2014) e, mais recentemente Haach *et al* (2015).

Esta dissertação, inserida no âmbito da tecnologia dos materiais de construção civil, foi idealizada especificamente com o objetivo contribuir na busca de um procedimento de ensaio mais simples e acessível, que forneça resultados precisos e com mais rapidez aos nossos construtores e projetistas para que estes possam idealizar e executar seus projetos com maior segurança e economia.

1.1 Definições

Por definição módulo de elasticidade ou módulo de Young é a razão entre uma tensão aplicada sobre um corpo e a deformação nele verificada, Calister (2008). Os materiais homogêneos, segundo o físico inglês Robert Hooke, mantém certa proporcionalidade entre a força aplicada e a deformação verificada. Esta teoria, que ficou conhecida como “Lei de Hooke”, correlaciona à carga aplicada (F) sobre determinado material, a sua deformação (x), estabelecendo o que ficou conhecido como constante de proporcionalidade (k):

$$F = k * x$$

Passado um século, em 1802, o médico e físico Thomas Young, nascido em 1773, dando continuidade aos estudos desenvolvidos por Hooke, foi o primeiro a estabelecer o conceito de módulo de elasticidade. No Século XX, os estudos de comportamento elástico dos materiais seguiram conhecidos como Teoria da Elasticidade.

Fazendo uma análise da aplicação desta definição, voltada para o material concreto, dadas às características particulares deste material que é composto de vários outros materiais, naturais ou não, e onde cada um destes tem seu módulo de elasticidade distinto, dever-se-ia sempre ser adotada, referindo-se a propriedade deste novo material assim composto, a expressão: “módulo de deformação” dada a não linearidade das suas deformações com as tensões aplicadas, no lugar de: “módulo de elasticidade”, uma vez que esta é uma propriedade característica dos materiais homogêneos, Vasconcelos e Guiammusso (2009).

Por sua vez a norma brasileira ABNT NBR 6118 (2014) denomina esta grandeza de duas formas: “Módulo de Elasticidade, E_{ci} ” e de “Modulo de deformação secante, E_{cs} ”, determinado de acordo com o ensaio realizado conforme a ABNT NBR 8522 (2007). Esta norma, que define a metodologia do ensaio estático, denomina de “Módulo de Elasticidade ou Módulo de deformação tangente inicial, E_{ci} ”, quando esta grandeza é determinada de acordo com o seu Item 6.2.2, com carregamentos e descarregamentos prévios do corpo de prova, simulando uma estrutura em utilização, sendo então, o seu módulo elasticidade, calculado a partir da inclinação de uma reta tangente imaginária, traçada paralela à reta secante construída com os dados da curva tensão-deformação obtida no ensaio. O “Módulo de deformação secante, E_{cs} ”, é o coeficiente angular da reta secante a curva tensão-deformação

obtida sem a escorvação prévia do corpo de prova, simulando uma estrutura no seu primeiro carregamento.

Neste trabalho, para apresentação dos resultados foram adotadas aos ensaios estáticos, de acordo com os critérios já descritos, as expressões “Módulo de elasticidade” e “Módulo de deformação”, respectivamente para $E_{ci} 0,3 f_c$ e $E_{cs} 0,3 f_c$. Aos ensaios dinâmicos, E_d , preferiu-se adotar a expressão, “Módulo de elasticidade dinâmico”, conforme ABNT NBR 15630 (2008), seguido da tecnologia adotada para sua obtenção. De acordo com Mehta e Monteiro (2014) e Neville (2016), os módulos de elasticidade determinados por métodos dinâmicos correspondem a uma deformação instantânea muito pequena e estes resultados assim se assemelham aos resultados do módulo de elasticidade tangente a inicial, $E_{ci} 0,3 f_c$.

1.2 Importância do tema

No Brasil, o módulo de elasticidade do concreto é determinado através do ensaio realizado conforme os procedimentos estabelecidos pela norma brasileira ABNT NBR 8522 (2007), tomando-se medidas de deformação, com equipamentos elétrico-eletrônicos ou mecânicos, diretamente na superfície do corpo de prova, durante o ensaio estático à compressão. A especificação, por parte dos projetistas de estruturas de concreto, do módulo de elasticidade do concreto como parâmetro de aceitação de algumas estruturas, tem estimulado discussões quanto a melhor forma de avaliar e determinar esta importante propriedade do material.

Justifica-se então a busca de um procedimento para determinação desta importante grandeza, com operações mais simplificadas e menos suscetíveis a erros sistemáticos, que sejam de baixo custo e principalmente que não sofram tantas interferências de operação, que geram aqueles erros conhecidos como aleatórios, responsáveis por grande parte das incertezas incorporadas aos resultados obtidos.

1.3 Objetivos da pesquisa

O objetivo geral deste trabalho é contribuir com os estudos realizados para obtenção do módulo de elasticidade do concreto, comparando aqui os resultados de ensaios realizados por um procedimento já normalizado de determinação do módulo de elasticidade dinâmico do concreto, quando estimulado por Impulso, ASTM C-215 (2014) e ASTM C 1876 (2015), e, os resultados dos ensaios realizados embasados

na ABNT NBR 15630 (2008), por tomada de medida da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas aos resultados obtidos com a utilização dos procedimentos de ensaio estático, consagrado, e de uso corrente no Brasil, para determinação do módulo de elasticidade, $E_{ci} 0,3 f_c$, conforme estabelecido na norma ABNT NBR 8522 (2007). Como objetivos específicos, serão comparados a estes resultados de módulo de elasticidade os resultados dos ensaios de determinação do módulo de deformação $E_{cs} 0,3 f_c$ e, também será observada a influência da natureza petrográfica do agregado graúdo nestes resultados.

1.4 Estrutura do trabalho

Para alcançar o objetivo, deste trabalho, foi proposta pelo autor a seguinte estrutura:

- Capítulo 1 – Introdução.

Este capítulo tem caráter introdutório ao tema. Apresenta o objetivo do trabalho, sua estrutura e a relevância do tema.

- Capítulo 2 – Módulo de elasticidade do concreto.

Neste Capítulo 2, o autor ocupou-se em apresentar os fatores que influenciam na sua determinação, discutidos e analisados por outros pesquisadores, algumas formas de determinação dos módulos estáticos e dinâmicos estabelecidas pela normalização nacional e internacional, os conceitos da metodologia proposta para determinação do módulo de elasticidade dinâmico do concreto e ainda de como podem ser estimados estes valores na inexistência de resultados de ensaios.

- Capítulo 3 – Programa experimental.

O Capítulo 3 é dedicado à apresentação do programa de ensaios elaborado para que se atinjam os objetivos da pesquisa.

Apresentam-se aqui também a metodologia adotada para o tratamento e análise dos resultados obtidos.

- Capítulo 4 – Apresentação e Análise dos Resultados.

Neste Capítulo 4, apresentam-se os resultados dos ensaios realizados para embasamento desta dissertação e sua análise.

- Capítulo 5 – Conclusões.

Apresentam-se aqui as conclusões do trabalho.

- Capítulo 6 – Referências bibliográficas.

São apresentadas aqui as referências bibliográficas utilizadas.

- Capítulo 7 – Anexos.

Apresentam-se aqui os boletins e relatórios de ensaios dos laboratórios com os resultados dos ensaios realizados para esta pesquisa.

1.5 Limitações do estudo

O objetivo deste trabalho é limitado pelo fato de que cada tipo de ensaio só foi realizado por um mesmo laboratório e pelo mesmo operador. A impossibilidade de obter resultados de interlaboratoriais não nos permitiu avaliar a reprodutibilidade dos resultados, impedindo assim a realização de um estudo estatístico mais aprofundado para determinar a confiabilidade dos resultados obtidos ou mesmo para uma validação metrológica do método de ensaio avaliado.

A inexistência de resultados tidos como “verdadeiros” obtidos por meio de ensaios realizados em padrões rastreáveis, a natureza empírica e experimental dos modelos apresentados pela normalização nacional e internacional para estimar o módulo de elasticidade do concreto, dificultam esta tarefa. Lembre-se aqui que estes estimadores que sugerem uma relação direta entre os módulos a resistência à compressão axial e a densidade do concreto, foram estabelecidos a partir de resultados de ensaios realizados em concretos produzidos com agregados graúdos de várias naturezas petrográficas, com diâmetros máximos superiores aos utilizados atualmente, e, com níveis de consistência impossíveis de se adotar nos dias de hoje dada à diversidade de necessidades e formas de aplicação do concreto.

2 MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO

A mudança dos padrões construtivos, ocasionada pelo aumento da resistência e durabilidade do concreto decorrente principalmente pela evolução da indústria do cimento Portland e dos aditivos, acompanhada da evolução dos métodos de cálculo utilizados pelos projetistas, causou mudanças significativas nos padrões arquitetônicos, o que, por sua vez, possibilitaram a construção de edifícios mais altos, vão livres maiores e seções transversais mais esbeltas o que reduziu a inércia dos elementos estruturais, fato esse que aumentou as suas deformações, Melo Neto e Helene (2002).

Portanto, o conhecimento das deformações reais da estrutura de concreto e de outros parâmetros que expressem as condições dos estados limites de serviço, passaram a ter uma importância muito maior para os cálculos das estruturas, o que levou os projetistas a passarem a especificar além da resistência à compressão do concreto desejada também o seu módulo de elasticidade.

Como já destacado anteriormente, o concreto, por ser um material composto não é um material perfeitamente elástico e por esta razão não apresenta um comportamento linear o quer dizer que suas deformações não são diretamente proporcionais às tensões aplicadas e que, estas deformações nem sempre desaparecem por completo, após sua solicitação.

Esta importante característica mecânica do concreto nos obriga então a estimar o seu módulo de elasticidade, por meio do ensaio estático, estabelecendo uma relação entre uma carga aplicada e a deformação em um corpo de prova ou mesmo por meio de ensaios dinâmicos, pela medida da velocidade ultrassônica ou ainda, como ora proposto, pela aquisição das respostas ao estímulo por Impulso, para fornecer aos projetistas subsídios para poderem calcular as tensões do projeto a serem observadas, além de momentos e deflexões em estruturas complexas.

2.1 Fatores que influenciam na sua determinação

Os procedimentos de ensaio para determinação do módulo de elasticidade do concreto, tanto estáticos como dinâmicos, conforme descritos a seguir, são reconhecidamente mais complexos que os métodos de determinação da sua resistência à compressão axial, Montija (2007), o que requer de seus operadores,

muita atenção e cuidado durante todo o processo de determinação desta propriedade.

Mesmo considerando todas estas dificuldades operacionais intrínsecas aos procedimentos necessários para sua obtenção, acredita-se que estes ensaios, quando realizados de acordo com os procedimentos pré-estabelecidos pelas normas, não deveriam ter incorporado aos seus resultados incertezas, oriundas de erros de origem sistemática.

Lembre-se aqui que erros sistemáticos são aqueles erros repetitivos que propagam incertezas nos resultados de todos os ensaios realizados pelo mesmo laboratório durante um determinado período. Estes erros podem ocorrer pelo uso de um equipamento mal calibrado ou com defeito ou ainda alterações na velocidade de aplicação das tensões no corpo de prova, durante o ensaio.

Araújo (2014) concluiu em sua pesquisa, analisando a influência da taxa de carregamento durante o ensaio que, nas diferentes formas de medir esta grandeza, mesmo seguindo-se rigorosamente as recomendações da ABNT NBR 8522 (2007) quanto aos cuidados na execução dos ensaios estáticos, as diferenças entre elas são sim significativas e remete aos profissionais envolvidos nestas avaliações de recebimento da estrutura, a responsabilidade de estabelecer correlações apropriadas aos resultados fornecidos por cada tipo de equipamento utilizado na sua determinação.

Sabe-se que a velocidade de aplicação da carga também interfere significativamente no grau de não linearidade da curva tensão-deformação. A aplicação de cargas instantâneas causa ao corpo de prova apenas uma pequena deformação antes da sua fratura, porém durante o tempo necessário para execução do ensaio de módulo, que pode durar até 30 minutos, a deformação pode aumentar de 15% a 20%, enquanto o seu módulo de elasticidade diminui na mesma proporção, Mehta e Monteiro (2014).

Erros de operação repetitivos como a utilização de equipamentos em condições inapropriadas, como por exemplo, o uso de um relógio comparador em temperaturas altas, diferentes daquela temperatura de calibração, também deve ser considerado como erro sistemático.

No caso dos ensaios dinâmicos, os erros sistemáticos mais comuns de serem observados são a falta de calibração do equipamento e, um laboratorista experiente deve saber como prever e evitar estes erros ou ainda como corrigir sua influência nos seus dados experimentais, de forma fundamentada, a fim de eliminar os seus efeitos.

Já os erros de origem aleatória, que são aqueles imprevisíveis e inerentes ao processo de qualquer experimento, principalmente pela própria natureza humana do operador, devem ser da mesma forma, minimizados com uma política adequada de treinamento. Um bom exemplo disso, para os ensaios estáticos, é o mau posicionamento de um corpo de prova na máquina de ensaio o que poderá trazer distorções, principalmente por que normalmente as medidas de deformações que são tomadas nas suas geratrizes. Já para a os ensaios dinâmicos, os erros mais frequentes podem ser falhas na preparação do substrato onde serão posicionados os transdutores, bem como o posicionamento ou alinhamento destes para coleta dos dados da velocidade da onda de ultrassom que atravessa o concreto. No método de determinação do módulo de elasticidade de estímulo por Impulso, especificamente, o posicionamento correto do corpo de prova e o ajuste dos sensores que fazem a aquisição das vibrações, em resposta ao estímulo imposto, podem alterar os resultados obtidos.

Para o caso específico dos resultados dos ensaios estáticos, considerando que estes erros não possam ser eliminados completamente e nem sempre minimizados, Vasconcelos e Guiammusso (2009) afirmam que estes acabam incorporando uma dispersão da ordem de até 25% aos resultados obtidos no ensaio. A falta de conhecimento destas influências, sejam elas de origem sistemáticas ou aleatórias, dificultam a correta previsão teórica das deformações de uma estrutura ao longo do tempo.

Corroborando com esta análise, os resultados obtidos por Montija (2007) mostraram que a reprodutibilidade dos resultados destes ensaios estáticos realizados até por um mesmo laboratório, independente do equipamento utilizado para realizar estas medidas, nem sempre é confiável o suficiente para garantir que decisões de aceite de estruturas de concreto sejam tomadas corretamente, dada a incerteza do ensaio.

Helene (1998) por sua vez já aconselhava, dadas à quantidade de variáveis envolvidas na determinação do módulo de elasticidade, que estes não fossem analisados individualmente e sim pela utilização de um conjunto de resultados representativos.

É importante lembrar que, para o caso onde o módulo de elasticidade é especificado como parâmetro de aceitação de uma estrutura, ao contrário da normalização aceita em muitos países que têm como referência a norma ACI 318 (2011), que admite uma variação nos resultados obtidos em laboratório de $\pm 20\%$, não existem tolerâncias na norma brasileira, ABNT NBR 6118 (2014), que não considera estas já conhecidas variações nos resultados dos ensaios, deixando a cargo do projetista, a decisão de receber ou não a estrutura que apresente, por exemplo, um módulo de elasticidade obtido no ensaio, 12% abaixo do especificado.

Para conhecer a variação dos resultados obtidos pelos laboratórios de ensaios brasileiros, o INMETRO anualmente promove programas interlaboratoriais nacionais, coordenados pelo Grupo de Trabalho nº 02, instalado no Centro Tecnológico 01, Laboratório de Concreto de Furnas Centrais Elétricas S.A. Estes laboratórios apresentam os resultados de ensaios realizados, de acordo com os procedimentos preconizados pela normalização, obtidos em amostras de um mesmo concreto, moldado e distribuído entre os laboratórios para este fim. Os resultados destes programas interlaboratoriais realizados nos últimos 10 anos apresentaram desvios padrões que variam de 1,5 GPa, com 19 laboratórios participantes em 2006 a 8,6 GPa, em 2011 com 15 laboratórios participantes. Os resultados anuais podem ser verificados no gráfico da Figura 01. O coeficiente de variação no ensaio, avaliado pelo programa somente a partir de 2008, teve como melhor desempenho o índice de 7,01% com participação de 19 laboratórios no ano de 2012 e, o maior valor anotado foi de 23,41% no ano de 2011 com a participação de 15 laboratórios, estes resultados são mostrados no gráfico da Figura 02.

A partir de 2012, a coordenação do programa passou a medir também o desempenho, em separado, dos laboratórios acreditados pela Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaio, RBLE. Um desvio padrão mínimo de 2,4 GPa foi anotado em 2015 com a participação de 11 laboratórios e o máximo de 8,0 GPa em 2012

com a participação de 12 laboratórios. Da mesma forma o coeficiente de variação mínimo de 9,8% foi anotado em 2015 e em 2012 o índice anotado foi de 22,01%.

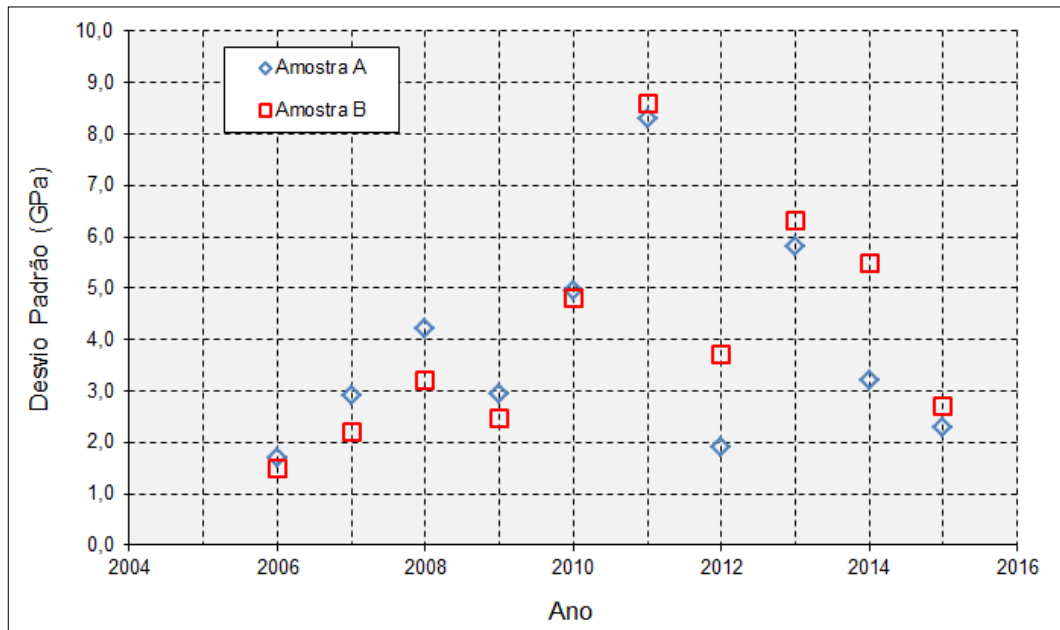
Pode-se entender então que eventuais não conformidades encontradas entre os resultados destes ensaios realizados durante o processo de controle tecnológico do concreto, executado para aceite definitivo destas estruturas, mediante ao atendimento dos valores especificados pelos projetistas, podem ter sua origem não somente qualidade do concreto produzido, mas também nos próprios procedimentos de ensaios, equipamentos ou instrumentação adotados pelos laboratórios de controle, durante a sua execução, Montija (2007).

Além da influencia destes erros operacionais nos resultados dos ensaios realizados para determinação do módulo de elasticidade do concreto, existem outros fatores que podem gerar variações nos resultados, para mais ou para menos, em concretos com mesma resistência à compressão, tais como o diâmetro do corpo de prova ou ainda as condições de cura e umidade dos corpos de prova no momento do ensaio.

A Normalização brasileira, já citada, para realização de ensaios estáticos de módulo de elasticidade, prevê e estabelece que sejam utilizados corpos de prova cilíndricos, com dimensões nominais de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura para realização destes ensaios. Da mesma forma permite também a utilização de outras dimensões, desde que a relação do diâmetro máximo do agregado graúdo represente no máximo a quarta parte do diâmetro do corpo de prova e, respeitando sempre as condições de proporção altura (h) dividido pelo diâmetro (d) de 1,98 a 2,02, conforme indicado pelas normas ABNT NBR 5738 (2208) e a ABNT NBR 7680 (2015).

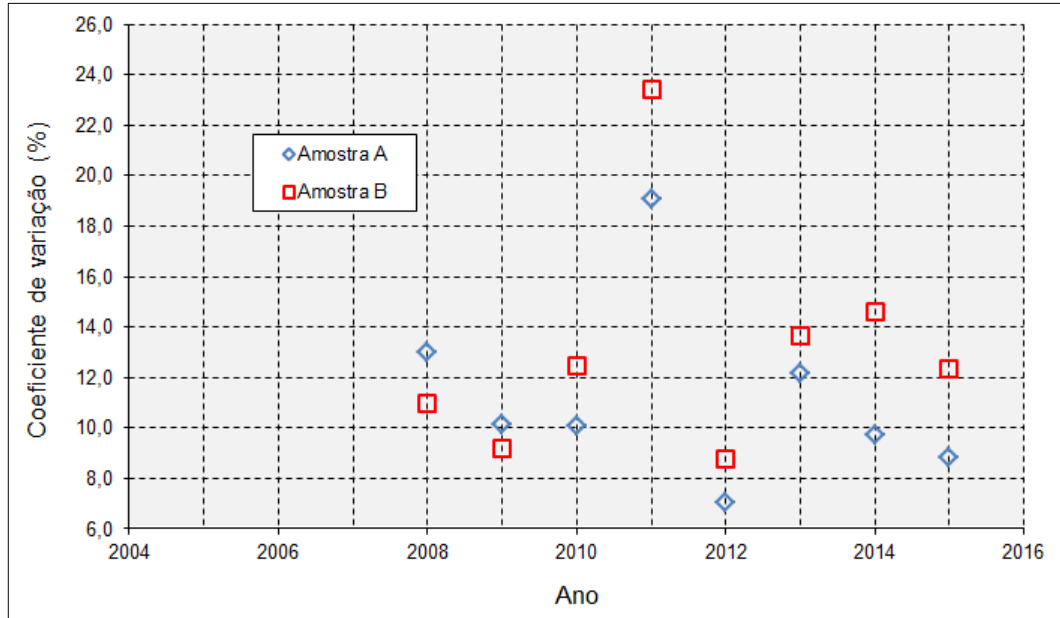
A utilização de corpos de prova com as proporções recomendadas pelas normas é importante de ser observada para evitar que o efeito do atrito provocado pelo contato da seção dos topos dos corpos de prova com os pratos da máquina de ensaio, gerem influências ou esforços transversais que interfiram na precisão das tomadas das deformações. (MARTINS, 2008).

Figura 1– Desvios padrões - Programa Interlaboratorial do INMETRO.



Fonte: Elaborado pelo autor com dados, resultados, dos Programas Interlaboratoriais do INMETRO de 2006 a 2015.

Figura 2 – Coeficientes de variação - Programa Interlaboratorial do INMETRO.



Fonte: Elaborado pelo autor com dados, resultados, dos Programas Interlaboratoriais do INMETRO de 2006 a 2015.

Jacinto e Giongo (2000) mostram que os resultados comparativos de resistência à compressão realizados em corpos de prova de maior dimensão, 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, são menores que os resultados obtidos em

corpos de prova de menor dimensão, 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Justificam, os autores, esta queda nos valores obtidos nos resultados dos ensaios ao maior volume de concreto, com maior volume de vazios, o que torna o corpo de prova mais deformável, e como consequência uma resistência menor, logo um módulo de elasticidade menor.

Fazendo uma análise dos resultados de resistência à compressão do interlaboratorial do INMETRO de ensaios em concreto endurecido de 2007, Cupertino *et al* (2008) também encontraram resultados maiores em corpos de prova de menores dimensões justificando, em suas conclusões, este incremento devido a eficácia do processo de cura, relação do diâmetro do corpo de prova com o tamanho do agregado graúdo, efeito parede ou ainda mudanças na distribuição dos esforços nas geratrizes dos corpos de prova em função da restrição dos topos dos corpos de prova quando em contato com os pratos da máquina de ensaio.

Contrariando o observado nos programas interlaboratoriais, as pesquisas realizadas por Cupertino *et al* (2007), relatam que os corpos de prova com dimensões nominais de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura apresentam resultados menores que os obtidos em corpos de prova com dimensões de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. Estes resultados além de serem menores apresentam maiores dispersões em seus resultados, independente do tipo de extensômetro utilizado.

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), além de outros autores, um dos parâmetros de ensaio que representa uma variável importante no desempenho desta propriedade é o estado de umidade do corpo de prova. Comparando os resultados dos ensaios realizados em corpos de prova ensaiados em condição úmida estes apresentam resultados aproximadamente 15% maiores que os resultados dos corpos de prova ensaiados na condição seca dada a diminuição da deformação em função da incompressibilidade da água acumulada nos poros do concreto.

Assim como estas variações observadas nos resultados dos ensaios, pelos erros ou escolha de dimensão dos corpos de prova ou tipo de cura ora citados, existem outros fatores ligados à composição dos concretos que podem ainda afetar de forma mais significativa, esta grandeza.

Os dois principais componentes do concreto, a pasta de cimento e os agregados graúdos, quando tem analisadas suas deformações em separado, apresentam um comportamento mais linear do que o apresentado pelo concreto. De acordo com Neville (2016) e Mehta e Monteiro (2014) isso ocorre no material composto, devido principalmente à presença de interface na zona de transição estabelecida entre a pasta de cimento e os agregados. O surgimento destas microfissuras nesta zona de transição representa uma redução da área efetiva de resistência às tensões. Isso significa que as tensões na região destas interfaces são maiores do que a tensão nominal, calculada com base na seção do corpo de prova. Esta fissuração altera, assim, a velocidade de deformação em função da tensão normalmente aplicada e aferem características de curva à relação tensão-deformação.

Reconhecidamente a zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado é o elo mais fraco da corrente e a qualidade deste agregado graúdo representada pela sua porosidade, dimensão, forma, textura superficial, granulometria e natureza mineralógica, define o maior ou menor aparecimento destas fissuras. A porosidade do agregado é a mais importante destas características, pois traduz sua rigidez, quanto mais poroso, menor é o módulo de elasticidade do composto, Mehta e Monteiro (2014). Continuando em suas análises indicam que forma e o tamanho do agregado graúdo também tem uma parcela significativa no incremento do módulo de elasticidade uma vez que a superfície específica é reduzida com o aumento do tamanho do agregado, e que, agregados com formas mais regulares ou cúbicos impedem o acúmulo de água na interface o que gera o enfraquecimento da região, devido ao aumento da relação água-cimento.

Arndt (2007) demonstra em seus estudos acréscimos de resistência da ordem de 10% quando os agregados com formas lamelares são substituídos pelos agregados de forma mais regular. Estes ganhos, provenientes da simples escolha da forma do agregado graúdo provocam ajustes nos teores de argamassa no traço do concreto.

Helene (1998) verifica que o aumento da trabalhabilidade do concreto leva ao incremento do consumo de cimento, mantida uma mesma resistência à compressão axial, o que significa um aumento no volume de pasta de cimento no metro cúbico

de concreto e, com isso, ter os seus resultados de módulo de elasticidade reduzidos por excesso de pasta.

De acordo com Mehta e Monteiro (2014) a porosidade do concreto é um dos fatores que influenciam seu módulo de elasticidade, uma vez que a sua densidade é inversamente proporcional a sua porosidade. Concretos produzidos com agregados densos de origem calcária podem chegar a atingir resultados até 20% maiores dos que os resultados dos ensaios de módulo em concretos elaborados com agregados de origem quartzíticas.

Abo-Qudais (2005) identificou em suas observações que o tamanho do agregado utilizado no concreto também se constitui em um fator importante na determinação do módulo dinâmico. Quanto maior o tamanho nominal deste agregado, maior a velocidade das ondas ultrassônicas, o que também é afirmado por Evangelista (2002), ao expor que concreto com agregados de massa específica maior ou com maiores quantidades de agregado, apresentam maior velocidade.

Popovics (2006) afirma que a velocidade de Impulso anotada e para concretos com a mesma resistência e composição, dosados com agregados de diferentes naturezas petrográficas, também é diferente. Já os concretos confeccionados com cascalho arredondado apresentam menor velocidade de Impulso quando comparados com concretos confeccionados com agregado britado de calcário ou granito que, por sua vez, apresentaram valores maiores e intermediários, respectivamente.

2.2 Como estimar

É consenso que o módulo de elasticidade aumenta em função da resistência à compressão e que não existe, porém, um consenso com relação à forma precisa de se estimarem estes valores, a partir dos valores de obtidos nos ensaios de resistência à compressão.

Apresentam-se a seguir os modelos propostos para estimar esta grandeza, de acordo com as normas que regulamentam a execução de projetos de estruturas de concreto, nacionais e internacionais. Os valores obtidos desta forma só devem ser utilizados na execução de projetos quando da ausência de resultados de ensaios comprobatórios dos valores da grandeza.

Não há dúvida quanto à natureza empírica experimental destes modelos e também quanto à necessidade de execução de estudos de dosagem prévios para definição de traços de concreto adequados as necessidades do projeto estrutural, até pelo fato das mudanças já descritas aqui na composição dos concretos atuais.

2.2.1 ABNT NBR 6118 (2014)

De acordo com a especificação brasileira, ABNT NBR 6118 (2014) o módulo de elasticidade do concreto, E_{ci} , deve ser estimado e seus valores utilizados no cálculo de estruturas, somente na ausência de estudos de dosagem, pelas expressões mostradas abaixo, Equações 1 e 2:

Para concretos de f_{ck} de 20 MPa a 50 MPa:

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad (\text{Equação 1})$$

Para concretos f_{ck} de 55 MPa a 90 MPa:

$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{1/3} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

E_{ci} = Módulo de elasticidade, em GPa;

α_E = Fatores de correção de 1,2 para basalto e diabásio; 1,0 para granito e gnaisse; 0,9 para calcário e 0,7 para arenito.

f_{ck} = Resistência característica do concreto, **em MPa**.

Já o módulo de deformação secante (E_{cs}) pode ser estimado a partir do valor obtido para o módulo de elasticidade do concreto (E_{ci}) $0,3 f_{ck}$, pela expressão dada pela Equação 3:

$$E_{cs} = 0,8 + 0,2 \cdot \left(\frac{f_{ck}}{80} \right) \cdot E_{ci} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

E_{cs} = Módulo de deformação secante, em GPa;

E_{ci} = Módulo de elasticidade, em GPa;

2.2.2 fib (CEB-FIP) Model Code (2013)

Para o Comitê Euro-Internacional, o módulo de elasticidade do concreto $E_{ci, 0,4}$ f_{cm} , deve ser estimado para cálculo de estruturas pela expressão, Equação 4:

$$E_{ci} = 21.5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck} + 8}{10} \right)^{1/3} \quad (\text{Equação 4})$$

$$E_{ci}(t) = \exp \left\{ s \cdot \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{0.5} \right] \right\}^{0.5} \cdot E_{ci} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

E_{ci} = Módulo de elasticidade aos 28 dias, em GPa;

$E_{ci}(t)$ = Módulo de elasticidade em idades diferentes que 28 dias;

α_E = Fatores de correção de 1,2 para basalto e diabásio; 1,0 para granito e gnaisse; 0,9 para calcário e 0,7 para arenito.

f_{ck} = Resistência característica do concreto, em MPa.

Já o módulo de deformação secante (E_c) pode ser estimado pela expressão mostrada pela Equação 6:

$$E_c = 0,8 + 0,2 \cdot \left(\frac{f_{ck}}{88} \right) \cdot E_{ci} \quad (\text{Equação 6})$$

E_c = Módulo de deformação secante, em GPa;

E_{ci} = Módulo de elasticidade, em GPa;

f_{ck} = Resistência característica do concreto, em MPa.

2.2.3 Eurocode2 (2004)

De acordo com a especificação do Eurocode2, o módulo de elasticidade do concreto (E_c) $0,4 f_{cm}$, pode ser estimado para calculo de estruturas pelas expressões mostradas abaixo, Equações 7 e 8:

$$E_c = 1,05 \cdot E_{cm} \quad (\text{Equação 7})$$

$$E_{c(t)} = 1,05 \cdot \left(\exp \left\{ \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{0,5} \right] \right\} \right)^{0,3} \cdot E_{cm} \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:

E_c = Módulo tangente de elasticidade do concreto com peso normal, em GPa;

E_{cm} = Módulo secante de elasticidade do concreto, em GPa;

$E_c(t)$ = Módulo de elasticidade em idades diferentes que 28 dias, em GPa;

Já o módulo de deformação secante (E_{cm}) pode ser estimado pelas expressões dadas pelas Equações 9 e 10, abaixo:

$$E_{cm} = 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3} \quad (\text{Equação 9})$$

$$E_{cd} = E_{cm}/1,2 \quad (\text{Equação 10})$$

Sendo:

E_{cm} = Módulo secante de elasticidade do concreto, em GPa;

E_{cd} = Valor de projeto do módulo secante de elasticidade do concreto, em GPa;

f_{cm} = Resistência média do concreto, em MPa;

2.2.4 ACI 318 (2011)

A normalização americana, como já foi dito, adotada em cerca de 50 países em seu Item R19.2.2.1 recomenda que o módulo de elasticidade, E_c a $0,45 \cdot f'_c$, deva ser estimado utilizando-se as seguintes Equações 11 e 12.

Para concretos de massa específica aparente entre 1.440 kg/m³ a 2.560 kg/m³:

$$E_c = \omega_c^{1.5} \cdot 0,043 \cdot f'_c{}^{1/2} \quad (\text{Equação 11})$$

Para concretos de massa específica normal:

$$E_c = 473 \cdot f'_c{}^{1/2} \quad (\text{Equação 12})$$

Onde:

E_c = Módulo de elasticidade, em Gpa;

ω_c = Massa específica aparente do concreto em questão, kg/m³.

f'_c = Resistência à compressão do concreto especificada, em Mpa.

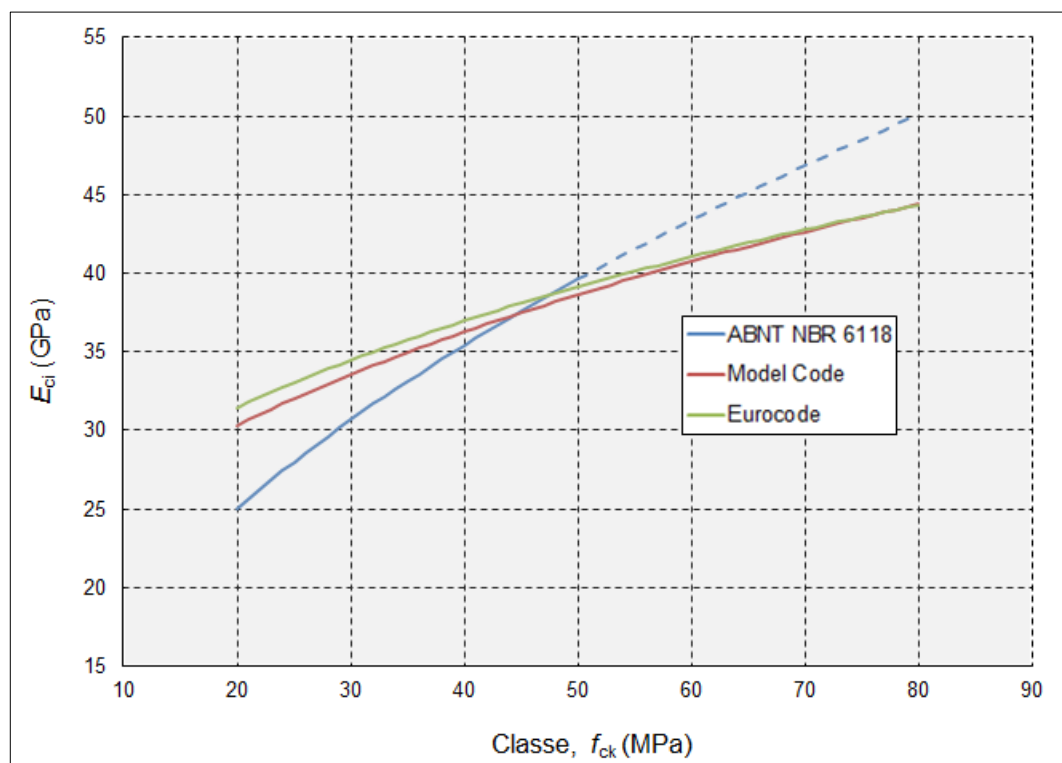
Apresentam-se abaixo, na Tabela 1 e nos gráficos das Figuras 3 e 4, um resumo dos valores de módulo, calculados a partir destes estimadores, sem as correções propostas para as diferentes naturezas petrográficas dos agregados, para as classes de resistências adotadas neste estudo, de acordo com a classificação da ABNT NBR 8953 (2015), f_{ck} de 20 MPa a f_{ck} 80 MPa.

Tabela 1 – Valores de módulo conforme os diversos estimadores apresentados. Valores sem os fatores propostos para correções referentes à natureza petrográfica dos agregados graúdos.

Classe f_{ck} (MPa)	Módulo [GPa]						
	ABNT, $0,3f_c$		<i>fib</i> Model Code, $0,4f_c$		ACI, $0,45f_c$	Eurocode 2, $0,4f_c$	
	Tangente	Secante	Tangente	Secante	Secante	Tangente	Secante
20	25,0	21,3	30,3	26,2	21,2	31,5	30,0
30	30,7	26,8	33,6	29,7	25,9	34,5	32,8
40	35,4	31,9	36,3	33,0	29,9	37,0	35,2
50	39,6	36,6	38,6	36,0	33,5	39,1	37,3
60	41,6	41,6	40,7	38,9	36,7	41,1	39,1
70	43,4	43,4	42,6	41,7	39,6	42,8	40,7
80	45,1	45,1	44,4	44,4	42,3	44,4	42,2

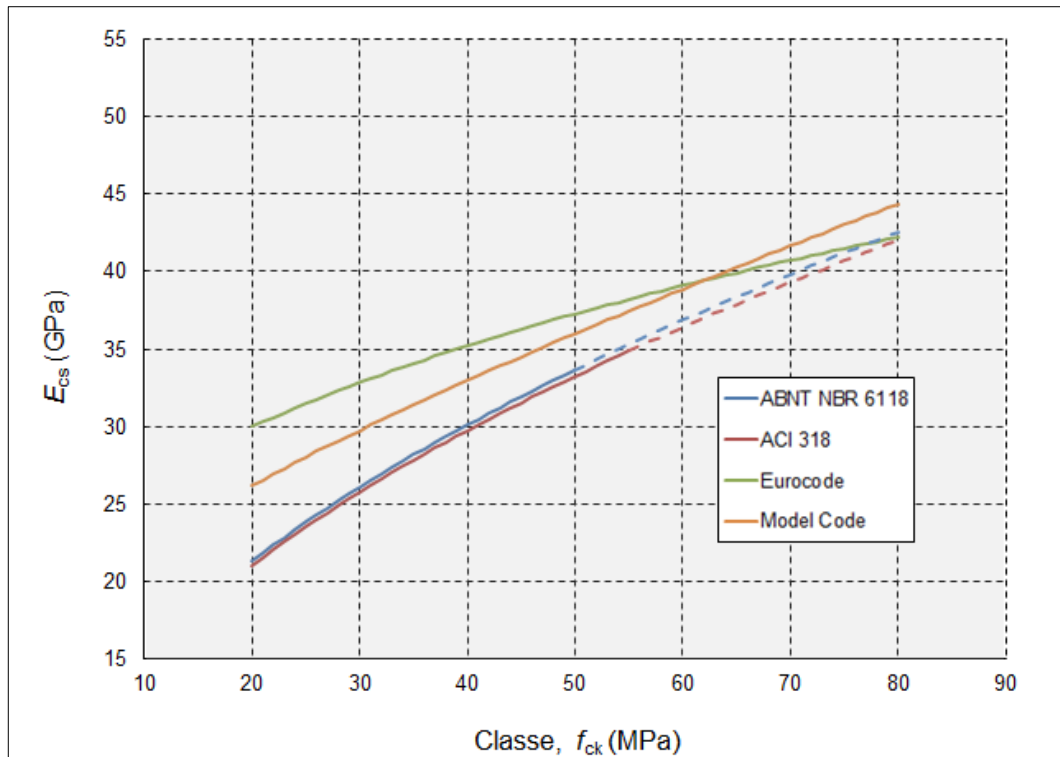
Fonte: Elaborado pelo autor com dados das diferentes especificações.

Figura 3 – Valores para módulo de elasticidade tangente inicial, conforme proposto pelos diferentes estimadores.



Fonte: Elaborado pelo autor com dados das diferentes especificações.

Figura 4 – Valores para módulo de deformação secante, conforme proposto pelos diferentes estimadores.



Fonte: Elaborado pelo autor com dados das diferentes especificações.

2.3 Como medir

Para o controle do valor do módulo de elasticidade, conforme especificado pelos projetistas, obtido através das expressões aqui apresentadas ou dos estudos prévios de dosagem, diversos métodos de ensaio podem ser utilizados. Apresenta-se a seguir algumas das formas mais conhecidas e normalizadas, no Brasil e no exterior, para se determinar esta grandeza do concreto de forma estática e de forma dinâmica.

2.3.1 Métodos estáticos

Os métodos de ensaios estáticos para determinação do módulo de elasticidade do concreto, mais utilizados no mundo e ora apresentados, tem em comum a tomada das deformações do concreto, independente do tipo de equipamento utilizado, elétrico-eletrônico ou mecânico, nas geratrizes dos corpos de prova no terço médio de sua altura. O resultado dos ensaios, necessariamente

destrutivo, é determinado pela divisão das tensões específicas aplicadas no corpo de prova pelas deformações aferidas durante este processo.

2.3.1.1 ABNT NBR 8522 (2008)

Os procedimentos utilizados para realização desta pesquisa foram os preconizados pela ABNT NBR 8522 (2008), que prevê a determinação do módulo de elasticidade tangente a inicial, E_{ci} , em três corpos de prova. Estes corpos de prova, cilíndricos de concreto, deverão ter suas dimensões nominais preferencialmente de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. Devem ser curados em água, de acordo com a ABNT NBR 5738 (2007) até a data do ensaio, quando serão inicialmente posicionados alinhados ao centro da prensa, para perfeita distribuição dos esforços e então submetidos ao processo de escorvação, três carregamentos e descarregamentos sucessivos entre a tensão inicial de 0,5 MPa, caso seja fixada a tensão, ou a tensão referente a deformação específica fixa de 0,000050, e a tensão limite máxima de $0,3 \cdot f_c$, determinada previamente em dois corpos de prova ensaiados à compressão axial, ABNT NBR 5739 (2014), quando então são anotadas as medidas de deformação com precisão mínima $\text{mm} \times 10^{-3}$, milésimos de milímetros. Outras dimensões de corpos de prova poderão ser utilizadas desde que respeitada a condição de que o diâmetro do corpo de prova seja no mínimo quatro vezes o diâmetro máximo do agregado graúdo, principalmente para aqueles casos onde os corpos de prova são preparados a partir de testemunhos extraídos de estruturas existentes.

No seu anexo A, Informativo, a norma prevê a determinação do módulo secante, E_{cs} , a qualquer tensão especificada entre $0,2 \cdot f_c$ e $0,8 \cdot f_c$, sem escorvação prévia do corpo de prova, simulando assim, no corpo de prova, as deformações de uma estrutura de concreto em seu primeiro carregamento.

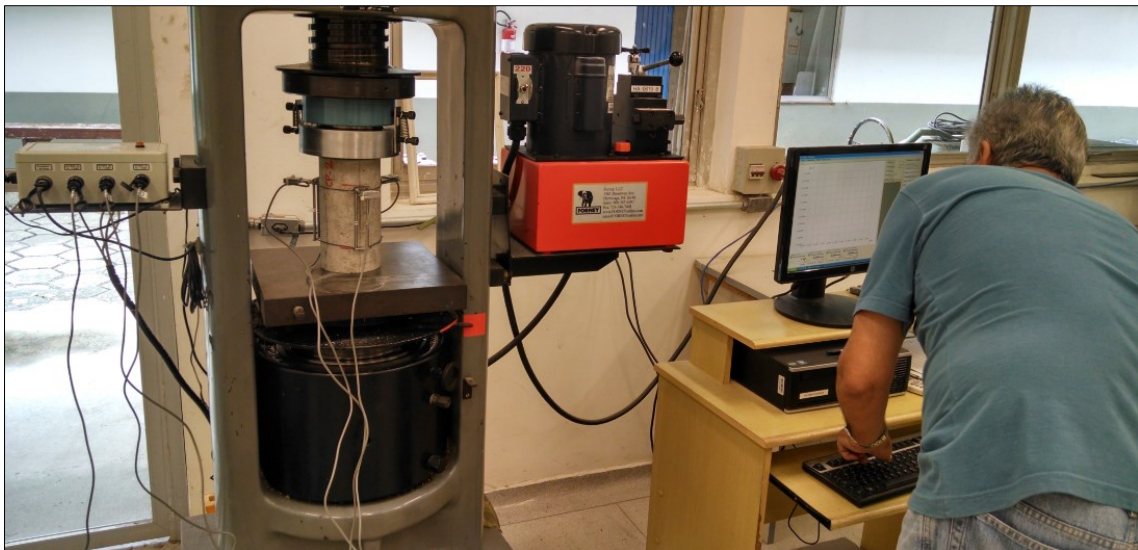
Após a determinação do módulo de elasticidade ou deformação, o corpo de prova é submetido a sua ruptura total, quando então, para validação dos resultados de módulo obtido, é verificada a compatibilidade destes, $\pm 20\%$, com os resultados de resistência obtidos nos ensaios prévios. Apresenta-se a seguir, Fotografia 01 abaixo, detalhes da bancada de ensaios estáticos do Laboratório de Materiais de Construção Civil do IPT.

A referida norma estabelece que sejam utilizadas para determinação do módulo de elasticidade tangente inicial, E_{ci} , no mínimo duas bases de tomadas de medidas, independentes ou não. Deve-se salientar que a bancada utilizada para realização desta pesquisa foi preparada com três bases de medidas o que torna a verificação prévia da distribuição de tensões na seção dos corpos de prova, procedimento necessário para determinação do módulo secante, E_{cs} , mais precisa.

O cálculo do módulo de elasticidade, E_{ci} , no caso da tensão fixada, deve ser feito como representado abaixo, Equação 13:

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} 10^{-3} = \frac{\sigma_b^{-0,5}}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} 10^{-3} \quad (\text{Equação 13})$$

Fotografia 1 – Aspectos da bancada do IPT para ensaios estáticos.



Fonte: Autor, bancada de ensaios estáticos do IPT.

Onde:

E_{ci} = Módulo de elasticidade, em GPa;

σ_b = a tensão maior, em MPa ($\sigma_b = 0,3fc$) ou tensão especificada em projeto;

0,5 = a tensão básica em MPa;

ε_b = é a deformação específica média nos corpos de prova, submetidos a tensão básica, 0,5 MPa.

ε_a = é a deformação específica média nos corpos de prova, submetidos a tensão maior.

Já o cálculo do módulo de elasticidade E_{ci} , no caso da deformação específica fixada, deve ser feito como representado a seguir na Equação 14:

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} 10^{-3} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - 50 \times 10^{-6}} 10^{-3} \quad (\text{Equação 14})$$

Sendo:

E_{ci} = Módulo de elasticidade, em GPa;

σ_b = a tensão maior, em MPa ($\sigma_b = 0,3fc$) ou tensão especificada em projeto;

σ_a = a tensão básica em MPa, que corresponde a deformação específica 50×10^{-6} medida;

ε_a = é a deformação específica média nos corpos de prova, submetidos à tensão maior.

Para o caso do módulo de deformação secante E_{cs} , conforme apresentado no Anexo A da ABNT NBR 8522 (2008), a grandeza deverá ser calculada como a seguir, Equação 15:

$$E_{cs} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} 10^{-3} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_n - \varepsilon_a} 10^{-3} \quad (\text{Equação 15})$$

Onde:

E_{cs} = Módulo de deformação secante, em GPa;

σ_b = a tensão maior, ($\sigma_b = 0,3fc$) em MPa;

0,5 = a tensão básica em MPa;

ε_n = é a deformação específica média nos corpos de prova, sob a tensão maior;

ε_a = é a deformação específica média nos corpos de prova, submetidos a tensão básica, 0,5 MPa.

Quanto aos erros aceitáveis para estes resultados a norma em questão admite dispersões máximas de 5% nas deformações individuais no corpo de prova, se medidas em bases independentes, e também entre as deformações apuradas nos três corpos de prova ensaiados, da mesma amostra.

A sua reprodutibilidade entre laboratórios deve ser, para a mesma amostra ensaiada em um curto intervalo de tempo, no máximo de 10%.

2.3.1.2 ASTM 469 (2014)

Da mesma forma que a normalização brasileira, a norma americana ASTM 469, 2014, recomenda que a determinação do módulo de elasticidade seja realizada em copos de prova com dimensões nominais que podem variar de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura até de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. Já para a questão dos corpos de prova extraídos ficam estas dimensões ainda condicionadas ao fato de que o diâmetro do corpo de prova seja no mínimo três vezes o diâmetro máximo do agregado graúdo.

As medidas de deformação, tanto longitudinais como transversais, são tomadas com auxílio de um compressômetro, equipado com relógios comparadores, com precisão de $\text{mm} \times 10^{-3}$, milésimo de milímetro. As deformações longitudinais anotadas são utilizadas para determinação do módulo de elasticidade e as deformações transversais utilizadas para o cálculo do seu coeficiente de Poisson.

O módulo de deformação (E) será dado, com margem de erro de 5%, conforme a Equação 16, abaixo:

$$E = (S_2 - S_1) / (e_2 - 0.000050) \quad (\text{Equação 16})$$

Em que:

E = Módulo de elasticidade, em GPa;

S_2 = a tensão correspondente a 40% da carga máxima, em MPa;

S_1 = a tensão correspondente à deformação específica de 13 milionésimos, expressa em MPa;

e_2 = a deformação correspondente a tensão S_2 .

O coeficiente de Poisson (μ) será dada, com margem de erro de 5%, conforme a Equação 17:

$$\mu = (e_{t2} - e_{t1}) / (e_2 - 0.000050) \quad (\text{Equação 17})$$

Em que:

μ = Razão de Poisson;

e_{t2} = Deformação transversal à meia-altura produzida pela tensão S_2 ;

e_{t1} = Deformação transversal à meia-altura produzida pela tensão S_1 .

e_2 = Deformação longitudinal à meia-altura produzida pela tensão S_2 ;

2.3.1.3 ISO EN 1920 -10 (2010)

Nesta metodologia, a determinação do módulo de elasticidade estático a compressão é recomendada da mesma forma que o ensaio realizado pela norma da ABNT, instalando-se medidores de deformação com bases de medidas não superiores a 2/3 do diâmetro do corpo de prova, fixados em pelo menos duas geratrizes diametralmente opostas, e fixados de forma equidistante dos seus topos. A relação $h/d = 2,00$ deve ser respeitada. Para o caso de corpos de prova preparados a partir de testemunhos extraídos sempre com diâmetro superior a quatro vezes o diâmetro máximo nominal do agregado graúdo. Devem-se ensaiar três corpos de prova para determinação da resistência a compressão média e dois corpos de prova para determinação do módulo. Para o caso dos corpos de prova extraídos de estruturas de concreto acabadas, o método aconselha a retirada de três exemplares para o ensaio de resistência à compressão e, três unidades para o ensaio de módulo, caso não cause prejuízos à estrutura. Para os casos onde a extração de testemunhos gere prejuízos a estrutura, deve-se optar por uma amostragem reduzida, mínimo dois corpos de prova, onde até as tensões a serem

aplicadas nos corpos de prova para tomada das deformações, podem ser estimadas.

As deformações deverão ser tomadas também entre 0,5 MPa e a tensão maior de $f_c/3$. Os resultados dos ensaios serão calculados conforme a expressão abaixo:

$$E_c = (\sigma_a - \sigma_b)/(\varepsilon_a - \varepsilon_b) \quad (\text{Equação 18})$$

Onde:

E_c = Módulo de elasticidade (GPa);

σ_a = a tensão maior, ($\sigma_a = 0,3f_c$), ou tensão especificada em projeto, em MPa;

σ_b = a tensão menor ou 0,5 MPa;

ε_a = é a deformação específica média nos corpos de prova, submetidos à tensão maior.

ε_b = é a deformação específica média nos corpos de prova, submetidos à tensão básica, 0,5 MPa.

2.3.2 Métodos dinâmicos

O módulo de elasticidade dinâmico do concreto pode ser determinado também por meio da utilização de métodos não destrutivos. Shehata (2005) destaca a existência de dois métodos: um que relaciona o módulo com a velocidade de propagação de ondas de ultrassom no corpo de prova e outro que relaciona o módulo com a frequência natural de vibração quando estimulado por impulso.

Os ensaios dinâmicos, ao contrario dos ensaios estáticos, não são destrutivos e os corpos de prova utilizados não são descartados após o ensaio, sendo possível repetir as medições em outras oportunidades, em idades diferentes.

2.3.2.1 Métodos da tomada da velocidade do pulso ultrassônico

No Brasil, ainda não existe norma específica para determinar o módulo de elasticidade dinâmico do concreto. Isto é feito, como em outros países, de uma maneira indireta. De uma maneira geral, os resultados obtidos por estes ensaios,

determinação da velocidade de propagação de ondas longitudinais de pulsos ultrassônicos, que atravessa um componente de concreto, tem como principais aplicações a verificação da homogeneidade do concreto, detecção de eventuais falhas internas em decorrência de erros no processo de adensamento do concreto, profundidade de fissuras e outras imperfeições, e também o monitoramento de variações na durabilidade do concreto, ao longo do tempo, decorrentes dos prejuízos causados pela agressividade do meio ambiente (ataque químico) principalmente pela ação de sulfatos. Apresentam-se a seguir alguns dos procedimentos normativos mais utilizados.

2.3.2.1.1 ABNT NBR 8802 (2013)

O método proposto pela ABNT NBR 8802 (2013), utilizado largamente para determinação da qualidade e da homogeneidade do concreto, prevê em seu escopo três tipos de arranjos para determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas o arranjo de transmissão direta, o indireto e o semidireto. O arranjo de transmissão direta é mais recomendado na determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas através do material, pois desta forma as ondas são recebidas com maior intensidade. Os transdutores, o emissor com frequência de emissão de onda superior a 20 kHz e o receptor, se posicionam em faces opostas com a utilização de gel acoplante, graxa de silicone, mineral ou vaselina, a fim de permitir o contato contínuo entre as superfícies. A Fotografia abaixo 2 ilustra este arranjo.

Fotografia 2 – Procedimento do ensaio de ultrassom.



Fonte: Autor, bancada de ensaios do IPT.

Os arranjos de transmissão indireta, onde os transdutores são posicionados lado a lado, são recomendados para o caso onde se tenha acesso a uma única face do elemento estrutural e as tomadas de velocidade deve ser feitas fixando-se o transdutor emissor de ondas em um ponto e realizar leituras com o transdutor receptor posicionado em vários pontos equidistantes entre si e sobre uma mesma reta. Estes dados de distância entre os pontos e velocidades anotadas são então lançados em um sistema cartesiano e a inclinação da reta obtida é a velocidade de propagação de onda que atravessa o concreto ensaiado.

Já o arranjo de transmissão semidireta, onde os transdutores são posicionados nas faces adjacentes do elemento ensaiado, só deve ser utilizado quando da impossibilidade de se acessar a duas faces opostas do elemento a ser ensaiado e as faces acessíveis não tiverem comprimento suficiente para se utilizar o arranjo indireto.

Cálculo da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas:

$$V = L/t \quad (\text{Equação 19})$$

Sendo:

V = Velocidade de propagação da onda ultrassônica, em mm/ μ s, arredondado a segunda casa decimal;

L = Distancia entre os pontos de acoplamento dos transdutores, em mm;

t = Tempo registrado, em micro segundos.

O módulo de elasticidade dinâmico pode ser calculado, a partir do conhecimento desta velocidade utilizando-se a expressão da ABNT NBR 15630 (2008).

2.3.2.1.2 ABNT NBR 15630 (2008)

O método para determinação do módulo de elasticidade dinâmico, E_d , de argamassas foi normalizado pela ABNT em 2008, com base nos procedimentos da ABNT NBR 8802 (2013), que preveem a determinação do módulo de elasticidade em corpos de prova, moldados em condições controladas, com dimensões nominais de 40 mm de largura, 40 mm de altura por 160 mm de comprimento. O equipamento transdutor-emissor recomendado para execução destes ensaios deve ter a capacidade de transformação do Impulso elétrico em onda de choque, que variam sua frequência de 54 KHz a 1 MHz.

Os transdutores, emissor e receptor, com são acoplados nas suas faces de 40 mm e a tomada da velocidade é semelhante a do arranjo direto da ABNT NBR 8802 (2013).

O módulo de elasticidade dinâmico é calculado de acordo com as Equações 20 e 21, apresentada a seguir.

Calculo da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas:

$$V = L/t \quad (\text{Equação 20})$$

Sendo:

V = Velocidade de propagação da onda ultrassônica, em mm/ μ s, arredondado a segunda casa decimal;

L = Distancia entre os pontos de acoplamento dos transdutores, em mm;

t = Tempo registrado, em micro segundos.

Cálculo do módulo elasticidade dinâmico:

$$E_d = V^2 \cdot \rho \cdot \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{1-\mu} \quad (\text{Equação 21})$$

Onde:

E_d = Modulo de elasticidade dinâmico, em MPa;

V = Velocidade de propagação da onda ultrassônica, em mm/ μ s, arredondado a segunda casa decimal;

ρ = Densidade de massa aparente da argamassa, em kg/m³;

μ = Razão de Poisson, neste caso adota-se 0,20.

2.3.2.1.3 ASTM C597 (2016)

Conforme estabelecido na ASTM C597–16, o método de ensaio de determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica em concreto também é recomendado para verificar a qualidade relativa do concreto, sua uniformidade e ainda indicar a presença de vazios.

As frequências das ondas de transformação podem variar de 20KHz a 150KHz, e os tempos de percurso entre a partida inicial e recepção do impulso são medidos eletronicamente.

A velocidade de pulso, V , de ondas de choque longitudinais numa massa de concreto está relacionada com as suas propriedades elásticas e uma densidade de acordo com a seguinte Equação 22:

$$V = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (\text{Equação 22})$$

Onde:

E = módulo de elasticidade dinâmico, em MPa;

μ = coeficiente de Poisson dinâmico;

ρ = densidade, em kg/m³.

Conforme observado, a obtenção do valor do módulo de elasticidade por esse método é feita indiretamente, isolando-se essa variável na fórmula apresentada.

2.3.2.2 Método da aquisição da resposta acústica provocada por impulso, ASTM 215 (2014) e ASTM E1876 (2015)

O método de estímulo por impulso consiste em obter as frequências naturais de vibração do concreto a partir da resposta acústica provocada pelo impacto de um martelo no corpo de prova e, com base na sua massa e dimensões, é calculado o módulo de elasticidade dinâmico do concreto. Nota-se que não existe uma normalização nacional sobre esse ensaio, sendo as normas ASTM C 215 (2014) ASTM E1876 (2015) as normas de referência para a sua realização.

O módulo de elasticidade dinâmico pode ser obtido, tanto pelas frequências flexionais, no qual o impulso e sua captação ocorrem no centro do corpo de prova, Fotografia 3, quanto longitudinais, quando o impulso é aplicado em uma extremidade e captado no lado oposto do corpo de prova), Fotografia 4, sendo que, na maioria das vezes, o valor do módulo obtido no modo flexional é superior ao obtido no modo longitudinal.

Assim, o módulo de elasticidade, a partir da frequência flexional, pode ser calculado pelas Equações 23 e 24:

$$E = 1,6067 \cdot \left(\frac{L^3}{D^4} \right) \cdot (m \cdot f_f^2) \cdot T_1' \quad (\text{Equação 23})$$

$$T_1' = 1 + 4,939(1 + 0,0752 \cdot \mu + 0,8109 \cdot \mu^2) \cdot \left(\frac{D}{L} \right)^2 - 0,4883 \cdot \left(\frac{D}{L} \right)^4 - \left[\frac{4,691 \cdot (1 + 0,2023 \cdot \mu + 2,173 \cdot \mu^2) \cdot \left(\frac{D}{L} \right)^4}{1 + 4,754 \cdot (1 + 0,1408 \cdot \mu + 1,536 \cdot \mu^2) \cdot \left(\frac{D}{L} \right)^2} \right] \quad (\text{Equação 24})$$

No caso da frequência longitudinal, o módulo de elasticidade pode ser calculado conforme mostrado nas Equações 25 e 26:

$$E = 16 \cdot m \cdot f_1^2 \cdot \left(\frac{L}{\pi \cdot D^2 \cdot k} \right) \quad (\text{Equação 25})$$

$$K = 1 - \left(\frac{\pi^2 \cdot \mu^2 \cdot D^2}{8 \cdot L^2} \right) \quad (\text{Equação 26})$$

Onde:

D = diâmetro do corpo de prova (mm);

L = comprimento do corpo de prova (mm);

M = massa do corpo de prova (g);

f_f = frequência de ressonância fundamental flexional (Hz);

f_l = frequência de ressonância fundamental longitudinal (Hz);

μ = coeficiente de Poisson.

Fotografia 3 – Forma de aplicação do impulso e aquisição da resposta acústica, frequência de ressonância fundamental flexional.



Fonte: Autor, bancada de ensaios dinâmicos da PhD Engenharia.

Fotografia 4 – Forma de aplicação do impulso e aquisição da resposta acústica, frequência de ressonância fundamental longitudinal.



Fonte: Autor, bancada de ensaios dinâmicos da PhD Engenharia.

2.4 Correlações

Em geral os valores dos resultados dos ensaios dinâmicos, quando comparados aos resultados dos ensaios estáticos, $E_{ci} 0,3 f_c$, são maiores. Esta diferença para mais nos resultados assim obtidos, pode ser justificada pela alta dispersão dos resultados observadas nos ensaios estáticos, conforme já discutido.

De acordo com Mehta e Monteiro (2014) os ensaios dinâmicos em geral são 30% maiores que os ensaios estáticos para concretos de média resistência, de 20 MPa a 40 Mpa e, 20% maiores para concretos considerados de alta resistência, aqueles com resistências acima de 40 MPa.

Da mesma forma os resultados médios dos ensaios de determinação do módulo de elasticidade dinâmico, através do estímulo por impulso são, de acordo com Almeida (2008), respectivamente, 27% e 21%, para concretos classificados de média resistência à compressão e, 8% e 6%, para aqueles concretos classificados como de alta resistência.

De acordo com o modelo apresentado pela ABNT NBR 6118 (2014) os resultados de módulo estático de elasticidade, $E_{ci} 0,3 f_c$, devem 15% maiores que os resultados de modulo de deformação, $E_{cs} 0,3 f_c$.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste trabalho procurou-se estudar métodos para obtenção do módulo de elasticidade, estático e dinâmico em concretos que representassem a maior demanda do mercado no estado de São Paulo e, para tanto, foram avaliados concretos produzidos com agregados graúdos das três origens petrográficas, como declarado comercialmente, o diabásio, o granito e o calcário.

Reserva-se este capítulo a descrição do programa experimental elaborado para o alcance dos objetivos propostos. Ser aqui apresentada também, uma breve descrição dos procedimentos adotados para caracterização tecnológica materiais constituintes do concreto bem como a caracterização do concreto nos seus estados fresco e endurecido.

3.1 Planejamento.

Evidentemente que para realização deste trabalho, dado ao seu objetivo que é o de comparar resultados de ensaios realizados com metodologias e equipamentos diferentes, não se pretendeu verificar a influência de todos os parâmetros e variáveis conforme descrito anteriormente. Assim, para realização deste estudo, foram fixadas as seguintes variáveis independentes:

- uma consistência do concreto fresco, bombeável, Classe S100;
- uma porcentagem de argamassa seca, 51%;
- uma idade do ensaio, 28 dias;
- uma areia de quartzo;
- uma areia artificial, calcária;
- três naturezas de agregado graúdo: diabásio, granito e calcário;
- um cimento, CP II E 40;
- uma dimensão de corpos de prova, 100 mm x 200 mm;
- um tipo de cura, úmida até 7 dias de idade.

Para melhor ilustrar esta pesquisa, a partir do estabelecimento destas premissas, foram inseridas e controladas as seguintes variáveis intervenientes:

- cinco traços distintos de concreto;
- cinco relações distintas de água/cimento;

- cinco massas específicas do concreto;
- cinco consumos de cimento por m³ de concreto.

Conhecendo-se assim e controlando todas estas variáveis, serão analisadas com segurança, as seguintes variáveis dependentes, objeto deste estudo:

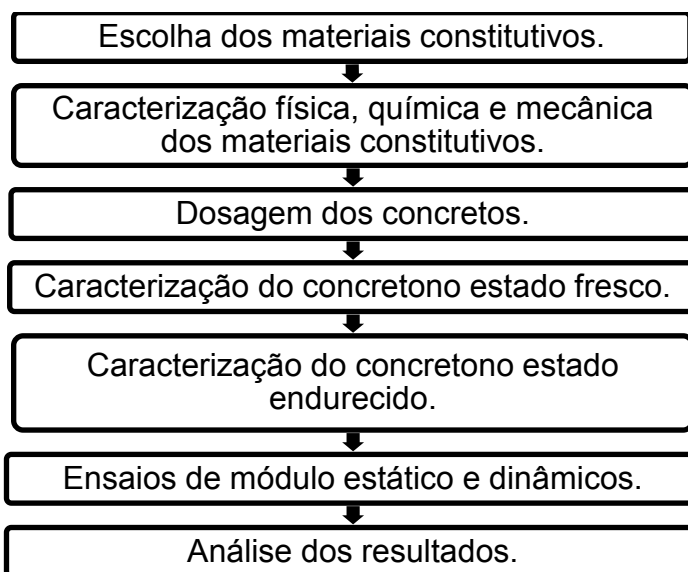
- resistência à compressão;
- módulos de elasticidade e deformação estáticos e dinâmicos.

Por serem mais usuais entre os laboratórios e empresas de serviços de concretagem, foram moldados corpos de prova cilíndricos, com dimensões nominais de 100 x 200 mm, de acordo com a ABNT NBR 5738 (2015) e que atendem as recomendações da ABNT NBR 8522 (2008), a partir dos concretos estudados.

Realizaram-se ensaios em concretos produzidos de acordo com as recomendações de consumo de cimento mínimo e relações água cimento máximos, conforme definido e recomendado pela norma brasileira, ABNT NBR 12655 (2015), em seu Item 5.2.2.1, para as classes de agressividade ambiental II, III e IV, comumente encontradas em nosso estado. Avaliou-se também, os módulos de elasticidade em um traço de concreto de baixa resistência, com relação água cimento maior do que o especificado pela norma brasileira e, ampliou-se ainda o escopo deste trabalho com o estudo de um concreto de baixa relação água/cimento e alta resistência.

Para os ensaios à compressão foram moldados dois corpos de prova a serem rompidos antes da realização dos ensaios de módulo que foram realizados em seis corpos de prova moldados para cada modalidade. Para os ensaios de caracterização das propriedades físicas do concreto endurecido, foram moldados três corpos de prova por série.

Para cumprimento dos objetivos desta pesquisa, no programa experimental executado, foram seguidos os seguintes passos, conforme mostrado no fluxograma da Figura 5, para cada natureza petrográfica de agregado graúdo utilizado, Diabásio, granito e calcário.

Figura 5 – Fluxograma de atividades do programa experimental.

Fonte: Elaborado pelo autor.

As Tabelas 2, 3 e 4, apresentam a identificação dos traços ensaiados, suas relações água/cimento, e cada origem petrográfica dos agregados graúdos. Também estão apresentadas as datas de moldagem e as datas de realização dos ensaios físicos e mecânicos dos concretos.

Tabela 2– Traços de concreto dosados com agregado graúdo de diabásio.

Relação a/c	Traço	Data da moldagem	Data dos ensaios
0,30	94	04.03.15	01.04.15
	104	17.03.15	14.04.15
0,45	308	04.09.14	02.10.14
	341	25.09.14	23.10.14
0,55	307	03.09.14	01.10.14
	340	24.09.14	22.10.14
0,60	306	02.09.14	30.09.14
	339	23.09.14	21.10.14
0,90	98	05.03.15	02.04.15
	109	18.03.15	15.04.15

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3 - Traços de concreto dosados com agregado graúdo de granito.

Relação a/c	Traço	Data da moldagem	Data do ensaio
0,30	298	16.06.15	14.07.15
	327	30.06.15	28.07.15
0,45	346	02.10.14	30.10.14
	369	16.10.14	13.11.14
0,55	345	01.10.14	29.10.14
	368	15.10.14	12.11.14
0,60	344	30.09.14	28.10.14
	367	14.10.14	11.11.14
0,90	280	17.06.15	15.07.15
	328	01.07.15	29.07.15

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 4 – Traços de concreto dosados com agregado graúdo de calcário.

Relação a/c	Traço	Data da moldagem	Data do ensaio
0,30	169	22.04.15	20.05.15
	194	05.05.15	02.06.15
0,45	263	07.08.14	04.09.14
	290	21.08.14	18.09.14
0,55	262	06.08.14	03.09.14
	289	20.08.14	17.09.14
0,60	261	05.08.14	02.09.14
	288	19.08.14	06.09.14
0,90	170	23.04.15	21.05.15
	200	06.05.15	03.06.15

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Como é possível verificar, o programa experimental teve a duração aproximada de 11 meses, iniciando-se as moldagens em 07.08.2014 e encerrando-se os ensaios físicos do concreto endurecido em 30.07.2015.

Com o intuito de se verificar a repetitividade dos resultados dos ensaios de caracterização dos concretos realizados, a programação completa foi realizada em duplicata, moldando-se corpos de prova dos mesmos traços, a cada 15 dias aproximadamente. Dos 15 experimentos avaliados então foram moldados de acordo com a ABNT NBR 5738 (2015), um total de 690 corpos de prova.

Neste período, foram realizados pelos laboratórios, um total de 1209 ensaios sendo: 69 ensaios de caracterização tecnológica dos materiais constituintes do concreto, 90 ensaios no concreto fresco e, nos corpos de prova moldados, 60 ensaios de determinação da resistência à compressão axial simples, 360 ensaios de determinação do módulo de elasticidade estático, 540 ensaios de determinação do módulo de elasticidade dinâmico e, ainda, 90 ensaios de determinação de absorção de água, do índice de vazios permeáveis e massas específicas no estado seco, saturado e massa específica real. Lembre-se que ensaios de ultrassom foram realizados, previamente, nos mesmos corpos de prova moldados para o ensaio estático e os ensaios por estímulo por impulso, transversal e longitudinal foram realizados no mesmo corpo de prova.

3.2 Caracterizações dos materiais utilizados.

Lembre-se aqui, que todos os materiais constitutivos dos concretos estudados referem-se às amostras médias dos materiais utilizados no cotidiano das filiais da empresa de serviço de concretagem. Os materiais ensaiados foram segregados na época da realização dos estudos no laboratório de São Paulo da empresa de serviços de concretagem onde permaneceram estocados de forma adequada até o fim dos estudos.

Foram inicialmente separados e reservados 800 kg de cimento Portland CP II E 40 coletado diretamente do silo, de acordo com o procedimento estabelecido na ABNT NBR 5741 (1993), na usina filial Jaguaré da empresa de serviços de concretagem, dos quais foram enviados 12 kg ao Laboratório de Materiais de Construção Civil do IPT, para realização dos ensaios de caracterização.

Os agregados, gráudo e miúdo, foram coletados diretamente das pilhas, no estoque das filiais de Campinas (brita de diabásio), Santo Amaro (brita de granito) e

Jaguaré (brita de calcário), areia de quartzo e areia artificial de calcário. Foram estocados no laboratório aproximadamente 1000 kg de cada material.

A partir desta amostra, na nova pilha formada no laboratório, foram coletados 75 kg de cada material, de acordo com o procedimento estabelecido no Item 5.4.1.5 da ABNT NBR NM 26 (2009) e encaminhados ao Laboratório de Materiais de Construção Civil do IPT, para realização dos ensaios de caracterização.

Os materiais utilizados neste trabalho foram caracterizados tecnologicamente de acordo com as normas da ABNT e os seus resultados avaliados de acordo com suas especificações também da ABNT.

3.2.1 Cimento Portland.

Os ensaios de caracterização química, física e mecânica do cimento Portland CP II E 40, em atenção a sua especificação, ABNT NBR 11578 (1991), foram realizados no Laboratório de Materiais do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S. A.

Apresentam-se na Tabela 5, os métodos e procedimentos utilizados para realização das análises químicas realizados na amostra do cimento Portland, CP II E – 40, utilizado.

Tabela 5 – Ensaios químicos.

Norma / Determinação	Procedimento
ABNT NBR NM 18/12 - Perda ao fogo	Calcinação em mufla
ABNT NBR NM 11-2/12- SiO ₂ , CaO, MgO, Fe ₂ O ₃ e Al ₂ O ₃	Florescência de RX
Norma / Determinação	Procedimento
ABNT NBR NM 16/12 - Anidrido sulfúrico	Gravimetria
ABNT NBR NM 17/12 - Na ₂ O e K ₂ O	Fotometria de chama
ABNT NBR NM 20/12 - (CO ₂)	Determinação por gasometria
ABNT NBR NM 15/12 - Resíduo insolúvel - RI	Gravimetria
ABNT NBR NM 19/12 – Sulfeto – (S ²⁻)	Titulação com amido

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Tabela 6 apresenta os métodos de ensaios físicos e mecânicos a serem realizados na amostra de cimento Portland utilizada, para verificação do atendimento dos seus resultados aos requisitos mínimos da sua especificação para produção de concreto, ABNT NBR 11578 (1991).

Tabela 6 – Ensaios físicos e mecânicos.

Norma / Determinação	Procedimento
ABNT NBR NM 43:2003 – Água para pasta normal	Sonda de Tetmajer
ABNT NBR NM 65:2003 – Início e fim de pega	Agulha de Vicat
ABNT NBR 11582:2012 – Expansibilidade a quente e frio	Agulha de Le Chatelier
ABNT NBR 11579:2013 - Finura	Peneira 200, # 0,075mm
ABNT NBR NM 23:2001 – Massa específica	Frasco de Le Chatelier
ABNT NBR 16372:2015 - Finura	Permeabilímetro de Blaine
ABNT NBR 7215:1997 – Resistência à compressão	Corpos de prova 50 x 100 mm

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.2 Agregados

Os ensaios de caracterização dos agregados, grãos e miúdos, foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil do IPT e na Associação Brasileira de Cimento Portland, conforme a metodologia descrita e apresentada na Tabela 7 a seguir, para verificação do atendimento aos requisitos exigíveis especificados pela ABNT NBR 7211 (2012) para agregados destinados a produção de concreto de cimento Portland.

Tabela 7 – Ensaio de caracterização dos agregados.

Norma / Determinação	Procedimento
ABNT NBR NM 30:2001 – Absorção de água	Método do cone
ABNT NBR NM 46:2003 – Material fino passante	Peneira 200, # 0,075mm
ABNT NBR NM 49:2001 – Impurezas orgânicas	Solução de hidróxido de sódio
ABNT NBR NM 52:2003 – Massas específicas	Frasco aferido.
ABNT NBR NM 53:2009 – Massas específicas	Balança hidrostática
ABNT NBR NM 248:2003 – Granulometria	Peneiras da série normal
ABNT NBR 7809:2006 – Índice de forma	Paquímetro
ABNT NBR 7218:2010 – Teor de argila em torrões	Análise tátil e visual
ABNT NBR 7389-1:2009 – Análise petrográfica	Lâmina
ABNT NBR 7389-2:2009 – Análise petrográfica	Microscópio estereoscópico (Lupa)
ABNT NBR 15577-4:2008 – Reatividade Potencial	Método de barras
ABNT NBR 15577-5:2008 – Mitigação	Método de barras

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.3 Aditivos

Os resultados da caracterização dos aditivos utilizados neste trabalho são apresentados de acordo com as informações fornecidas pelos relatórios de conformidade fornecidos pelo departamento de controle de qualidade das empresas fornecedoras.

A metodologia e procedimentos adotados encontram-se declarados na Tabela 8 abaixo.

Tabela 8 – Caracterização dos aditivos.

Norma / Determinação	Procedimento
ABNT NBR NM 10908:2009 – Cor	Exame visual
ABNT NBR NM 10908:2009 – Massa específica	Picnômetro
ABNT NBR NM 10908:2009 – Teor de sólidos	Secagem em estufa
ABNT NBR NM 10908:2009 – pH	Peagâmetro eletrônico

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 Caracterização do concreto no estado fresco.

Os concretos estudados neste trabalho foram preparados, de acordo com as recomendações da ABNT NBR 12821 (2009), no laboratório da Empresa de Serviços de Concretagem, Engemix Concreto, situado na Filial do Jaguaré, SP.

Os ensaios de caracterização do concreto no estado fresco executado foram realizados de acordo com as normas e procedimentos apresentados na Tabela 9, abaixo.

Tabela 9 – Ensaios de caracterização do concreto no estado fresco.

Norma / Determinação	Procedimento
ABNT NBR NM 43:2003 – Consistência	Cone de Abrams.
ABNT NBR NM 9833:2009 – Massa específica	Gravimetria
ABNT NBR NM 47:2002 – Ar aprisionado	Método pressométrico
ABNT NBR 5738:2015 – Moldagem e cura de corpos de prova	Moldagem manual

Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.4 Caracterização do concreto no estado endurecido

Os ensaios de caracterização das propriedades do concreto no estado endurecido foram todos realizados aos 28 dias de idade. A Tabela 10, abaixo apresenta os métodos e procedimentos adotados para realização destes ensaios.

Tabela 10 – Ensaios de caracterização do concreto endurecido.

Norma / Determinação	Procedimento
ABNT NBR-5739 (2014) – Ensaio à compressão.	Ruptura de corpos de prova
ABNT NBR 8522 (2008) – Módulo estático de elasticidade.	Tomada de deformações na superfície do corpo de prova
ABNT NBR 15630 (2008) – Módulo dinâmico de elasticidade.	Medida de velocidade de onda ultrassônica
ASTM E 1876 (2009) – Módulo dinâmico de elasticidade	Aquisição das vibrações geradas por impulso
ABNT NBR 9778 (2005) – Absorção de água por imersão, índice de vazios permeáveis e massas específicas.	Método gravimétrico

Fonte: Elaborado pelo autor.

A determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da aquisição das vibrações geradas por impulso foi realizada na PhD Engenharia e os demais ensaios físicos e mecânicos foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil do IPT.

3.5 Apresentações, tratamento e análise dos resultados.

Os resultados da caracterização dos materiais constitutivos do concreto, bem como do concreto fresco e endurecido, são apresentados de acordo com a metodologia de cálculo estabelecida pelas respectivas normas de ensaio.

Os resultados dos ensaios de determinação dos módulos de elasticidade, estáticos e dinâmicos receberam tratamento estatístico e são apresentadas as médias dos seis resultados individuais obtidos em cada série ensaiada, os seus desvios padrões, bem como a determinação do coeficiente de variação no ensaio.

Da mesma forma são apresentados os resultados das médias determinadas entre as duas séries, traços, moldadas analogamente, o seu desvio padrão e o coeficiente de variação do ensaio.

Para verificação da semelhança estatística entre os resultados obtidos entre as séries duplicadas, foi utilizado o Teste de Hipótese, Distribuição t, bicaudal, admitindo-se um intervalo de confiança de 95%, considerado adequado para ensaios mecânicos em concreto e para embasamento desta pesquisa. Estes resultados serão apresentados na forma “Aceita” ou “Rejeita” aos critérios da hipótese aqui estabelecidos.

A partir das médias assim avaliadas, são construídos gráficos que apresentam curvas, exponenciais para os resultados de resistência à compressão e curvas polinomiais, de segunda ordem, para os diversos módulos determinados, através de regressões. A partir destas equações foram obtidos novos pontos referentes às classes de resistência de concreto, 20, 30, 40, 50, 60, 70 e 80 MPa, conforme estabelecido na ABNT NBR 8953 (2015).

Os resultados dos módulos estáticos de deformação, $E_{cs} 0,30 f_c$, são comparados aos resultados obtidos nos ensaios de determinação do módulo estático de elasticidade, e, os resultados dos módulos de elasticidade dinâmicos comparados aos resultados do módulo estático de elasticidade, $E_{ci} 0,30 f_c$ realizados de acordo com a metodologia brasileira.

Além destas comparações, são comparados os resultados obtidos nos ensaios de módulo entre as naturezas petrográficas estudadas.

Para operação e apresentação dos resultados destes cálculos serão utilizados os recursos do programa “MICROSOFT EXCEL, VERSÃO 2010”.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados dos ensaios, seu tratamento, e a análise destes.

São apresentados, em primeiro lugar, os resultados e as análises das caracterizações química, física e mecânica dos materiais constituintes, bem como os resultados e a análise das caracterizações físicas e mecânicas dos concretos estudados em seus estados fresco e, endurecido.

Também são apresentadas as análises e tratamentos realizados para verificação e estabelecimento de correlações estabelecidas a partir dos resultados obtidos nos ensaios de determinação dos módulos de elasticidade e deformação, estático e dinâmico.

4.1 Caracterização dos materiais constitutivos

Apresentam-se a seguir a análise dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos materiais utilizados neste estudo, realizada e embasada nas respectivas especificações brasileiras.

4.1.1 Cimento Portland CP II E 40

Os resultados dos ensaios realizados de caracterização química, física e mecânica do cimento Portland, CP II E 40, utilizado, em sua íntegra, poderão ser consultados no Anexo A desta dissertação. Os resultados atenderam aos requisitos da sua especificação, ABNT NBR 11578 (1991), podendo ser utilizado na produção de concreto.

Ressalte-se aqui que este cimento, pela sua especificação, pode conter em sua composição de 6% a 34% de adição de escória e, apresenta, de acordo com os resultados apresentados, um equivalente alcalino da ordem de 0,56%, o que o caracteriza como um cimento de baixa alcalinidade e baixo calor de hidratação.

Desta forma e de acordo com Mehta & Monteiro (2014), este cimento não apresenta o risco de gerar danos aos concretos com eles produzidos pela reação dos seus álcalis com os agregados, mesmo quando estes sejam potencialmente reativos.

4.1.2 Agregado miúdo

Na elaboração dos concretos avaliados para embasamento deste trabalho foi utilizado agregado miúdo composto por duas areias, a saber: uma areia natural de quartzo, natural e outra areia artificial originária do processo de britagem do calcário. Esta mistura, frequentemente utilizada pelas empresas de serviços de concretagem, é realizada por motivos técnicos, econômicos e ambientais, lembrando-se da necessidade de utilização dos passivos da indústria do agregado graúdo e da escassez e altos custos das areias naturais dentro do estado de São Paulo.

Detalhes dos procedimentos adotados para realização dos ensaios e os resultados da caracterização destas areias, em sua íntegra e conforme proposto, são apresentados nos Anexos B, C e D desta dissertação. Apresenta-se abaixo uma análise dos resultados desta caracterização, embasada na especificação brasileira ABNT NBR 7211 (2009).

4.1.2.1 Areia de quartzo

Com relação à composição granulométrica deste material, observa-se através da curva representada no gráfico da Figura 6, que esta se encontra abaixo daquelas estabelecidas como ótima ou utilizável na Tabela 2 da ABNT NBR 7211 (2009), sendo este material considerado muito fino. Esta areia se usada isoladamente na produção de concreto poderia trazer prejuízos econômicos e à durabilidade dos concretos produzidos, causados pela elevação da relação água/cimento.

De acordo com os resultados da análise petrográfica realizada, esta areia é composta quase na sua totalidade por grãos de quartzo arredondados de alta esfericidade, com a superfície polida e fosca, de cor avermelhada e sem a ocorrência de fases deletérias em sua composição. Não foi detectada também a presença de materiais carbonosos.

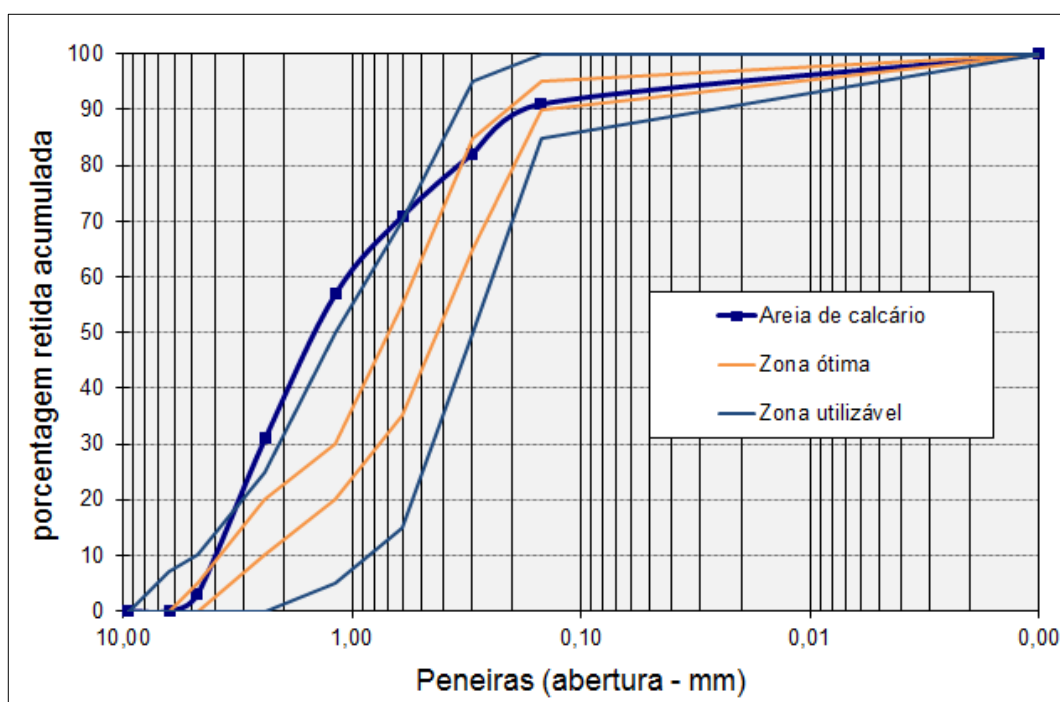
Muito embora não tenham sido encontrados na sua composição mineralógica materiais considerados deletérios, este Autor recomendou, para efetiva comprovação da sua inocuidade, a realização do ensaio de determinação da reatividade com os álcalis de cimento Portland.

4.1.2.2 Areia artificial de calcário

Os resultados da granulometria realizada são representados graficamente na Figura 8 e demonstram que esta areia artificial, tem sua granulometria acima (mais grossa) do que a sugerida e estabelecida pela ABNT NBR 7211 (2009), como zona utilizável como agregado miúdo para concreto.

As análises dos resultados da petrografia que foi realizada no material não beneficiado bem como os resultados da verificação da reatividade potencial com os álcalis do cimento Portland utilizado, e sua mitigação se necessária, são apresentadas no item 4.1.3.3, desta dissertação e em seus Anexos B e C.

Figura 8 – Distribuição granulométrica da areia artificial de calcário.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Cabe aqui ressaltar ainda que o resultado de determinação do teor de material fino que passa pela peneira de abertura 75 μm , por lavagem, para este insumo foi da ordem de 17,9%, logo acima do especificado para agregados miúdos de origem de britagem de agregados. Lembre-se aqui que este percentual é calculado sobre a massa da amostra de areia artificial de calcário ensaiada e que, de acordo com a Alínea “c”, Tabela 7, do Item 6.2, da ABNT NBR 7211 (2009), este

percentual de material passante encontrado deve ser reavaliado e recalculado sobre a quantidade do agregado total¹, conforme ali definido.

4.1.2.3 Agregado miúdo composto

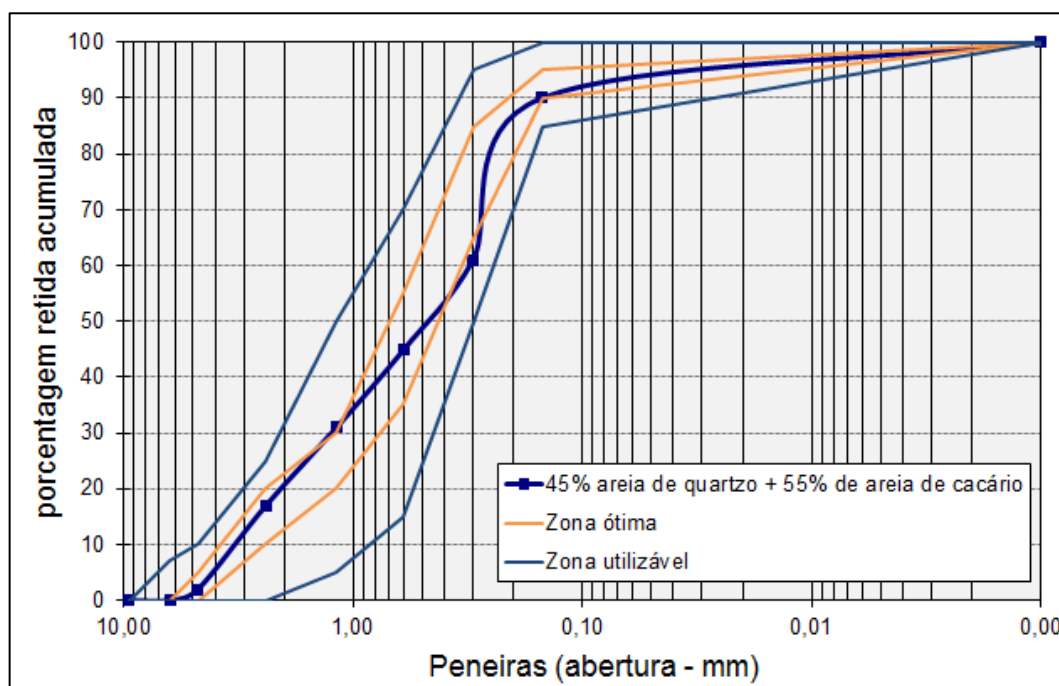
Esta empresa de serviços de concretagem adota em seus concretos correntes, embasada nos resultados destes ensaios laboratoriais e nos estudos de dosagem realizados ao longo dos anos, um agregado miúdo composto na proporção de 45% areia de quartzo e, 55% da areia artificial de calcário.

Reavaliando o agregado miúdo, assim composto, observa-se que na sua granulometria, esta mistura aferiu ao material uma curva granulométrica mais adequada para produção de concreto e, que mais se aproxima da curva ótima recomendada pela ABNT NR 7211 (2009). Este arranjo, além de representar uma opção mais econômica assegura que não haverá incrementos significativos na relação água/cimento conforme descrito anteriormente. Apresenta-se no gráfico da Figura 9, a curva granulométrica deste agregado miúdo composto.

Quanto ao teor de material fino que passa pela peneira de abertura 75 µm total, verificou-se aqui que estes apresentam valores de material passante pela peneira de abertura 75 µm, por lavagem abaixo do limite estabelecido de 6,5%, máximo permitido para o agregado total para que não haja comprometimento da durabilidade do concreto.

A Tabela 11, a seguir, apresenta o resumo desta análise realizada somando-se a quantidade total de material fino passante determinado, presente em 1 m³ de concreto e dividindo este valor pelo consumo total de agregados no traço de concreto estudado.

¹ A ABNT NBR 7211, em seu Item 3.6, define como agregado total: "Agregado resultante da britagem de rochas cujo beneficiamento resulta numa distribuição granulométrica constituída por agregados graúdos e miúdos ou por mistura intencional de agregados britados e areia natural ou britada, possibilitando o ajuste da curva granulométrica em função das características do agregado e do concreto a ser preparado com este material. Os limites desta norma referentes ao agregado total devem atender aos critérios de ponderabilidade em massa entre os agregados graúdos e miúdos que o compõe."

Figura 9 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo composto utilizado.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 11 – Resultados da quantidade total do material passante na # 75 μm , por traço.

Diabásio	Traço	94	104	308	341	307	340	306	339	98	109
	(%)	4,3	4,3	4,7	4,7	5,0	5,0	5,1	5,1	5,5	5,5
Granito	Traço	298	327	346	369	345	368	344	367	280	328
	(%)	4,0	4,0	4,3	4,3	4,7	4,7	4,7	4,7	5,1	5,1
Calcário	Traço	169	194	263	290	262	289	261	288	170	200
	(%)	4,2	4,2	4,5	4,5	4,8	4,8	4,9	4,9	5,3	5,3

Legenda: (%) Porcentagem de material passante na peneira de abertura 75 μm , por lavagem no agregado total utilizado em cada traço estudado.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Entende-se então, que os demais resultados dos ensaios da caracterização do agregado miúdo composto pela areia de quartzo e areia artificial de calcário atenderam aos limites e requisitos da sua especificação, que este agregado miúdo total deve ser considerado apropriado para utilização na produção de concreto, sem restrições.

4.1.3 Agregados graúdos

Na produção do concreto utilizado na moldagem dos corpos de prova a serem ensaiados neste trabalho foram utilizados agregados graúdos das seguintes naturezas petrográficas declaradas: brita de diabásio, produzida na região de Paulínia; brita de granito, produzida em Itapeverica da Serra; e brita de calcário, produzida na região de Araçariguama, todas no estado de São Paulo.

Os métodos adotados para sua realização e detalhes dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização destes agregados graúdos, conforme descrito no Capítulo 2, são apresentados nos Anexos B, C e D, desta dissertação. Segue a análise dos resultados desta caracterização, embasada na especificação brasileira ABNT NBR 7211 (2009).

4.1.3.1 Agregado graúdo de diabásio

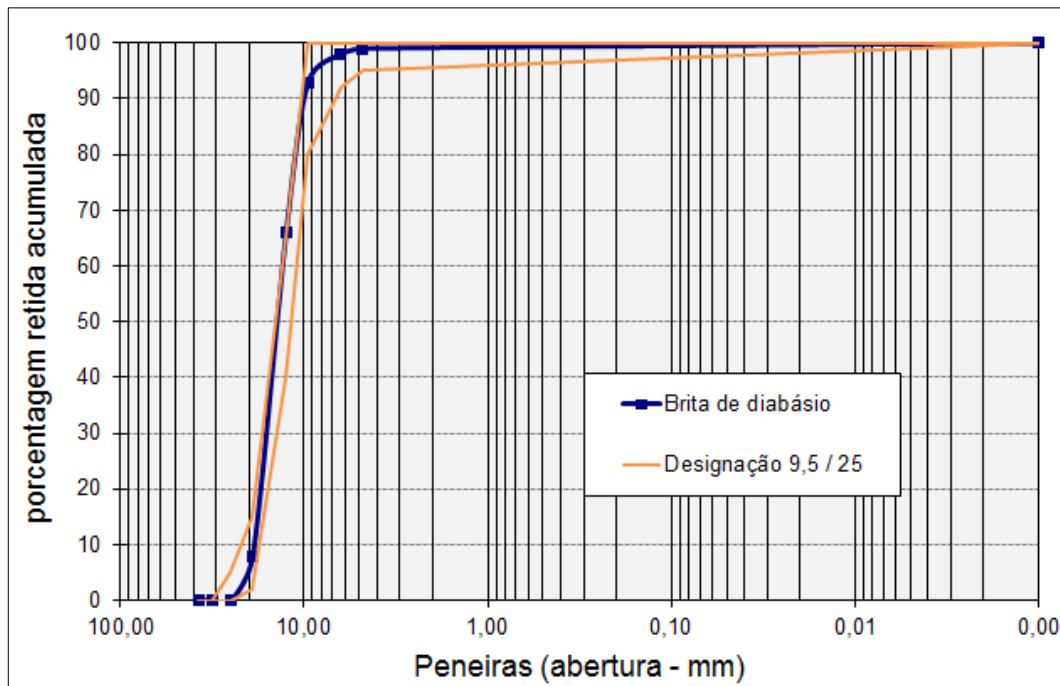
Um dos aspectos mais importantes para a economicidade de um traço de concreto é sem dúvida a granulometria do agregado graúdo. Este parâmetro irá auxiliar a definir a quantidade de argamassa total utilizada e, neste caso, conforme se pode observar através dos resultados representados no gráfico da Figura 10, a curva de distribuição granulométrica deste agregado graúdo não apresenta descontinuidades importantes e o encaixa na zona de designação 19 / 31,5 mm, conforme os limites estabelecidos na Tabela 6, do Item 6.1.1, da ABNT NBR 7211 (2009).

A análise petrográfica apresenta, como resultado, que este diabásio é composto predominantemente por plagioclásio, feldspato, e augita, clinopiroxinênio, com opacos, provavelmente óxidos de ferro e titânio. Ocorrências de vidro alterado foram verificadas e traços de quartzo. Identificou-se na análise realizada a presença de minerais de alteração, na forma de argilo minerais verdes.

Pela ocorrência de quartzo observada, como um dos produtos de alteração do vidro, a rocha pode apresentar um caráter potencialmente reativo com os álcalis do cimento, no ensaio acelerado e de acordo com esta recomendação foi realizado o ensaio de determinação da sua reatividade com os álcalis de cimento Portland utilizado método acelerado em barras de argamassa. O gráfico da Figura 11 apresenta o resultado do ensaio realizado de acordo com a Parte 4 da ABNT NBR

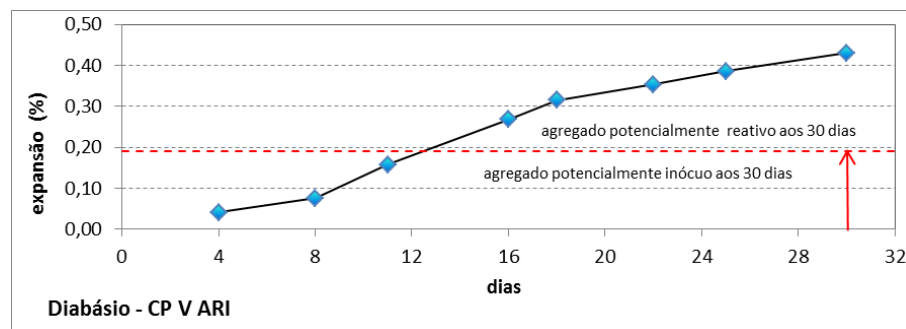
15577 (2008), utilizando-se cimento padrão reservado no laboratório para este fim, com equivalente alcalino de 0,86. De acordo com os resultados apresentados, este insumo foi considerado como agregado potencialmente reativo aos álcalis do cimento Portland.

Figura 10 – Distribuição granulométrica da brita de diabásio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

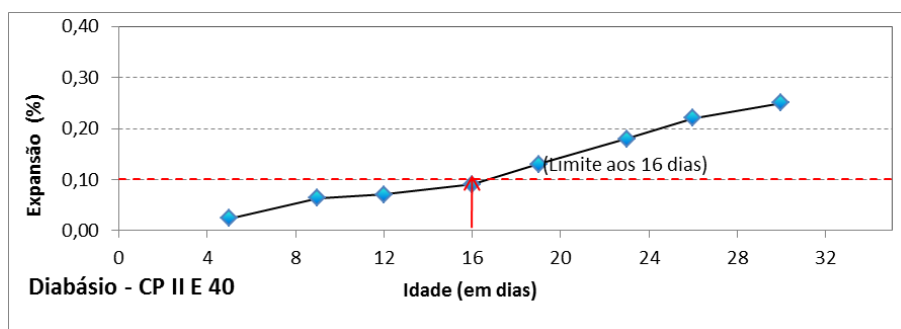
Figura 11 – Resultado – Reatividade potencial, método de barras, acelerado.



Fonte: Boletim de resultado de ensaios do IPT, Anexo D.

A partir deste resultado, foi verificada a eficiência da mitigação desta reatividade, de acordo com a Parte 5, da ABNT NBR 15577 (2008), utilizando-se apenas o cimento Portland, CP II E 40, utilizado na empresa de serviços de concretagem, com equivalente alcalino de 0,56. O gráfico da Figura 12 apresenta o resultado do ensaio acelerado realizado para verificar a eficiência deste cimento na mitigação da reatividade apurada.

Figura 12 – Verificação da mitigação da reatividade potencial, método de barras, acelerado.



Fonte: Boletim de resultado de ensaios do IPT, Anexo D.

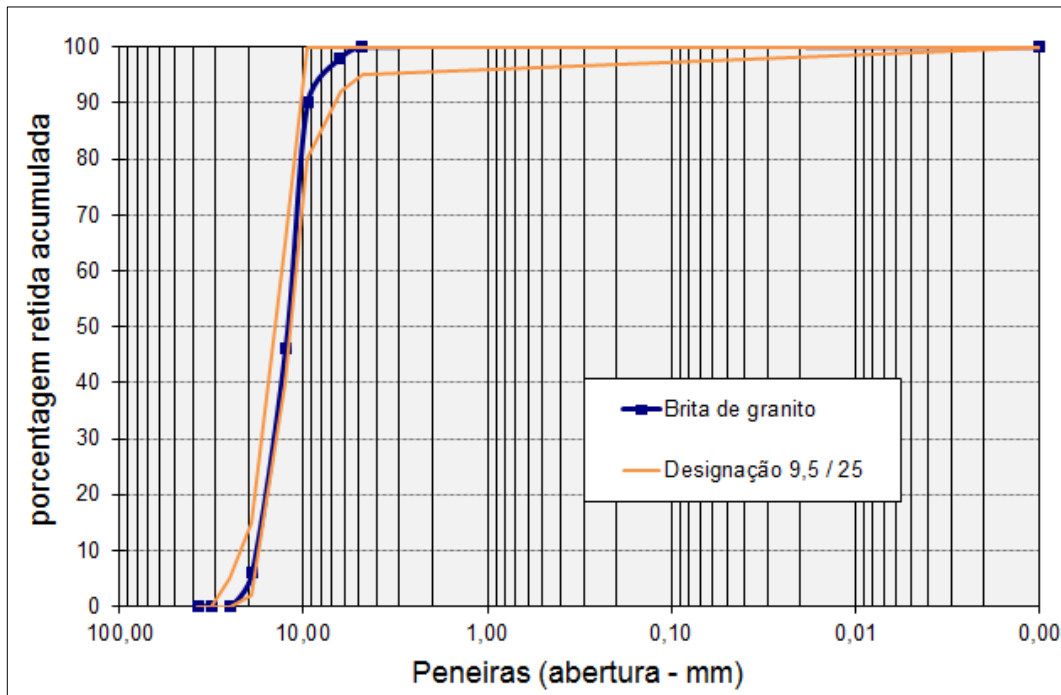
Com a comprovação da mitigação da reatividade potencial inicialmente detectada, o resultado ficou abaixo de 0,10% aos 16 dias de exposição, conforme recomenda o Item 7.2.2 da ABNT NBR 15577-1 (2008), considera-se que os resultados dos ensaios de caracterização da brita de diabásio atenderam aos requisitos da especificação ABNT NBR 7211 (2009), sendo esta considerada adequada para utilização na produção de concreto composto com o cimento selecionado, CP II E 40.

4.1.3.2 Agregado graúdo de granito

A análise petrográfica revelou que esta rocha é composta por quantidades semelhantes de plagioclásio, microclinio e quartzo, daí a sua classificação como monzogranito. A biotita ocorre como mineral subordinado. Embora seja de origem ígnea, a rocha foi submetida a processos tectônicos que resultaram em tensões e deformações que conferem a rocha o caráter protomilonítico. Esta característica associada ao alto teor de quartzo torna esta rocha potencialmente reativa com os álcalis do cimento.

Pode-se também observar, conforme os resultados da granulometria, representados no gráfico da Figura 13, que a curva de distribuição granulométrica desta brita se encaixa na zona de designação 9,5 / 25, conforme os limites fixados na Tabela 6, do Item 6.1.1, da ABNT NBR 7211 (2012).

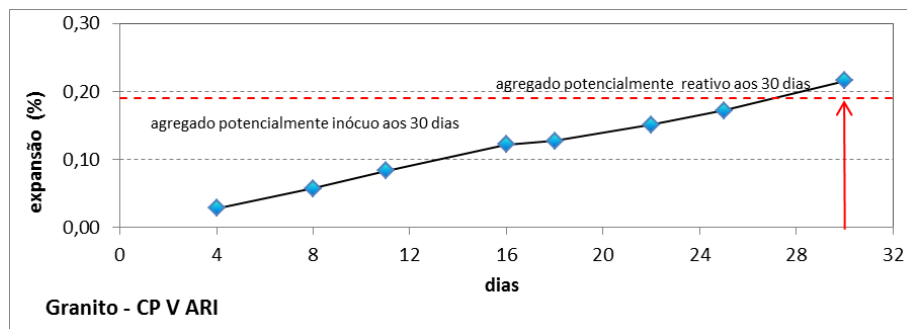
Figura 13 – Distribuição granulométrica da brita de granito.



Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com a recomendação do relatório de ensaio de análise petrográfica, foi, para melhor caracterizar o agregado, realizado o ensaio de determinação da sua reatividade potencial com os álcalis de cimento Portland utilizado pelo método acelerado, em barras de argamassa. O gráfico da Figura 14 apresenta o resultado do ensaio realizado, de acordo com a Parte 4 da ABNT NBR 15577 (2008), utilizando-se cimento padrão reservado no laboratório para este fim, com equivalente alcalino de 0,86%.

Figura 14 – Resultado – Reatividade potencial, método de barras, acelerado.

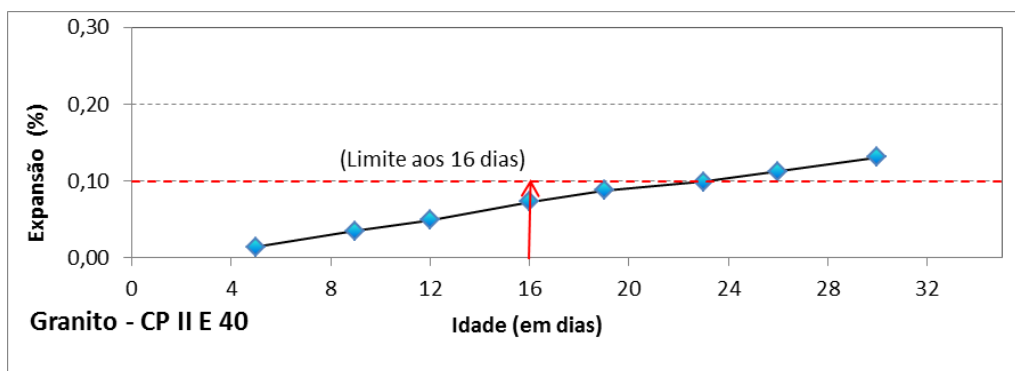


Fonte: Boletim de resultado de ensaios do IPT, Anexo D.

A partir deste resultado positivo para reatividade potencial, foi verificada a possibilidade de sua mitigação, utilizando-se apenas o cimento disponível na empresa de serviços de concretagem, CP II E 40, com adição de escória e equivalente alcalino da ordem de 0,56, conforme resultado apresentado na Tabela 10 do Anexo A, caracterização química do cimento.

O gráfico da Figura 15 apresenta o resultado do ensaio acelerado realizado para verificar a eficiência desta mudança a exemplo do ocorrido com a brita de diabásio.

Figura 15 – Verificação da mitigação da reatividade potencial, método de barras, acelerado.



Fonte: Boletim de resultado de ensaios do IPT, Anexo D.

Com a comprovação da mitigação da reatividade potencial inicialmente detectada, considera-se aqui que todos os resultados dos ensaios da caracterização da brita de granito atendem aos requisitos da especificação ABNT NBR 7211 (2009), sendo esta considerada própria para utilização na produção de concretos compostos com o cimento escolhido CP II E 40.

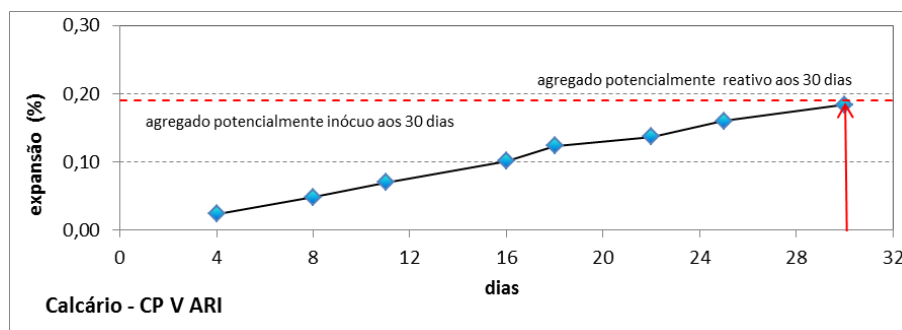
4.1.3.3 Agregado graúdo de calcário

Na produção do concreto utilizado na moldagem dos corpos estudos nesta pesquisa para embasamento desta dissertação trabalho foi, além das anteriormente apresentadas, utilizada brita de origem petrográfica calcárica, produzida em Araçariguama, SP.

De acordo com os resultados da análise petrográfica realizada, esta rocha é composta predominantemente por calcita, com quantidades subordinadas dos

O gráfico da Figura 17 apresenta o resultado do ensaio realizado, de acordo com a Parte 4 da ABNT NBR 15577 (2008), utilizando-se cimento reservado no laboratório para este fim, CP V ARI, com equivalente alcalino de 0,86.

Figura 17 – Resultado – Reatividade potencial, método de barras acelerado.



Fonte: Boletim de resultado de ensaios do IPT, Anexo D.

Sendo este agregado considerado potencialmente inócuo aos álcalis do cimento Portland e, considerando que os demais resultados dos ensaios de caracterização da brita de calcário atendem aos requisitos da especificação ABNT NBR 7211 (2009), este insumo é considerado próprio para sua utilização em produção de concretos.

4.1.4 Aditivos.

Os resultados dos ensaios de caracterização dos aditivos utilizados neste trabalho, apresentados pelo controle de qualidade de seus fabricantes, são apresentados no Anexo F e, atendem as recomendações da especificação brasileira ABNT NBR 11768:2011, podendo ser utilizados na produção de concreto, sem restrições.

4.2 Caracterização dos concretos estudados.

Apresentam-se neste item os resultados e análise da caracterização física e mecânica realizada nos concretos escolhidos para realização e embasamento deste trabalho.

4.2.1 Concreto no estado fresco.

Apresentam-se a seguir, nas Tabelas 12 a 17, os parâmetros físicos obtidos nos ensaios realizados nos concretos preparados para este estudo, no estado fresco. Os resultados aqui apresentados foram calculados, de acordo com as recomendações da ABNT NBR 9833 (2009), adotando-se para massa específica da água o valor correspondente a 24°C, de 997,3 kg/m³.

De acordo com o planejamento experimental apresentado, os concretos ora estudados apresentaram consistências dentro da faixa inicialmente especificada, S100, consistência esta que possibilita o bombeamento do concreto e sua correta compactação. No gráfico apresentado na Figura 18, podemos observar o desempenho de todos os traços das famílias estudadas, para este importante parâmetro. Os gráficos das Figuras 19 a 22 apresentam a aderência das demais propriedades no estado fresco, às relações água/cimento adotadas.

Na figura 23 encontram-se os consumos de cimento calculados de acordo com a ABNT NBR 9833 (2009).

Tabela 12 – Parâmetros do traço e suas propriedades no estado fresco, concretos com agregado graúdo de diabásio.

Identificação do traço	94	104	308	341	307	340	306	339	98	109
Traço unitário e quantidades utilizadas (kg)										
Cimento (1)	1,00	30,250	1,00	20,900	1,00	17,300	1,00	17,500	1,00	10,700
Areia de quartzo (a)	0,54	16,340	0,95	19,920	1,22	21,140	1,35	23,570	2,27	24,250
Areia artificial de calcário (a)	0,66	20,020	1,09	22,860	1,49	25,840	1,65	28,800	2,77	29,640
Agregado graúdo de diabásio (p)	2,11	64,090	2,96	61,780	3,57	61,800	3,84	67,140	5,50	58,900
Água	0,30	9,075	0,45	9,405	0,55	9,515	0,60	10,500	0,90	9,630
Aditivo polifuncional	0,257	0,242	0,125	0,105	0,061	0,061	0,070	0,070	0,086	0,080
Aditivo plastificante	-	-	-	-	-	-	-	-	0,139	0,128
Aditivo superplastificante	0,121	0,106	-	-	-	-	-	-	-	--
Propriedades no estado fresco										
Abatimento (mm)	120	120	115	115	120	120	120	120	110	110
Abatimento médio (mm)	120		115		120		120		110	
Massa específica (kg/m ³)	2.527	2.520	2.464	2.464	2.448	2.448	2.445	2.440	2.424	2.420
Massa específica média (kg/m ³)	2.524		2.465		2.448		2.443		2.422	
Teor de ar aprisionado (%)	0,7	0,9	1,6	1,7	1,9	2,0	2,0	2,0	2,2	2,6
Teor de ar aprisionado médio (%)	0,8		1,6		1,9		2,0		2,4	

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 13 – Consumos e parâmetros calculados de acordo com a ABNT NBR 9833 (2009), concretos com agregado graúdo de diabásio.

Identificação do traço	94	104	308	341	307	340	306	339	98	109
Consumos (kg/m³)										
Cimento (1)	547	545	382	382	312	312	290	289	195	185
Areia de quartzo (a)	295	295	364	364	382	382	391	390	442	441
Areia artificial de calcário (a)	362	361	418	418	466	466	477	476	540	539
Agregado graúdo de diabásio (p)	1159	1155	1129	1130	1116	1116	1113	1111	1073	1071
Água	164	164	172	172	172	172	174	174	175	175
Aditivo polifuncional	4,65	4,36	2,29	1,91	1,09	1,09	1,16	1,16	1,56	1,46
Aditivo plastificante	-	-	-	-	-	-	-	-	2,53	2,53
Aditivo superplastificante	2,19	1,91	-	-	-	-	-	-	-	-
Parâmetros calculados de acordo com a ABNT NBR 9833 (2009)										
Teor de ar aprisionado (%)	0,6	0,8	1,8	1,7	2,1	2,1	2,0	2,2	2,32	2,5
Teor de ar aprisionado médio (%)	0,7		1,7		2,1		2,1		2,4	
% de argamassa seca $(1+a/1+a+p)*100$	51									
Água/cimento (x) (kg/kg)	0,30		0,45		0,55		0,60		0,90	

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 14 – Parâmetros do traço e suas propriedades no estado fresco, concretos com agregado graúdo de granito.

Identificação do traço	94	104	308	341	307	340	306	339	98	109
Traço unitário e quantidades utilizadas (kg)										
Cimento (1)	1,00	30,250	1,00	20,900	1,00	17,300	1,00	17,500	1,00	10,700
Areia de quartzo (a)	0,54	16,340	0,95	19,920	1,22	21,140	1,35	23,570	2,27	24,250
Areia artificial de calcário (a)	0,66	20,020	1,09	22,860	1,49	25,840	1,65	28,800	2,77	29,640
Agregado graúdo de granito (p)	2,11	64,090	2,96	61,780	3,57	61,800	3,84	67,140	5,50	58,900
Água	0,30	9,075	0,45	9,405	0,55	9,515	0,60	10,500	0,90	9,630
Aditivo polifuncional	0,257	0,257	0,178	0,178	0,052	0,069	0,105	0,105	0,086	0,80
Aditivo plastificante	-	-	-	-	-	-	-	-	0,121	0,136
Aditivo superplastificante	0,121	0,136	-	-	-	-	-	-	-	--
Propriedades no estado fresco										
Abatimento (mm)	110	110	110	110	120	120	120	110	110	110
Abatimento médio (mm)	110		110		120		115		110	
Massa específica (kg/m ³)	2.455	2.451	2.398	2.388	2.381	2.385	2.374	2.382	2.360	2.358
Massa específica média (kg/m ³)	2.453		2.398		2.383		2.378		2.359	
Teor de ar aprisionado (%)	0,6	0,8	1,3	1,6	1,6	1,8	1,8	2,1	2,2	2,6
Teor de ar aprisionado médio (%)	0,7		1,4		1,7		1,9		2,4	

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 15 – Consumos e parâmetros calculados de acordo com a ABNT NBR 9833 (2009), concretos com agregado graúdo de granito.

Identificação do traço	94	104	308	341	307	340	306	339	98	109
Consumos (kg/m³)										
Cimento (1)	531	530	372	370	305	304	282	283	190	190
Areia de quartzo (a)	287	287	354	354	371	372	379	381	430	430
Areia artificial de calcário (a)	352	351	406	406	454	454	464	465	526	525
Agregado graúdo de granito (p)	1126	1124	1099	1099	1085	1087	1081	1084	1044	1043
Água	159	159	167	167	167	167	169	170	171	170
Aditivo polifuncional	4,52	4,51	3,16	3,16	0,91	1,22	1,69	1,70	1,52	1,42
Aditivo plastificante	-	-	-	-	-	-	-	-	2,47	2,27
Aditivo superplastificante	2,13	2,39	-	-	-	-	-	-	-	-
Parâmetros calculados de acordo com a ABNT NBR 9833 (2009)										
Teor de ar aprisionado (%)	0,4	0,6	1,5	1,5	1,9	1,7	2,0	1,6	2,1	2,2
Teor de ar aprisionado médio (%)	0,5		1,5		1,8		1,8		2,1	
Argamassa seca $(1+a/1+a+p)*100$ (%)	51									
Água/cimento (x) (kg/kg)	0,30		0,45		0,55		0,60		0,90	

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 16 – Parâmetros do traço e suas propriedades no estado fresco, concretos com agregado graúdo de calcário.

Identificação do traço	169	194	263	290	262	289	261	288	170	200
Traços unitário e quantidades utilizadas (kg)										
Cimento (1)	1,00	30,250	1,00	20,900	1,00	17,300	1,00	17,500	1,00	10,700
Areia de quartzo (a)	0,54	16,340	0,95	19,920	1,22	21,140	1,35	23,570	2,27	24,250
Areia artificial de calcário (a)	0,66	20,020	1,09	22,860	1,49	25,840	1,65	28,800	2,77	29,640
Agregado graúdo de calcário(p)	2,11	64,090	2,96	61,780	3,57	61,800	3,84	67,140	5,50	58,900
Água	0,30	9,075	0,45	9,405	0,55	9,515	0,60	10,500	0,90	9,630
Aditivo polifuncional	0,242	0,242	0,105	0,105	0,061	0,061	0,070	0,070	0,086	0,080
Aditivo plastificante	-	-	-	-	-	-	-	-	0,139	0,139
Aditivo superplastificante	0,121	0,106	-	-	-	-	-	-	-	-
Propriedades no estado fresco										
Abatimento (mm)	110	120	120	110	110	120	120	120	120	110
Abatimento médio (mm)	115		115		155		120		115	
Massa específica (kg/m ³)	2.501	2.503	2.451	2.443	2.428	2.433	2.424	2.424	2.404	2.408
Massa específica média (kg/m ³)	2.502		2.447		2.431		2.424		2.406	
Teor de ar aprisionado (%)	0,7	0,9	1,4	1,4	2,1	2,1	2,0	1,9	2,1	2,1
Teor de ar aprisionado médio (%)	0,8		1,4		2,1		1,9		2,1	

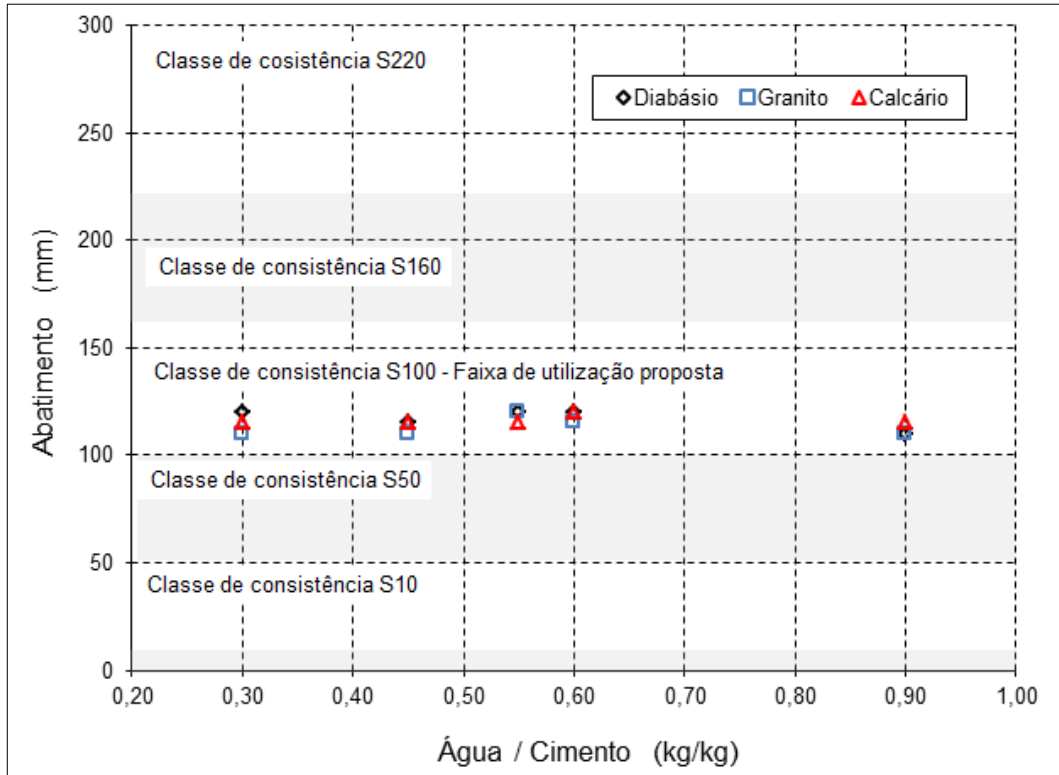
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 17 – Consumos e parâmetros calculados de acordo com a ABNT NBR 9833 (2009), concretos com agregado graúdo de calcário.

Identificação do traço	169	194	263	290	262	289	261	288	170	200
Consumos (kg/m ³)										
Cimento (1)	541	542	380	378	310	310	288	288	193	194
Areia de quartzo (a)	292	293	362	361	379	379	387	387	438	440
Areia artificial de calcário (a)	358	358	415	414	463	464	473	473	535	537
Agregado graúdo de calcário (p)	1147	1148	1123	1119	1107	1109	1103	1103	1064	1068
Água	162	163	171	170	170	171	173	173	174	174
Aditivo polifuncional	4,33	4,33	1,90	1,89	1,08	1,09	1,15	1,15	1,55	1,46
Aditivo plastificante	-	-	-	-	-	-	-	-	2,51	2,52
Aditivo superplastificante	2,16	1,90	-	-	-	-	-	-	-	-
Parâmetros calculados de acordo com a ABNT NBR 9833 (2009),										
Teor de ar aprisionado calculado (%)	0,7	0,6	1,4	1,7	2,1	1,9	2,0	2,0	2,3	2,1
Teor de ar aprisionado calculado médio (%)	0,6		1,5		2,0		2,0		2,2	
% de argamassa seca $(1+a/1+a+p)*100$	51									
Água/cimento (x) (kg/kg)	0,30		0,45		0,55		0,60		0,90	

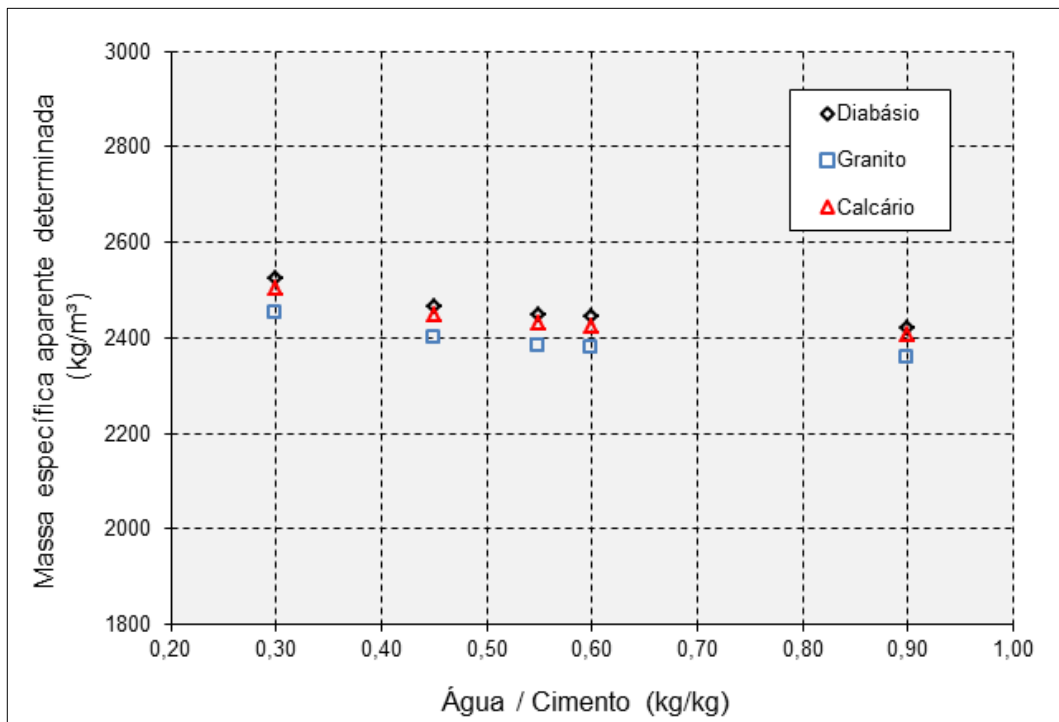
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 18 – Índice de consistência médio, determinado.



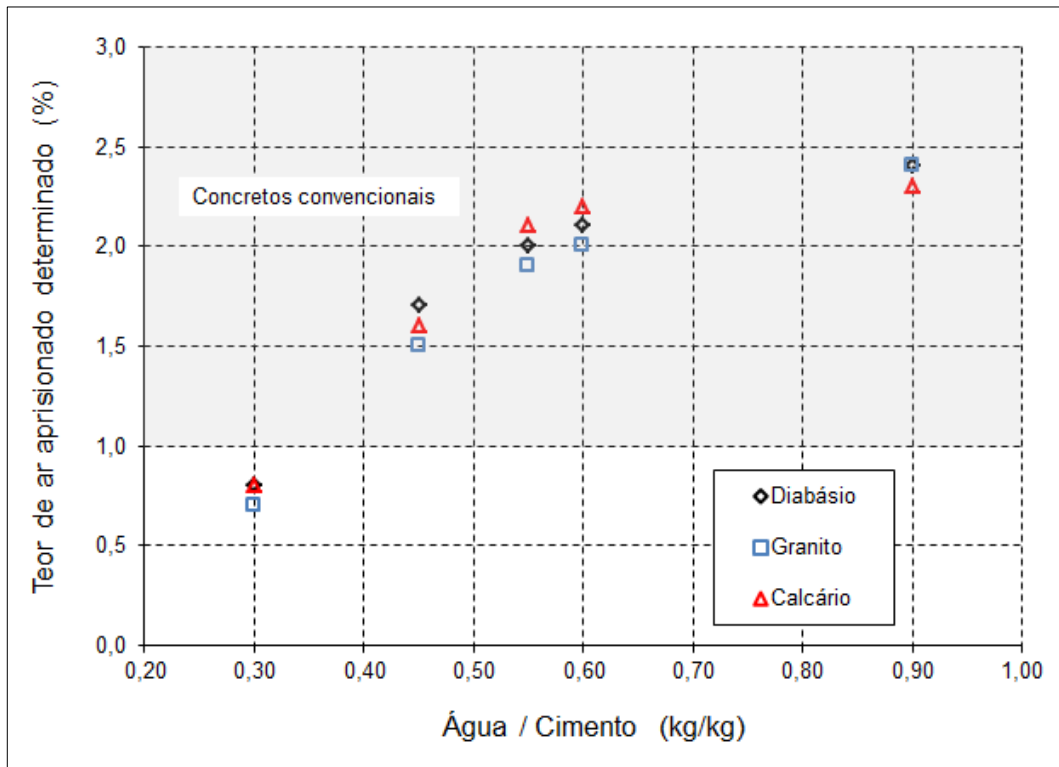
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 19 – Massas específicas aparentes, médias determinadas.



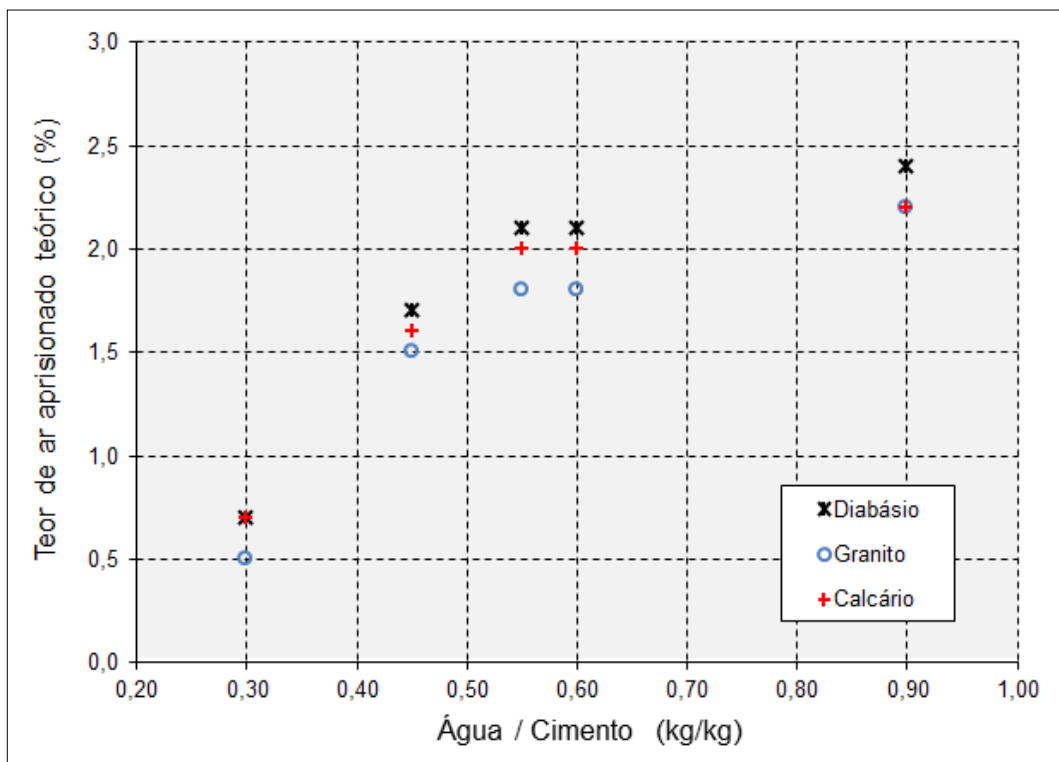
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 20 – Teor de ar aprisionado determinado e limites definidos por Geyer e De Sá(2006), para concretos convencionais.



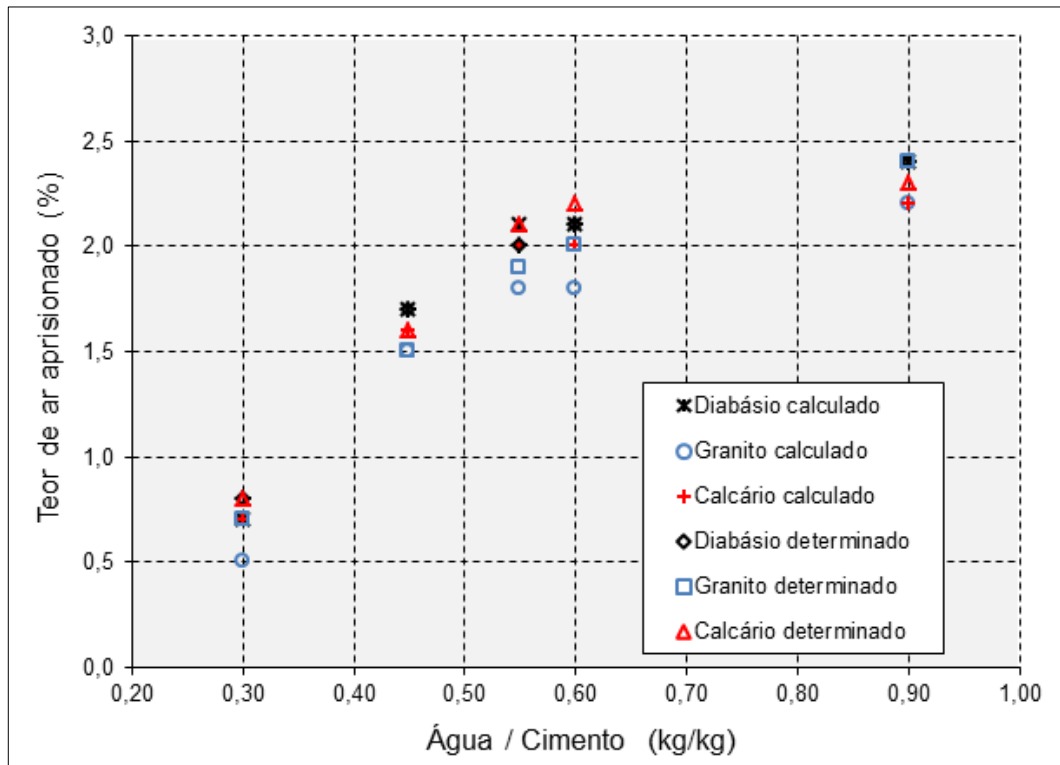
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 21– Teor de ar aprisionado teórico.



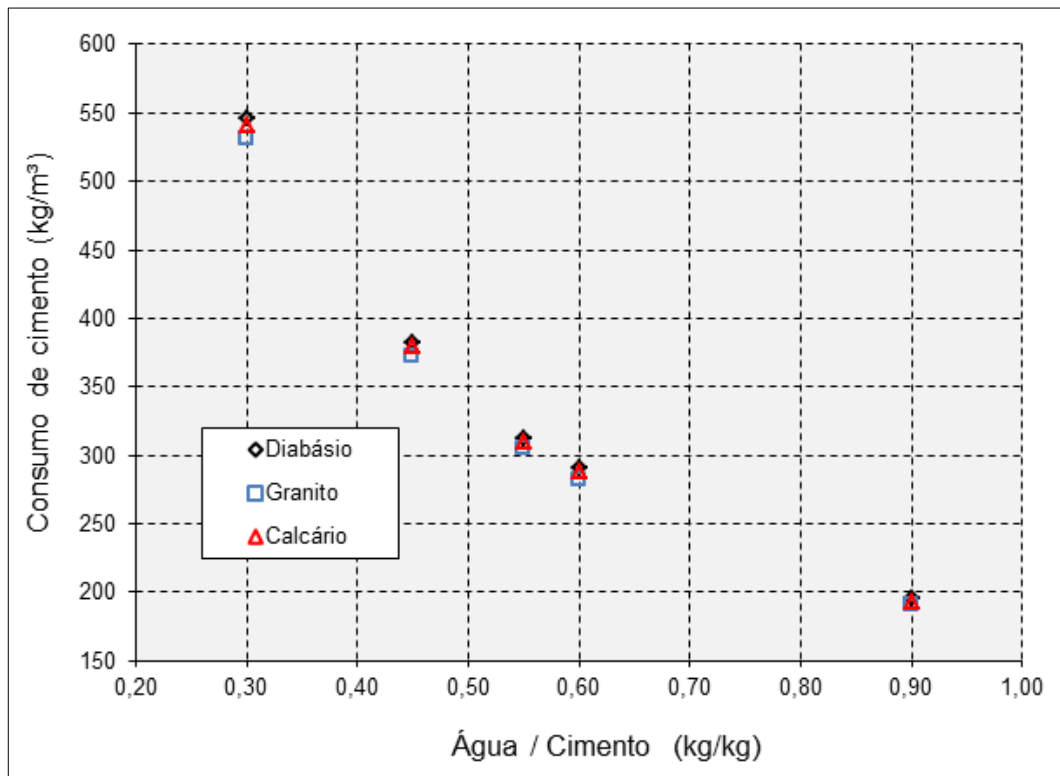
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22 – Teor de ar aprisionado determinado e teórico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23 – Consumo de cimento médio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Todas as propriedades no estado fresco atenderam aos pré-requisitos estabelecidos para a realização desta pesquisa.

A massa específica aparente e o teor de ar aprisionado do concreto não variaram significativamente entre os traços análogos estudados e, apresentaram-se inversamente proporcionais as relações água/cimento. De acordo com Geyer e De Sá (2006) concretos convencionais, sem adição de aditivos incorporadores de ar possuem teores de ar aprisionado entre 1% e 3%. Percentuais de ar incorporado ao concreto, pela utilização de aditivos, acima de 5%, podem trazer prejuízos ao desempenho mecânico destas misturas.

Os teores de ar aprisionado teórico das misturas, calculados de acordo normalização específica já citada, acompanharam os resultados dos ensaios realizados, de acordo como esperado.

4.2.2 Concreto no estado endurecido.

De acordo com o plano experimental apresentado, foram moldados e curados, em câmara úmida, até os 7 dias de idade, para realização destes ensaios, corpos de prova cilíndricos de dimensões nominais de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura, de acordo com a ABNT NBR 5738 (2015), ficando acondicionados no ambiente no laboratório até a data de ensaio, aos 28 dias de idade.

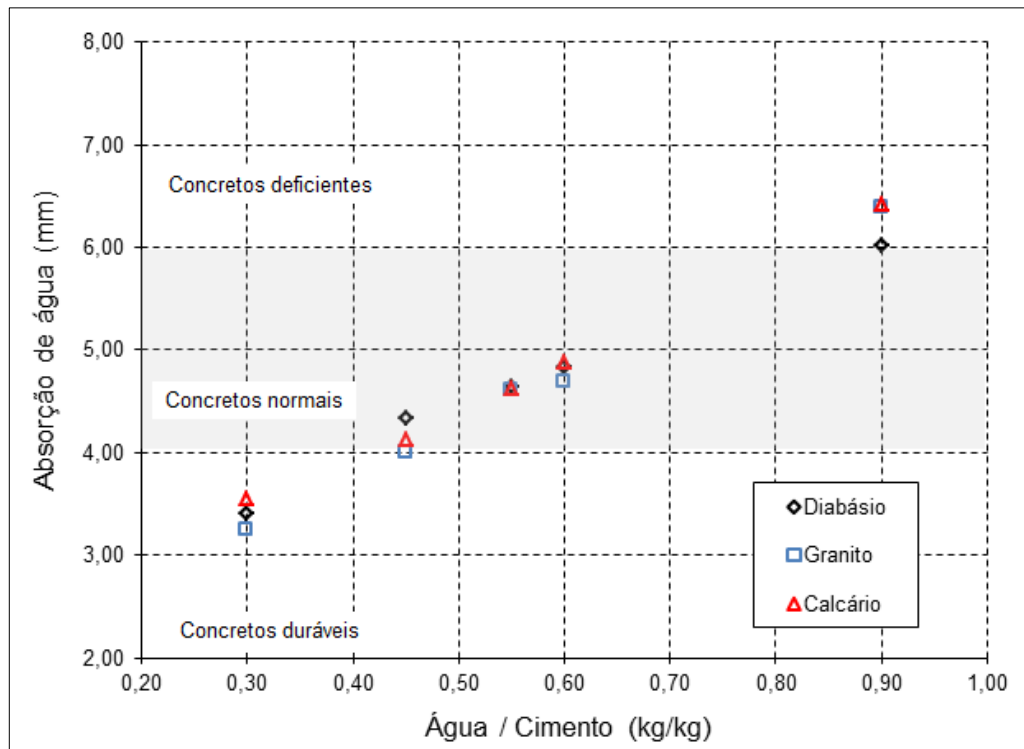
4.2.2.1 Índices físicos.

As propriedades físicas dos concretos endurecidos determinam a sua durabilidade. As Tabelas 18, 19 e 20 apresentam as médias dos resultados de absorção de água por imersão, índice de vazios permeáveis e suas massas específicas, detalhes dos resultados individuais e dos procedimentos de ensaios de caracterização física no estado endurecido poderão ser consultados no Anexo G desta dissertação.

O gráfico da Figura 24 apresentado a seguir, mostra os resultados médios obtidos no ensaio de absorção de água dos concretos estudados correlacionados com a relação água/cimento e os limites propostos por Helene (1983), concretos duráveis até 4,2%, entre 4,2% e 6,3% concretos normais e, acima de 6,3% de absorção de água, concretos deficientes. Estes resultados, de uma forma geral

mostram que a absorção de água do concreto aumenta em função do aumento da relação água/cimento, devido a um aumento da sua porosidade, Mehta e Monteiro (2014), afetando negativamente a sua durabilidade.

Figura 24 – Resultados médios de absorção de água e limites propostos por Helene (1983).



Fonte: Elaborado pelo autor com resultados do Boletim de Resultados de Ensaio IPT, Anexo G.

Neville (2016) classifica como bons concretos, os concretos com taxas de absorção de água abaixo de 10%.

A ABNT NBR 8451 (1998) estabelece o limite máximo de 6,0% de absorção média e o limite de 7,5% para o resultado individual para concretos destinados a confecção de postes para distribuição de energia elétrica, que ficarão expostos às intempéries. Isto evidencia a qualidade do concreto, mesmo com os baixos consumos de cimento Portland, estudados.

Para concretos de alto desempenho, aqueles com resistência à compressão acima de 40 MPa, Kosmatka *et al* (2003), estabelecem em seu manual, como adequados, índices de absorção entre 2% e 5%.

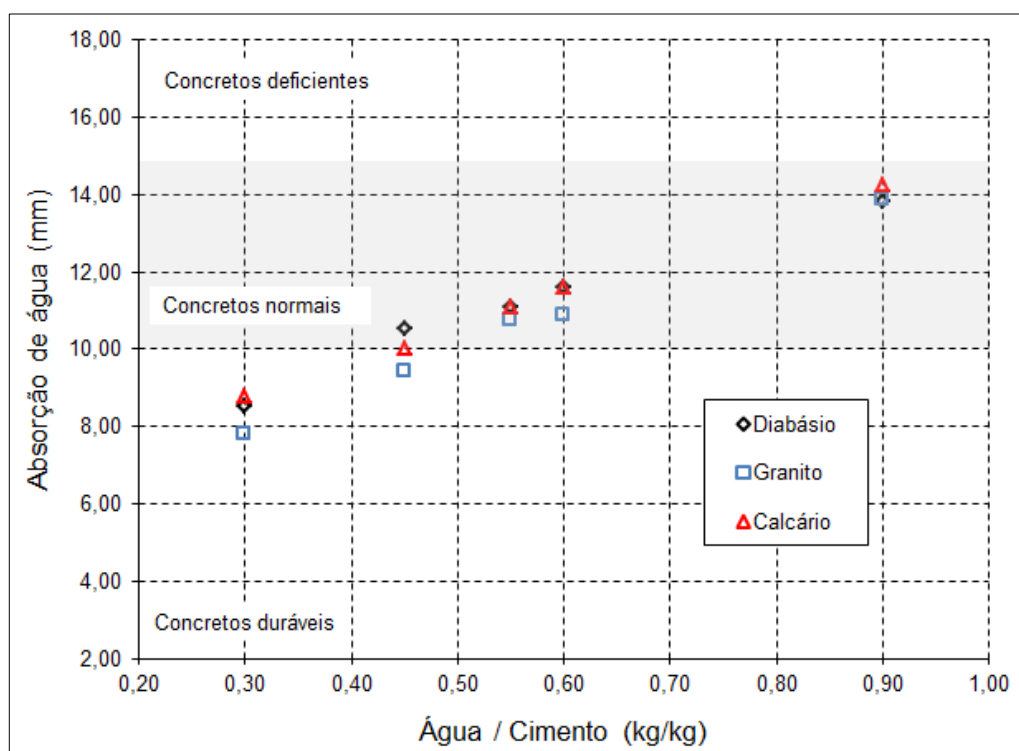
Para Helene (1993), o índice de vazios permeáveis máximo de 15% limita os concretos normais dos concretos deficientes e, considera que concretos até 10% sejam concretos duráveis. Entre 10% e 15% situam-se os concretos considerados normais.

Já para os índices de vazios permeáveis observados e conforme apresentados no gráfico da Figura 25, Whiting e Nagi (1998) indicam que, para índices de resistência à compressão acima de 40 MPa um índice de vazios próximo de 6% é adequado para concretos duráveis.

Nos resultados obtidos para este estudo o maior resultado médio de absorção de água determinado e apresentado foi de 6,42%, obtido nos ensaios realizados no concreto de relação água cimento 0,90, produzido com agregado graúdo de calcário, com resistência à compressão média de 19,9 MPa.

Já no caso do índice de vazios permeáveis, o índice de 15%, considerado limite entre concretos normais e deficientes, não foi superado em nenhum dos traços estudados.

Figura 25 – Resultados médios do índice de vazios permeáveis e limites propostos por Helene (1993).



Fonte: Elaborado pelo autor com resultados do Boletim de Resultados de Ensaio IPT, Anexo G.

Nos gráficos das Figuras 26 a 28 apresentam-se os resultados médios das massas específicas do concreto no estado seco, saturado e sua massa específica real, conforme determinadas de acordo com cada relação água/cimento estudada.

De uma maneira geral, nestes resultados pode-se observar que, conforme já discutido anteriormente, os valores das massas secas e saturadas, tendem a serem maiores para aquelas relações água/cimento menores, onde os consumos de cimento são mais elevados e onde são observados os menores índices de vazios permeáveis. Já para as massas específicas reais, percebe-se que os resultados dos concretos produzidos com agregados graúdos de mesma natureza petrográfica, sofrem pouca influência da relação água/cimento do concreto, e seus resultados são mais próximos, uma vez que todos os seus vazios permeáveis foram preenchidos por água, durante o procedimento de fervura, ao qual o corpo de prova é submetido, durante o procedimento de ensaio.

A ABNT NBR 6118 (2014) considera como normais concretos com massas específicas secas entre 2.000 kg/m^3 e 2.800 kg/m^3 , após secagem em estufa. Para efeito de cálculo, na execução de projetos de estruturas, sugere que seja adotado o valor de 2.400 kg/m^3 , para massa específica real do concreto simples.

Tabela 18 – Propriedades no estado endurecido, concretos com agregado graúdo de diabásio.

Identificação do traço	94	104	308	341	307	340	306	339	98	109
Relação água/cimento	0,30		0,45		0,55		0,60		0,90	
Índices físicos médios										
Absorção (%)	3,33	3,49	4,41	4,25	4,73	4,49	4,78	4,89	5,98	6,07
Média	3,41		4,33		4,64		4,83		6,02	
Índice de vazios permeáveis (%)	8,35	8,68	10,71	10,33	11,32	10,85	11,42	11,74	13,69	13,99
Média	8,51		10,52		11,08		11,58		13,84	
Massa específica seca (kg/dm ³)	2,50	2,48	2,43	2,43	2,40	2,42	2,39	2,40	2,29	2,30
Média	2,49		2,43		2,41		2,39		2,29	
Massa específica saturada (kg/dm ³)	2,59	2,57	2,54	2,53	2,51	2,52	2,50	2,52	2,43	2,44
Média	2,58		2,53		2,51		2,51		2,43	
Massa específica real (kg/dm ³)	2,73	2,72	2,72	2,71	2,70	2,71	2,70	2,72	2,65	2,68
Média	2,72		2,71		2,70		2,71		2,66	

Fonte: Elaborado pelo autor com dados do Boletim de Resultados de Ensaios IPT, Anexo G.

Tabela 19 – Propriedades no estado endurecido, concretos com agregado graúdo de granito.

Identificação do traço	298	327	346	369	345	368	344	367	280	328
Relação água/cimento	0,30		0,45		0,55		0,60		0,90	
Resistências médias à compressão (MPa)										
Índices físicos médios										
Absorção (%)	3,02	3,48	4,05	3,94	4,84	4,38	5,04	4,33	5,95	6,82
Média	3,25		3,99		4,61		4,68		6,38	
Índice de vazios permeáveis (%)	7,33	8,29	9,56	9,32	11,19	10,27	11,59	10,18	12,95	14,75
Média	7,81		9,44		10,73		10,88		13,85	
Massa específica seca (kg/dm ³)	2,43	2,38	2,369	2,36	2,31	2,35	2,30	2,35	2,18	2,16
Média	2,40		2,36		2,33		2,32		2,17	
Massa específica saturada (kg/dm ³)	2,50	2,47	2,46	2,46	2,42	2,45	2,41	2,46	2,31	2,31
Média	2,48		2,46		2,43		2,43		2,31	
Massa específica real (kg/dm ³)	2,62	2,60	2,61	2,61	2,60	2,61	2,60	2,62	2,50	2,54
Média	2,61		2,61		2,60		2,61		2,52	

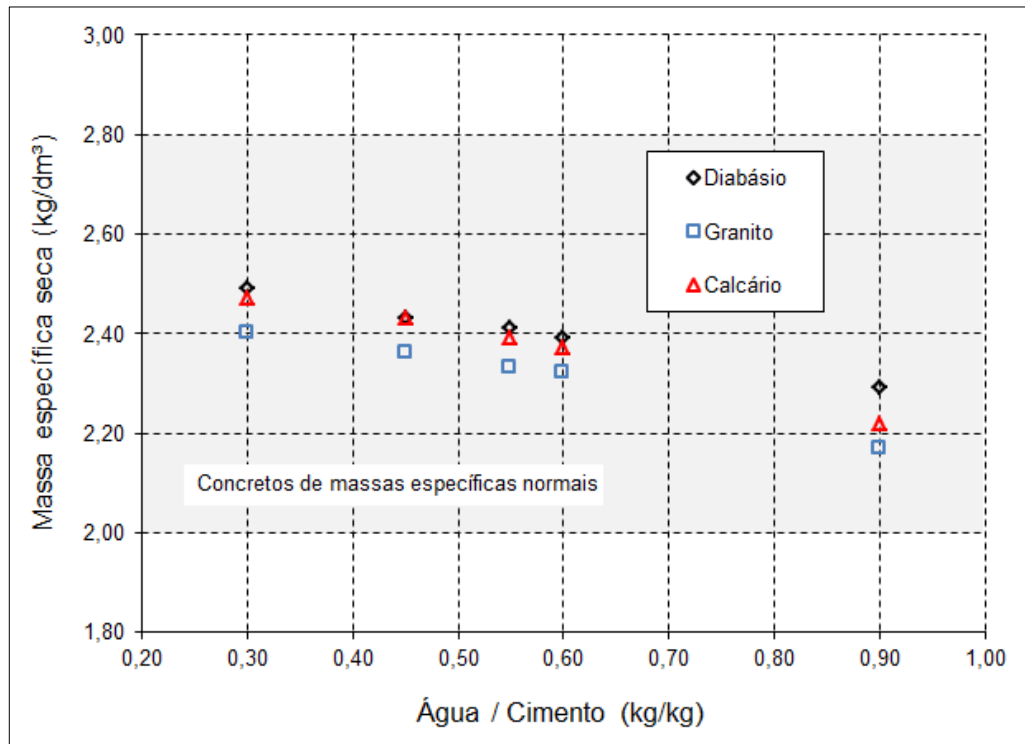
Fonte: Elaborado pelo autor com dados do Boletim de Resultados de Ensaios IPT, Anexo G.

Tabela 20 – Propriedades no estado endurecido, concretos com agregado graúdo de calcário.

Identificação do traço	169	194	263	290	262	289	261	288	170	200
Relação água/cimento	0,30		0,45		0,55		0,60		0,90	
Resistências à compressão (MPa)										
Índices físicos médios										
Absorção (%)	3,79	3,32	3,73	4,51	4,40	4,88	4,63	5,14	6,99	5,85
Média	3,55		4,12		4,62		4,88		6,42	
Índice de vazios permeáveis (%)	9,25	8,32	9,09	10,93	10,47	11,72	10,90	12,28	15,50	13,00
Média	8,78		10,01		11,09		11,59		14,25	
Massa específica seca (kg/dm ³)	2,44	2,50	2,43	2,43	2,38	2,40	2,35	2,39	2,22	2,22
Média	2,47		2,43		2,39		2,37		2,22	
Massa específica saturada (kg/dm ³)	2,53	2,59	2,53	2,53	2,48	2,52	2,46	2,51	2,37	2,35
Média	2,56		2,53		2,50		2,48		2,36	
Massa específica real (kg/dm ³)	2,69	2,73	2,68	2,72	2,66	2,72	2,64	2,72	2,62	2,55
Média	2,71		2,70		2,69		2,68		2,58	

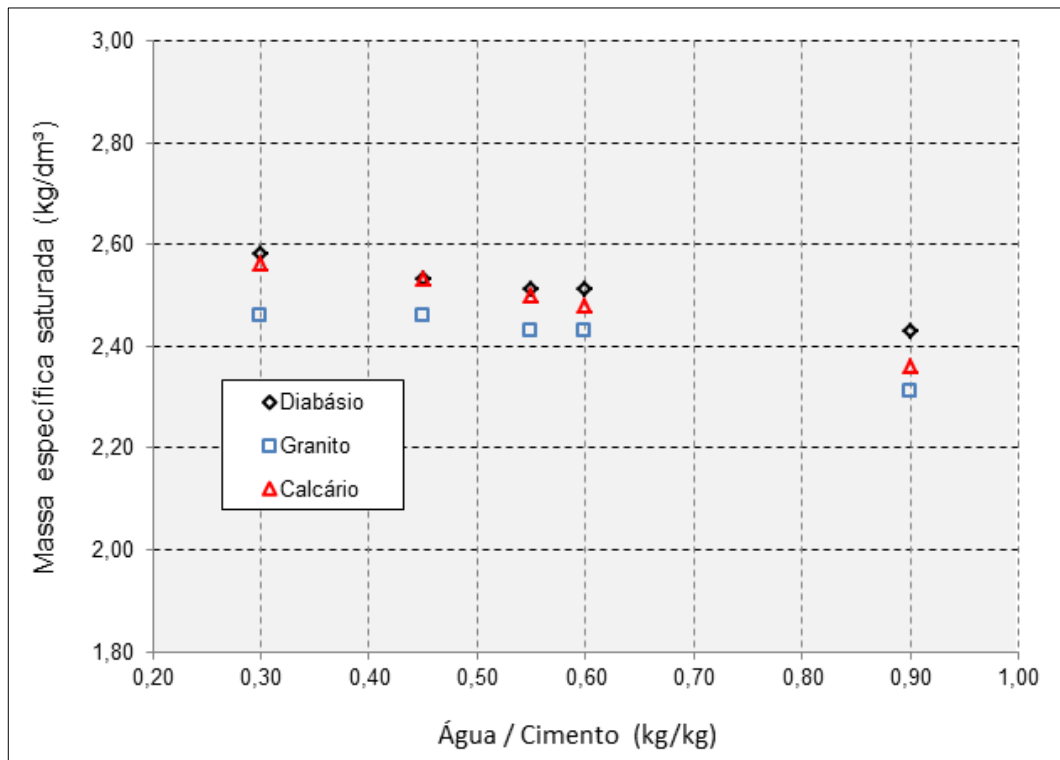
Fonte: Elaborado pelo autor com dados do Boletim de Resultados de Ensaios IPT, Anexo G.

Figura 26 – Resultados médios de massa específica seca e limites da ABNT NBR 6118 (2014).



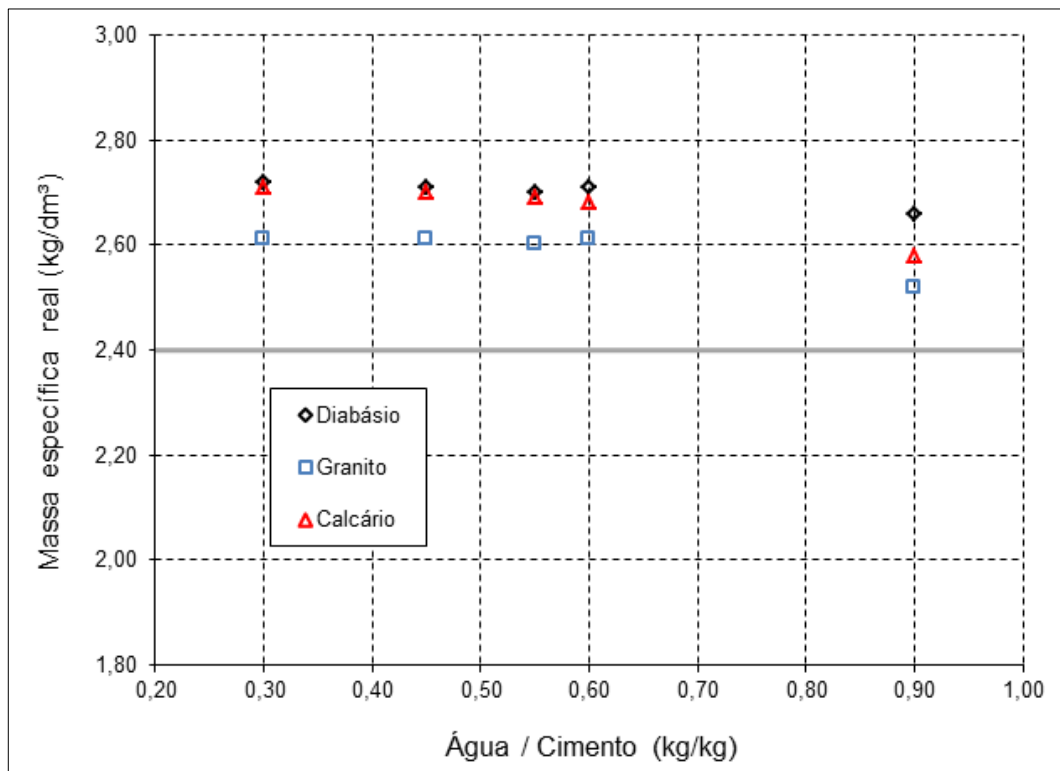
Fonte: Elaborado pelo autor com resultados do Boletim de Resultados de Ensaio IPT, Anexo G.

Figura 27 – Resultados médios de massa específica saturada.



Fonte: Elaborado pelo autor com resultados do Boletim de Resultados de Ensaio IPT, Anexo G.

Figura 28 – Resultados médios de massa específica real e valor sugerido pela ABNT NBR 6118 (2014), para projeto, 2,40 kg/dm³.



Fonte: Elaborado pelo autor com resultados do Boletim de Resultados de Ensaios IPT, Anexo G.

4.2.2.2 Resistência à compressão.

Os resultados de resistência à compressão dos concretos apresentados no, Anexo H, ora estudados e realizados para parametrizar os ensaios de módulo estáticos realizados, apresentaram, se analisados de acordo com as orientações do Anexo B da ABNT NBR 5739 (2007), coeficientes de variação do ensaio, iguais ou abaixo de 1,5 % que são considerados excelentes, vide Tabela 2.B. da referida norma. Ainda o ACI 214 (2012), limita esta classificação para corpos de prova moldados para estudos laboratoriais em 2,0%. A Tabela 20 abaixo apresenta os resultados desta análise estatística realizada.

Tabela 21 – Avaliação estatística dos ensaios à compressão.

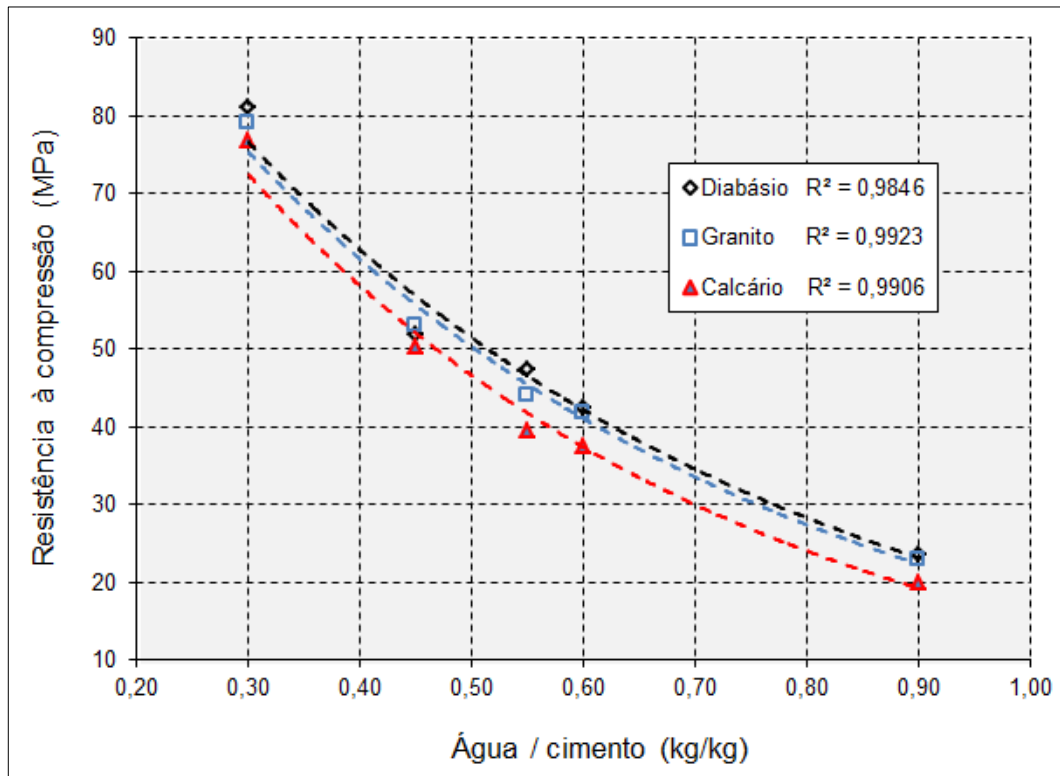
Traços	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
Diabásio	0,7	1,4	0,7	1,5
Granito	0,7	1,5		
Calcário	0,6	1,4		

Fonte: Elaborado pelo autor com resultados do Boletim de Resultados de Ensaio IPT, Anexo H.

As Tabelas 22 a 24 apresentam os resultados de determinação da resistência à compressão, médios por traço e médios por relação água/cimento, com seus respectivos desvios padrões (DP) e coeficientes de variação, (CV).

A resistência à compressão do concreto, propriedade mais importante do concreto objeto de controle e aceitação de estruturas, depende principalmente da relação água/cimento e sua compactação, Neville (2016).

Conforme os estudos apresentados por Duff Abrams em 1918, a resistência à compressão é inversamente proporcional à relação água/cimento, isso significa que quanto maior for o seu valor, menor será a resistência obtida, em função da maior porosidade da matriz, Helene (1997); Helene e Terzian (1993) e Helene e Tutikian (2011). A natureza petrográfica dos agregados graúdos assim como a sua massa específica são fatores que, influenciam nestes resultados. O gráfico apresentado na Figura 29 ilustra este crescimento com os resultados de resistência à compressão obtidos nesta pesquisa.

Figura 29 – Resistências à compressão médias.

Fonte: Elaborado pelo autor com resultados do Boletim de Resultados de Ensaios IPT, Anexo H.

Tabela 22 – Resistência à compressão média, concretos com agregado graúdo de diabásio.

	Relação água/cimento (kg/kg)									
	0,30		0,45		0,55		0,60		0,90	
	T94	T104	T308	T341	T307	T340	T306	T339	T98	T109
Média	80,0	81,9	52,3	51,3	47,6	47,0	43,1	41,8	24,2	22,8
DP	0,85	0,99	0,28	0,71	0,57	0,28	0,57	0,71	0,28	0,28
CV (%)	1,06	1,21	0,54	1,38	1,19	0,60	1,31	1,69	1,17	1,24
Média	81,0		51,8		47,3		42,5		23,5	
DP	1,3		0,7		0,4		0,9		1,0	
CV (%)	1,6		1,4		0,9		2,2		4,2	

Fonte: Elaborado pelo autor com resultados do Boletim de Resultados de Ensaios IPT, Anexo H.

Tabela 23 – Resistência à compressão média, concretos com agregado graúdo de granito.

	Relação água/cimento (kg/kg)									
	0,30		0,45		0,55		0,60		0,90	
	T298	T327	T346	T369	T345	T368	T344	T367	T280	T328
Média	79,3	78,7	53,1	52,6	43,5	44,6	41,1	42,3	23,5	22,0
DP	0,85	0,71	0,71	0,71	0,57	0,57	0,57	0,57	0,28	0,28
CV (%)	1,07	0,90	1,33	1,34	1,30	1,27	1,38	1,34	1,20	1,29
Média	79,0		52,9		44,1		41,7		22,8	
DP	0,4		0,3		0,8		0,8		1,1	
CV (%)	0,54		0,7		1,8		2,0		4,6	

Fonte: Elaborado pelo autor com resultados do Boletim de Resultados de Ensaios IPT, Anexo H.

Tabela 24 – Resistência à compressão média, concretos com agregado graúdo de calcário.

	Relação água/cimento (kg/kg)									
	0,30		0,45		0,55		0,60		0,90	
	T169	T194	T263	T290	T262	T289	T261	T288	T170	T200
Média	75,8	77,7	50,4	50,0	39,6	39,2	37,1	38,0	20,0	19,8
DP	0,57	0,85	0,57	0,85	0,57	0,57	0,28	0,57	0,28	0,28
CV (%)	0,75	1,09	1,12	1,70	1,43	1,44	0,76	1,49	1,41	1,43
Média	76,8		50,2		39,4		37,6		19,9	
DP	1,3		0,3		0,3		0,6		0,1	
CV (%)	1,7		0,6		0,7		1,7		0,7	

Fonte: Elaborado pelo autor com resultados do Boletim de Resultados de Ensaios IPT, Anexo H.

4.2.2.3 Módulos estáticos e dinâmicos.

Apresentam-se a seguir os resultados dos ensaios de determinação do módulo de elasticidade estático. Estes resultados foram tratados e analisados conforme o procedimento descrito no programa experimental, Capítulo 3, desta dissertação.

A íntegra dos resultados e detalhes dos procedimentos e equipamentos utilizados poderá ser consultada nos boletins de resultados de ensaios do IPT, constantes Anexos H e no Relatório de Ensaio PhD nº 293/2016, Anexo J desta dissertação.

Lembre-se aqui que os resultados de todos os ensaios estáticos realizados, de acordo com o boletim de resultados de ensaios do IPT Anexo H, desta dissertação, atenderam aos limites sugeridos pela ABNT NBR 8522 (2008) para dispersão no ensaio, Item 6.2.4, e repetitividade, Item 8.1, sendo assim as duas séries, do mesmo traço, serem consideradas iguais.

4.2.2.3.1 Módulo estático de elasticidade, $E_{ci} 0,3 f_c$.

Nas Tabelas 25, 26 e 27, apresentadas a seguir, são mostrados os resultados médios do módulo de elasticidade, $E_{ci} 0,3 f_c$, os desvios padrões, (DP) e os coeficientes de variação, (CV), calculados para cada série e entre as séries análogas. São apresentados também os resultados da análise feita para determinar a semelhança estatística dos resultados destes ensaios, realizados nestas séries.

O gráfico da Figura 30 apresenta a correlação entre as relações água/cimento escolhidas e o módulo de elasticidade, $E_{ci} 0,3 f_c$, determinado.

A representação gráfica da Figura 31 mostra as curvas polinomiais de tendência ajustadas, as suas respectivas equações de regressão e o coeficiente de determinação, (R^2), de cada uma das naturezas petrográficas estudadas.

Cabe aqui ressaltar que, para o caso do módulo de elasticidade $E_{ci} 0,3 f_c$, todas as séries que, de acordo com o plano experimental proposto, ensaiadas em duplicata, foram consideradas estatisticamente iguais, para um intervalo de confiança de 95%.

Tabela 25 – Resultados médios, (GPa), do módulo de elasticidade, E_{ci} 0,3 f_c , desvios padrões, coeficientes de variação e semelhança estatística. Agregado graúdo de diabásio.

	Relação água/cimento (kg/kg)									
	0,30		0,45		0,55		0,60		0,90	
	T94	T104	T308	T341	T307	T340	T306	T339	T98	T109
Média	50,9	50,5	43,7	44,0	40,8	39,6	39,7	37,2	27,9	25,9
DP	0,6	0,9	0,8	0,7	0,5	0,7	1,2	0,3	0,4	0,7
CV (%)	1,1	1,8	1,8	1,5	1,2	1,7	2,9	0,8	1,6	2,9
Média	50,7		43,9		40,2		38,4		26,9	
DP	0,7		0,7		0,8		1,5		1,2	
CV (%)	1,5		1,6		2,1		3,9		4,4	
Hipótese	Atende		Atende		Atende		Atende		Atende	

Fonte: Elaborado pelo autor com resultados do Boletim de Resultados de Ensaios IPT, Anexo H.

Tabela 26 – Resultados médios, (GPa), do módulo de elasticidade, E_{ci} 0,3 f_c , desvios padrões, coeficientes de variação e semelhança estatística. Agregado graúdo de granito.

	Relação água/cimento (kg/kg)									
	0,30		0,45		0,55		0,60		0,90	
	T298	T327	T346	T369	T345	T368	T344	T367	T280	T328
Média	43,3	42,7	37,4	38,7	35,2	35,6	32,6	34,3	24,2	23,5
DP	1,0	1,0	0,9	0,3	0,8	0,8	0,5	0,3	0,2	0,3
CV (%)	2,2	2,4	2,3	0,7	2,2	2,3	1,6	1,0	1,0	1,3
Média	43,0		38,0		35,4		33,5		23,9	
DP	1,0		0,9		0,8		1,0		0,5	
CV (%)	2,3		2,5		2,2		3,0		2,0	
Hipótese	Atende		Atende		Atende		Atende		Atende	

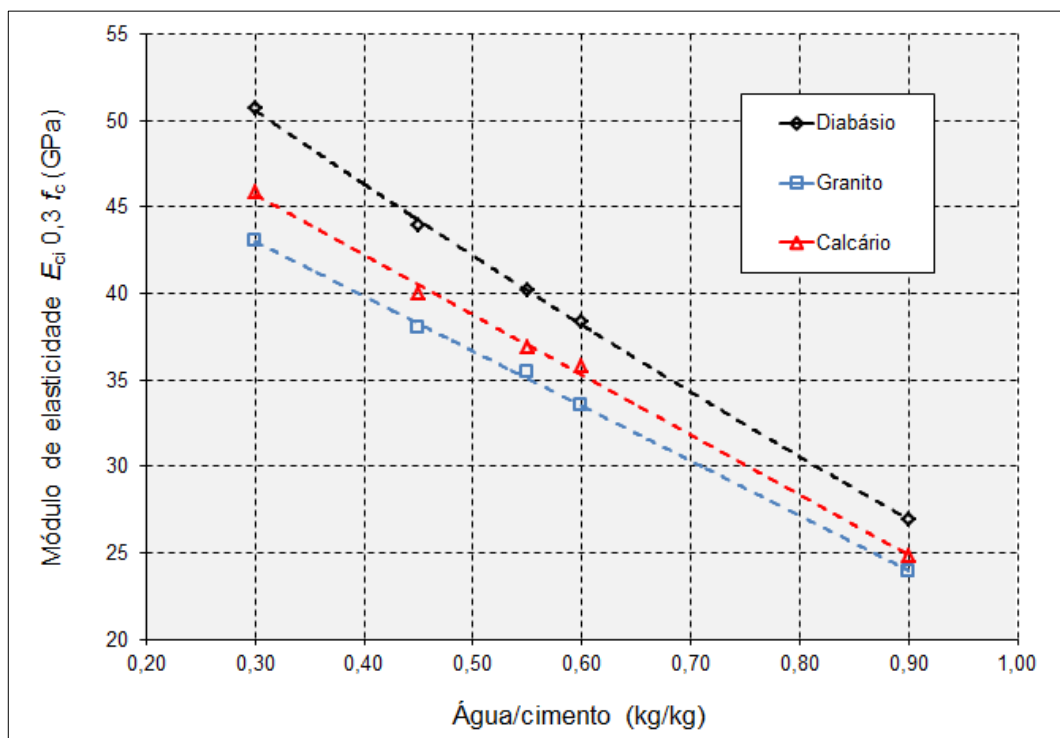
Fonte: Elaborado pelo autor com resultados do Boletim de Resultados de Ensaios IPT, Anexo H.

Tabela 27 – Resultados médios, (GPa), do módulo de elasticidade, E_{ci} $0,3 f_c$, desvios padrões, coeficientes de variação e semelhança estatística. Agregado graúdo de calcário.

	Relação água/cimento (kg/kg)									
	0,30		0,45		0,55		0,60		0,90	
	T169	T194	T263	T290	T262	T289	T261	T288	T170	T200
Média	46,4	45,2	40,3	39,7	36,5	37,2	35,2	36,4	25,3	24,4
DP	0,6	0,9	0,4	0,8	1,1	1,1	1,2	0,9	0,3	0,5
CV (%)	1,3	1,2	1,0	1,9	3,1	2,9	3,5	2,4	1,2	2,0
Média	45,9		40,0		36,9		35,8		24,8	
DP	0,9		0,7		1,1		1,2		0,6	
CV (%)	2,0		1,7		3,0		3,4		2,5	
Hipótese	Atende		Atende		Atende		Atende		Atende	

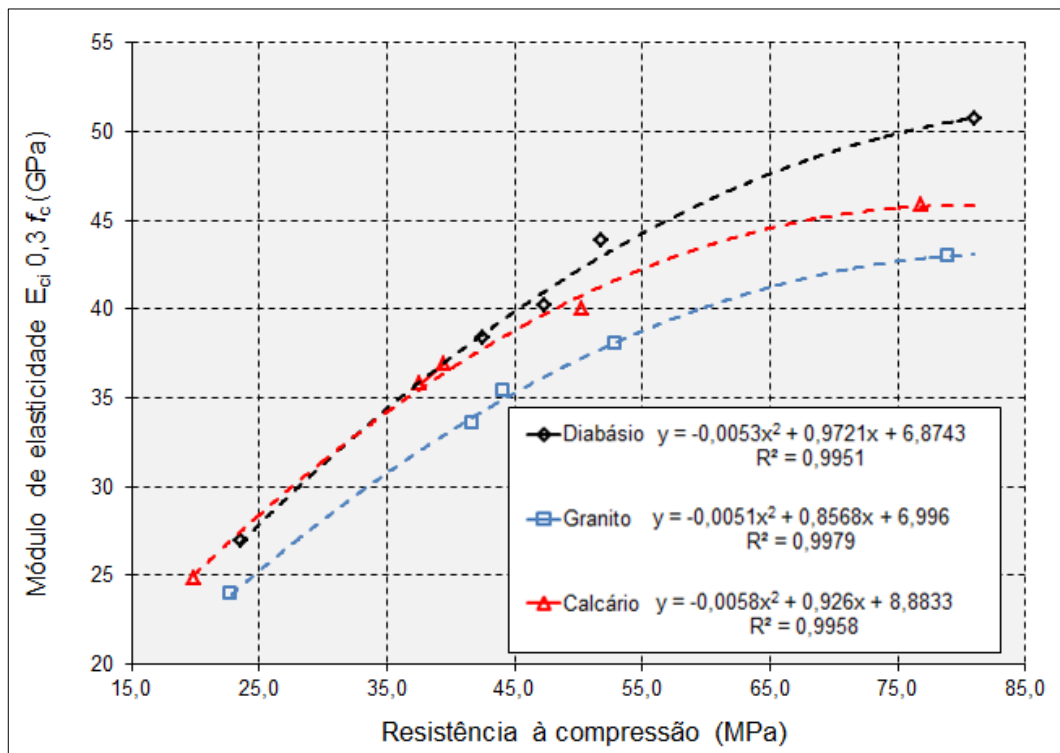
Fonte: Elaborado pelo autor com resultados do Boletim de Resultados de Ensaio IPT, Anexo H.

Figura 30 – Resultados médios do módulo de elasticidade, E_{ci} $0,3 f_c$ versus relações água cimento. Todas as naturezas petrográficas estudadas.



Fonte: Elaborado pelo autor com resultados do Boletim de Resultados de Ensaio IPT, Anexo H.

Figura 31 – Resultados médios do módulo de elasticidade, $E_{ci} 0,3 f_c$, versus resistência à compressão. Todas as naturezas petrográficas estudadas.



Fonte: Elaborado pelo autor com resultados do Boletim de Resultados de Ensaio IPT, Anexo H.

4.2.2.3.2 Módulo estático de deformação, $E_{cs} 0,3 f_c$.

Nas Tabelas 28, 29 e 30, apresentadas a seguir, são mostrados os resultados médios do módulo de deformação, $E_{cs} 0,3 f_c$, os desvios padrões, (DP), e os coeficientes de variação, (CV) calculados para cada série e entre as séries análogas. São apresentados também os resultados da análise feita para determinar a semelhança estatística dos resultados destes ensaios, realizados nestas séries.

O gráfico da Figura 32 apresenta a correlação entre as relações água/cimento escolhidas e o módulo de deformação, $E_{cs} 0,3 f_c$, determinado.

O gráfico apresentado na Figura 33 mostra as curvas polinomiais de tendência ajustadas, as suas respectivas equações de regressão e o coeficiente de determinação (R^2) de cada uma das naturezas petrográficas estudadas.

Para o caso do módulo de deformação, $E_{cs} 0,3 f_c$, todas as séries são consideradas estatisticamente iguais, para um intervalo de confiança de 95%.

Tabela 28 – Resultados médios, (GPa), do módulo de deformação, E_{cs} 0,3 f_c , desvios padrões, coeficientes de variação e semelhança estatística. Agregado graúdo de diabásio.

	Relação água/cimento (kg/kg)									
	0,30		0,45		0,55		0,60		0,90	
	T94	T104	T308	T341	T307	T340	T306	T339	T98	T109
Média	43,5	45,0	39,4	40,2	36,2	35,8	34,7	33,4	24,9	24,2
DP	0,5	0,7	1,0	1,4	1,1	1,1	0,9	0,7	0,4	0,4
CV (%)	1,1	1,5	2,6	3,6	3,0	3,2	2,5	2,2	1,5	1,8
Média	44,2		39,8		36,0		33,5		24,7	
DP	1,0		1,3		1,1		1,5		0,5	
CV (%)	2,2		3,2		3,0		4,4		2,2	
Hipótese	Atende		Atende		Atende		Atende		Atende	

Fonte: Elaborado pelo autor com resultados do Boletim de Resultados de Ensaios IPT, Anexo H.

Tabela 29 – Resultados médios, (GPa), do módulo de deformação, E_{cs} 0,3 f_c , desvios padrões, coeficientes de variação e semelhança estatística. Agregado graúdo de granito.

	Relação água/cimento (kg/kg)									
	0,30		0,45		0,55		0,60		0,90	
	T298	T327	T346	T369	T345	T368	T344	T367	T280	T328
Média	38,5	37,7	34,0	34,4	31,6	31,9	29,1	31,2	22,3	21,6
DP	0,4	0,6	1,0	1,0	0,8	0,7	0,8	0,9	0,3	0,3
CV (%)	1,1	1,6	3,0	3,0	2,4	2,1	2,7	2,8	1,5	1,2
Média	38,1		34,2		31,7		30,2		21,9	
DP	0,6		1,0		0,7		1,3		0,5	
CV (%)	1,7		2,9		2,2		4,4		2,1	
Hipótese	Atende		Atende		Atende		Atende		Atende	

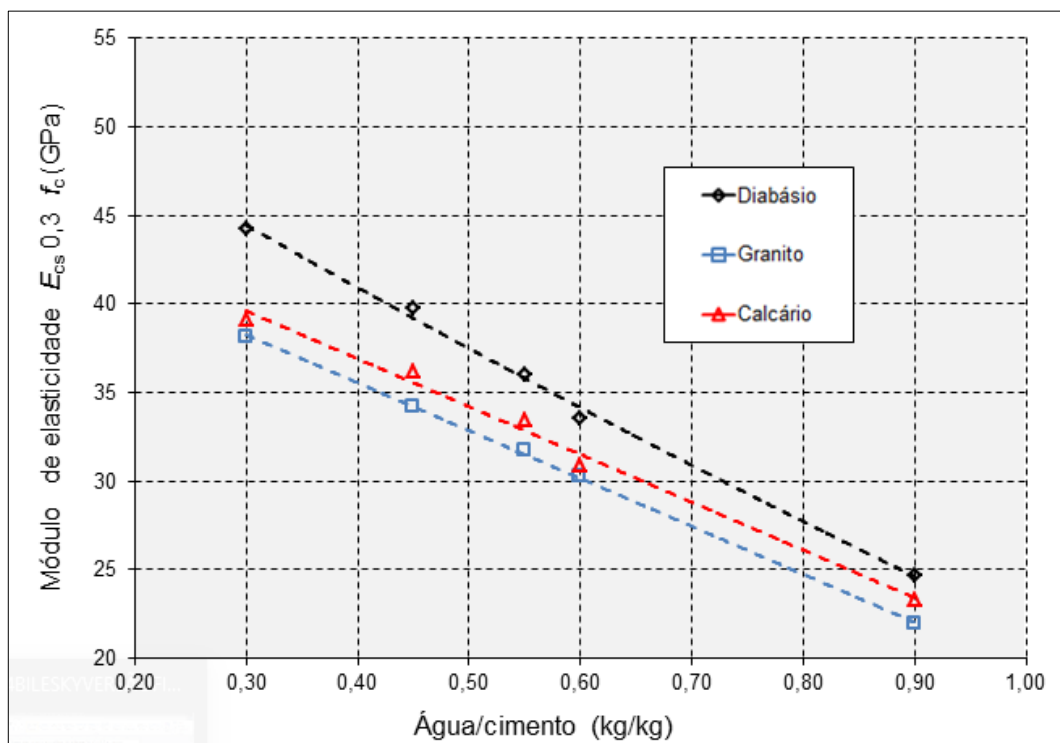
Fonte: Elaborado pelo autor com resultados do Boletim de Resultados de Ensaios IPT, Anexo H.

Tabela 30 – Resultados médios, (GPa), do módulo de deformação, E_{cs} $0,3 f_c$, desvios padrões, coeficientes de variação e semelhança estatística. Agregado graúdo de calcário.

	Relação água/cimento (kg/kg)									
	0,30		0,45		0,55		0,60		0,90	
	T169	T194	T263	T290	T262	T289	T261	T288	T170	T200
Média	38,9	39,3	36,3	36,1	34,0	32,8	31,0	30,8	23,6	23,0
DP	0,6	0,5	0,6	0,3	1,3	0,8	1,0	0,6	0,8	0,5
CV (%)	1,6	1,4	1,5	0,9	3,7	2,4	3,3	2,0	3,5	2,0
Média	39,1		36,2		33,4		30,9		23,3	
DP	0,6		0,4		1,2		0,8		0,7	
CV (%)	1,5		1,2		3,5		2,6		3,1	
Hipótese	Atende		Atende		Atende		Atende		Atende	

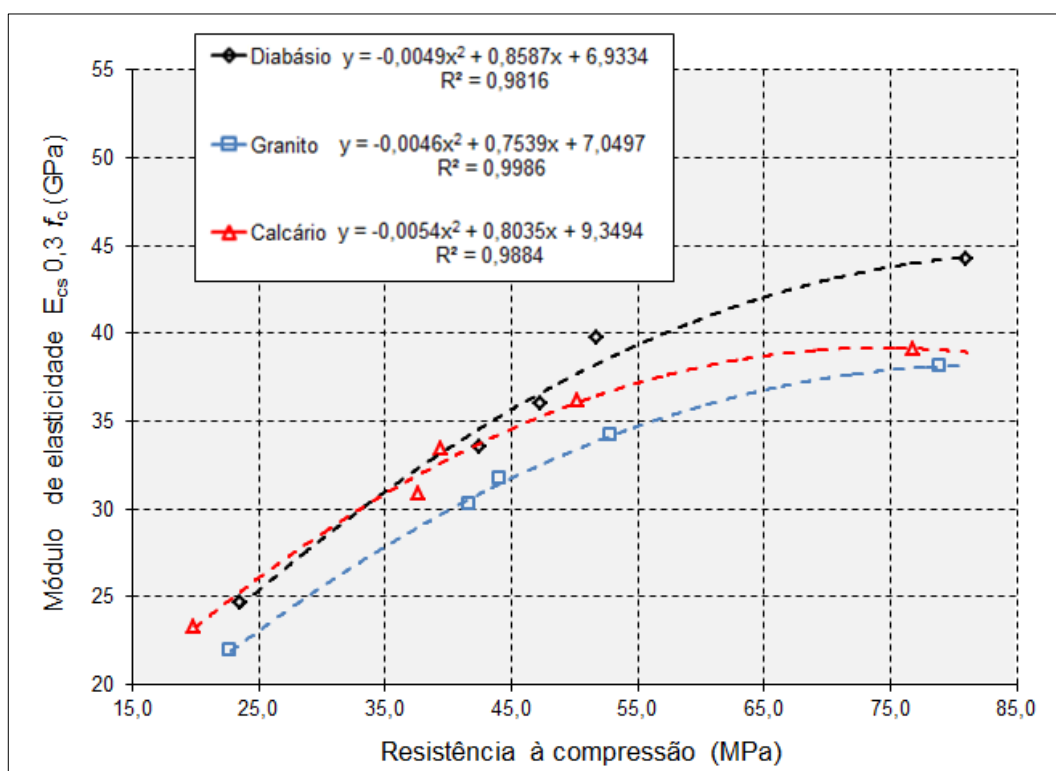
Fonte: Elaborado pelo autor com resultados do Boletim de Resultados de Ensaios IPT, Anexo H.

Figura 32 – Resultados médios do módulo de deformação, E_{cs} $0,3 f_c$, versus relações água/cimento. Todas as naturezas petrográficas estudadas.



Fonte: Elaborado pelo autor com resultados do Boletim de Resultados de Ensaios IPT, Anexo H.

Figura 33 – Resultados médios do módulo de deformação, $E_{CS\ 0,3\ f_c}$, versus resistência à compressão. Todas as naturezas petrográficas estudadas.



Fonte: Elaborado pelo autor com resultados do Boletim de Resultados de Ensaio IPT, Anexo H.

4.2.2.3.3 Módulo de elasticidade dinâmico através da velocidade de propagação ultrassônica, $E_{d\ Ultrassom}$.

Nas Tabelas 31, 32 e 33, apresentadas a seguir, são mostrados os resultados médios do módulo de elasticidade dinâmico, $E_{d\ Ultrassom}$, os desvios padrões, (DP), e os coeficientes de variação, (CV), calculados para cada série e entre as séries análogas. São apresentados também os resultados da análise feita para determinar a semelhança estatística dos resultados destes ensaios, realizados nestas séries.

Para o módulo de elasticidade dinâmico, $E_{d\ Ultrassom}$, as séries ensaiadas referentes aos traços análogos ensaiados em duplicata T345 e T368 assim como os traços T280 e T328, concretos com agregado graúdo de granito e, traços T268 e T288 bem como os traços T170 e T200, concretos com agregado graúdo de granito, tiveram as suas hipóteses de igualdade rejeitadas, para um intervalo de confiança de 95%.

Tabela 31 – Resultados médios, (GPa), do módulo de elasticidade dinâmico, E_d ultrassom, desvios padrões, coeficientes de variação e semelhança estatística. Agregado graúdo de diabásio.

	Relação água/cimento (kg/kg)									
	0,30		0,45		0,55		0,60		0,90	
	T94	T104	T308	T341	T307	T340	T306	T339	T98	T109
Média	51,3	49,7	47,2	46,2	44,6	45,6	40,2	41,2	30,5	30,3
DP	2,7	3,1	1,6	0,8	1,4	1,8	1,2	1,6	0,9	1,3
CV (%)	5,4	6,2	3,3	1,7	3,1	3,8	2,9	3,8	2,9	4,3
Média	50,5		46,7		45,1		40,7		30,4	
DP	2,9		1,3		1,6		1,4		1,1	
CV (%)	5,8		2,8		3,5		3,5		3,5	
Hipótese	Aceita		Aceita		Aceita		Aceita		Aceita	

Fonte: Elaborado pelo autor com resultados do Boletim de Resultados de Ensaios IPT, Anexo I.

Tabela 32 – Resultados médios, (GPa), do módulo de elasticidade dinâmico, E_d ultrassom, desvios padrões, coeficientes de variação e semelhança estatística. Agregado graúdo de granito.

	Relação água/cimento (kg/kg)									
	0,30		0,45		0,55		0,60		0,90	
	T298	T327	T346	T369	T345	T368	T344	T367	T280	T328
Média	42,9	43,3	40,9	39,7	37,7	39,1	36,6	36,1	28,4	26,7
DP	1,0	0,6	2,6	2,1	0,8	1,3	1,3	1,4	0,4	1,4
CV (%)	2,4	1,4	6,4	5,4	2,0	3,3	3,5	3,9	1,3	5,1
Média	43,1		40,3		38,4		36,4		27,5	
DP	0,8		2,3		1,2		1,3		1,3	
CV (%)	1,9		5,8		3,2		3,6		4,8	
Hipótese	Aceita		Aceita		Rejeita		Aceita		Rejeita	

Fonte: Elaborado pelo autor com resultados do Boletim de Resultados de Ensaios IPT, Anexo I.

Tabela 33 – Resultados médios, (GPa), do módulo de elasticidade dinâmico, E_d ultrassom, desvios padrões, coeficientes de variação e semelhança estatística. Agregado graúdo de calcário.

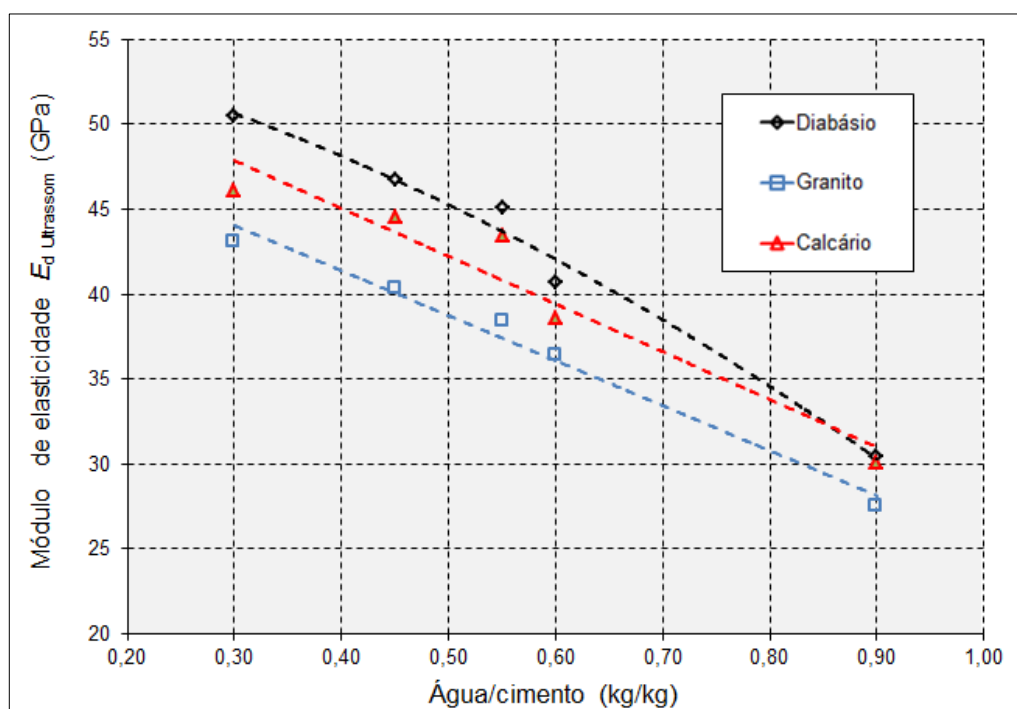
	Relação água/cimento (kg/kg)									
	0,30		0,45		0,55		0,60		0,90	
	T169	T194	T263	T290	T262	T289	T261	T288	T170	T200
Média	44,9	47,2	44,6	44,5	43,0	43,9	38,2	39,0	28,9	31,3
DP	0,4	2,3	1,4	0,6	2,1	1,2	0,9	0,8	1,1	1,0
CV (%)	1,0	4,9	3,2	1,3	4,9	2,7	2,5	2,0	3,9	3,2
Média	46,1		44,5		43,4		38,6		30,1	
DP	2,0		1,0		1,7		0,9		1,6	
CV (%)	4,3		2,3		3,9		2,4		5,3	
Hipótese	Aceita		Aceita		Aceita		Rejeita		Rejeita	

Fonte: Elaborado pelo autor com resultados do Boletim de Resultados de Ensaio IPT, Anexo I.

O gráfico da Figura 34 apresenta a correlação entre as relações água/cimento escolhidas e o módulo de deformação, E_d Ultrassom, determinado.

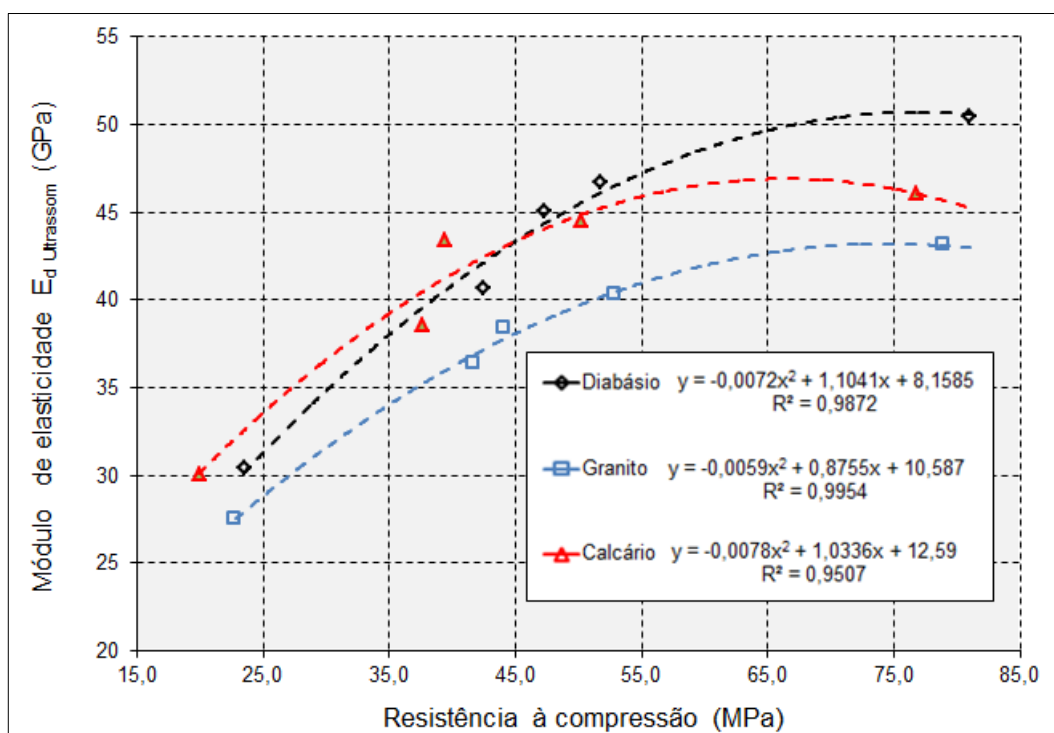
O gráfico da Figura 35 apresenta as curvas polinomiais de tendência ajustadas, as suas equações de regressão e o coeficiente de determinação, (R^2), de cada natureza petrográfica estudada.

Figura 34 – Resultados médios do módulo de elasticidade dinâmico, E_d Ultrassom versus relações água cimento. Todas as naturezas petrográficas estudadas.



Fonte: Elaborado pelo autor com resultados do Boletim de Resultados de Ensaio IPT, Anexo I.

Figura 35 – Resultados médios do módulo de elasticidade dinâmico, E_d Ultrassom versus resistência à compressão. Todas as naturezas petrográficas estudadas.



Fonte: Elaborado pelo autor com resultados do Boletim de Resultados de Ensaio IPT, Anexo I.

4.2.2.3.4 Módulo de elasticidade dinâmico através do estímulo por Impulso longitudinal, $E_{d \text{ Impulso L}}$.

Nas Tabelas 34, 35 e 36 a seguir, são mostrados os resultados médios do módulo de elasticidade dinâmico, $E_{d \text{ Impulso L}}$, os desvios padrões anotados, (DP), coeficientes de variação, (CV), e, semelhança estatística dos ensaios realizados nos concretos dosados concretos dosados com as três naturezas petrográficas de agregado graúdo.

O gráfico da Figura 36 apresenta a correlação entre as relações água/cimento escolhidas e o módulo de deformação, $E_{d \text{ Impulso L}}$, determinado.

Para os resultados dos ensaios do módulo de elasticidade, $E_{d \text{ Impulso L}}$, todas as séries foram consideradas estatisticamente iguais, para um intervalo de confiança de 95%.

Tabela 34 – Resultados médios, (GPa), do módulo de elasticidade dinâmico, $E_{d \text{ Impulso L}}$, desvios padrões, coeficientes de variação e semelhança estatística. Agregado graúdo de diabásio.

	Relação água/cimento (kg/kg)									
	0,30		0,45		0,55		0,60		0,90	
	T94	T104	T308	T341	T307	T340	T306	T339	T98	T109
Média	53,1	53,2	48,3	47,8	45,0	44,1	44,0	43,7	36,5	36,0
DP	0,3	0,4	0,5	0,8	0,6	0,9	0,3	0,4	0,5	0,6
CV (%)	0,6	0,8	1,1	1,6	1,4	1,9	0,6	0,8	1,4	1,8
Média	53,2		47,8		44,5		43,8		36,2	
DP	0,4		0,8		0,8		0,3		0,6	
CV (%)	0,8		1,6		1,9		0,8		1,7	
Hipótese	aceita		aceita		aceita		aceita		aceita	

Fonte: Elaborado pelo autor com resultados do Boletim de Resultados de Ensaios PhD, Anexo J.

Tabela 35 – Resultados médios, (GPa), do módulo de elasticidade dinâmico, E_d Imulso L, desvios padrões, coeficientes de variação e semelhança estatística. Agregado graúdo de granito.

	Relação água/cimento (kg/kg)									
	0,30		0,45		0,55		0,60		0,90	
	T298	T327	T346	T369	T345	T368	T344	T367	T280	T328
Média	46,2	46,5	43,4	43,3	40,8	40,8	39,6	39,9	33,5	33,3
DP	0,5	0,4	0,2	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4	0,1	0,2
CV (%)	1,0	0,8	0,4	0,9	0,9	1,3	1,0	1,1	0,3	0,6
Média	46,3		43,4		40,8		39,8		33,4	
DP	0,4		0,3		0,4		0,4		0,2	
CV (%)	0,9		0,6		1,1		1,1		0,6	
Hipótese	aceita		aceita		aceita		aceita		aceita	

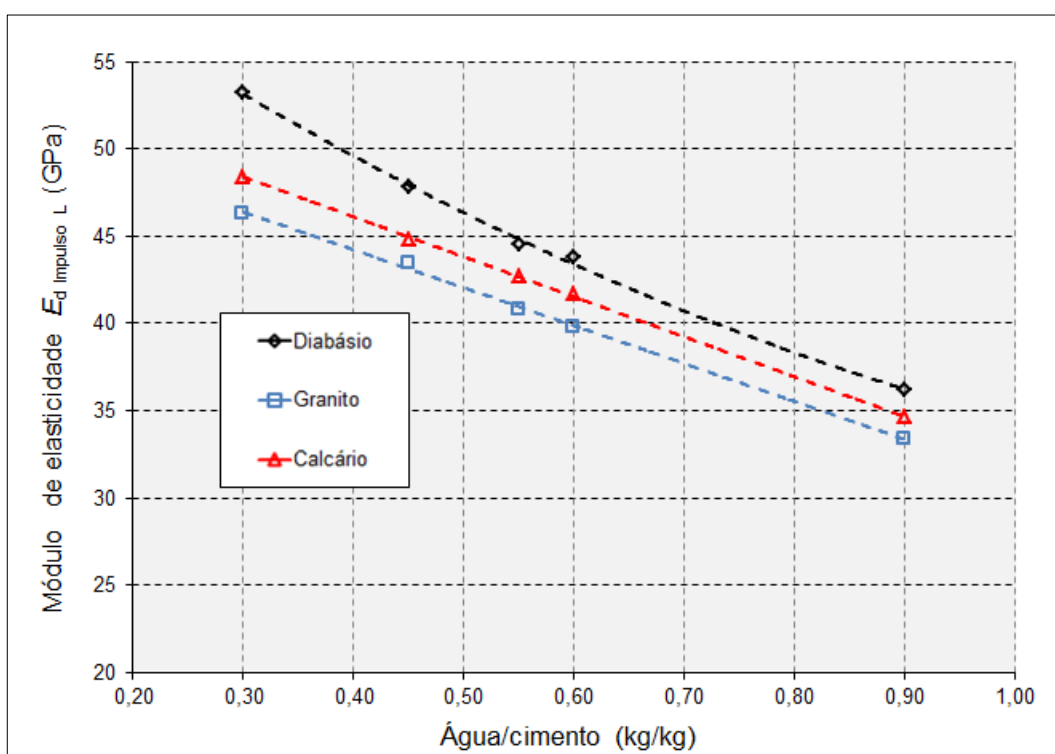
Fonte: Elaborado pelo autor com resultados do Boletim de Resultados de Ensaios PhD, Anexo J.

Tabela 36 – Resultados médios, (GPa), do módulo de elasticidade dinâmico, E_d Imulso L, desvios padrões, coeficientes de variação e semelhança estatística. Agregado graúdo de calcário.

	Relação água/cimento (kg/kg)									
	0,30		0,45		0,55		0,60		0,90	
	T169	T194	T263	T290	T262	T289	T261	T288	T170	T200
Média	48,4	48,4	44,9	44,8	42,5	42,8	41,4	42,0	34,6	34,5
DP	0,6	0,6	0,3	0,7	0,7	0,7	0,8	0,7	0,8	0,8
CV (%)	1,3	1,2	0,6	1,5	1,7	1,7	2,0	1,6	2,4	2,4
Média	48,4		44,8		42,7		41,7		34,6	
DP	0,6		0,5		0,7		0,8		0,8	
CV (%)	1,2		1,1		1,7		1,9		2,3	
Hipótese	aceita		aceita		aceita		aceita		aceita	

Fonte: Elaborado pelo autor com resultados do Boletim de Resultados de Ensaios PhD, Anexo J.

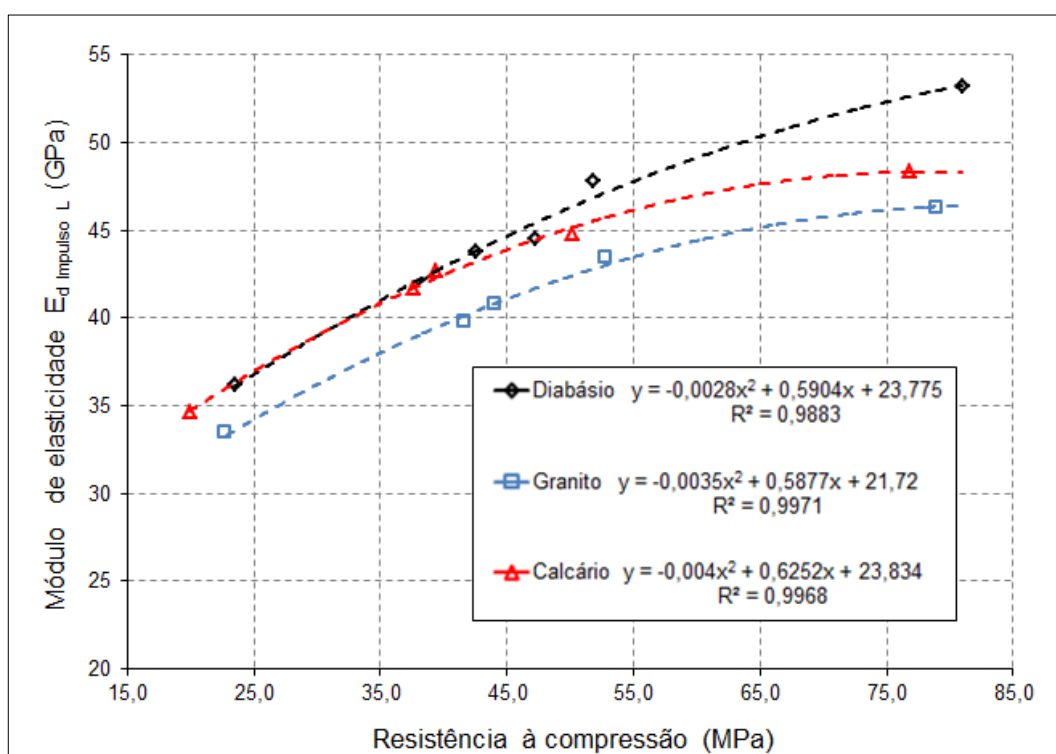
Figura 36 – Resultados médios do módulo de elasticidade dinâmico, $E_{d \text{ Impulso L}}$ versus relações água/cimento. Todas as naturezas petrográficas estudadas.



Fonte: Elaborado pelo autor com resultados do Boletim de Resultados de Ensaio PhD, Anexo J.

O gráfico apresentado na Figura 37 mostra as curvas polinomiais de tendência ajustadas, as suas respectivas equações de regressão e o coeficiente de determinação, (R^2), de cada uma das naturezas petrográficas estudadas.

Figura 37 – Resultados médios do módulo de elasticidade dinâmico, $E_{d \text{ Impulso L}}$ versus resistência à compressão. Todas as naturezas petrográficas estudadas.



Fonte: Elaborado pelo autor com resultados do Boletim de Resultados de Ensaio PhD, Anexo J.

4.2.2.3.5 Módulo de elasticidade dinâmico através do estímulo por impulso transversal, $E_{d \text{ Impulso T}}$.

Apresentam-se Tabelas 37, 38 e 39, a seguir, os resultados médios do módulo de elasticidade dinâmico, $E_{d \text{ Impulso T}}$, os desvios padrões, (DP), anotados, coeficientes de variação, (CV), e, semelhança estatística dos ensaios realizados nos concretos dosados concretos dosados com as três naturezas petrográficas de agregado graúdo.

O gráfico da Figura 38 apresenta a correlação entre as relações água/cimento escolhidas e o módulo de deformação, $E_{d \text{ Impulso T}}$, determinado.

O gráfico apresentado na Figura 39 mostra as curvas polinomiais de tendência ajustadas, as suas respectivas equações de regressão e o coeficiente de determinação, (R^2) de cada uma das naturezas petrográficas estudadas.

Para os resultados dos ensaios do módulo de elasticidade, $E_{d \text{ Impulso T}}$, todas as séries foram consideradas estatisticamente iguais, para um intervalo de confiança de 95%.

Tabela 37 – Resultados médios, (GPa), do módulo de elasticidade dinâmico, E_d Impulso T, desvios padrões, coeficientes de variação e semelhança estatística. Agregado graúdo de diabásio.

	Relação água/cimento (kg/kg)									
	0,30		0,45		0,55		0,60		0,90	
	T94	T104	T308	T341	T307	T340	T306	T339	T98	T109
Média	51,4	52,0	47,1	46,7	43,4	43,3	41,7	41,2	34,2	33,9
DP	0,3	0,6	0,8	0,7	0,7	0,7	0,6	0,8	0,6	0,4
CV (%)	0,6	1,1	1,6	1,5	1,5	1,5	1,4	2,1	1,7	1,1
Média	51,7		46,7		43,3		41,2		33,9	
DP	0,5		0,7		0,7		0,8		0,5	
CV (%)	1,0		1,5		1,5		2,0		1,6	
Hipótese	aceita		aceita		aceita		aceita		aceita	

Fonte: Elaborado pelo autor com resultados do Boletim de Resultados de Ensaios PhD, Anexo J.

Tabela 38 – Resultados médios, (GPa), do módulo de elasticidade dinâmico, E_d Impulso T, desvios padrões, coeficientes de variação e semelhança estatística. Agregado graúdo de granito.

	Relação água/cimento (kg/kg)									
	0,30		0,45		0,55		0,60		0,90	
	T298	T327	T346	T369	T345	T368	T344	T367	T280	T328
Média	43,6	43,6	40,5	40,8	39,5	39,6	38,5	38,3	31,3	31,1
DP	0,4	0,6	0,3	0,6	0,2	0,2	0,3	,2	0,7	0,7
CV (%)	0,9	1,4	0,9	1,3	0,5	0,6	0,7	0,6	2,2	2,1
Média	43,6		40,6		39,6		38,4		31,2	
DP	0,5		0,6		0,3		0,3		0,6	
CV (%)	1,2		1,5		0,7		0,7		2,1	
Hipótese	aceita		aceita		aceita		aceita		aceita	

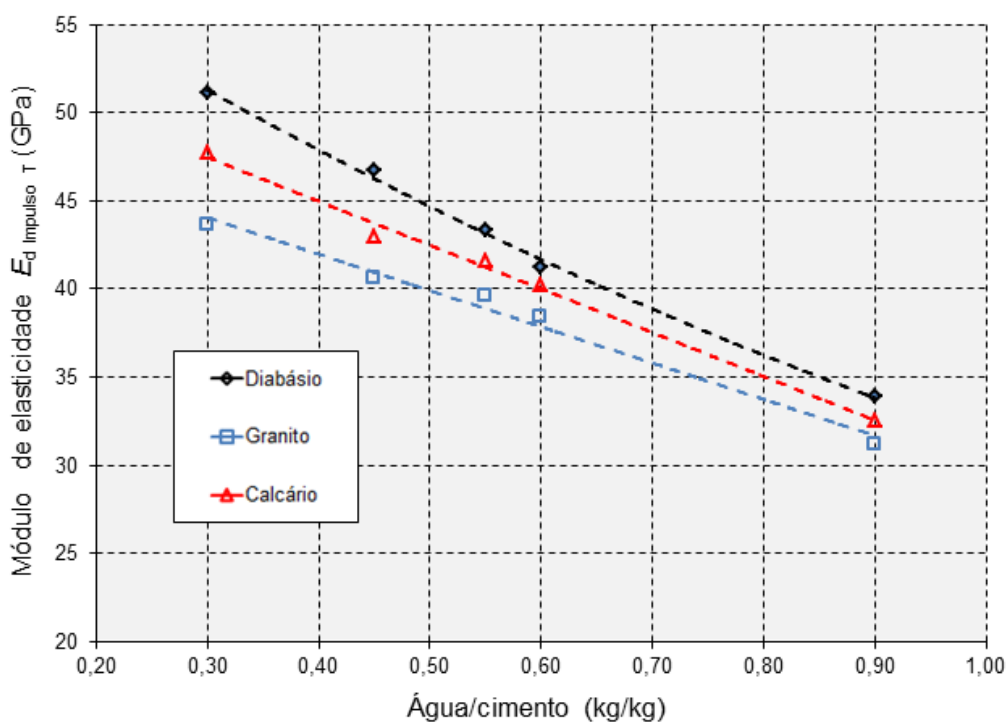
Fonte: Elaborado pelo autor com resultados do Boletim de Resultados de Ensaios PhD, Anexo J.

Tabela 39 – Resultados médios, (GPa), do módulo de elasticidade dinâmico, $E_{d \text{ Impulso } T}$, desvios padrões, coeficientes de variação e semelhança estatística. Agregado graúdo de calcário.

	Relação água/cimento (kg/kg)									
	0,30		0,45		0,55		0,60		0,90	
	T169	T194	T263	T290	T262	T289	T261	T288	T170	T200
Média	47,8	47,5	43,2	42,9	41,3	41,6	40,4	40,0	32,1	33,0
DP	0,2	0,5	0,8	0,8	0,9	1,0	0,7	0,8	0,7	0,3
CV (%)	0,5	1,0	1,9	1,9	2,2	2,4	1,7	2,0	2,3	0,9
Média	47,7		43,0		41,6		40,2		32,5	
DP	0,4		0,8		1,0		0,7		0,7	
CV (%)	0,8		1,8		2,4		1,8		2,3	
Hipótese	aceita		aceita		aceita		aceita		aceita	

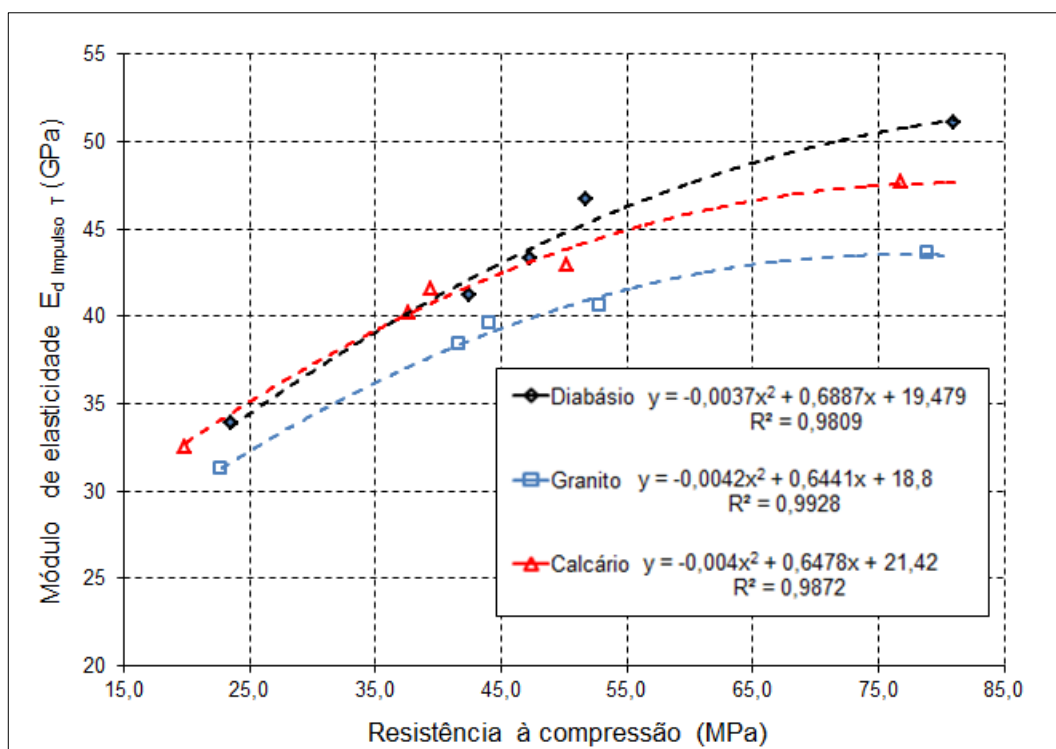
Fonte: Elaborado pelo autor com resultados do Boletim de Resultados de Ensaio PhD, Anexo J.

Figura 38 – Resultados médios do módulo de elasticidade dinâmico, $E_{d \text{ Impulso } T}$ versus água/cimento. Todas as naturezas petrográficas estudadas.



Fonte: Elaborado pelo autor com resultados do Boletim de Resultados de Ensaio PhD, Anexo J.

Figura 39 – Resultados médios do módulo de elasticidade dinâmico, $E_{d \text{ Impulso T}}$ versus resistência à compressão. Todas as naturezas petrográficas estudadas.



Fonte: Elaborado pelo autor com resultados do Boletim de Resultados de Ensaio PhD, Anexo J.

Como pode se verificar, os resultados dos ensaios realizados com agregado graúdo de calcário apresentam-se maiores que os resultados obtidos nos ensaios realizados com concretos dosados com granito, contrariando assim as expectativas dos estimadores das normas.

Deve-se lembrar de que este calcário tem a sua densidade mais alta do que a do granito utilizado, logo a sua porosidade é menor e, os seus resultados, devem ser superiores aos dos resultados alcançados com agregados de origem petrográfica quartzíticas, Mehta e Monteiro (2014).

4.3 Comparações dos resultados de módulo por classe de resistência

A partir dos dados fornecidos pelas curvas de tendência traçadas, as equações de regressão a partir das quais foram estimados os valores dos módulos de elasticidade e deformação para as classes de resistência dos concretos estruturais, f_{ck} , C20, C30, C40, C50, C60, C70 e C80, conforme a ABNT NBR 8953

(2015). Estas equações, os coeficientes de determinação e, os valores de módulo adotados nestas análises são apresentados na Tabela 40, a seguir.

Os gráficos das Figuras 40 a 44 apresentam a ilustração gráfica dos resultados destes cálculos para cada tipo de módulo comparando o desempenho das três naturezas petrográficas estudadas.

Tabela 40 - Equações polinomiais de regressão adotadas, coeficientes de determinação e valores estimados de módulo, estático ou dinâmico, para cada classe de resistência, ABNT NBR 8953 (2015). (Continua)

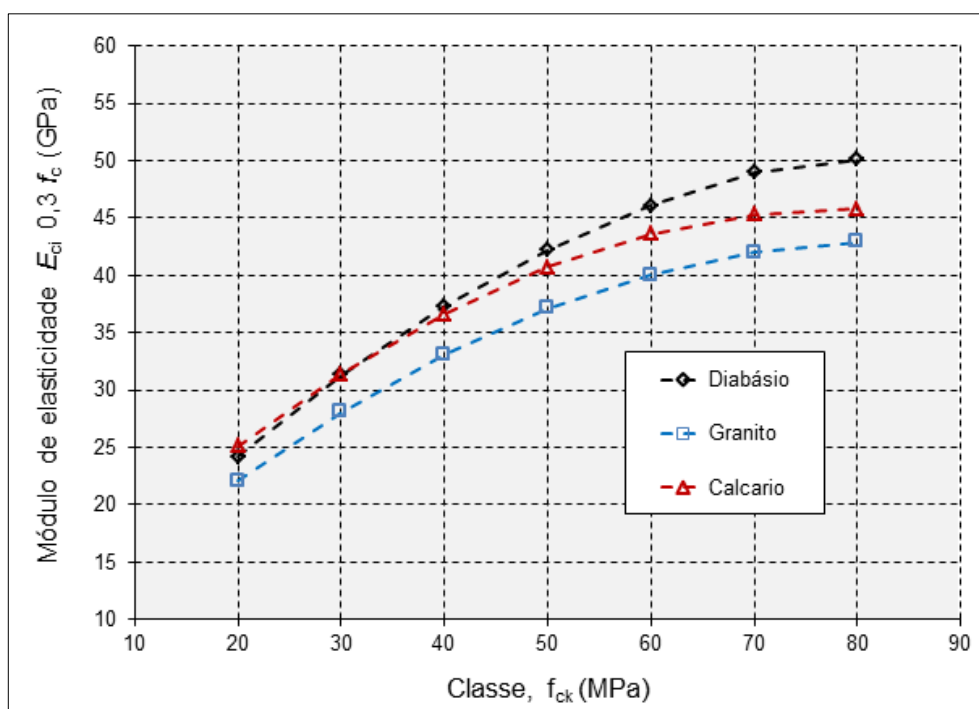
Agregado graúdo de diabásio									
Módulo	Equações de regressão adotadas	Coeficiente de determinação (R ²)	Classe de resistência (MPa)						
			20	30	40	50	60	70	80
			Baixa	Média		Alta			
			Módulo (GPa)						
$E_{ci 0,3 f_c}$	$y = -0,0053x^2 + 0,9721x + 6,8743$	0,9951	24,2	31,3	37,3	42,2	46,1	49	50,1
E_{cs}	$y = -0,0049x^2 + 0,8587x + 6,9334$	0,9816	22,1	28,3	33,4	37,6	40,8	43	44,3
Ultrassom	$y = -0,0072x^2 + 1,1041x + 8,1585$	0,9872	27,4	34,8	40,8	45,4	48,5	50,2	50,4
Impulso L	$y = -0,0028x^2 + 0,5904x + 23,775$	0,9883	34,5	39	42,9	46,3	49,1	51,4	53,1
Impulso T	$y = -0,0037x^2 + 0,6887x + 19,479$	0,9809	31,8	36,8	41,1	44,7	47,5	49,6	50,9
Agregado graúdo de granito									
$E_{ci 0,3 f_c}$	$y = -0,0051x^2 + 0,8568x + 6,996$	0,9979	22,1	28,1	33,1	37,1	40	42	42,9
E_{cs}	$y = -0,0046x^2 + 0,7539x + 7,0497$	0,9986	20,3	25,5	29,8	33,2	35,7	37,3	37,9
Ultrassom	$y = -0,0059x^2 + 0,8755x + 10,587$	0,9954	25,7	31,5	36,2	39,6	41,9	43	42,9
Impulso L	$y = -0,0035x^2 + 0,5877x + 21,72$	0,9971	32,1	36,2	39,6	42,4	44,4	45,7	46,3
Impulso T	$y = -0,0042x^2 + 0,6441x + 18,8$	0,9928	30	34,3	37,8	40,5	42,3	43,3	43,4

Tabela 40- Equações polinomiais de regressão adotadas, coeficientes de determinação e valores estimados de módulo, estático ou dinâmico, para cada classe de resistência, ABNT NBR 8953 (2015). (continuação)

Agregado graúdo de calcário									
Módulo	Equações de regressão adotadas	Coeficiente de determinação (R ²)	Classe de resistência (MPa)						
			20	30	40	50	60	70	80
			Baixa	Média		Alta			
			Módulo (GPa)						
$E_{ci} 0,3 f_c$	$y = -0,0058x^2 + 0,926x + 8,8833$	0,9958	25,1	31,4	36,6	40,7	43,6	45,3	45,8
E_{cs}	$y = -0,0054x^2 + 0,8035x + 9,3494$	0,9884	23,3	28,6	32,8	36	38,1	39,1	39,1
Ultrassom	$y = -0,0078x^2 + 1,0336x + 12,59$	0,9507	30,1	36,6	41,5	44,8	46,5	46,7	45,4
Impulso L	$y = -0,0042x^2 + 0,6252x + 23,834$	0,9968	34,7	39	42,4	45,1	46,9	48	48,3
Impulso T	$y = -0,004x^2 + 0,6478x + 21,42$	0,9872	32,8	37,3	40,9	43,8	45,9	47,2	47,6

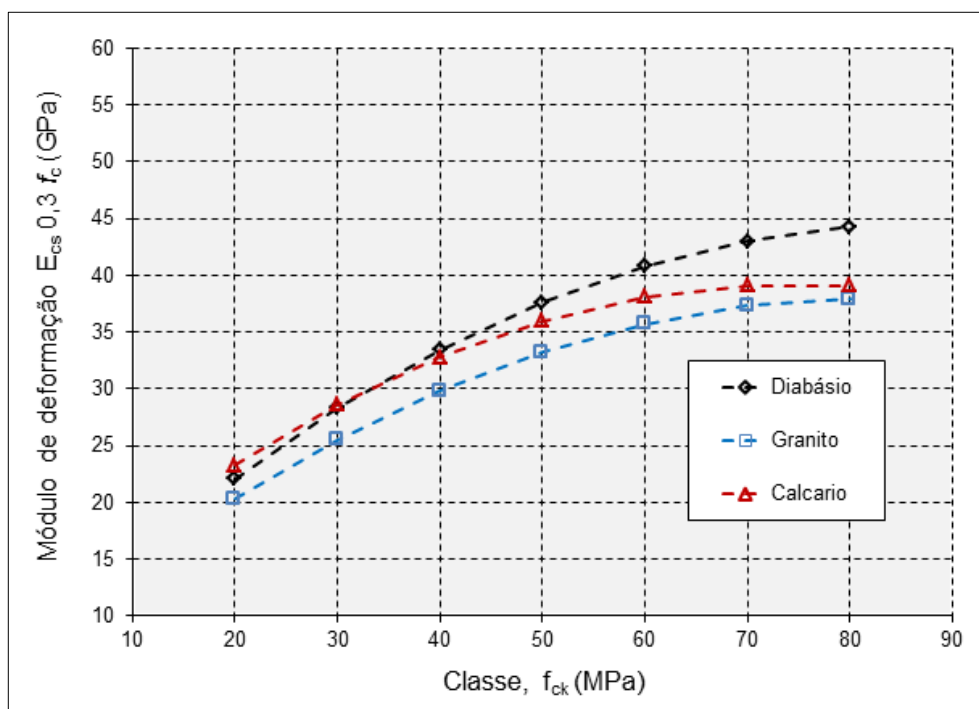
Fonte: Elaborado pelo autor embasado nos resultados constantes dos Anexos H, I e J.

Figura 40 – Valores do módulo de elasticidade, $E_{ci} 0,3 f_c$, calculados por regressão, para as classes de resistência do concreto C20 a C80.



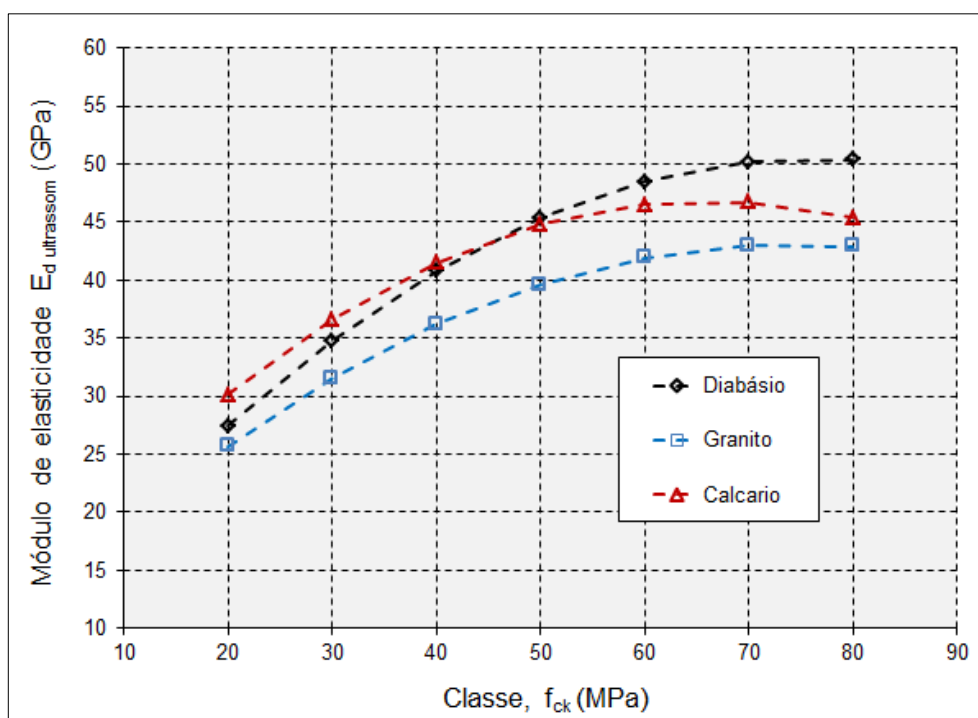
Fonte: Elaborado pelo autor embasado no Boletim de Resultados de Ensaio IPT, Anexo H.

Figura 41 – Valores do módulo de deformação, $E_{cs} 0,3 f_c$, calculados por regressão, para as classes de resistência do concreto C20 a C80.



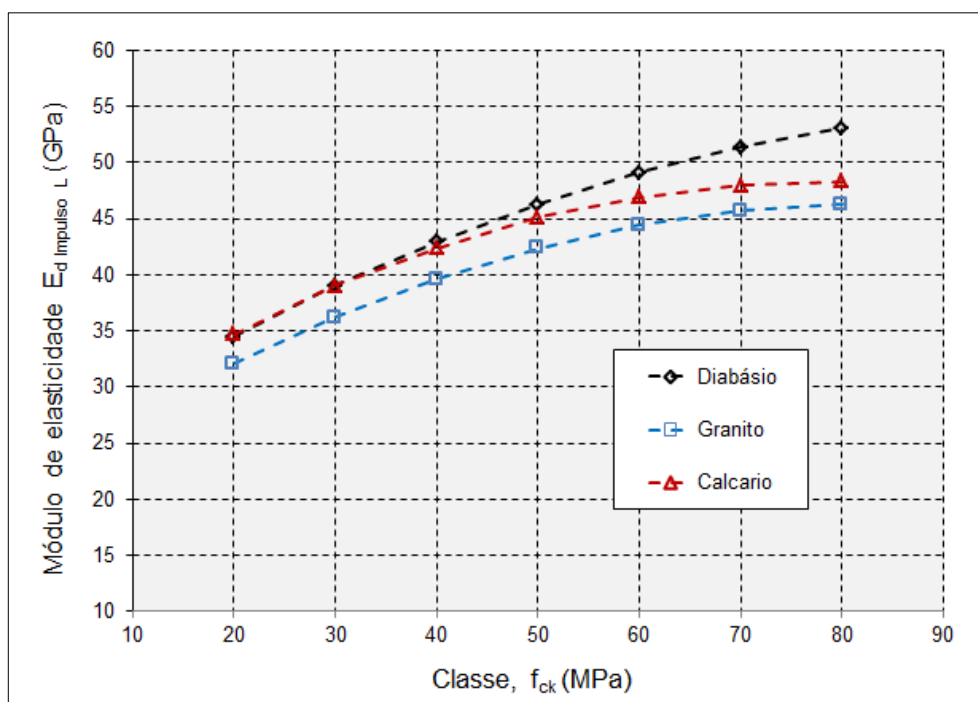
Fonte: Elaborado pelo autor embasado no Boletim de Resultados de Ensaio IPT, Anexo H.

Figura 42 – Valores do módulo de elasticidade dinâmico, $E_{d \text{ Ultrassom}}$, calculados por regressão, para as classes de resistência do concreto C20 a C80.



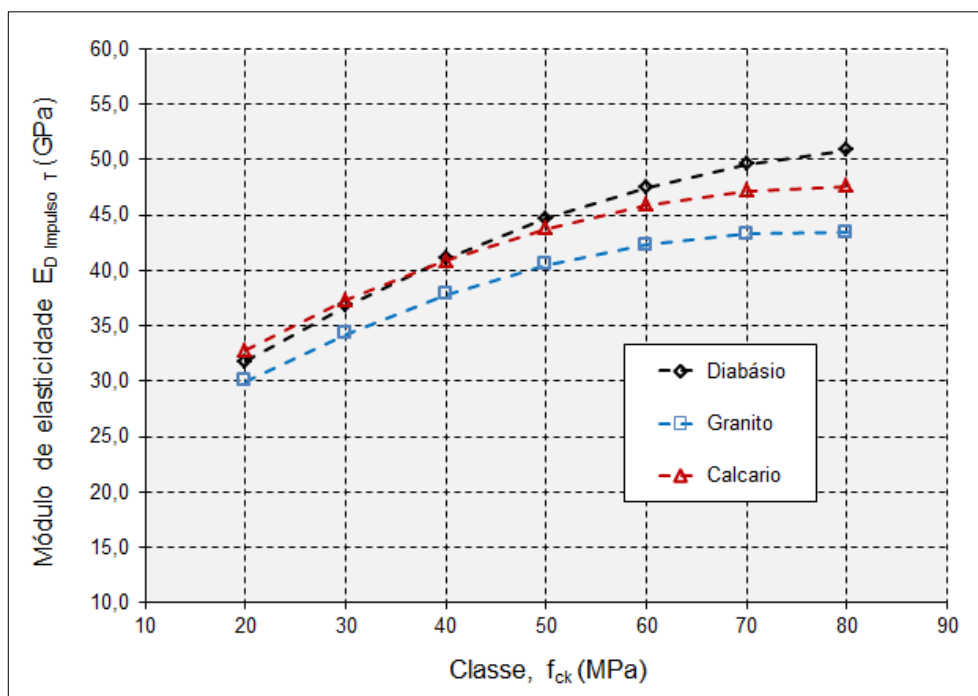
Fonte: Elaborado pelo autor embasado no Boletim de Resultados de Ensaio IPT, Anexo I.

Figura 43 – Valores do módulo de elasticidade dinâmico, $E_{d \text{ Impulso L}}$, calculados por regressão, para as classes de resistência do concreto C20 a C80.



Fonte: Elaborado pelo autor embasado no Boletim de Resultados de Ensaio PhD, Anexo J.

Figura 44 – Valores do módulo de elasticidade dinâmico, $E_{d \text{ Impulso T}}$, calculados por regressão, para as classes de resistência do concreto C20 a C80.



Fonte: Elaborado pelo autor embasado no Boletim de Resultados de Ensaio IPT, Anexo J.

Apresentam-se nas Tabelas 41 a 45, o resumo das variações anotadas entre os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade e deformação referentes aos concretos dosados com agregados graúdos de diabásio e calcário, comparados aos resultados obtidos nos concretos dosados com agregados graúdos de granito.

Esta comparação é realizada desta forma em atenção ao Item 8.2.8, da ABNT NBR 6118 (2014) e de outras normas internacionais, que sugerem que os estimadores dos valores dos módulos de elasticidade, para concretos dosados com agregados graúdos de origem quartzíticas, granito e gnaisse, tenham sua expressão de estimativa do módulo multiplicada por $\alpha = 1,00$, enquanto que, os valores estimados para concretos produzidos com outras naturezas petrográficas, têm os seus valores corrigidos para mais ou para menos.

No caso do diabásio recomenda-se multiplicar a expressão estimadora de módulo de elasticidade, por $\alpha = 1,20$, o que significa que os resultados de módulo esperados para os concretos produzidos com este tipo de agregado é de até 20 % maiores que os resultados esperados para concretos produzidos com os agregados graúdos, de origem quartzíticas.

Já no caso do calcário a expectativa é diferente, deve-se multiplicar a expressão estimadora por $\alpha = 0,90$ sendo a expectativa de obtenção de resultados até 10% menores. Os resultados destas comparações são ainda separados, para uma melhor comparação com os dados bibliográficos encontrados, ainda por classe de resistência a compressão de concreto, conforme apresentado pelos autores Mehta e Monteiro (2014) e Neville (2016). Concretos de baixa resistência, até 20 MPa, de média resistência, entre 20,0 MPa e 40,0 MPa, ou ainda concretos de alta resistência, que são aqueles com resultados acima de 40 MPa.

Tabela 41 - Resumo das variações entre os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade, E_{ci} $0,3 f_c$, comparados aos obtidos para os ensaios realizados em concretos com agregado graúdo de granito.

Natureza do agregado graúdo	Variações (%)	Classe de resistência (MPa)						
		20	30	40	50	60	70	80
		Média			Alta			
Diabásio	Individuais	1,10	1,11	1,13	1,14	1,15	1,17	1,17
	Médias	1,11			1,16			
Calcário	Individuais	1,14	1,12	1,11	1,10	1,09	1,08	1,07
	Médias	1,13			1,08			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 42 - Resumo das variações anotadas entre os resultados dos ensaios de módulo de deformação, E_{cs} $0,3 f_c$, comparados aos obtidos para os ensaios realizados em concretos com agregado graúdo de granito.

Natureza do agregado graúdo	Variações (%)	Classe de resistência (MPa)						
		20	30	40	50	60	70	80
		Média			Alta			
Diabásio	Individuais	1,09	1,11	1,12	1,13	1,14	1,15	1,17
	Médias	1,10			1,15			
Calcário	Individuais	1,15	1,12	1,10	1,08	1,07	,05	1,03
	Médias	1,13			1,06			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 43 - Resumo das variações anotadas entre os ensaios de módulo de elasticidade dinâmico, $E_{d \text{ Ultrassom}}$, comparados aos obtidos para os ensaios realizados em concretos com agregado graúdo de granito.

Natureza do agregado graúdo	Variações (%)	Classe de resistência (MPa)						
		20	30	40	50	60	70	80
		Média			Alta			
Diabásio	Individuais	1,07	1,10	1,13	1,15	1,16	1,17	1,17
	Médias	1,11			1,16			
Calcário	Individuais	1,17	1,16	1,15	1,13	1,11	1,09	1,06
	Médias	1,16			1,10			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 44 - Resumo das variações anotadas entre os ensaios de módulo de elasticidade dinâmico, $E_{d \text{ Impulso L}}$, comparados aos obtidos para os ensaios realizados em concretos com agregado graúdo de granito.

Natureza do agregado graúdo	Variações (%)	Classe de resistência (MPa)						
		20	30	40	50	60	70	80
		Média			Alta			
Diabásio	Individuais	1,07	1,08	1,08	1,09	1,11	1,12	1,15
	Médias	1,08			1,12			
Calcário	Individuais	1,08	1,08	1,07	1,06	1,06	1,05	1,04
	Médias	1,08			1,05			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 45 - Resumo das variações anotadas entre os ensaios de módulo de elasticidade dinâmico, $E_{d \text{ Impulso T}}$, comparados aos obtidos para os ensaios realizados em concretos com agregado graúdo de granito.

Natureza do agregado graúdo	Variações (%)	Classe de resistência (MPa)						
		20	30	40	50	60	70	80
		Média			Alta			
Diabásio	Individuais	1,06	1,07	1,09	1,10	1,12	1,15	1,17
	Médias	1,07			1,13			
Calcário	Individuais	1,09	1,09	1,08	1,08	1,09	1,09	1,10
	Médias	1,09			1,09			

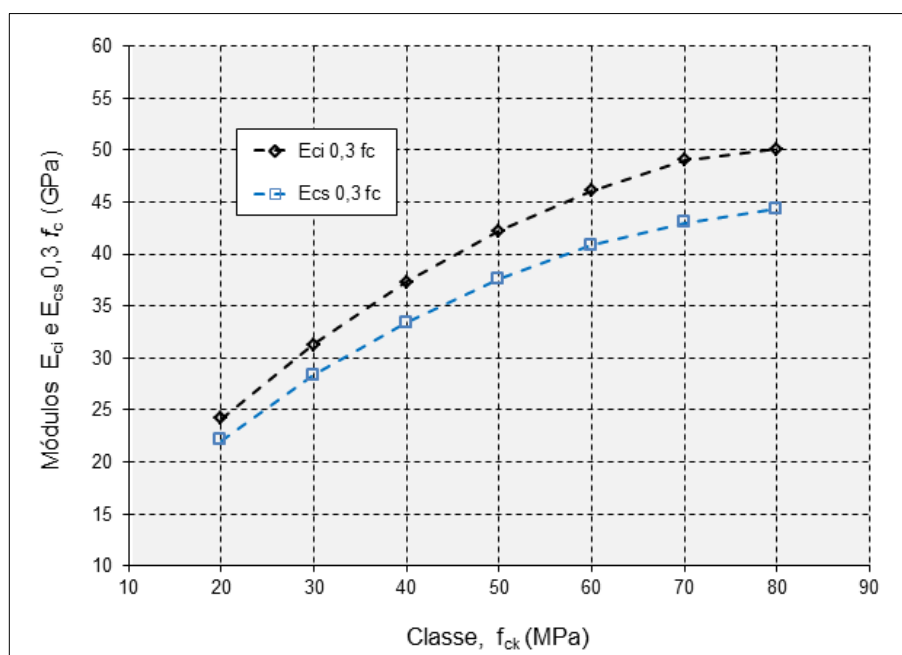
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os gráficos apresentados a seguir nas Figuras 45 a 47 apresentam as diferenças obtidas neste estudo entre os resultados de módulo de deformação, $E_{cs} 0,3 f_c$, obtidos, comparados aos resultados anotados dos ensaios realizados de determinação do módulo de elasticidade, $E_{ci} 0,3 f_c$. Como poderão ser observados, os resultados obtidos nos ensaios de módulo de deformação, $E_{cs} 0,3 f_c$, foram menores que os resultados observados nos ensaios realizados de módulo de elasticidade, $E_{ci} 0,3 f_c$, confirmando as informações obtidas na bibliografia consultada e especificações.

Valores destas variações, individuais e médios por classe de resistência de concreto, poderão ser verificados na Tabela 46, a seguir.

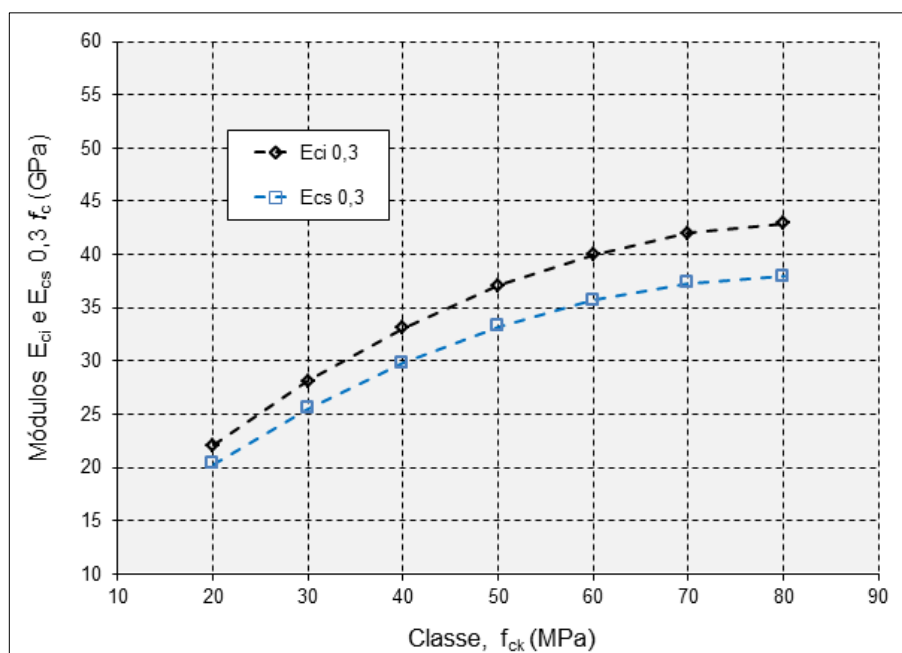
Apresentam-se nas Figuras 48 a 50 representações gráficas dos resultados calculados dos diversos módulos de elasticidade dinâmicos estudados, comparados ao módulo de elasticidade, $E_{ci} 0,3 f_c$, separados agora por natureza petrográfica.

Figura 45 – Valores do módulo de deformação, $E_{cs} 0,3 f_c$, comparados aos resultados do módulo de elasticidade, $E_{ci} 0,3 f_c$, calculados por regressão, para as classes de resistência do concreto C20 a C80, agregado graúdo de diabásio.



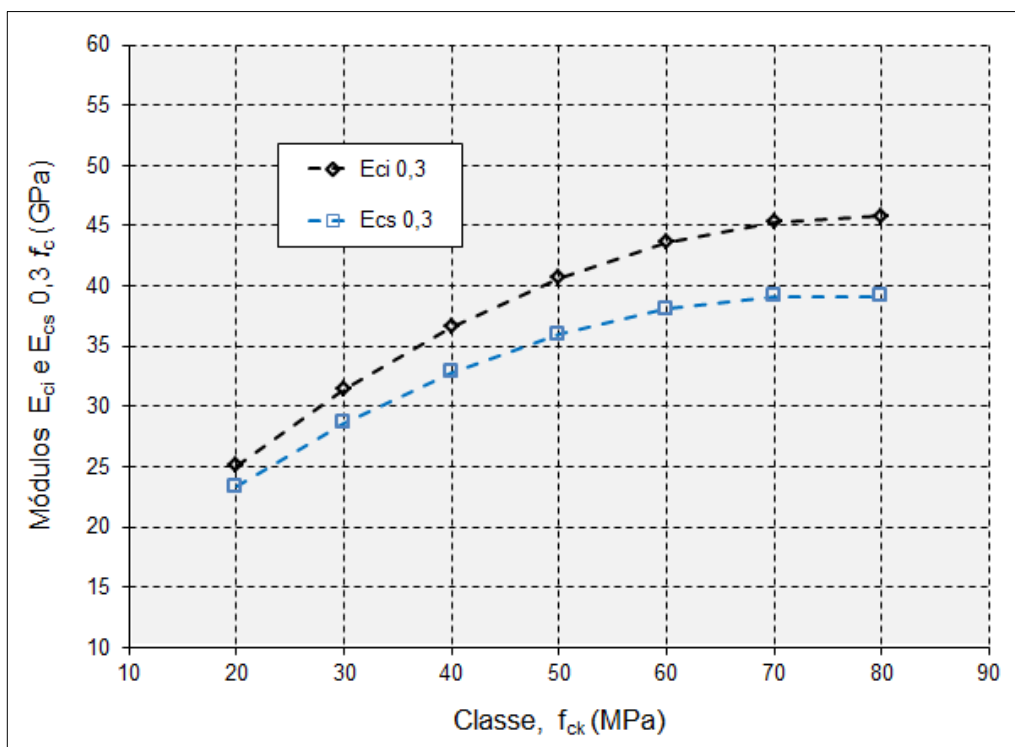
Fonte: Elaborado pelo autor embasado no Boletim de Resultados de Ensaio IPT, Anexo H.

Figura 46 – Valores do módulo de deformação, $E_{cs} 0,3 f_c$, comparados aos resultados do módulo de elasticidade, $E_{ci} 0,3 f_c$, calculados por regressão, para as classes de resistência do concreto C20 a C80, agregado graúdo de granito.



Fonte: Elaborado pelo autor embasado no Boletim de Resultados de Ensaio IPT, Anexo H.

Figura 47 – Valores do módulo de deformação, $E_{cs} 0,3 f_c$, comparados aos resultados do módulo de elasticidade, $E_{ci} 0,3 f_c$ calculados por regressão, para as classes de resistência do concreto C20 a C80, agregado graúdo de calcário.



Fonte: Elaborado pelo autor embasado no Boletim de Resultados de Ensaios IPT, Anexo H.

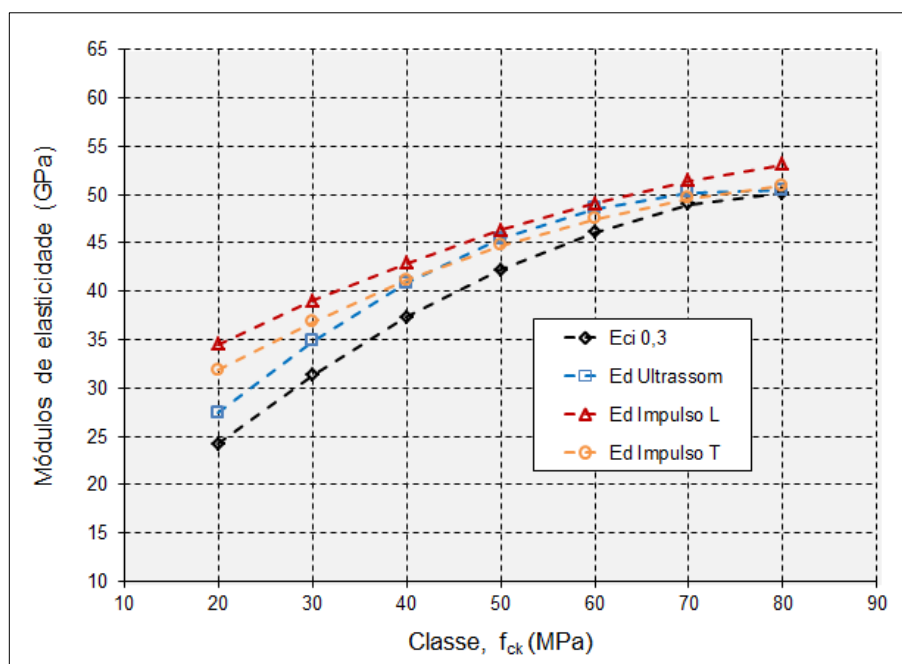
Tabela 46 - Resumo das variações anotadas entre os resultados dos ensaios de módulo de deformação, $E_{cs} 0,3 f_c$, comparados aos resultados dos ensaios de módulo de elasticidade, $E_{ci} 0,3 f_c$.

Natureza do agregado graúdo	Variações (%)	Classe de resistência (MPa)						
		20	30	40	50	60	70	80
		Media				Alta		
Diabásio	Individuais	0,91	0,90	0,90	0,89	0,89	0,88	0,88
	Média	0,90				0,89		
Granito	Individuais	0,92	0,91	0,90	0,89	0,89	0,89	0,88
	Média	0,91				0,89		
Calcario	Individuais	0,93	0,91	0,90	0,88	0,87	0,86	0,85
	Média	0,91				0,86		

Fonte: Elaborado pelo autor.

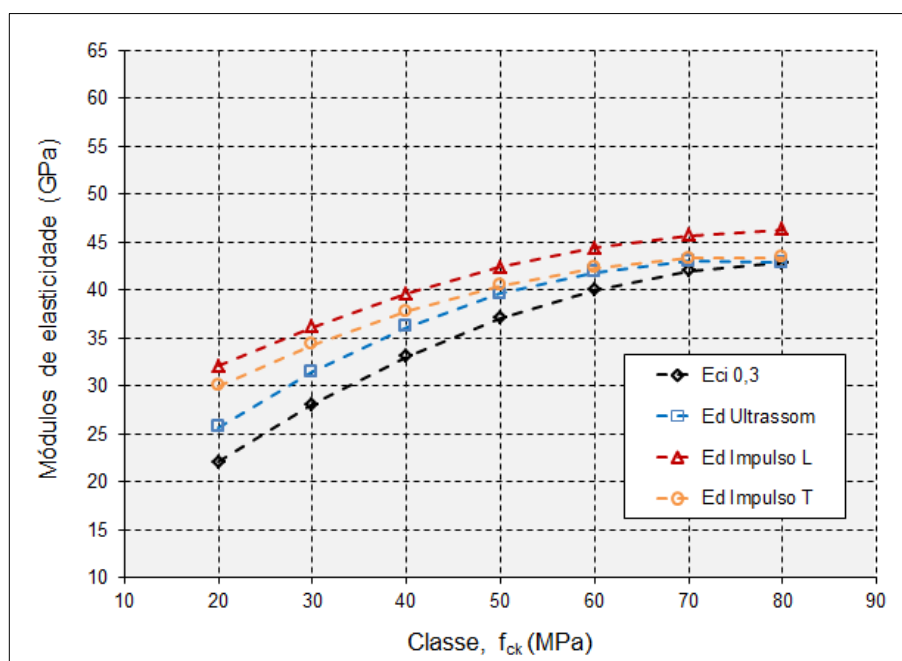
Nas Tabelas 47, 48 e 49 apresentam-se as variações dos resultados dos ensaios de módulo dinâmico quando comparados aos resultados dos ensaios de módulo de elasticidade estático, $E_{ci} 0,3 f_c$, de obtidos nesta pesquisa.

Figura 48 – Valores dos módulos de elasticidade dinâmicos comparados aos resultados do módulo de elasticidade, $E_{ci} 0,3 f_c$, calculados por regressão, para as classes de resistência do concreto C20 a C80, agregado graúdo de diabásio.



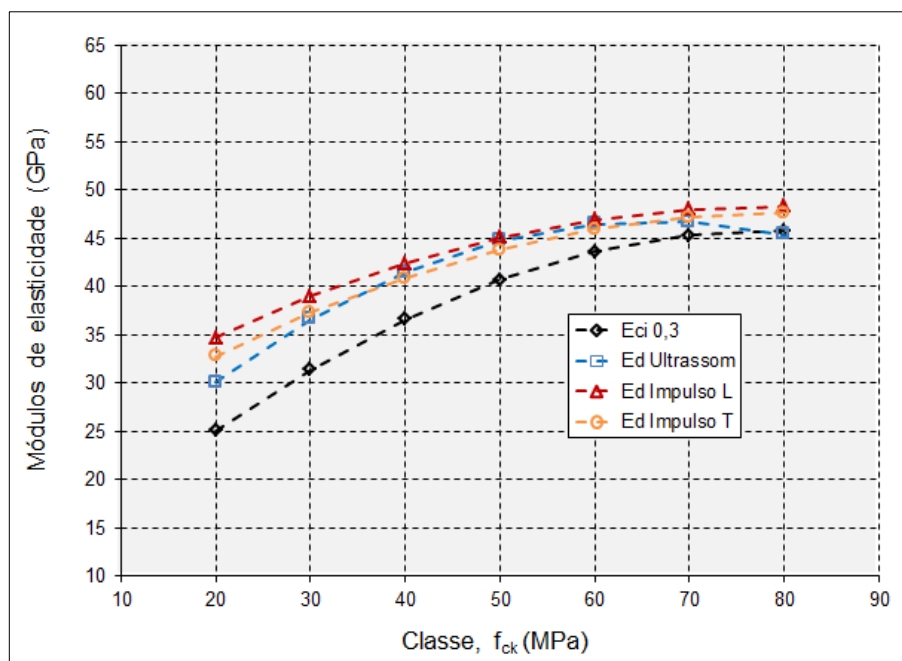
Fonte: Elaborado pelo autor embasado Boletim de Resultados de Ensaio IPT, Anexo H e I e Relatório no PhD n° 293, Anexo J.

Figura 49 – Valores dos módulos de elasticidade dinâmicos comparados aos resultados do módulo de elasticidade, $E_{ci} 0,3 f_c$, calculados por regressão, para as classes de resistência do concreto C20 a C80, agregado graúdo de granito.



Fonte: Elaborado pelo autor embasado Boletim de Resultados de Ensaio IPT, Anexo H e I e no Relatório PhD n° 293, Anexo J.

Figura 50 – Valores dos módulos de elasticidade dinâmicos comparados aos resultados do módulo de elasticidade, $E_{ci} 0,3 f_c$, calculados por regressão, para as classes de resistência do concreto C20 a C80, agregado graúdo de calcário.



Fonte: Elaborado pelo autor embasado Boletim de Resultados de Ensaio IPT, Anexo H e I e Relatório no PhD n° 293, Anexo J.

Tabela 47 - Resumo das variações anotadas entre os resultados dos ensaios dos módulos de elasticidade dinâmicos quando comparados aos resultados dos ensaios de módulo de elasticidade estático, $E_{ci} 0,3 f_c$, concretos dosados com agregados graúdos de diabásio.

Módulo de elasticidade dinâmico	Variações (%)	Classe de resistência (MPa)						
		20	30	40	50	60	70	80
		Média			Alta			
Ultrassom	Individuais	1,13	1,11	1,09	1,08	1,05	1,02	1,01
	Médias	1,11			1,04			
Impulso longitudinal	Individuais	1,43	1,25	1,15	1,10	1,07	1,05	1,06
	Médias	1,27			1,07			
Impulso transversal	Individuais	1,31	1,18	1,10	1,06	1,03	1,01	1,02
	Médias	1,20			1,03			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 48 - Resumo das variações anotadas entre os resultados dos ensaios dos módulos de elasticidade dinâmicos quando comparados aos resultados dos ensaios de módulo de elasticidade estático, $E_{ci} 0,3 f_c$, concretos dosados com agregados graúdos de granito.

Módulo de elasticidade dinâmico	Variações (%)	Classe de resistência (MPa)						
		20	30	40	50	60	70	80
		Média			Alta			
Ultrassom	Individuais	1,16	1,12	1,09	1,07	1,05	1,02	1,00
	Médias	1,12			1,03			
Impulso longitudinal	Individuais	1,45	1,29	1,20	1,14	1,11	1,09	1,08
	Médias	1,29			1,10			
Impulso transversal	Individuais	1,36	1,22	1,14	1,09	1,06	1,03	1,08
	Médias	1,24			1,05			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 49 - Resumo das variações anotadas entre os resultados dos ensaios dos módulos de elasticidade dinâmicos quando comparados aos resultados dos ensaios de módulo de elasticidade estático, $E_{ci} 0,3 f_c$, concretos dosados com agregados graúdos de calcário.

Módulo de elasticidade dinâmico	Variações (%)	Classe de resistência (MPa)						
		20	30	40	50	60	70	80
		Média			Alta			
Ultrassom	Individuais	1,20	1,17	1,13	1,10	1,07	1,03	0,99
	Médias	1,17			1,05			
Impulso longitudinal	Individuais	1,38	1,24	1,16	1,11	1,08	1,06	1,05
	Médias	1,26			1,07			
Impulso transversal	Individuais	1,31	1,19	1,12	1,08	1,05	1,04	1,04
	Médias	1,21			1,05			

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir destes resultados e completando a análise de todos os resultados são apresentados na Tabela 49, abaixo, o resumo geral das variações anotadas entre os resultados dos diversos tipos de ensaios realizados e o resultado do ensaio de módulo de elasticidade estático, $E_{ci} 0,3 f_c$.

Tabela 50- Resumo geral das variações anotadas entre os resultados dos ensaios dos ensaios de módulo quando comparados aos resultados dos ensaios de módulo de elasticidade estático, $E_{ci} 0,3 f_c$. Todas as naturezas petrográficas.

Classe de resistência à compressão (MPa)	$E_{cs} 0,3 f_c / E_{ci} 0,3 f_c$	Ensaio dinâmico em geral (%)	Ensaio por ultrassom (%)	Estímulo por Impulso (%)	
				Longitudinal	Flexional
Média ($20 \leq f_{ck} \leq 40$)	0,91	1,21	1,13	1,27	1,22
Alta (> 40)	0,88	1,06	1,04	1,08	1,05

Fonte: Elaborado pelo autor

Se comparados aos dados literários poderemos, conforme apresentados na Tabela 50, abaixo, onde se apresentam os valores propostos por dois

pesquisadores, pode-se concluir que estes resultados estão de uma maneira geral, atendem aos valores constantes da literatura consultada.

De acordo com Almeida (2008) e Mehta e Monteiro (2014), os valores resultados dos ensaios dinâmicos são sempre maiores quando comparados aos resultados dos ensaios estáticos.

A ABNT NBR 6118 (2014) orienta que, para estimativa do módulo de deformação, E_{ci} $0,3 f_c$, valores dos módulos de elasticidade, E_{ci} $0,3 f_c$, sejam multiplicados por 0,85.

Tabela 51 - Resumo das variações nos resultados dos ensaios dinâmicos propostas por Almeida (2008) e Mehta e Monteiro (2014)

Classe de resistência à compressão (MPa)	Mehta & Monteiro (2014)	Almeida (2008)	
		Estímulo por Impulso (%)	
	Ensaio dinâmico em geral (%)	Longitudinal	Flexional
Média ($20 \leq f_{ck} \leq 40$)	1,30	1,27	1,21
Alta (> 40)	1,20	1,08	1,06

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados da bibliografia citada.

Dada à quantidade de variáveis existentes na determinação dos módulos, tanto pelo método estático como pelo dinâmico, os resultados aqui apresentados se aplicam somente aos materiais e as proporções (traços) ora estudadas, coletados neste período.

Para aquelas obras onde o conhecimento desta propriedade é importante para segurança estrutural da obra, aconselha-se a realização de um estudo de dosagem aprofundado, de preferência antes mesmo da definição do f_{ck} a ser utilizado no desenvolvimento do projeto, visando o melhor aproveitamento econômico dos materiais escolhidos e da resistência efetiva do concreto.

5 CONCLUSÕES

5.1 Quanto aos resultados obtidos

Inserido no contexto da tecnologia de materiais de construção civil, este trabalho foi especificamente desenvolvido para contribuir no estudo da determinação do módulo de elasticidade do concreto ou módulo de Yong, atento as dificuldades encontradas pelos laboratórios de ensaios em obter resultados mais homogêneos nestes ensaios. Os programas interlaboratoriais do INMETRO nos mostram que, estes ensaios estáticos mesmo quando executados com procedimentos embasados em metodologias consagradas, utilizando equipamentos devidamente calibrados e, pessoal treinado e familiarizado com estes procedimentos, dado a inúmera quantidade de variáveis que interferem nestas determinações, nem sempre atendem as necessidades do mercado tanto produtor quanto consumidor.

Atendendo ao objetivo principal deste trabalho de comparar os resultados do ensaio dinâmico por estímulo por impulso aos resultados do ensaio estático, E_{ci} 0,3, e de acordo com os resultados aqui apresentados, lembrando que estes resultados referem-se a concretos produzidos para este fim, com amostras coletadas na época dos ensaios nas linhas de produção da empresa de serviço de concretagem, pode-se concluir, de forma itemizada, que:

1. Todas as séries análogas tiveram nos resultados dos ensaios de determinação do módulo pelos métodos estáticos e dinâmicos, a hipótese de igualdade aceita para um intervalo de confiança de 95% com exceção dos resultados das séries separadas para o ensaio de módulo de elasticidade dinâmico, $E_{d \text{ Ultrassom}}$, referentes aos traços análogos T345 e T368, assim como os traços T280 e T328, concretos preparados com agregado graúdo de granito e, traços T268 e T288 bem como os traços T170 e T200, concretos dosados com agregados graúdos de calcário, mostrando assim a alta variabilidade nos resultados dos ensaios executados com esta tecnologia;
2. Os resultados médios dos ensaios de determinação do módulo de elasticidade dinâmico, $E_{d \text{ Ultrassom}}$ foram, 1,13, para concretos classificados de média resistência à compressão e, 1,04 para aqueles concretos classificados como de alta resistência, maiores que os resultados do módulo de

- elasticidade, $E_{ci} 0,3 f_c$, acompanhando assim os valores sugeridos e indicados na bibliografia consultada;
3. Os resultados médios dos ensaios de determinação do módulo de elasticidade dinâmico, $E_{d \text{ Impulso L}}$ e $E_{d \text{ Impulso T}}$, foram respectivamente, 1,27 e 1,22, para concretos classificados de média resistência à compressão e, 1,08 e 1,05 para aqueles concretos classificados como de alta resistência, maiores que os resultados do módulo de elasticidade, $E_{ci} 0,3 f_c$, acompanhando assim os valores sugeridos e indicados na bibliografia consultada;
 4. Atendendo o objetivo específico de identificar a influência da natureza petrográfica dos agregados graúdos, observou-se que os resultados obtidos em todos os ensaios realizados de determinação do módulo, estático ou dinâmico dos concretos estudados com agregado graúdo de calcário, não foram inferiores aos resultados de todos os ensaios realizados com agregado graúdo de granito ao contrário das previsões dos modelos da ABNT NBR 6118 (2014) e de outras especificações internacionais, ficando os maiores resultados obtidos para os concretos dosados com agregado graúdo de diabásio;
 5. Já os resultados dos ensaios de determinação do módulo de deformação $E_{cs} 0,3 f_c$, foram até 14% menores do que os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade, $E_{ci} 0,3 f_c$.

5.2 Quanto ao investimento e retorno

Notoriamente, os resultados dos ensaios de determinação do módulo dinâmico por estímulo por impulso apresentaram as menores dispersões e representam uma boa alternativa para melhorar qualidade dos serviços prestados pelos laboratórios. Mais ainda, o investimento inicial previsto para aquisição do equipamento é igual àquele para implantação do equipamento de tomada de deformações superficiais com três bases de medida e com sistema de aquisição de dados. Dessa forma, o ganho econômico da utilização deste procedimento reside na redução drástica do tempo de realização do ensaio e de emissão do relatório. A possibilidade de ensaiar o mesmo corpo de prova em outras idades também representa economia significativa.

5.3 Sugestões para continuidade da pesquisa

Os resultados apresentados sugerem ser viável, rápido e provavelmente mais econômico realizar ensaios de módulo através de métodos dinâmicos, em especial ultrassom e de aquisição de resposta acústica quando estimulado por Impulso.

Caberia agora promover um estudo interlaboratorial para afinar as respostas.

Sugere também, que a utilização deste procedimento em corpos de prova de menores dimensões que as sugeridas nas normas de ensaios estáticos, principalmente naqueles testemunhos extraídos de estruturas de concreto acabadas.

5.4 Transferência ao meio técnico

Como todo trabalho acadêmico técnico-científico deve ter o seu conhecimento adquirido transferido para o meio técnico, a tecnologia de determinação do módulo de elasticidade através da aquisição da resposta acústica ao estímulo por Impulso, foi apresentada pelo autor e seu orientador, oralmente e como artigo técnico no 56º Congresso Brasileiro do Concreto, no Centro de Convenções de Natal, no Rio Grande do Norte, na Seção 9, Auditório 2, às 14h 30min do dia 09 de outubro de 2014. Novas publicações, agora com os resultados finais, estão em fase de elaboração para publicação em revistas especializadas e congressos nacionais e internacionais.

Dado o interesse normativo desta pesquisa, seus resultados foram apresentados, pelo autor, na reunião da Comissão de Estudos de Métodos de Ensaio de Concreto do CB 18, CE-018:300.002, na Sala Maior da Associação Brasileira de Cimento Portland, Av. Torres de Oliveira, 76, às 09 h, no dia 18 de novembro de 2016, com a solicitação verbal de inclusão deste procedimento na norma vigente ou de abertura de uma nova Comissão de Estudos para criação de uma norma específica para concreto de determinação do módulo de elasticidade do concreto, através da utilização de ensaios dinâmicos. Cópia desta dissertação será encaminhada a comissão de estudos, com uma solicitação formal, após a sua aprovação e revisão final.

REFERÊNCIAS

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

ALMEIDA, S. F.; HANAI, J. B. Análise dinâmica experimental da rigidez de elementos de concreto submetidos à danificação progressiva até a ruptura. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v.10, n. 44, p. 49-66, 2008.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318-14**: Building Code Requirements for Structural Concrete. 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **C-215**: Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens. 2014. 7p.

_____. **C469**: Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression . 2014. 5p.

_____. **C597**: Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. W. Conshohocken, PA: ASTM International, 2009. 4p.

_____. **E1876**: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration . 2015. 16p.

ARNDT, J. A.; SOUSA, J.; BIANCHINI, M. Influência do índice de forma do agregado graúdo na resistência do concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49., 2007, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves: 2007. CD-ROM.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 238p.

_____. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova .Rio de Janeiro, 2015. 9p.

_____. **NBR 5739**: Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos .Rio de Janeiro, 2007. 9p.

_____. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 238p.

_____. **NBR 7211:** Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009. 9p.

_____. **NBR 7215:** Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão .Rio de Janeiro, 1997. 8p.

_____. **NBR 7218:** Agregados — Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 2010. 3p.

_____. **NBR 7389-1:** Agregados - Análise petrográfica de agregado para concreto . Rio de Janeiro, 2009. 5p.

_____. **NBR 7389-2:** Agregados - Análise petrográfica de agregado para concreto .Rio de Janeiro, 2009. 5p.

_____. **NBR 7809:** Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2008. 3p.

_____. **NBR 8522:** Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008. 16p.

_____. **NBR 8802:** Concreto endurecido — Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2013. 8p.

_____. **NBR 8953:** Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015. 3p.

_____. **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005. 4p.

_____. **NBR 11578:** Cimento Portland composto - Especificação. Rio de Janeiro, 1991. 5p.

_____. **NBR 11579:** Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2013. 1p.

_____. **NBR 11582:** Cimento Portland — Determinação da expansibilidade Le Chatelier .Rio de Janeiro, 2012. 4p.

_____. **NBR 11768:** Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2011. 19p.

_____. **NBR 12655:** Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2015. 23p.

_____. **NBR 12821:** Preparação de concreto em laboratório - Procedimento. Rio de Janeiro, 2009. 5p.

_____. **NBR 15575-1:** Edificações habitacionais — Desempenho - Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013. 71p.

_____. **NBR 15577-4:** Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2008. 12p.

_____. **NBR 15577-5:** Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 5: Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2008. 5p.

_____. **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, 2008. 4p.

_____. **NBR 16372:** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine) .Rio de Janeiro, 2015. 11p.

_____. **NBR NM 11-2:** Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxidos principais por complexometria. Rio de Janeiro, 2012. 17p.

_____. **NBR NM 15:** Cimento Portland - Análise química - Determinação de resíduo insolúvel. .Rio de Janeiro, 2012. 3p.

_____. **NBR NM 16:** Cimento Portland - Análise química - Determinação de anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro, 2012. 3p

_____. **NBR NM 17:** Cimento Portland - Análise química - Método de arbitragem para a determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama. Rio de Janeiro, 2012. 4p.

_____. **NBR NM 18:** Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012. 4p.

_____. **NBR NM 19:** Cimento Portland - Análise química - Determinação de enxofre na forma de sulfeto. Rio de Janeiro, 2012. 6p.

_____. **NBR NM 20:** Cimento Portland e suas matérias primas - Análise química - Determinação de dióxido de carbono por gasometria. Rio de Janeiro, 2012. 15p.

_____. **NBR NM 23:** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001. 5p.

_____. **NBR NM 30:** Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001. 3p.

_____. **NBR NM 43:** Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2003. 8p.

_____. **NBR NM 46:** Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003. 6p.

_____. **NBR NM 47:** Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002. 23p.

_____. **NBR NM 49:** Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001. 3p.

_____. **NBR NM 52:** Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009. 6p.

_____. **NBR NM 53:** Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009. 8p.

_____. **NBR NM 65:** Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003. 4p.

_____. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6p.

_____. **NBR NM 9833**: Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2012. 3p.

BILESKY, P. C.; TANGO, C. E. S. Utilização de "cilindros montados" para ensaios mecânicos de concreto (II. Módulo de elasticidade). In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47. 2005, Olinda. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2005. CD-ROM.

BILESKY, P. C. et al. Considerações sobre o módulo de elasticidade do concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 56. 2014, Natal. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2014. CD-ROM.

CALLISTER, Jr., WILLIAM D. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. Tradução Sérgio Murilo Stamile Soares. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CUPERTINO, M. A .et al. Avaliação de fatores de ensaio que interferem nos resultados de modulo de elasticidade do Concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49., 2007, Bento Gonçalves – RS. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2007. CD-ROM.

CUPERTINO, A. L. L. et al. Analise da influencia da dimensão básica do corpo-de-prova no modulo de elasticidade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 50., 2008, Salvador –BA. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2008. CD-ROM.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EUROCODE 2: design of Concrete Structures: part 1-1: general rules and rules for buildings. **EN 1992-1-1**. Brussels, Belgium, 2004.

EVANGELISTA, A.C.J. **Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos**. 2002. 219 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2002.

GEYER, A.L.B.; DE SÁ, R.R. **Informativo Técnico Realmix** – Importância do controle de qualidade do concreto no estado fresco, Ano 2, Nº 2, jul. 2006 . Disponível em: http://www.realmixconcreto.com.br/downloads/Ano2_informativo_internet.pdf
Acesso em: 11 nov. 2016.

HELENE, P.R.L. **La agresividad del medio y la durabilidad del hormigón**. AATH, nº 10, p.25-35, ago.1983.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estabelecimento de parâmetros de dosagem e controle de cimento Portland**. 1987. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado**. 1993. 248 f. Tese de Livre Docência – Universidade de São Paulo.

HELENE, P. R. L. **Estudo da variação do módulo de elasticidade do concreto com a composição e características do concreto fresco e endurecido**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Relatório Técnico nº 10.1222. Associação Brasileira de Portland. São Paulo. 1998.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL - INMETRO. **Relatório DCT.C.TC.01.035.2007-R0**. Furnas Centrais Elétricas S.A. jul. 2007.

_____. **Relatório DCT.C.TC.007.2008-R0**. Furnas Centrais Elétricas S.A. maio. 2008.

_____. **Relatório DCT.C.TC.015.2009-R0**. Furnas Centrais Elétricas S.A. abr. 2009.

_____. **Relatório DCT.C.006.2011-R0**. Furnas Centrais Elétricas S.A. fev. 2011.

_____. **Relatório DCT.C.027.2011-R0**. Furnas Centrais Elétricas S.A. mar. 2011.

_____. **Relatório DCT.C.122.2011-R0**. Furnas Centrais Elétricas S.A. dez. 2011.

_____. **Relatório DCT.E.000.2013-R0**. Furnas Centrais Elétricas S.A. mar. 2013.

_____. **Relatório GST.E.006.2014-R0**. Furnas Centrais Elétricas S.A. jan. 2014.

_____. **Relatório GST.E.098.2014-R0**. Furnas Centrais Elétricas S.A. out. 2014.

_____. **Relatório GST.E.105.2015-R2**. Furnas Centrais Elétricas S.A. fev. 2016.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION - ISO. **ISO 1920-10**: Testing of concrete — Part 10: Determination of static modulus of elasticity in compression. Rio de Janeiro, 2010. 12p.

JACINTHO, A.E.G.A.; GIONGO, J.S. **Deformações instantâneas de concreto**. In: ISAIA, G.C. (Ed.). **Concreto**: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005.

KOSMATKA, S. H.; KERKHOFF, B.; PANARESE, W. C. **High-Performance Concrete**. In: **Design and Control of Concrete Mixtures**, EB001, 14th edition, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 2003.

MARTINS, D. G. **Influencia do tamanho do corpo de prova nos resultados de ensaios de módulo de deformação e resistência à compressão e suas correlações para concretos produzidos e, Goiânia-GO.** 2008. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2008.

MELO NETO, A.A. HELENE, P. Módulo de Elasticidade Dosagem e avaliação de modelos de previsão do módulo de elasticidade de concretos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44., 2002, Belo Horizonte – MG. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2002. CD-ROM.

METHA, P.K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto:** microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: IBRACON, 2008.

MONTIJA, F. C. **Aspectos da variabilidade experimental do ensaio de módulo de deformação do concreto.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** 2.ed. São Paulo: Pini, 2015.452p.

POPOVICS, S. Effects of uneven moisture Distribution on the Strength of and Wave Velocity in Concrete. **Ultrasonics**, 2005, v. 43. p. 429-434.

SHEHATA, L.D. **Deformações instantâneas de concreto.** In: ISAIA, G.C. (Ed.). **Concreto:** ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005.

THE INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE. COMITE EURO-INTERNATIONAL du BETON. **FIB Model Code for Concrete Structures 2010.** CEB-FIP model code. 2013.

TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. Dosagem dos Concretos de Cimento Portland. In: ISAIA, G.C. et al. **Concreto: Ciência e Tecnologia** 2.v. v.1 Cap. 12, p. 415-451. São Paulo: Ed. Ibracon, 2011.

VASCONCELOS, A. C.; GIAMMUSSO, S. E. O misterioso módulo de elasticidade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 40., 1998, Rio de Janeiro. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 1998. CD-ROM - Trabalho_090.

VASCONCELOS, A. C.; GIAMMUSSO, S. E. **Empresa TQS - O misterioso módulo de elasticidade.** Fev. 2009.

VIERA, T. M. et al. Influencia da dimensão do corpo de prova de concreto e da forma de capeamento, nos resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 50, 2008, Salvador - BA. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2008. CD-ROM.

WHITING, D. A; NAGI, M. A. **Manual on Control of Air Content in Concrete.**
EB116. National Ready Mixed Concrete Association and Portland Cement
Association. 1998.

ANEXOS

ANEXO A – RESULTADOS – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA E MECÂNICA DO CIMENTO PORTLAND CP II E 40.

ANEXO B – RESULTADOS – CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS.

ANEXO C – RESULTADOS – ANÁLISE PETROGRÁFICA DOS AGREGADOS.

ANEXO D – RESULTADOS – DETERMINAÇÃO DA REATIVIDADE DOS AGREGADOS COM ÁLCALIS DO CIMENTO PORTLAND.

ANEXO E – RESULTADOS – MITIGAÇÃO DA REATIVIDADE POTENCIAL DOS AGREGADOS COM ÁLCALIS DO CIMENTO PORTLAND.

ANEXO F – RESULTADOS – CARACTERIZAÇÃO DOS ADITIVOS.

ANEXO G – RESULTADOS – DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA DO ÍNDICE DE VAZIOS E DAS MASSAS ESPECÍFICAS.

ANEXO H – RESULTADOS – DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E DOS MÓDULOS ESTÁTICOS.

ANEXO I – RESULTADOS – DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO ATRAVÉS DA PROPAGAÇÃO DE ONDA ULTRASÔNICA.

ANEXO J – RESULTADOS – DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO ATRAVÉS DO ESTÍMULO POR IMPULSO.