

## **INFLUÊNCIA DA NATUREZA PETROGRÁFICA DO AGREGADO GRAÚDO NO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO**

### **INFLUENCE OF THE COARSE AGGREGATE PETROGRAPHIC NATURE IN THE ELASTICITY MODULUS OF THE CONCRETE**

Pedro Bilesky (1); Paulo Helene (2); Cláudio Sbrighi Neto (3); Alessandra Lorenzetti de Castro (4).

(1) *Mestre em Habitação, Consultor independente;*

(2) *Professor Titular EPUSP, PhD Engenharia;*

(3) *Professor Doutor, Ibracon;*

(4) *Professora Doutora do Departamento de Engenharia de Estruturas EESC/USP.*

[bilesky.pc@gmail.com](mailto:bilesky.pc@gmail.com)

## **Resumo**

Apresentam-se neste trabalho, resultados de um estudo experimental onde foi avaliado comparativamente o comportamento do módulo de elasticidade em concretos produzidos com agregados graúdos, designados comercialmente como calcário, granito e diabásio. Submeteram-se estes concretos, a ensaios realizados pelo método de ensaio estático, conforme proposto pela norma da ABNT NBR 8522 (2008), e, aos ensaios pelos chamados métodos dinâmicos, por vibração acústica através de estímulo por pulso, conforme a ASTM ASTM E 1876 (2009) e de acordo com a ABNT NBR 8802 (2013) e ABNT NBR 15630 (2009), por tomada de velocidade de propagação ultrassônica. Foram estudados concretos de resistências à compressão que variaram de 20 MPa a 80 MPa. Os ensaios de caracterização dos agregados graúdos mostraram que estes eram de naturezas petrográficas distintas daquelas declaradas comercialmente. Os resultados obtidos contrariaram, em parte, os modelos da ABNT NBR 6118 (2014) e de outras especificações internacionais que sugerem valores de módulo de elasticidade a serem adotados no projeto, quando não disponíveis resultados efetivos de ensaio. Os resultados obtidos nos ensaios dinâmicos, obedecendo a literatura consultada, foram sempre superiores aos resultados obtidos nos ensaios estáticos. A influência da resistência à compressão do concreto também se mostrou significativa e superior à influência da natureza petrográfica dos agregados, entretanto, para um mesmo nível de resistência foi possível se verificar a influência da sua natureza petrográfica. A repetitividade dos resultados foi avaliada estatisticamente e os resultados mostraram-se adequados.

*Palavra-Chave: Módulo de elasticidade; agregados graúdos; naturezas petrográficas; ensaios; normalização.*

## **Abstract**

The results of an experimental study comparing the behavior of the elasticity modulus in concretes produced with coarse aggregates, designated commercially as limestone, granite and diabase, are presented in this paper. These tests were carried out by the static test method, as proposed by the ABNT NBR 8522 (2008) standard, and by the tests so-called dynamic methods, by acoustic vibration through pulse stimulation, according to ASTM E 1876 (2009) and in accordance with ABNT NBR 8802 (2013) and ABNT NBR 15630 (2009), by ultrasonic propagation speed. Concrete with compressive strength ranging from 20 MPa to 80 MPa were studied. The characterization tests of the coarse aggregates showed that these were of petrographic natures different from those declared commercially. The results obtained partially counteracted the ABNT NBR 6118 (2014) models and other international specifications that suggest elasticity modulus values to be adopted in the project when effective test results are not available. The results obtained in the dynamic tests, following the consulted literature, were always superior to the results obtained in the static tests. The influence of the compressive strength of the concrete was also significant and superior to the influence of the petrographic nature of the aggregates; however, for the same level of resistance it was possible to verify the influence of its petrographic nature. The repeatability of the results was statistically evaluated, and the results were adequate.

*Keywords: Modulus of elasticity; coarse aggregates; petrographic natures; Laboratory tests; normalization.*

## 1. INTRODUÇÃO

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 significativamente a inércia dos elementos estruturais, fato esse que aumentou as suas deformações, MELO NETO e HELENE, (2002). 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.

O concreto, por ser um material composto não é um material perfeitamente elástico. 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 obriga, então, estimar o seu módulo de elasticidade por meio de ensaios estáticos, 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 pela aquisição das respostas ao estímulo por pulso, para fornecer aos projetistas subsídios para o cálculo das tensões do projeto a serem observadas, além de momentos e deflexões em estruturas complexas.

Estes procedimentos de ensaio para determinação do módulo de elasticidade do concreto, tanto estáticos como dinâmicos, são reconhecidamente mais complexos que os métodos de determinação da sua resistência à compressão axial, MONTIJA (2007), e requerem 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, erros sistemáticos ou aleatórios, acredita-se que estes ensaios, quando realizados de acordo com os procedimentos pré-estabelecidos pelas normas, não deveriam ter incorporado aos seus resultados incertezas. É sempre bom lembrar que no caso específico dos resultados dos ensaios estáticos, considerando que estes erros não possam ser totalmente eliminados e nem completamente minimizados, VASCONCELOS e GUIAMUSSO (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, dada a 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.

Além das variáveis operacionais assim incluídas aos resultados dos ensaios, a origem petrográfica do agregado graúdo, objeto de estudo deste trabalho, demonstra representar um fator, que, dentre vários outros fatores, mais influência tem na obtenção da grandeza. A forma característica do agregado graúdo obtido, natural ou britado, em cada natureza petrográfica, representa uma variável importante na qualidade final do concreto. O aumento da quantidade de argamassa ocasionada pela forma do agregado graúdo, pode aumentar a porosidade do concreto e, conforme explicam MEHTA e MONTEIRO (2014) é, sem dúvida, um dos fatores que mais influenciam o 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 do que os resultados dos ensaios de módulo em concretos elaborados com agregados de origem quartzíticas. ARNDT *et al* (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.

ABO-QUAIS (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 do pulso anotada 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.

Acompanhando uma atual exigência de aumento da trabalhabilidade do concreto para o seu lançamento, já verificava HELENE (1998), que essa mudança leva ao incremento do consumo de cimento, mantida a mesma resistência à compressão axial, o que significa um aumento no volume de pasta de cimento no metro cúbico de concreto e, com isso, os seus resultados de módulo de elasticidade são reduzidos por excesso de pasta.

Apresentam-se então neste trabalho, resultados de um estudo experimental onde foi avaliado comparativamente o comportamento do módulo de elasticidade em concretos produzidos com agregados graúdos, designados comercialmente como calcário, granito e diabásio. Submeteram-se estes concretos, a ensaios realizados pelo método de ensaio estático, conforme proposto pela norma da ABNT NBR 8522 (2008), e, aos ensaios pelos chamados métodos dinâmicos, por vibração acústica através de estímulo por impulso, conforme a ASTM E 1876 (2009) e de acordo com a ABNT NBR 8802 (2013) e ABNT NBR 15630 (2009), por tomada de velocidade de propagação ultrassônica. Foram estudados concretos com relações a/c que variaram de 0,30 a 0,90, com resistências à compressão de 20 MPa a 80 MPa.

## 2 Programa experimental

Evidentemente que para realização deste trabalho, não se pretendeu verificar a influência de todos os parâmetros e variáveis que interferem na obtenção do módulo de elasticidade. Assim, além da realização da caracterização dos materiais constitutivos, foram fixadas as seguintes variáveis independentes:

- consistência do concreto fresco: bombeável Classe S100;
- porcentagem de argamassa seca: 51%;
- idade do ensaio: 28 dias;
- areia de quartzo;
- areia artificial: calcária;
- agregados graúdos: diabásio, granito e calcário, com  $D_{max} = 25\text{mm}$ ;
- cimento CP II E 40;
- dimensão dos corpos de prova: 100 mm x 200 mm;
- tipo de cura: úmida até 7 dias de idade, equilíbrio do laboratório até 28 dias.

A partir do estabelecimento destas premissas, foram inseridas e controladas as seguintes variáveis intervenientes:

- cinco traços distintos de concreto, “m” em kg: 3,31; 5,0; 6,28; 6,84; 10,54;
- cinco relações distintas de água/cimento em kg/kg: 0,30; 0,45; 0,55; 0,60; 0,90;
- cinco massas específicas do concreto em  $\text{kg/m}^3$ : 2.453; 2.398; 2.383; 2.378; 2.359;
- cinco consumos de cimento por  $\text{m}^3$  de concreto, C, em  $\text{kg/m}^3$ : 545; 382; 312; 290; 190.

Conhecendo e controlando todas estas variáveis, foram analisadas com segurança as seguintes variáveis dependentes, objeto deste estudo:

- resistência à compressão ( $f_c$ );
- módulo de elasticidade estático tangente inicial ( $E_{ci,0,3^*f_c}$ );
- módulos de elasticidade dinâmico, longitudinal e transversal, obtido através de estímulo por impulso ( $E_{d \text{ Pulso}}$ ) e, obtido através de ondas ultrassônicas ( $E_{d \text{ Ultrassom}}$ ).

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

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. Avaliaram-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. Ampliou-se ainda o escopo deste trabalho incluindo 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 tipo de ensaio realizado.

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.

Neste período, foram realizados 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 dos módulo de elasticidade dinâmico e, ainda, 90 ensaios de determinação de absorção de água por imersão, 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 Resultados e análise

#### 3.1 Materiais constitutivos dos concretos

Na produção dos concretos a serem ensaiados foram utilizados agregados graúdos das seguintes naturezas petrográficas declaradas: brita de diabásio, produzida na região de Paulínia; brita de granito, produzida em Itapeceira da Serra; e brita de calcário, produzida na região de Araçariçuama, todas no estado de São Paulo. Para uma melhor análise posterior, apresenta-se a seguir a caracterização realizada para estes agregados graúdos. Na Tabela 1, a natureza petrográfica de cada agregado graúdo utilizado. De acordo com a análise realizada, conforme a ABNT NBR 7389-2 (2009) e apresentada pelo Relatório de Ensaio IPT Nº 1 069 963-203 (2015), como pode se observar, é diferente daquela declarada comercialmente.

Tabela 1. Natureza petrográfica declarada versus natureza petrográfica anotada no ensaio

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

Entende-se aqui que nem sempre a classificação petrográfica real do agregado graúdo utilizado na produção de concreto é compatível com a classificação dada comercialmente que é muito mais simplificada. Isso induz aos usuários destas informações, a utilização de estimadores de módulo de elasticidade que não correspondem à realidade.

A Tabela 2 apresenta a granulometria e demais índices determinados, de acordo com a sua especificação, ABNT NBR 7211 (2009), nos agregados graúdos utilizados.

Tabela 2 – Granulometria e outros índices físicos determinados nos agregados graúdos utilizados

Peneiras		Granulometria					
Designação	Abertura (mm)	Material retido em massa (%)					
		Diabásio		Granito		Calcário	
		Individual	Acumulada	Individual	Acumulada	Individual	Acumulada
1 ¼ in	32	0	0	0	0	0	0
1 in	25	0	0	0	0	1	1
¾ in	19	8	8	6	6	7	8
½ in	12,5	58	66	40	46	70	78
3/8 in	9,5	27	93	44	90	20	98
¼ in	6,3	5	98	8	98	1	99
nº 04	4,8	1	99	2	100	0	99
nº 08	2,4	0	99	0	100	0	99
nº 16	1,2	0	99	0	100	0	99
nº 30	0,6	0	99	0	100	0	99
nº 50	0,3	0	99	0	100	0	99
nº 100	0,15	0	99	0	100	0	99
< 0,15		1	-	0	-	1	-
Totais		100	695	100	696	100	700
Módulo de finura		6,95		6,96		7,00	
Dimensão máxima característica (mm)		25		25		25	
Massa específica seca (g/cm³)		2,85		2,65		2,76	
Massa específica saturada superfície seca (g/cm³)		2,86		2,62		2,79	
Massa específica aparente (g/cm³)		2,83		2,63		2,74	
Absorção de água (%)		0,5		0,4		1,2	
Teor de argila e materiais friáveis (%)		ausente		ausente		ausente	
Material fino que passa através da peneira 75µm (%)		1,4		0,3		0,6	
Reatividade potencial com álcalis do cimento		inócuo		inócuo		inócuo	

Registre-se aqui que todos os materiais constitutivos do concreto foram analisados de acordo com as normas brasileiras de ensaio apropriadas, com base nas suas especificações e que foram considerados conformes para produção de concreto, conforme apresentado detalhadamente nos Relatórios de Ensaios anexos à Dissertação de Mestrado de BILESKY (2016).

### 3.2 Propriedades dos concretos no estado recém misturado

Os concretos produzidos para este estudo atenderam aos parâmetros pré-estabelecidos no programa experimental e tiveram suas propriedades verificadas de acordo com as normas brasileiras

As Tabelas 3 a 5 apresentam os valores dos traços unitários básicos e os consumos médios encontrados para cada uma das naturezas petrográficas utilizadas. Houve, é claro, uma pequena variação na quantidade dos aditivos, em função da trabalhabilidade requerida, prefixada como Classe S100, o que ocasionou uma pequena variação nos consumos totais anotados, logo na massa específica aparente do concreto fresco.

Tabela 3. Traços unitários básicos adotados para agregado graúdo de diabásio.

Materiais	A	B	C	D	E
cimento	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
areia de quartzo	0,54	0,95	1,22	1,35	2,27
areia artificial de calcário	0,66	1,09	1,49	1,65	2,77
agregado graúdo de diabásio	2,11	2,96	3,57	3,84	5,50
água	0,30	0,45	0,55	0,60	0,90
aditivo polifuncional (%)	0,82	0,55	0,35	0,40	0,77
aditivo plastificante (%)	-	-	-	-	1,24
aditivo super-plastificante (%)	0,37	-	-	-	-
Consumos e algumas propriedades no estado recém misturado					
consumo de cimento / m <sup>3</sup>	546	382	312	289	190
consumo de água / m <sup>3</sup>	164	172	172	174	175
relação a/c (kg/kg)	0,30	0,45	0,55	0,60	0,90
teor de ar aprisionado (%)	0,8	1,6	1,9	2,0	2,4
massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	2.524	2.465	2.448	2.443	2.422
atende classe de agressividade ABNT NBR 12655:2015	IV	IV	III	II	---

Tabela 4. Traços unitários básicos adotados para agregado graúdo de granito.

Identificação do traço	A	B	C	D	E
cimento	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
areia de quartzo	0,54	0,95	1,22	1,35	2,27
areia artificial de calcário	0,66	1,09	1,49	1,65	2,77
agregado graúdo de granito	2,11	2,96	3,57	3,84	5,50
água	0,30	0,45	0,55	0,60	0,90
aditivo polifuncional (%)	0,85	0,85	0,35	0,60	0,77
aditivo plastificante (%)	-	-	-	-	1,20
aditivo super-plastificante (%)	0,42	-	-	-	-

(continua)

Tabela 4. Traços unitários básicos adotados para agregado graúdo de granito. (continuação)

Identificação do traço	A	B	C	D	E
Consumos e algumas propriedades no estado recém misturado					
consumo de cimento / m <sup>3</sup>	530	371	304	282	190
consumo de água / m <sup>3</sup>	159	167	167	169	170
relação a/c (kg/kg)	0,30	0,45	0,55	0,60	0,90
teor de ar aprisionado (%)	0,7	1,4	1,7	1,9	2,4
massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	2.453	2.398	2.383	2.378	2.359
atende classe de agressividade ABNT NBR 12655:2015	IV	IV	III	II	---

Tabela 5. Traços unitários básicos adotados para agregado graúdo de calcário.

Identificação do traço	A	B	C	D	E
cimento	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
areia de quartzo	0,54	0,95	1,22	1,35	2,27
areia artificial de calcário	0,66	1,09	1,49	1,65	2,77
agregado graúdo de calcário	2,11	2,96	3,57	3,84	5,50
água	0,30	0,45	0,55	0,60	0,90
aditivo polifuncional (%)	0,80	0,50	0,35	0,40	0,77
aditivo plastificante (%)	-	-	-	-	1,30
aditivo super-plastificante (%)	0,38	-	-	-	-
Consumos e algumas propriedades no estado recém misturado					
consumo de cimento / m <sup>3</sup>	541	379	310	288	193
consumo de água / m <sup>3</sup>	162	170	170	173	174
relação a/c (kg/kg)	0,30	0,45	0,55	0,60	0,90
teor de ar aprisionado (%)	0,8	1,4	2,1	1,9	2,1
massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	2.453	2.398	2.383	2.378	2.359
atende classe de agressividade ABNT NBR 12655 (2015)	IV	IV	III	II	---

Apresenta-se no gráfico da Fig.1 o teor de ar aprisionado médio, determinado pelo método pressométrico, ABNT NBR NM 47 (2002), e no gráfico de Fig. 2, a massa específica aparente média, determinada de acordo com a ABNT NBR 9833 (2012).

É importante frisar que 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 às 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 acima de 5% devido à utilização de aditivos podem trazer prejuízos ao desempenho mecânico destas misturas.

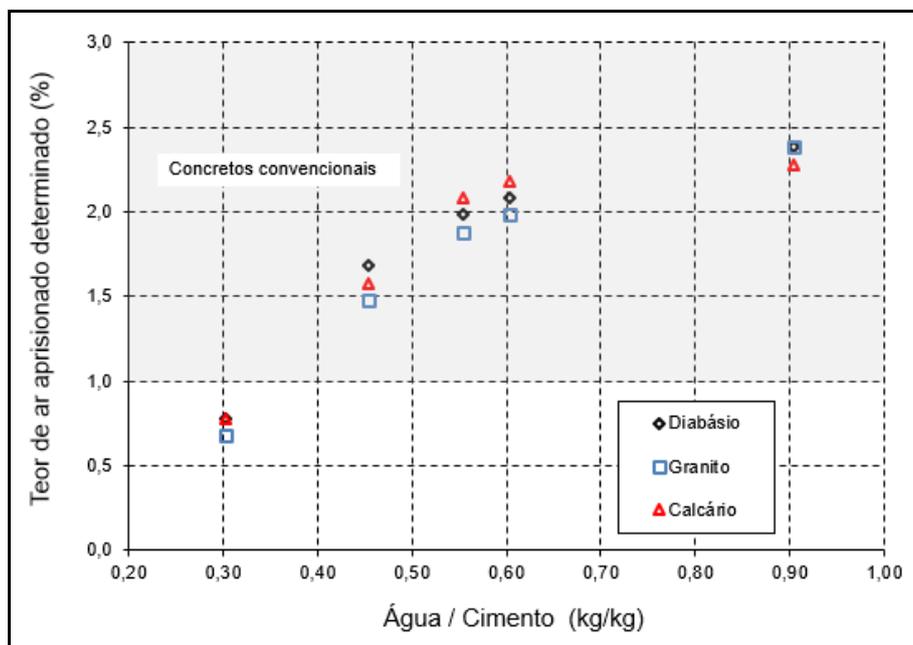


Figura 1. Teor de ar aprisionado.

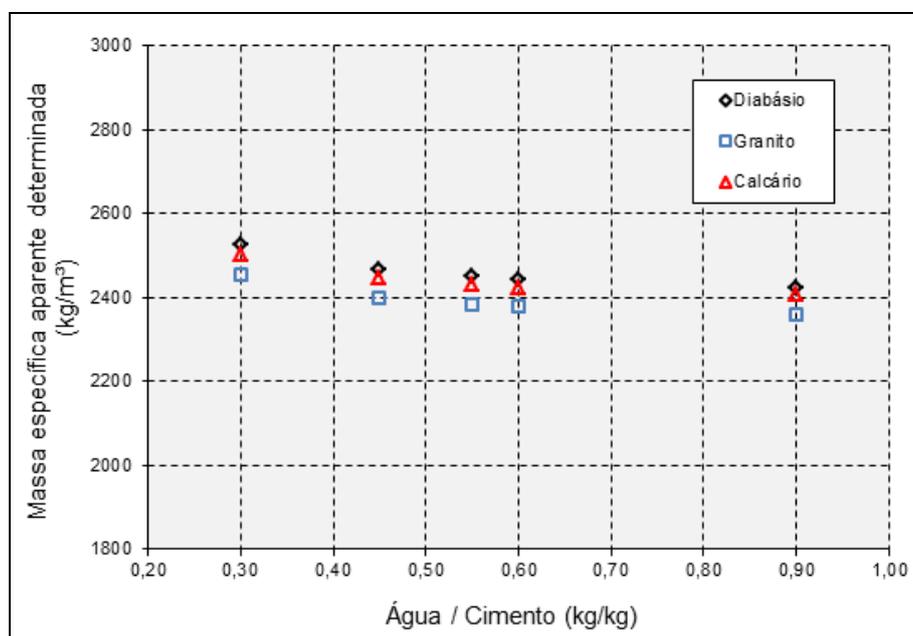


Figura 2. Massa específica aparente determinada.

### 3.3 Propriedades dos concretos no estado endurecido

De acordo com o plano experimental apresentado, os corpos de prova foram moldados e curados em câmara úmida até os 7 dias de idade, conforme prescreve a ABNT NBR 5738 (2015), ficando acondicionados no ambiente no laboratório até a data de ensaio, 28 dias de idade.

#### 3.3.1 Índices físicos

Foram determinados também a absorção de água por imersão e o índice de vazios permeáveis dos concretos estudados, de acordo com a ABNT NBR 9778 (2005).

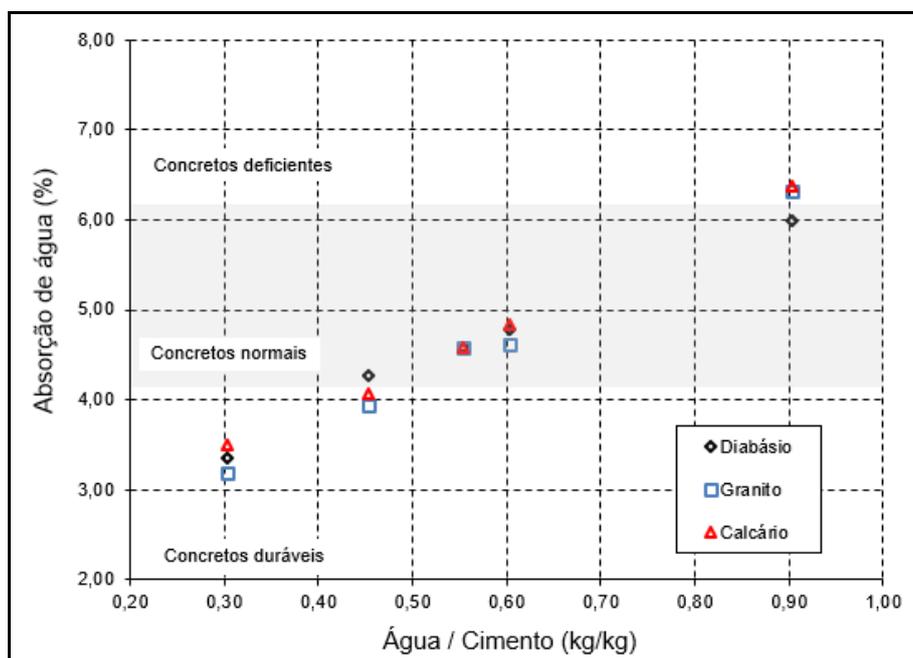


Figura 3. Resultados médios de absorção de água e limites propostos por HELENE (1983).

O gráfico da Fig. 3, apresentado acima, mostra os resultados médios obtidos no ensaio de absorção de água por imersão 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 os concretos apresentam durabilidade normal a alta em função da sua absorção. Além disso, a absorção de água dos concretos aumenta em função do aumento da relação água/cimento, devido a um aumento da sua porosidade e permeabilidade MEHTA e MONTEIRO (2014), afetando negativamente a sua durabilidade. NEVILLE (2016) classifica como bons concretos aqueles com taxa de absorção de água abaixo de 10%.

A ABNT NBR 8451-1 (2011), por sua vez, estabelece o limite máximo de 5,5% de absorção média e o limite de 7,0% para o resultado individual para concretos destinados a confecção de postes para distribuição de energia elétrica, Classe II, que ficarão expostos

às intempéries. Isto evidencia a boa qualidade do concreto estudados, mesmo os com baixos consumos de cimento Portland.

Para HELENE (1983), conforme apresentado no gráfico da Fig. 4 abaixo, o índice de vazios permeáveis máximo de 15% limita os concretos normais dos concretos deficientes e, considera que concretos com até 10% sejam concretos duráveis. Entre 10% e 15% situam-se os concretos considerados normais.

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.

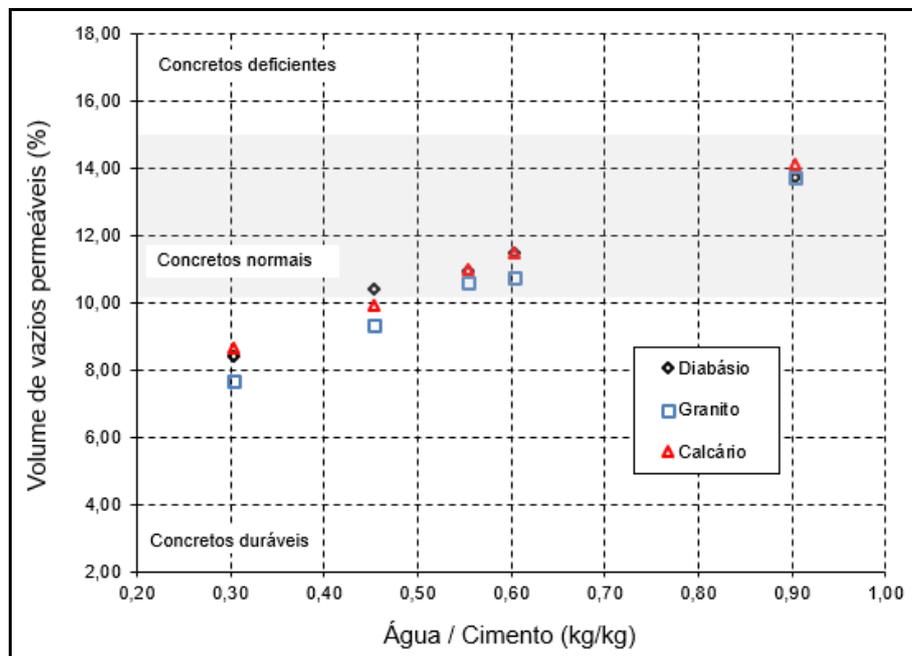


Figura 4. Resultados médios do volume de vazios permeáveis e limites propostos por HELENE (1983).

### 3.3.2 Resistência à compressão

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

Conforme os estudos apresentados por ABRAMS (1919), 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 e TUTIKIAN (2011). A natureza petrográfica dos agregados graúdos, assim como a sua massa específica, são fatores que influenciam nestes resultados. O gráfico da Fig. 5 ilustra este crescimento com os resultados de resistência média à compressão obtidos aos 28 dias.

Os resultados de resistência à compressão dos concretos ora estudados e realizados para parametrizar os ensaios de módulo estáticos realizados atenderam às prescrições do Anexo B da ABNT NBR 5739 (2007), apresentando coeficientes de variação do ensaio iguais ou abaixo de 1,5%, que são considerados excelentes conforme a Tabela 2.B. da referida norma. Ainda, o ACI 214:2012, mais tolerante, limita esta classificação para corpos de prova moldados para estudos laboratoriais em 2,0%, BILESKY (2016).

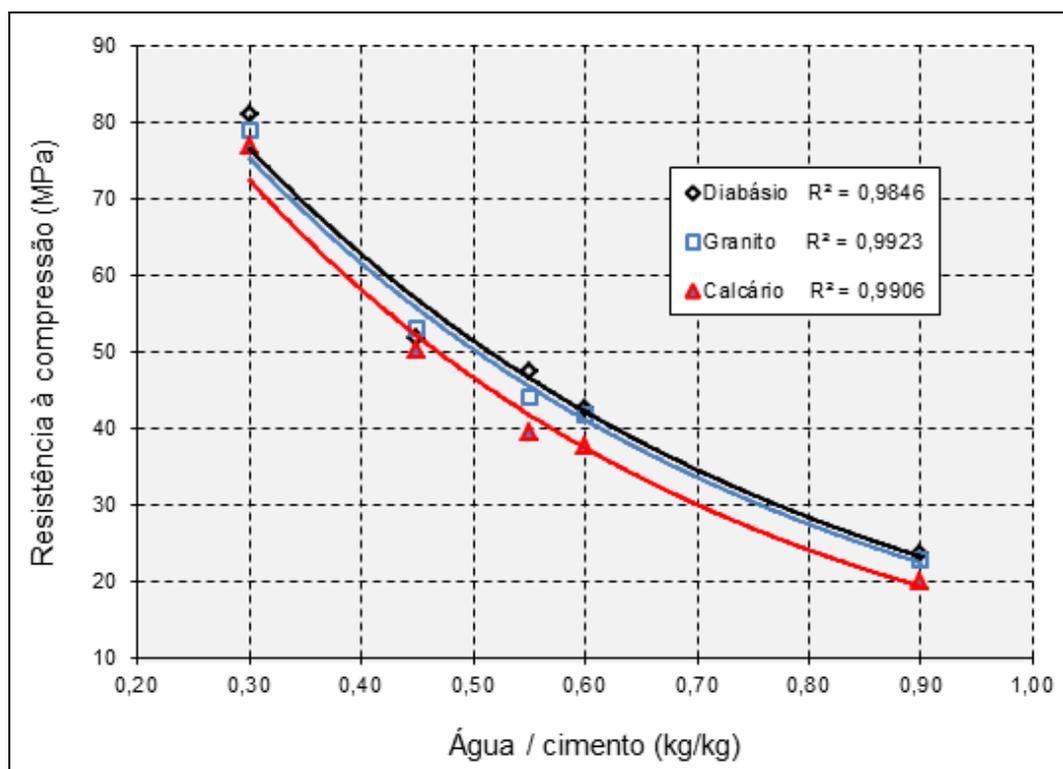


Figura 5. Resistências à compressão médias obtidas

### 3.3.3 Módulo de elasticidade

Apresentam-se nas Figs. 6 a 8, a seguir, os resultados obtidos a partir de diferentes métodos de ensaio para se determinar a grandeza “Módulo de Elasticidade”, seja pelo método estático, conforme preconizado pela ABNT NBR 8522 (2008), ou pelos métodos dinâmicos, conforme estabelecidos na ABNT NBR 15630 (2009) e ASTM E 1876 (2009). Lembre-se, conforme descrito no plano experimental adotado, que se trata de resultados médios de duas séries de seis corpos moldados com quinze dias de intervalo. Estes resultados foram analisados estatisticamente e as séries análogas tiveram nos resultados dos ensaios de determinação do módulo pelos métodos estático e dinâmico, 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,  $E_d$  Ultrassom, referentes aos traços análogos de  $a/c = 0,55$ , assim como os traços de  $a/c = 0,90$ , concretos preparados com agregado graúdo de granito, e traços de  $a/c = 0,60$  e  $a/c =$

0,90 de concretos dosados com agregados graúdos de calcário, mostrando, assim, a alta variabilidade nos resultados dos ensaios executados com esta metodologia.

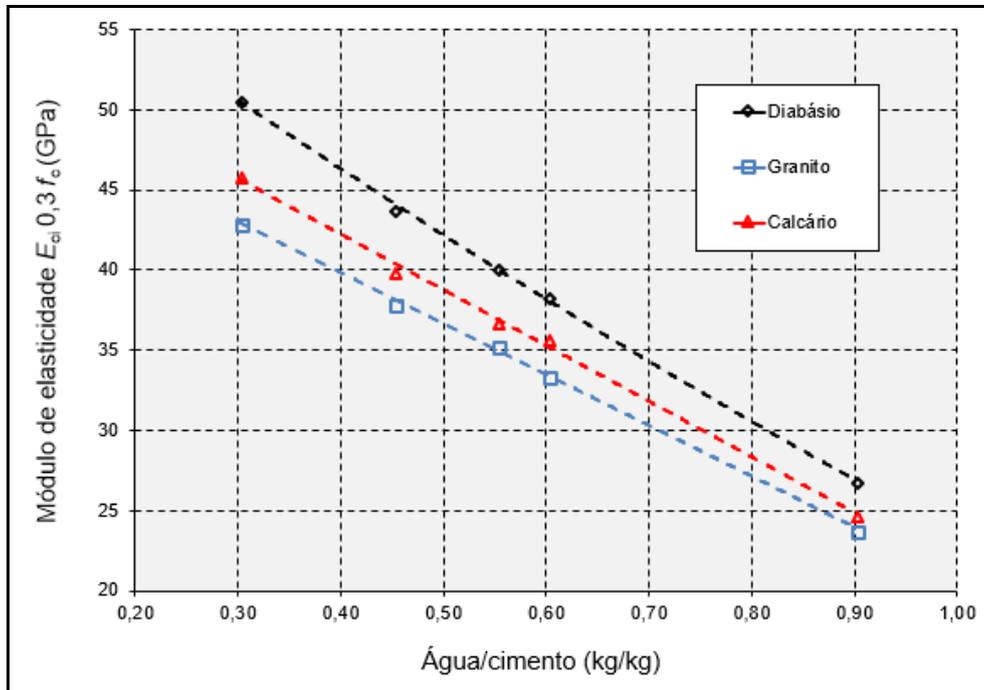


Figura 6. Módulo de elasticidade  $E_{ci,0,3 f_c}$ .

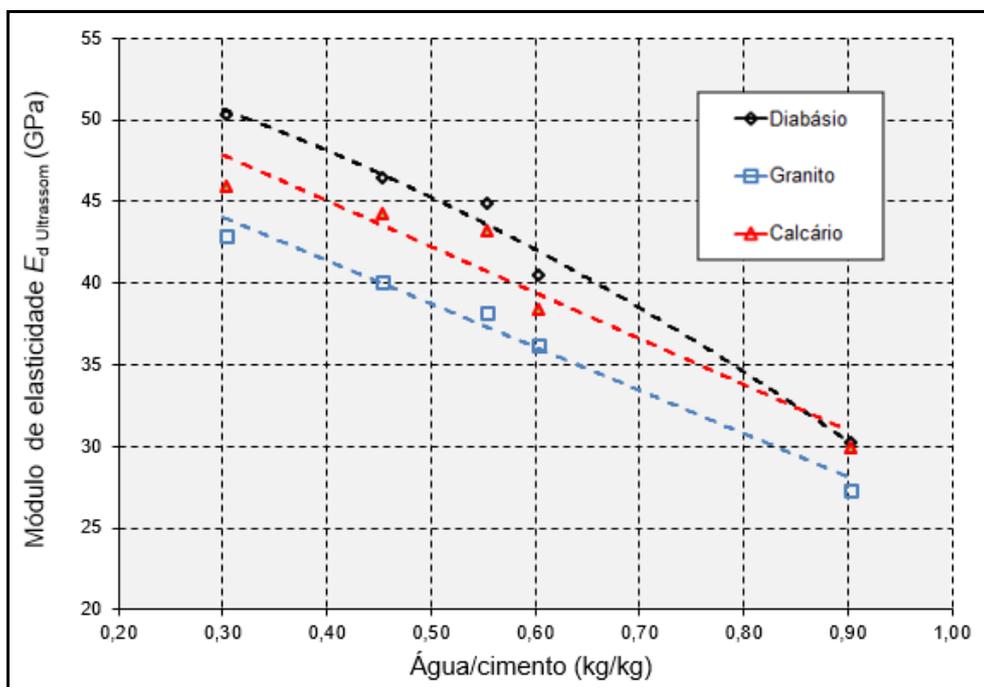


Figura 7. Módulo de elasticidade  $E_d$  Ultrassom.

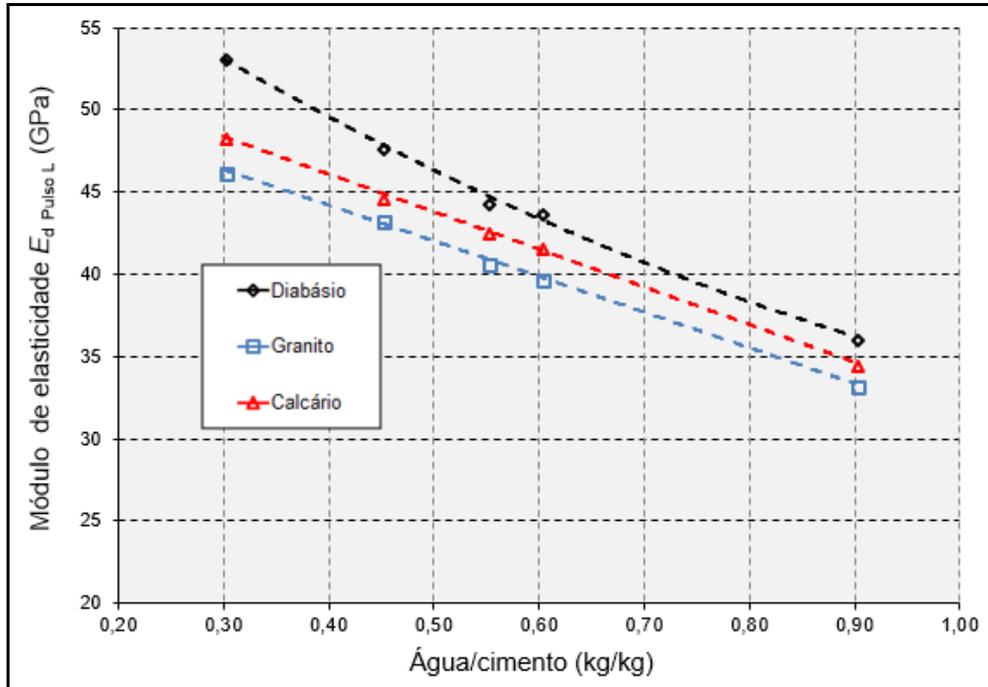


Figura 7. Módulo de elasticidade  $E_{d \text{ Pulso L}}$ .

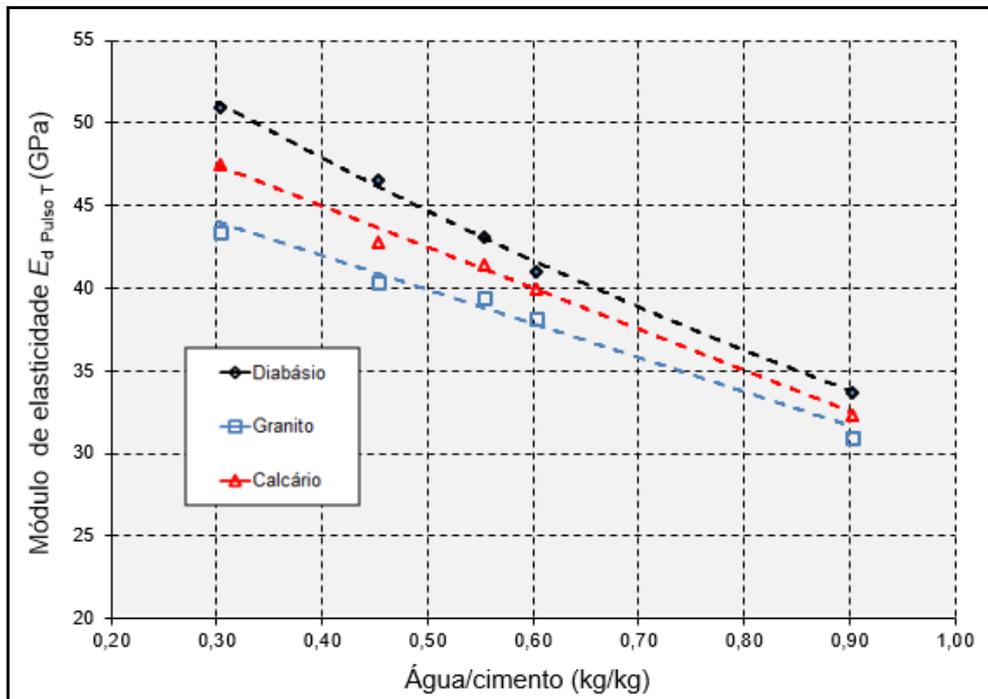


Figura 8. Módulo de elasticidade  $E_{d \text{ Pulso T}}$ .



Deve-se ressaltar que o calcário utilizado nesta pesquisa tem a sua densidade mais alta do que a do granito, logo a sua porosidade é menor e, os seus resultados, devem ser superiores aos dos resultados alcançados com agregados de origem petrográfica quartzíticas, de acordo com o já verificado por MEHTA e MONTEIRO (2014).

#### 4 Considerações finais

A norma brasileira ABNT NBR 6118 (2014), a exemplo da normalização internacional, aceita que os parâmetros oferecidos em seu Item 8.2.8 e expressos como exemplo na Tabela 8.1 (para agregados de origem granítica), na falta de ensaios comprobatórios do módulo de elasticidade do concreto escolhido, sejam utilizados na equalização da estrutura, propondo também correções para as demais naturezas petrográficas de agregados graúdos disponíveis no mercado. Entenda-se aqui que, por uma questão até de segurança estrutural, os índices ali propostos fornecem aos projetistas valores adequados e que devem estar confortavelmente aquém dos valores a serem obtidos nos ensaios. Isso nem sempre corresponde à realidade e tem sido motivo de acaloradas discussões no meio técnico.

Os resultados obtidos neste trabalho mostraram, conforme já identificado por MAIA e ALSANI (2016), que os índices propostos pela normalização, que tem sua origem empírica e experimental, baseada principalmente em um acervo de resultados de ensaios realizados em concretos utilizados no passado, com equipamentos ultrapassados e nem sempre devidamente calibrados, nem sempre correspondem às características dos concretos utilizados nos dias atuais, ou seja, as necessidades do mercado consumidor foram se modificando com o passar dos anos e as características físicas e mecânicas do concreto se alteraram pela sua própria composição.

É notório então que estes estimadores precisam ser melhor estudados e revistos, sendo evidente a importância de se conhecer bem o material considerado no projeto. No caso ora apresentado, o agregado graúdo denominado comercialmente de “calcário” era, na verdade, de acordo com a análise petrográfica apresentada, um mármore com uma série de minerais secundários, que tem seu processo genético sensivelmente diferente daquele que origina a grande maioria dos calcários comuns, resultando em propriedades físico-mecânicas diversas dos calcários típicos. Isto provoca uma inversão quanto à expectativa do comportamento por causa de sua compacidade sensivelmente superior e que induz elevação do módulo de elasticidade do concreto com ele produzido. Da mesma forma, foi identificado que o material chamado de “granito” é um tipo de granito diferenciado dos granitos correntes em virtude do processo de milonitização que fez parte de sua gênese, induzindo uma série de fragilidades na sua estrutura com influência direta em sua compacidade e, portanto, no módulo de elasticidade do concreto.

Reconhecidamente toda mudança de normalização e de especificação demanda de resultados de pesquisas e de tempo para o seu melhor embasamento. Como já é de conhecimento do mercado envolvido, as dificuldades para se associar os valores de resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ) aos valores do módulo de elasticidade, conforme sugerido na normalização, são evidentes. Sugere-se então aos calculistas que tenham prévio conhecimento do potencial dos materiais disponíveis na região de



interesse e, assim, melhor definam esta resistência característica à compressão, ( $f_{ck}$ ), a utilizar em seus projetos.

## 5 Conclusões

Atendendo o objetivo específico deste artigo de identificar a influência da natureza petrográfica dos agregados graúdos sobre o módulo de elasticidade de concretos aplicados na prática da construção civil, pode-se observar, a partir dos resultados apresentados, que em todos os ensaios realizados de determinação do módulo de elasticidade, seja pelo método estático ou ainda pelos métodos dinâmicos adotados, nos concretos estudados com agregado graúdo de calcário, não foram nunca inferiores aos resultados de todos os ensaios realizados com agregado graúdo de granito, ao contrário das previsões dos modelos simplificados adotados pela ABNT NBR 6118 (2014) e outras especificações internacionais. Na maioria das vezes, os maiores resultados foram obtidos nos concretos dosados com agregado graúdo de diabásio evidenciando assim, que para uma mesma relação água/cimento do concreto há uma clara influência da natureza mineralógica do agregado graúdo no módulo de elasticidade obtido no concreto.

## 6 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.

ABRAMS, D. A.. **Design of Concrete Mixture**. Bulletin 1, Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute, Chicago, 1919. 27 p. Disponível em <<https://archive.org/stream/designconcretem00abragoog#page/n2/mode/2up>>. Acesso em 13/05/2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **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**. 49º Congresso Brasileiro do Concreto, Bento Gonçalves: 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2007. 9p.

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



Anais do  
60º Congresso Brasileiro do Concreto  
CBC2018  
Setembro / 2018



@ 2018 - IBRACON - ISSN 2175-8182

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação.** Rio de Janeiro, 2009. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7389-2: Agregados - Análise petrográfica de agregado para concreto.** Rio de Janeiro, 2009. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8451-1: Postes de concreto armado para redes de distribuição e de transmissão de energia elétrica - Especificação.** Rio de Janeiro, 2011. 32p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão.** Rio de Janeiro, 2008. 16p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802: Concreto endurecido — Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.** Rio de Janeiro, 2013. 8p.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9833: Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico.** Rio de Janeiro, 2012. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2015. 23p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15630: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica.** Rio de Janeiro, 2008. 4p.

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

BILESKY, P. C.. **Contribuição aos Estudos do Módulo de Elasticidade do Concreto.** 2016. Dissertação Mestrado - Curso de Habitação, Coordenadoria de Ensino Tecnológico, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S. A., São Paulo, 2016.



EVANGELISTA, A.C.J. **Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos.** 2002. 219 p. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2002.

GEYER, A.L.B.; DE SÁ, R.R.. **Importância do controle de qualidade do concreto no estado fresco.** Informativo Técnico Realmix, Ano 2, Nº 2, jul. 2006. Disponível em: <[http://www.realmixconcreto.com.br/downloads/Ano2\\_informativo\\_internet.pdf](http://www.realmixconcreto.com.br/downloads/Ano2_informativo_internet.pdf)>. Acesso em: 11 nov. 2016.

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

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.

MAIA, L.; ASLANI, F.. **Modulus of elasticity of concretes produced with basaltic aggregate.** Computers and Concrete, Volume 17, Number 1, January 2016, pages 129-140. Disponível em <<http://technopress.kaist.ac.kr/content/?page=article&journal=cac&Volume=17&num=1&ordernum=7>>. Acesso em 01 fev. 2018.

MELO NETO, A.A.; HELENE, P.. **Módulo de Elasticidade Dosagem e avaliação de modelos de previsão do módulo de elasticidade de concretos.** **44º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Belo Horizonte, 2002.**

METHA, P.K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** São Paulo. 2ª Edição, São Paulo, Ipcis, 2014. 750p.

MONTIJA, F. C.. **Aspectos da variabilidade experimental do ensaio de módulo de deformação do concreto.** 2007. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

NEVILLE, A. M.. **Propriedades do concreto.** 2ª Edição, 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.

QUITETE, E. B.. **Análise petrográfica.** RELATÓRIO DE ENSAIOS Nº 1 069 963-203, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., 2015.

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.



Anais do  
60º Congresso Brasileiro do Concreto  
CBC2018  
Setembro / 2018



@ 2018 - IBRACON - ISSN 2175-8182

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