

ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS DE OBTENÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA CONCRETO PREPARADO COM AREIAS NATURAL E ARTIFICIAL

COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS TO OBTAIN THE ELASTICITY MODULUS FOR CONCRETE PREPARED WITH NATURAL AND ARTIFICIAL SANDS

Ricardo Antonio Barbosa¹, Rita de Cássia Silva Sant'Anna Alvarenga², Antonio Neves de Carvalho Junior³, Ramon Tadeu Lopes Ferreira⁴, Lucas Maurício Rodrigues⁵, Lucas de Oliveira Castro⁶, Rafael Bossi Garcia⁷, White José dos Santos⁸

¹Engenheiro Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, MG. E-mail: richardufmg@hotmail.com

²Doutora em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, MG. E-mail: ritadecassia@ufv.br

³Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, MG.
E-mail: anjunior@demc.ufmg.br

⁴Engenheiro Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, MG. E-mail: tadeuramoncivil@gmail.com

⁵Discente do Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, MG.
E-mail: lucasrodrigues.eng.civil@hotmail.com

⁶Engenheiro Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, MG. E-mail: lucascastro.ecivil@gmail.com

⁷Discente do Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, MG.
E-mail: rbgarcia11@gmail.com

⁸Doutor em Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, MG, Departamento de Engenharia de Materiais e Construção Civil. E-mail: white.santos@demc.ufmg.br.

RESUMO

Foram estudadas as propriedades mecânicas e indicadores de durabilidade em concretos, enfatizando as formas de obtenção dos módulos de elasticidade. Foram utilizados dois agregados miúdos, um artificial de britagem e outro natural. No programa experimental foram avaliadas absorção de água por imersão e por capilaridade, porosidade, resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral, correlacionando-as com o módulo de elasticidade. O módulo de elasticidade foi avaliado por meio de três metodologias: ultrassom, ressonância forçada e pela curva tensão por deformação. Os resultados permitiram caracterizar os materiais e compósitos e, ainda, identificar as convergências e divergências entre as propriedades e metodologias apresentadas e gerar boas correlações entre elas. Observou-se que a ABNT NBR 6118:2014 foi a que inferiu valores de módulo de elasticidade mais próximos aos reais devido a consideração do tipo de agregado. Conclui-se que o agregado a ser utilizado é um fator de suma importância e a determinação de suas propriedades é indispensável para se obter melhor aproximação entre o referencial teórico e o valor real. Comprovou-se que a areia artificial eleva a resistência mecânica, melhora as condições de durabilidade e aumenta os módulos de elasticidade estático e dinâmico do concreto.

Palavras-chave: propriedade mecânicas do concreto, durabilidade, módulo de elasticidade, agregados.

ABSTRACT

It was studied the mechanical properties and durability of concrete indicators, focusing on ways of obtaining elasticity modulus. Using two fine aggregate, an artificial crushing and other natural. In the experimental program examined the absorption of water by immersion and capillarity, porosity, resistance to axial compression and tensile strength by diametrical compression, correlating them with the elasticity modulus. The elasticity modulus was evaluated under the bias of three methods: ultrasound, forced resonance and the stress-strain curve. The results allowed characterizing the materials and the composites and to identify the similarities and differences between the properties and methods presented and to generate good correlations. It was observed that the ABNT NBR6118:2014 provided values of the elasticity modulus closer to reality due to the type of aggregate. It is concluded that the aggregate to be used is an important factor and the determination of its properties become essential in getting a good approximation between the theoretical and the real cases. It was proved that the artificial sand increases the mechanical strength; improve the durability and increases the static and dynamic elasticity modules of the concrete.

Keywords: mechanical properties of concret, durability, concrete, elasticity modulus, aggregates.

1 – INTRODUÇÃO

O módulo de elasticidade, ou módulo de *Young*, é um parâmetro mecânico que proporciona a medida da rigidez de um material, estando associado a propriedades

mecânicas como tensão de escoamento, tensão de ruptura, propagação de trinca, entre outras (ISAIA, 2011 e METHA; MONTEIRO, 2014).

Silva (2006) e Sahmaran *et al.* (2009) destacam, ainda, que o módulo de elasticidade depende das condições

do cimento hidratado, como a relação água/cimento e a disposição, espaços entre as partículas dos agregados devido a sua forma, granulometria, rugosidade dos grãos e teor de material pulverulento. É uma das propriedades elásticas mais importantes dos compósitos cimentícios para a análise dos impactos de manutenção e desempenho das estruturas, e está intimamente relacionado com as propriedades da pasta de cimento, a rigidez dos agregados selecionados e o método de determinação do módulo (ALMEIDA, 2012; TORGALKAR, 2004; ALVES; MAGALHÃES; CARRASCO, 2013; ZHANG *et al.*, 2006 e SENGUL, 2002).

O módulo de elasticidade de compósitos cimentícios sob tração ou compressão é dado pela declividade da curva tensão por deformação por carga uniaxial, não sendo linear, o que permite dividir este módulo em três tipos (ISAIA, 2011):

- tangente, que é dado pela declividade de uma reta traçada de forma tangente à curva de tensão por deformação em qualquer ponto desta curva;
- secante, que é obtido pela declividade de uma reta traçada da origem até um ponto da curva, que corresponde à tensão de 40% da carga de ruptura;
- cordal, que é dado pela inclinação de uma reta traçada entre dois pontos quaisquer da curva tensão por deformação, sendo o primeiro correspondente a 50 μm e o segundo a 40 % da carga de ruptura.

O módulo de elasticidade dinâmico corresponde a uma deformação instantânea muito pequena e é dado por aproximação pelo módulo tangente inicial. Geralmente é de 20 a 40 % mais alto que o módulo de elasticidade estático (ISAIA, 2011). É utilizado em análises dinâmicas, como sismos, vibrações e carregamentos cíclicos.

Identificam-se várias formas de obtenção do módulo de elasticidade estático do concreto, contudo há muitas divergências entre as metodologias e os parâmetros considerados. Como formas de estimativa do módulo de elasticidade estático do concreto tem-se:

- pela Equação 1, proposta pelas Normas Brasileiras (ABNT NBR 6118:2014 e ABNT NBR 8522:2008, baseada na resistência à compressão, e em a_1 e a_2 , que correspondem a correções em função do módulo de elasticidade do agregado e da consistência do concreto fresco, respectivamente.

$$E_{ci} = 5600 \cdot f_c^{0.5} \cdot a_1 \cdot a_2 \quad (1)$$

Em que: E_{ci} = Módulo de Elasticidade Estático do concreto (MPa);

f_c = Resistência à compressão do concreto (MPa);

a_1 = Índice de correção do módulo de elasticidade em função da natureza do agregado, que varia de 0,7 para arenitos, 1,0 para gnaisses e 1,2 para basalto;

a_2 = Índice de correção do módulo de elasticidade em função da sua consistência, que varia de 0,9 para fluida, 1,0 para plástica e 1,1 para seca.

- pelas Equações 2 e 3 da Norma Norte-Americana (ASTM C469:2014 e ACI C318: 2014), baseadas na massa específica, resistência à compressão e idade:

$$E_c = \gamma^{1.5} \cdot 33 \cdot f_c^{0.5} \quad (2)$$

$$E_c = 5.700 \cdot f_{cj}^{0.5} \quad (3)$$

Em que: E_c = Módulo de Elasticidade Estático do concreto (MPa);

f_c = Resistência à compressão do concreto (MPa);

γ = Massa Específica (kg/l);

f_{cj} = Resistência à compressão do concreto (MPa) em “j” dias.

- pelas Equações 4 e 5 da Norma Europeia (CEB-FIP MC2010: 2013), baseadas na resistência à compressão e na idade do concreto:

$$E_c = 21.500 \cdot ((f_c + 8)/10)^{1/3} \quad (4)$$

$$E_c = 21.500 \cdot ((f_{cj})/10)^{1/3} \quad (5)$$

Em que: E_c = Módulo de Elasticidade Estático do concreto (MPa);

f_c = Resistência à compressão do concreto (MPa);

f_{cj} = Resistência à compressão do concreto (MPa) em “j” dias.

A utilização de ensaios não destrutivos na avaliação das propriedades dos materiais de construção está bastante difundida, e nos últimos anos vários métodos novos foram introduzidos, como por exemplo, a obtenção de módulo de elasticidade dinâmico por meio de ultrassom (MALHOTRA; SIVASUNDARAM, 2004a), frequência ressonante (MALHOTRA; SIVASUNDARAM, 2004b; ABNT NBR 15630:2008 e BS EM 12504-4:2004), decremento da vibração livre (TORGALKAR, 2004), rotação de vigas (MALHOTRA; SIVASUNDARAM, 2004a), pulsos (ALVES; MAGALHÃES; CARRASCO, 2013 e TORGALKAR, 2004) e métodos térmicos (TORGALKAR, 2004)

Segundo Malhotra e Sivasundaram (2004a), o módulo de elasticidade dinâmico pode ser obtido com maior precisão por ensaio ultrassônico (vide Equação 6, ABNT NBR 8802:2013).

$$E_d = \gamma \cdot V^2 \cdot [(1+v) + (1+2 \cdot v)/(1-v)] \quad (6)$$

Em que: E_d = Módulo de elasticidade dinâmico (N/mm²);

V = Velocidade do pulso ultrassônico (m/s);

γ = Densidade de massa no estado endurecido (kg/m³);

v = Coeficiente de Poisson.

Conforme a norma norte-americana ASTM C 215:2008, pode-se obter o valor de E_d pelo método de medição das frequências ressonantes transversal, longitudinal e torcional de prismas e cilindros de concreto (Equação 7).

$$E_d = (4 \cdot L^2 \cdot F^2 \cdot P/g) \cdot 10^{-6} \quad (7)$$

Em que: E_d = Módulo de elasticidade dinâmico (N/mm²);

L = Comprimento do CP (m);

F = Frequência de ressonância longitudinal (hertz);

P = Peso volumétrico (N/m³);

g = Aceleração da gravidade (m/s²).

Esta pesquisa teve como objetivo avaliar as propriedades mecânicas (resistência à compressão axial, tração por compressão diametral e módulos de elasticidade dinâmico e estático) e indicadores de durabilidade (porosidade, absorção por imersão e capilaridade) de concretos confeccionados com a utilização de dois tipos de agregado miúdo, natural (denominado AN) e artificial de britagem (denominado AA), de modo a verificar e comparar as metodologias utilizadas atualmente para obtenção dos módulos de elasticidade e identificar sua representatividade.

2 – MATERIAIS E PROGRAMA EXPERIMENTAL

No programa experimental deste trabalho buscou caracterizar os agregados e os concretos ($f_{ck} = 20$ MPa) gerados e realizar ensaios e correlações entre os métodos de avaliação do módulo de elasticidade.

2.1 Materiais

Empregou-se cimento Portland do tipo CP II-E-32; agregado miúdo natural quartzoso, zona ótima natural (AN) ou agregado artificial (AA) de britagem de gnaiss (Tabela 1), zona utilizável superior e agregado graúdo de gnaiss (Tabela 2), brita zero.

A caracterização dos agregados compreendeu as análises de granulometria, massa específica, material pulverulento (Figura 1 e Tabelas 2 e 3) e imagens por lupa esteroscópica (Figura 2). Caracterizou-se, ainda, a composição mineralógica por meio da difração de Raios-X e Eflorescência de Raios-X.

Figura 1 – Curvas granulométricas das areias natural e artificial

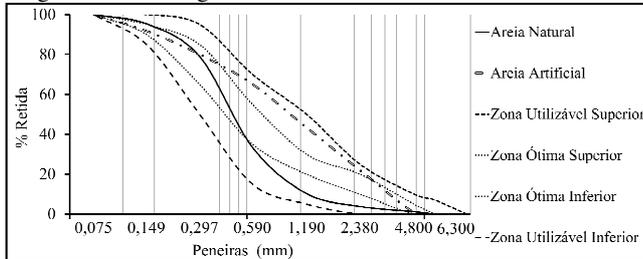


Tabela 1 – Caracterização dos agregados miúdos (NM 248:2003)

Peneira – Abertura (mm)	Total acumulado (%)	
	Natural	Artificial
4,8	1,24	0,79
2,4	3,86	22,06
1,2	10,33	43,46
0,6	33,50	65,19
0,3	79,02	80,14
0,15	95,37	91,9
Fundo	100	100
Diâmetro máximo	2,4 mm	4,8 mm
Módulo de finura	2,23	3,04
γ_{real} (NM 52/2009)	2,62 kg/dm ³	2,66 kg/dm ³
$\gamma_{unitária}$ (NM 45/2006)	1,40 kg/dm ³	1,57 kg/dm ³
Material pulverulento (NM 46/2001)	0,92%	0,84%

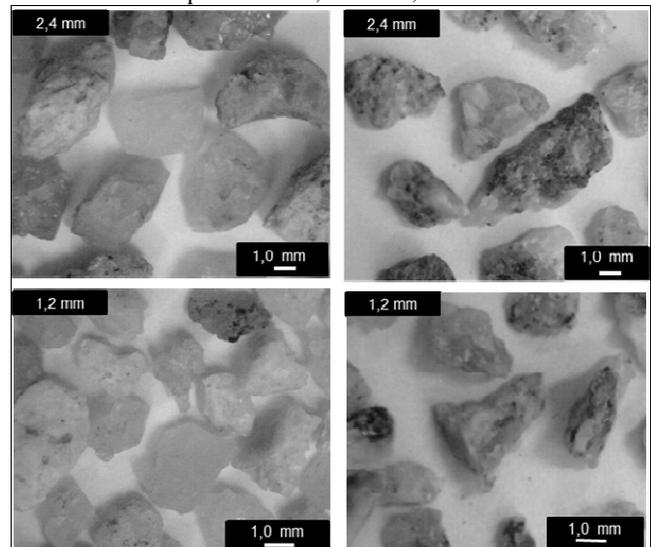
Tabela 2 – Caracterização do agregado graúdo utilizado

Composição Granulométrica (NM 248/2003)	
Peneira – Abertura (mm)	Total acumulado (%)
12,5	0
9,5	6,5
6,3	46,2
4,8	78,2
2,4	98,6
1,2	99,2
0,6	99,3
0,3	99,3
0,15	99,3
Fundo	100
Diâmetro máximo	12,5 mm
Módulo de finura	5,80
Massa específica real (NM 52/2009)	2,68 kg/dm ³
Massa aparente unitária (NM 45/2006)	1,46 kg/dm ³

Percebe-se que o agregado natural (AN) se encontra na zona ótima, com diâmetro máximo de 2,4 mm. Nos ensaios de Difração de Raios X e Eflorescência de Raios X foi observada a presença de quartzo (SiO₂; trigonal) de forma abundante, ortoclásio (Na_{0,8}Ca_{0,2}Al_{1,2}Si_{2,8}O₈; triclinico) com percentual médio-baixo, albita (NaAlSi₃O₈; triclinico) com índice baixo, caulinita (Al₂Si₂O₅(OH)₄; monoclinico) com teor baixo, ferro hornblenda (Ca₂Fe²⁺₄Al_{0,75}Fe³⁺_{0,25}(Si₇AlO₂₂)(OH)₂; monoclinico) baixo, goethita (FeO(OH), ortorrômbico) baixo traço.

O agregado artificial (AA) se apresentou na zona utilizável superior, com diâmetro máximo de 4,8 mm e com a composição mineral: Oligoclásio (feldspato: Na_{0,8}Ca_{0,2}Al_{1,2}Si_{2,8}O₈; triclinico) de forma abundante, quartzo (SiO₂; trigonal) com percentual médio, Ferrohornblenda (anfíbólio: Ca₂Fe²⁺₄Al_{0,75}Fe³⁺_{0,25}(Si₇AlO₂₂)(OH)₂; monoclinico) com percentual médio-baixo, biotita (mica: K(Mg,Fe²⁺)₃AlSi₃O₁₀(OH)_{1,75}F_{0,25}; monoclinico) com percentual médio baixo; chamosita (clorita: Fe²⁺₃Mg_{1,5}AlFe³⁺_{0,5}Si₃AlO₁₀(OH)₈; monoclinico) com teor baixo.

Figura 2 – Imagem dos grãos dos agregados miúdos: natural (esquerda) e artificial (direita) para os percentuais retidos nas peneiras de 2,4 mm e 1,2 mm



2.2 Programa experimental

A proposta deste trabalho foi analisar comparativamente os valores dos módulos de elasticidade de dois concretos produzidos, em diferentes idades (7, 14 e 28 dias) e para os diferentes agregados miúdos (natural e artificial). Assim sendo, foi realizado o programa experimental a fim de se obter as características e propriedades desses agregados e concretos, visando avaliar sua influência sobre os módulos de elasticidade.

A caracterização dos concretos consistiu na realização de ensaios de compressão axial (ABNT NBR 5739:2007), tração por compressão diametral (ABNT NBR 7222:2011), porosidade (ABNT NBR 9778:2009), absorção por imersão (ABNT NBR 9778:2009) e por capilaridade (ABNT NBR 9779:2012) e obtenção de imagens de macroestrutura (imagens de poros e da interface pasta/agregado) obtidas por lupa estereoscópica. Foram moldados 5 corpos de prova (CP) para cada propriedade e idade analisada. A moldagem e cura dos CP seguiu a ABNT NBR 5738:2003.

A avaliação experimental do módulo de elasticidade foi feita por meio da confecção da curva tensão por deformação, ensaio de velocidade de pulso ultrassônico e ensaio de frequência ressonante forçada. Foram avaliadas ainda equações propostas pelas normas (ABNT NBR 6118:2014; ABNT NBR 8522:2008, ASTM C469:2014 e ACI C318:2014; CEB-FIP MC2010:2013; ABNT NBR 8802:2013; ASTM C215:2008), que permitem estimar o módulo em função da resistência à compressão.

Foram produzidos dois concretos diferentes, segundo método de dosagem IPT/USP, sendo um com o agregado miúdo natural (AN) e outro com o agregado artificial de britagem (AA), conforme traços que constam na Tabela 3. Obtiveram-se resultados de *Slump Test* semelhantes em ambos (90±10 mm).

Tabela 3 – Traços

Cimento (kg)	AA (kg)	AN (kg)	Brita (kg)	Água (kg)
1,000	1,830	0,000	2,300	0,549
1,000	0,000	1,830	2,300	0,549

Percebe-se que, apesar das granulometrias diferentes, a forma e as microfissuras geradas no processo de britagem resultaram em concretos de mesma consistência.

Os resultados são apresentados como média ± desvio padrão. Foram realizados ainda teste *t* e ANOVA para comparação dos dados, sendo considerados significantes resultados nos quais $p < 0,05$.

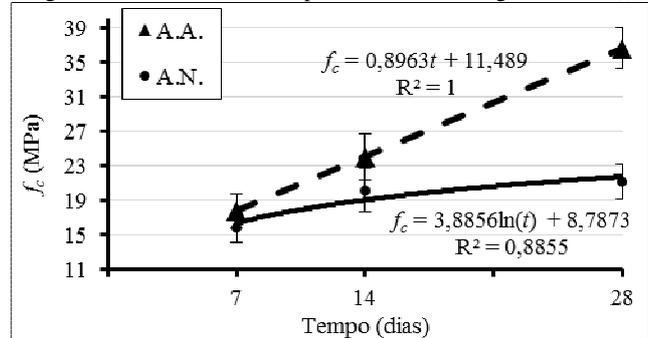
3 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados são apresentados como média ± desvio padrão. Foram realizados, ainda, os testes *t* e ANOVA para comparação dos dados e considerados significantes os resultados em que $p < 0,05$.

3.1 Resistência à compressão axial

Na Figura 3 são apresentados os resultados de f_c (ABNT NBR 5739:2007) que foi realizado para cada traço e idade.

Figura 3 – Resistência à compressão axial ao longo da idade (*t*)



Uma primeira análise dos agregados miúdos (AN e AA), conforme Figuras 1 e 2 e Tabela 1, permite verificar que o agregado natural é mais fino (módulo de finura de 2,4), está na zona ótima e tem grãos mais arredondados, o que tende a convergir para um melhor empacotamento de partículas. Assim, a expectativa era de que o concreto com AN tivesse maiores valores de resistência mecânica e módulo de elasticidade (PENG; HU; DING, 2009; FORMAGINI, 2005; MENG *et al.*, 2012 e GOMES, 2009).

Tem-se, ainda, que a resistência mecânica da areia natural (quartzo, 252 MPa) é maior do que a da areia artificial (gnaisse, 147 MPa) (NEVILLE e BROOKS, 2013). Isto poderia influenciar os valores de resistência e do módulo, que seriam maiores para o concreto com agregado de maior resistência (SAHMARAN *et al.*, 2009).

Conforme apresentado na Figura 3, o concreto feito com areia artificial teve um crescimento expressivamente superior (teste *t*) de f_c em relação àquele em que se utilizou areia natural chegando, aos 28 dias, a um valor aproximadamente 70% superior. Constatou-se que a resistência à compressão do concreto é influenciada pelo agregado sendo que, para idades mais avançadas, f_c passa a ter influência mais significativa do aglomerante hidratado aderido ao agregado (METHA; MONTEIRO, 2014). Isto leva a concluir que o conjunto areia artificial e cimento proporcionou melhor travamento mecânico devido ao melhor empacotamento dos grãos de AA.

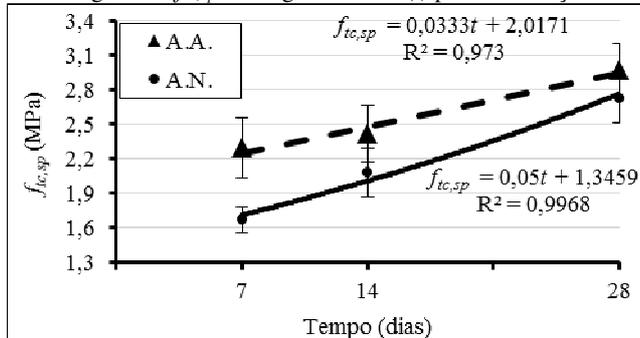
Contraopondo aos trabalhos de Peng, Hu e Ding (2009), Formagini (2005), Meng *et al.* (2012) e Gomes (2009) percebe-se que a associação de angulosidade, distribuição granulométrica e maior aspereza da superfície dos agregados de AA maximizaram f_c devido a melhoria do empacotamento de partículas e a melhor fixação, ancoragem do cimento já hidratado, solidarizando as partículas do agregado.

Com o objetivo de avaliar a significância das correlações realizou-se o teste ANOVA e constatou-se que as correlações são significantes, logo, existe uma variação considerável da resistência à compressão em relação ao tempo de cura.

3.2 Resistência à tração por compressão diametral

Na Figura 4 são apresentados os resultados de $f_{ct,sp}$ (ABNT NBR 7222:2011) que foi realizado para cada traço e idade.

Figura 4 – $f_{ct,sp}$ ao longo da idade (t) para cada traço

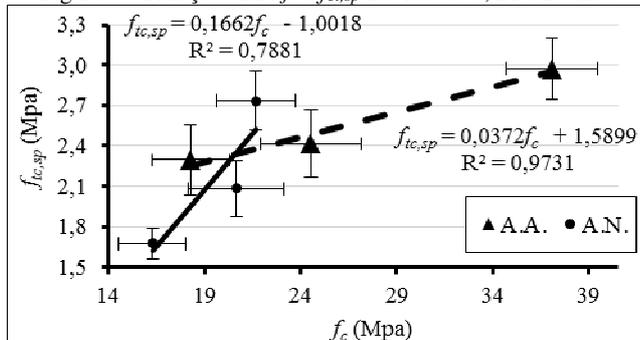


A $f_{ct,sp}$ (Figura 4) apresenta valores um pouco maiores para os traços com areia artificial, o que comprova que o uso de AA melhorou a interação pasta/agregado, sobretudo nas primeiras idades (35,29%). Acredita-se que a angulosidade, a rugosidade superficial (vide Figura 2) e a quantidade de finos do AA convergiram para um melhor empacotamento e maior atrito entre os grãos, o que aumentou $f_{ct,sp}$ nas primeiras idades. Contudo, aos 28 dias os valores encontrados são similares (teste t).

Na busca em identificar a correlação entre tração e compressão foi confeccionada a Figura 5. Percebe-se que a curva com areia artificial apresentou $f_{ct,sp}$ igual a 16,62% de f_c , o que corrobora com dados bibliográficos que relatam que esta relação se encontra entre 10% e 20% (ISAIA, 2011 e METHA; MONTEIRO, 2014). A areia natural, entretanto, apresentou valor de 3,72%, bastante inferior ao preconizado.

Como se percebe na Figura 5, a curva com areia artificial possui crescimento mais estável (linear, $R^2 = 0,97$) em relação a f_c . Já para a areia natural, esta relação não se apresentou tão linear ($R^2 = 0,79$), apesar de aumentar cerca de 64% aos 28 dias. Atribui-se esta variação às condições da areia natural, que não recebeu nenhum tratamento e se apresenta com muita variabilidade (presença de contaminantes e minerais de pouca resistência, caulinita e goethita), o que pode ter conduzido a estes resultados.

Figura 5 – Relação entre f_c e $f_{ct,sp}$ nas idades 7, 21 e 28 dias

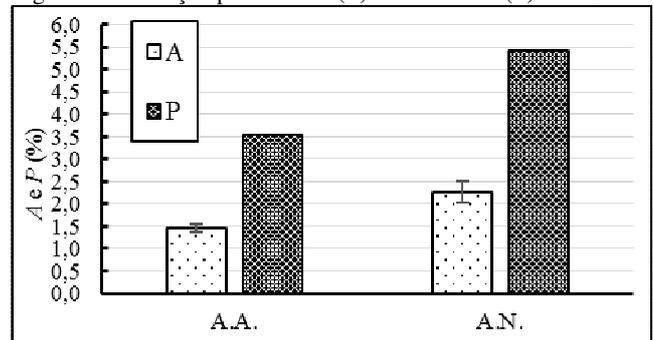


O teste ANOVA permitiu constatar que existe uma variação significativa da resistência à tração por compressão diametral em relação ao tempo de cura. Para a relação entre $f_{ct,sp}$ e f_c , somente a areia artificial apresentou significância, o que se justifica pela grande variabilidade dos valores encontrados com a areia natural.

3.3 Absorção de água por imersão e porosidade

O ensaio de absorção por imersão é utilizado para avaliar o grau de porosidade dos concretos, regido pela ABNT NBR 9778:2009. Na Figura 6 são apresentados os resultados. Constata-se que a areia natural gerou um traço com maior volume de vazios, uma vez que sua absorção por imersão (55,48%) e sua porosidade (53,26%) são maiores.

Figura 6 – Absorção por imersão (A) e Porosidade (P) aos 28 dias



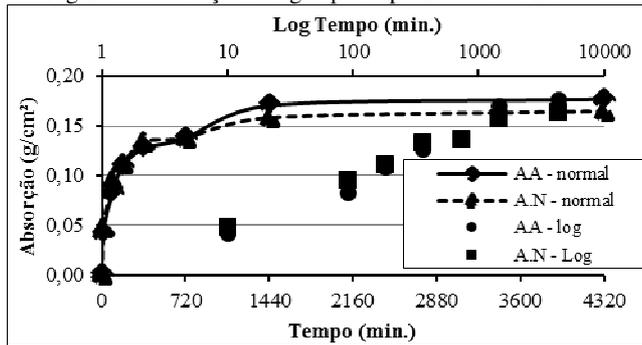
Embora a curva de distribuição granulométrica da areia natural seja um pouco melhor distribuída (zona ótima) que a da areia artificial (zona utilizável superior), isto não refletiu nos valores de A e P, que foram inferiores para AA devido melhor empacotamento de partículas gerado pela granulometria associada a forma dos grãos, conforme constatado por Haddad (2015).

O Teste t permitiu verificar que os valores são estatisticamente diferentes. Percebe-se que o tipo de agregado influenciou significativamente esta propriedade, sendo o efeito mais positivo para a areia artificial, com valor reduzido, gerando um concreto mais durável. Isto corrobora com os dados encontrados para f_c e $f_{ct,sp}$ uma vez que estruturas mais compactas (menos poros e menos absorventes) convergem para resistência mecânica maior (SENGUL, 2002 e SAHMARAN *et al.*, 2009).

3.4 Absorção de água por capilaridade

Na Figura 7 é mostrado o crescimento e estabilização da capilaridade para ambos os traços (ABNT NBR 9779:2012). Foram avaliadas os tempos de 0, 10 e 90 min, 3, 6, 12, 24 e 72 h.

Figura 7 – Absorção de água por capilaridade aos 28 dias.



Percebe-se (Figura 7) que os valores de absorção por capilaridade estão bastante próximos (iguais pelo Teste *t*), o que se deve ao fato de que apesar das duas areias estarem contidas em faixas granulométricas diferentes (Figuras 1 e 2 e Tabela 1), outras propriedades como forma das partículas, angulosidade, fissuras internas (obtidas pelo processo de britagem) convergiram para valores similares nesta propriedade (HADDAD, 2015). Aliado a isto, identifica-se que a relação aglomerante/agregado se manteve constante, o que permitiu o envolvimento dos grãos. Como a cura foi controlada, não houve saída brusca da água de amassamento, o que impediu o surgimento de poros com continuidade.

Relacionando a capilaridade com a absorção por imersão pode-se concluir que a areia artificial possui um número menor de poros, pois sua absorção por imersão é menor, porém, esses poros estão mais interligados do que no traço com areia natural, já que sua capilaridade é levemente superior. A partir do logaritmo do tempo observou-se que os valores encontrados se linearizaram e permitiram obter as expressões de aproximação das mesmas, conforme Equações 8 (AA) e 9 (AN).

$$A = 0,0514 \cdot \text{Log}(t) + 0,0061 \quad (8)$$

$$A = 0,0475 \cdot \text{Log}(t) + 0,0027 \quad (9)$$

3.5 Imagens da lupa estereoscópica

Efetuuou-se a análise da macroestrutura por lupa estereoscópica dos concretos produzidos de modo a identificar e avaliar os poros, a estrutura da matriz e distribuição dos agregados (vide Figuras 8 e 9).

Analisando as Figuras 8 e 9 com as imagens por lupa estereoscópica dos traços de concreto com areia natural (AN) e com areia artificial (AA) constata-se a comprovação dos dados obtidos anteriormente a respeito da porosidade (maior para AN), das absorções (maior para AN) e das f_c e $f_{ct,sp}$ (menores para AN). Outro fato a se destacar é que não foi visualizada a interligação dos poros, gerando menos capilares (Figura 7) para passagem da água, convergindo para valores baixos desta propriedade, conforme visto na Seção 3.4.

Figura 8 – Imagem do concreto com areia artificial aos 28 dias

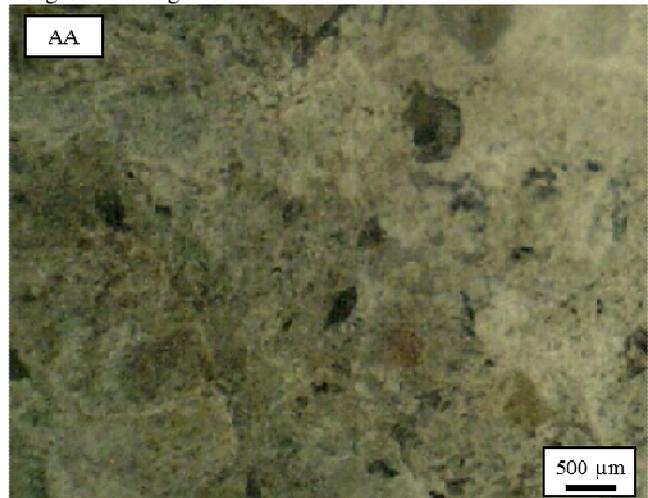
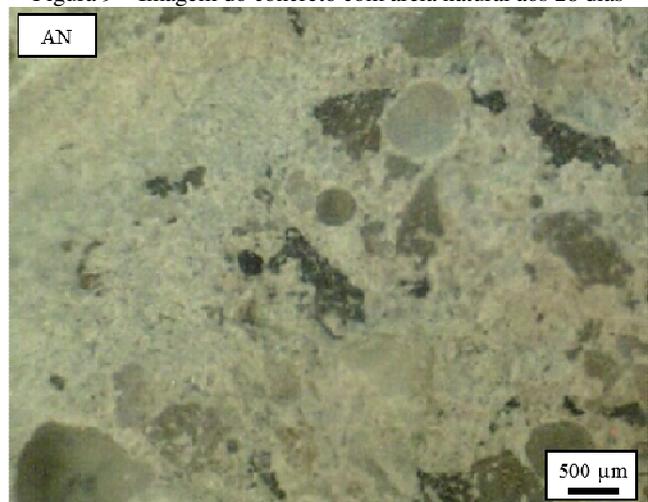


Figura 9 – Imagem do concreto com areia natural aos 28 dias



Quando designadas, segundo a classificação dos tamanhos da IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*), tem-se pelas imagens a visualização de poros classificados como megaporos ($> 7,5 \mu\text{m}$).

Nestas imagens foi utilizada a seção interna rompida dos corpos de prova do ensaio de tração por compressão diametral, de forma irregular (sem lixamento; polimento ou planificação).

É possível identificar boa interação entre a matriz cimentícia e os agregados, tanto miúdo quanto graúdo, demonstrando que a dosagem e a mistura foram adequadas.

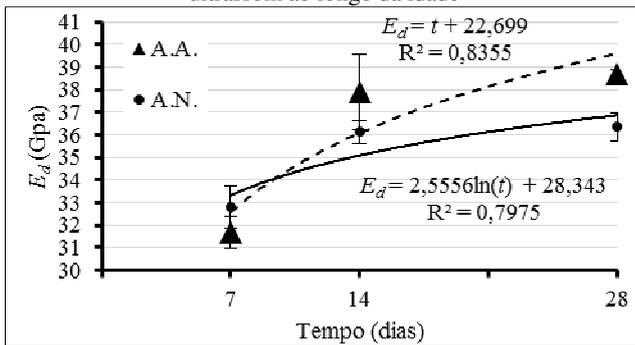
3.6 Módulo de elasticidade dinâmico

Os resultados E_d são apresentados e, posteriormente, comparadas às metodologias utilizadas para sua obtenção.

3.6.1 E_d pelo ultrassom

O módulo de elasticidade dinâmico (E_d) é calculado com base na velocidade das ondas ultrassônicas a partir da Equação 6 (ABNT NBR 8802:2013). Os resultados são apresentados na Figura 10 para cada idade.

Figura 10 – Valores do Módulo de Elasticidade Dinâmico pelo ultrassom ao longo da idade

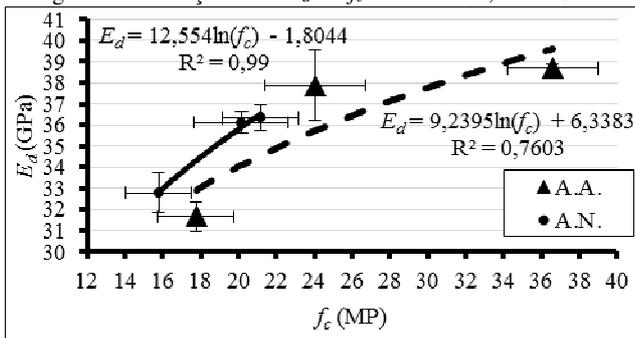


Ao comparar o E_d obtido para os dois traços (Figura 10) com os valores de porosidade (Figura 7) pode-se concluir que há concordância entre esses dados, uma vez que uma maior porosidade determina maior número de vazios no concreto, o que reduz a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas. O módulo de elasticidade é inversamente proporcional a estes vazios (SENGUL, 2002 e SAHMARAN *et al.*, 2009), logo mais vazios (poros) correspondem a menores valores E_d .

O teste ANOVA constatou que as correlações são significantes, logo, existe uma variação considerável de E_d em relação ao tempo de cura. Pelo Teste t , somente para idades mais avançadas se identificou uma diferença significativa entre os traços, demonstrando que o efeito da matriz cimentícia associado ao melhor empacotamento das partículas se manifestou de forma evidente somente para maiores idades (FORMAGINI, 2005 e MENG *et al.*, 2012).

São várias as correlações para obtenção do módulo de elasticidade em função de f_c . Diante disto efetuaram-se as correlações da Figura 11 para a areia natural e artificial.

Figura 11 – Relação entre E_d e a f_c nas idades 7, 21 e 28 dias



Percebe-se, pelas Figuras 10 e 11, que o traço com areia artificial tem um crescimento bastante acentuado ao longo das primeiras idades, tanto de sua resistência quanto de seu E_d ao se comparar com AN que crescem de forma mais lenta que os de resistência. No caso da areia artificial, tem-se um aumento de f_c de mais de 100% (entre 7 e 28 dias), enquanto que o módulo aumenta em apenas 22% no mesmo intervalo de tempo. Para o traço com areia natural, tem-se aumentos de f_c de 34% e de 10% para E_d . Tal ocorrido reforça a afirmação de Neville e Brooks (2013) de

que se deve atentar para o fato da resistência crescer de forma superior ao módulo de elasticidade.

O teste ANOVA constatou que as correlações são significantes, logo, existe uma variação considerável de E_d e f_c e esta variação é diferente entre os traços, demonstrando que o agregado mais anguloso influencia E_d de forma mais significativa.

3.6.2 E_d por ressonância forçada

O equipamento de ressonância forçada fornece a frequência em hertz e, a partir da Equação 7 (ASTM C 215:2008), pode-se calcular o valor do módulo de elasticidade dinâmico (Figura 12). Foram obtidos os seguintes valores para E_d por ressonância forçada para os concretos com AA e com AN, respectivamente: 36,9±0,7 GPa e 33,2±0,5 GPa aos 28 dias.

Figura 12 – Equipamento utilizado para determinar a frequência ressonante – Erudite MKII



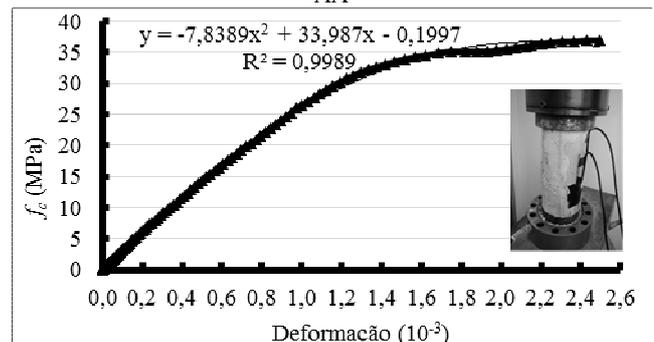
Constata-se, por mais este método de determinação do módulo de elasticidade dinâmico, que os valores encontrados para a areia artificial são superiores aos da areia natural, o que leva a concluir que seu módulo individual é superior ao da areia natural, conforme foi visto também para o ensaio por ultrassom.

3.6.3 E_d pela curva tensão deformação

Associado a isto tem-se o ensaio de estruturação da curva tensão por deformação, obtida juntamente com o ensaio de compressão axial na idade de 28 dias.

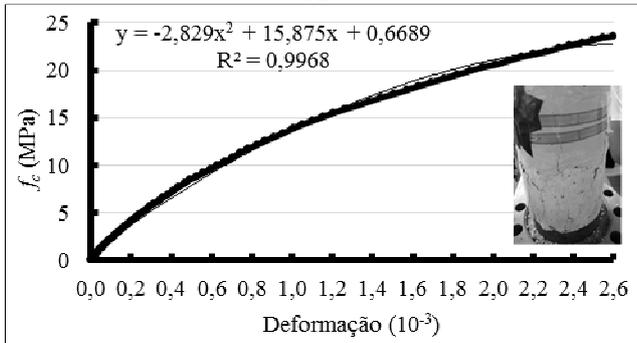
Utilizou-se célula de carga e dois extensômetros elétricos (vertical e horizontal, conforme Figuras 13 e 14) para traçar uma curva tensão por deformação, permitindo estabelecer os módulos de elasticidade estático (E_{ci}) e dinâmico (E_d).

Figura 13 – Curva tensão por deformação para o concreto com AA



O (E_{ci}) pode ser obtido pela declividade de uma reta traçada da origem até um ponto da curva, que corresponde à tensão de 40% da carga de ruptura (ISAIA, 2011). Já E_d foi obtido pela tangente inicial (adotou-se os dois primeiros pontos da curva). Destaca-se que os corpos de prova foram instrumentados e ensaiados por compressão axial (ABNT NBR 5739:2007).

Figura 14 – Curva tensão por deformação para o concreto com AN



Pelas curvas (Figuras 13 e 14) tensão por deformação foram obtidos os valores de E_d de $34,0 \pm 0,3$ GPa e $25,4 \pm 0,4$ GPa para os traços com areia artificial e natural, respectivamente.

3.6.4 Comparação entre as formas de obtenção do módulo de elasticidade dinâmico

Para comparar as metodologias, foram confeccionadas a Figura 15 e a Tabela 4, com as três metodologias trabalhadas neste artigo.

Figura 15 – Comparação entre os métodos de definição E_d

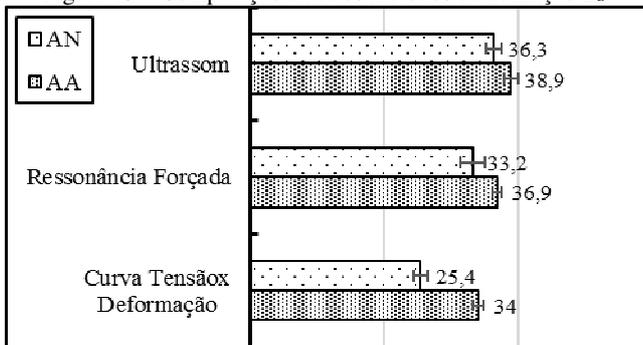


Tabela 4 – Diferenças entre os traços para E_d aos 28 dias

Diferença entre os ensaios (%)	AA	AN	t
Curva por Ressonância	8,53	30,71	*
Curva por Ultrassom	14,41	42,91	*
Ressonância por Ultrassom	5,42	9,34	*

*Os valores são diferentes.

Embora uma análise visual sinalize relativa proximidade entre os valores obtidos pelo método do ultrassom e da frequência ressonante forçada, testes estatísticos (teste t) comprovaram que os mesmos são significativamente diferentes, assim como em relação aos valores obtidos pela curva tensão por deformação.

De forma geral pode-se admitir que entre os métodos não destrutivos a diferença entre os resultados não ultrapassa 10% em média, contudo chega a 42,91% a diferença destes em relação à curva tensão por deformação e o método de velocidade do pulso ultrassônico para areia natural.

Identifica-se, assim, que a areia natural apresentou maior divergência que a areia artificial, o que se justifica pela sua maior heterogeneidade de forma, textura e composição mineralógica, reduzindo a capacidade de aderência/ancoragem entre a pasta e o agregado, e o empacotamento das partículas.

Pode-se admitir que os três ensaios foram consonantes, principalmente para areia artificial, logo seu uso para aferição das propriedades dos compósitos cimentícios se mostra eficiente. Ressalta-se que se faz necessário uma maior observação aos parâmetro da areia natural que apresentou valores bem inferiores na curva tensão por deformação em relação ao métodos do ultrassom e ressonância forçada.

3.7 Módulo de elasticidade estático

Calculou-se o valor do módulo de elasticidade estático (ABNT NBR 8522:2008) pela curva tensão por deformação (Figuras 13 e 14), obtendo-se os seguintes valores: $27,80 \pm 0,3$ GPa para a AA e $17,81 \pm 0,2$ GPa para a AN.

Diante disto, pode-se comparar os valores obtidos a partir do ensaio com os obtidos mediante fórmula prescrita pela norma ABNT NBR 6118:2014, descrita na Equação 1, e por normas internacionais (CEB-MC 2010:2013 e ASTM C469:2014) dadas pelas equações de 2 a 5. Na Figura 16 e Tabela 5 são mostrados valores, diferenças percentuais e Testes t encontrados para E_c .

Figura 16 – Comparação entre os métodos de estimativa e definição do módulo de elasticidade estático para concreto aos 28 dias

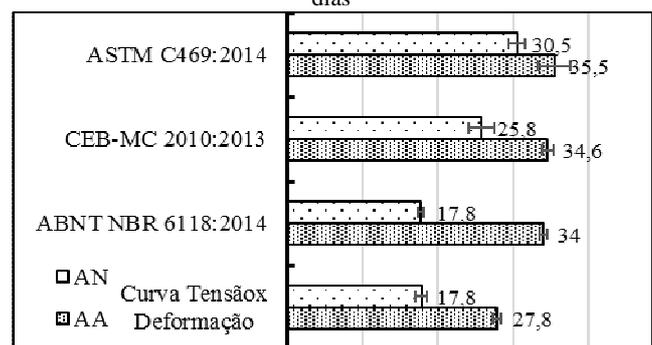


Tabela 5 – Diferenças entre os traços para E_c aos 28 dias

Diferença entre os ensaios (%)	AA	AN	t
Curva por ABNT NBR 6118:2014	22,30	-0,11	*
Curva por FIB/CEB-MC 2010:2013	24,46	44,94	*
Curva por ASTM C469:2014	27,70	71,35	*
NBR 6118:2014 por FIB/CEB-MC 2010:2013	1,76	45,11	*
NBR 6118:2014 por ASTM C469:2014	4,41	71,54	*
ASTM C469:2014 por FIB/CEB-MC 2010:2013	2,60	18,22	*

*Os valores são diferentes.

Comparando-se as normas (Figura 16 e Tabela 5), conclui-se que a ABNT NBR 6118:2014 apresentou a melhor estimativa das três (apresenta os menores valores em relação às demais normas (CEB-MC 2010:2013 e ASTM C469:2014)), estimando um valor praticamente igual (diferença de 0,11%) ao encontrado pela curva tensão por deformação para areia natural, quando se utiliza o coeficiente de ajuste (α_1) em função do agregado. Destaca-se que o arenito quartzoso precisa reduzir o valor do módulo de elasticidade estático a 70%.

Quando se avalia a areia artificial se constata que o valor da ABNT NBR 6118:2014 é bem superior em relação à curva tensão por deformação (42,70%). Logo, pode-se admitir que o valor do coeficiente está bem ajustado para areia natural, contudo ainda precisa ser melhor aferido para areia artificial.

Pode-se constatar, ainda, pela Figura 16 e Tabela 5, que para a areia artificial E_c tem uma variação pequena (4,41%) em relação às normas analisadas. Já para a areia natural constatou-se uma variação maior, de 71,54% para ABNT NBR 6118:2014 por ASTM C469:2014 e de 18,22% para ASTM C469:2014 por FIB/CEB-MC 2010:2013, levando a concluir que o módulo de elasticidade estático é influenciado pelo tipo de agregado.

Constata-se, ainda, que a areia natural se mostrou mais variável em relação aos parâmetros normativos (CEB-MC 2010:2013 e ASTM C469:2014) e a curva tensão por deformação, justificado pela falta de um coeficiente de correção em função do tipo de agregado nas normas internacionais. Já a areia artificial teve menor variação (27,70%) destas correlações, demonstrando que os procedimentos previstos na normalização internacional são mais adequados a agregados artificiais provindos do gnaíse e precisam ser melhor ajustados para considerar outros tipos de agregado.

Buscou-se correlacionar os módulos de elasticidade (E_d e E_c) de modo a obter a relação entre os mesmos (vide Tabela 6 com as diferenças percentuais detectadas).

Tabela 6 – Diferenças entre E_d e E_c para cada método aos 28 dias

Diferença entre os ensaios (%)	AA	AN	t
E_d Curva por E_c Curva	22,30	42,70	*
E_d Curva por E_c NBR 6118:2014	0,00	42,86	**
E_d Curva por E_c CEB-MC 2010:2013	-1,73	-1,55	**
E_d Curva por E_c ASTM C469:2014	-4,23	-16,72	*
E_d Res. por E_c Curva	32,73	86,52	*
E_d Res. por E_c NBR 6118:2014	8,53	86,73	*
E_d Res.a por E_c CEB-MC 2010:2013	6,65	28,68	*
Res.a por E_c ASTM C469:2014	3,94	8,85	*
E_d Ultrassom por E_c Curva	32,73	86,52	*
E_d Ultrassom por E_c NBR 6118:2014	8,53	86,73	*
E_d Ultrassom por E_c CEB-MC 2010:2013	6,65	28,68	*
Ultrassom por E_c ASTM C469:2014	3,94	8,85	*

*Os valores são diferentes.

**Hipótese nula não pode ser rejeitada, logo, os valores são iguais;

Os valores de E_d se apresentaram em praticamente todos os casos (excessão de CEB-MC 2010:2013 e ASTM C469:2014) superiores aos encontrados experimentalmente (curva tensão por deformação) para o módulo de elasticidade estático, o que corrobora com a bibliografia

(ISAIA, 2011 e METHA; MONTEIRO, 2014), de que E_d é de 20% a 40% superior a E_c . Destaca-se que a variação da relação E_d/E_c foi de -4,23% (E_d Curva por E_c ASTM C469:2014) até 32,73% (E_d Ultrassom por E_c Curva) para areia natural e de -16,72% (E_d Curva por E_c ASTM C469:2014) até 86,52% (E_d Ultrassom por E_c Curva) para areia artificial, demonstrando a grande incerteza da inferência de E_c para areia artificial de britagem segundo as normas CEB-MC 2010:2013 e ASTM C469:2014.

Os valores negativos da Tabela 6 permitem concluir que os resultados de E_d (Curva) foram menores que os valores de E_c estimados pelas CEB-MC 2010:2013 e ASTM C469:2014, o que vai de encontro ao descrito na bibliografia (ISAIA, 2011 e METHA e MONTEIRO, 2014) e mostra o quanto estas normas maximizam os valores de E_c . Tem-se assim estimativas de estruturas mais rígidas do que o real, podendo causar deformações maiores do que as previstas em projeto.

Quando se analisam os ensaios de inferência de E_d (ressonância e ultrassom) em relação ao ensaio de obtenção de E_c (curva tensão por deformação), percebe-se uma variação entre 22,30% (E_d Curva) e 32,73% (ressonância e ultrassom) para areia natural e de 42,70% (E_d Curva) e 86,52% (ressonância e ultrassom) para areia artificial. Os limites apresentados por Isaia (2011) e Metha e Monteiro (2014) são menos abrangentes (20% até 40%) sobretudo para atender areia artificial.

Pode-se constatar que as fórmulas estabelecidas pelas normas nacionais (ABNT NBR 6118:2014 e ABNT NBR 8522:2008) estão coerentes com os valores encontrados experimentalmente neste trabalho para areia natural, contudo as normas internacionais (ASTM C469:2014 e CEB-FIP MC 2010:2013) precisam ser ajustadas. Diante disto, propõe-se a adoção de fatores de correção em função do tipo de agregado (α_1), conforme indicado na Tabela 7, para cada normalização.

Tabela 7 – Proposta de α_1 para ajuste de E_d e E_c aos 28 dias

Diferença entre os ensaios (%)	α_1	
	AN	AA
E_c NBR 6118:2014	0,70	0,82
E_c FIB/CEB-MC 2010:2013	0,69	0,80
E_c ASTM C469:2014	0,58	0,78
E_d Ressonância – ASTM C 215:2008	0,77	0,92
E_d Ultrassom – ABNT NBR 8802:2013	0,70	0,87

Destaca-se que o valor α_1 para E_c NBR 6118:2014 é o já estabelecido pela norma, contudo, o valor para o agregado de gnaíse britado deve ser 0,82 e não 1,0 como preconizado. Nas demais normas é indicada a adoção dos fatores de correção da Tabela 7.

CONCLUSÕES

Os ensaios de caracterização permitiram verificar a influência das características dos agregados sobre o módulo de elasticidade, uma vez que a areia natural gerou um concreto com módulo menor que a artificial. Pôde-se relacionar ainda a influência destes sobre a porosidade e absorção nos concretos gerados.

As correlações propostas se apresentam adequadas, visto que possuem R^2 próximo de 1. Portanto, são equações que permitem estimar os valores de algumas propriedades em função de resultados de outras com boa precisão.

Depois da realização dos ensaios e comparações pôde-se observar que os diferentes métodos de obtenção do módulo de elasticidade estático estão numa faixa diferente dos valores encontrados experimentalmente (curva tensão por deformação). Identificou-se que um dos principais problemas desta diferença está na não consideração do tipo de agregado que se utiliza pelas normas internacionais (ASTM C469:2014 e CEB-FIP MC 2010:2013) e adequado ajuste na norma nacional (ABNT NBR 6118:2014). Além disto, os ensaios de obtenção do módulo de elasticidade dinâmico não levam em consideração este mesmo parâmetro o que convergiu para valores maximizados de E_d .

Para sanar esta questão foram propostos valores para α_1 que correspondem ao índice de correção do módulo de elasticidade em função da natureza do agregado. Espera-se, com isto, padronizar estes ensaios e estimativas para que reflitam valores semelhantes aos reais dos módulos de elasticidade.

Comprovou-se, também, que o uso da areia artificial como agregado miúdo eleva o valor da resistência mecânica, melhora as condições de durabilidade (redução de porosidade e absorção de água) e aumenta os módulos de elasticidade estático e dinâmico do concreto. Sendo assim, conclui-se que o agregado miúdo influencia significativamente as características do concreto, principalmente os valores dos módulos de elasticidade (E_d e E_c) devendo, portanto, ser considerado nos processos de simulação, estimativa e cálculo dos ensaios/processos indiretos.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi possível graças ao apoio das agências: CNPq, FAPEMIG, UFMG, UFV, e Laboratórios de Concreto e de Estruturas da UFMG.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, S. M. **Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto de cimento Portland através de ensaios de compressão simples e de frequência ressonante**. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia da UFMG, 213 f., 2012.

ALVES, R. J.; MAGALHAES, M. D. C.; CARRASCO, E. V. M. Determination of the transverse Young's modulus (TYM) of wood by means of an input power technique. **Construction and Building Materials**, v. 42, p. 11-21, 2013.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.061>.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318R**: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. Detroit, 2014, 520 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 46**. Agregados: Determinação do

material fino que passa através da peneira 75 μ m, por lavagem. Rio de Janeiro, 2001.

_____. Norma Mercosul. **NBR NM 248**. Agregados: Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 5738**. Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.

_____. Norma Mercosul. **NBR NM 45**: Agregados: Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

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

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

_____. **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.

_____. Norma Mercosul. **NBR NM 52**: Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio de frasco Chapman. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 9778**. Argamassa e concreto endurecidos: Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 7222**. Concreto: Concreto e argamassa: Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 9779**. Argamassa e concreto endurecidos: Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

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

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

ASTM. Standart Test. **Method for fundamental transverse, longitudinal, and torsional resonant frequencies of concrete specimens**. C 215, 2008.

ASTM C469/C469M-14: Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014

BRITISH STANDARD – **BS EN 12504-4**. Testing concrete. Determination of ultrasonic pulse velocity. 2004.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **FIB Model code for concrete structures 2010**. Hardcover, 2013.

FORMAGINI, S. **Dosagem científica e caracterização mecânica de concreto de altíssimo desempenho**. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Engenharia – COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro: 2005, 285 p.

GOMES, P. C. C.; BARROS, A. R. **Métodos de dosagem em concreto autoadensável**. 1. ed. São Paulo: Editora Pini Ltda., 2009, 1 v., 164 p.

HADDAD, L. D. O. **Estudo da influência da forma e granulometria dos agregados nas propriedades das**

- argamassas de revestimento.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Minas Gerais: 2015, 113 p.
- ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e tecnologia.** 1. ed., São Paulo, SP, Ed. IBRACON, 2011.
- MALHOTRA, V. M.; SIVASUNDARAM, V. **Ultrasonic methods.** In: Malhotra, V.M.; Carino, N.J. (eds). CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, 1 ed., chapter 5, Boston, USA, CRC Press, 2004a.
- MALHOTRA, V. M.; SIVASUNDARAM, V. **Resonance frequency methods.** In: Malhotra, V. M.; Carino, N. J. (ed.). CRC Handbook on nondestructive testing of concrete, 1 ed., chapter 6, Boston, USA, CRC Press, 2004b.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais.** 2 ed. São Paulo. Ed. Nicole Pagan Hasparyk, 2014.
- MENG, L.; LU, P.; LI, S.; ZHAO, J.; LI, T. **Shape and size effects on the packing density of binary spherocylinders.** Powder Technology, v. 228, p. 284-294, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2012.05.033>.
- NEVILLE, A. M; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto.** Editora Bookman: São Paulo, 2 ed., 2013, 472 p.
- PENG, Y.; HU, S.; DING, Q. **Dense packing properties of mineral admixtures in cementitious material.** Particuology Science and Technology of Particles, n. 7, p. 399-402, 2009.
- SAHMARAN, M.; LACHEMI, M.; HOSSAIN, K. M. A.; RANADE, R.; LI, V. C. Influence of aggregates type and size on ductility and mechanical properties of engineered cementitious composites. **ACI Materials Journal**, Mai.-Jun., p. 308-316, 2009.
- SENGUL, Ö.; TASDEMIR, C.; TASDEMIR, M. A. Influence of aggregate type on mechanical behavior of normal- and high-strength concrete. **ACI Materials Journal**, Nov.-Dez., p. 528-533, 2002.
- SILVA, N. G. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária.** 2006. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.
- TORGALKAR, A. M. A resonance frequency technique to determine elastic modulus of hydroxyapatite. **Journal of Biomedical Materials Research**, v. 13, p. 907-920, 2004. <http://dx.doi.org/10.1002/jbm.820130609>.
- ZHANG, S.; XUE, X.; LIU, X.; DUAN, P.; YANG, H.; JIANG, T.; WANG, D.; LIU, R. **Current situation and comprehensive utilization of iron ore tailing resources.** Journal of Mining Science, v. 42, n. 4, p. 403-408, 2006. <http://dx.doi.org/10.1007/s10913-006-0069-9>.