



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**RECIELI KNONER SANTOS GORSKI**

**CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO PRODUZIDO COM  
DIFERENTES TIPOS E DIMENSÕES DE AGREGADOS GRAÚDOS**

CAMPINAS

2018

**RECIELI KNONER SANTOS GORSKI**

**CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO PRODUZIDO COM  
DIFERENTES TIPOS E DIMENSÕES DE AGREGADOS GRAÚDOS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestra em Engenharia Agrícola, na Área Construções Rurais e Ambiente.

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Cinthya Bertoldo Pedroso

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELA ALUNA RECIELI KNONER SANTOS GORSKI, E ORIENTADA PELA PROF<sup>a</sup>. DR<sup>a</sup>. CINTHYA BERTOLDO PEDROSO.

CAMPINAS

2018

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

G687c Gorski, Reieli Knoner Santos, 1992-  
Caracterização do concreto produzido com diferentes tipos e dimensões de agregados graúdos / Reieli Knoner Santos Gorski. – Campinas, SP : [s.n.], 2018.

Orientador: Cinthya Bertoldo Pedroso.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Ultrassom. 2. Anisotropia. 3. Agregados (Materiais de construção). 4. Módulo de elasticidade. 5. Caracterização de materiais. I. Pedroso, Cinthya Bertoldo, 1982-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Characterization of the concrete produced with different types and dimensions of coarse aggregates

**Palavras-chave em inglês:**

Ultrasound

Anisotropy

Aggregates (Building Materials)

Modules of elasticity

Material characterization

**Área de concentração:** Construções Rurais e Ambiente

**Titulação:** Mestra em Engenharia Agrícola

**Banca examinadora:**

Cinthya Bertoldo Pedroso [Orientador]

Julio Soriano

Vladimir Guilherme Haach

**Data de defesa:** 29-05-2018

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da **Dissertação de Mestrado** defendida por **Recieli Knoner Santos Gorski**, aprovada pela Comissão Julgadora em 29 de Maio de 2018, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

# FEAGRI

---

**Profa. Dra. Cinthya Bertoldo Pedroso – Presidente e Orientadora**  
**FEAGRI/UNICAMP**

---

**Prof. Dr. Julio Soriano – Membro Titular**  
**FEAGRI/UNICAMP**

---

**Prof. Dr. Vladimir Guilherme Haach – Membro Titular**  
**USP/São Carlos**

**Faculdade de**  
**Engenharia Agrícola**  
**Unicamp**

**A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica da discente.**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela vida, cuidado e dedicação para comigo a cada momento provando que está no controle de todas as coisas.

Aos meus pais, Reginaldo e Elione, e minha irmã Tatieli, pelo incentivo que me deram para superar todos os obstáculos e poder realizar mais esta etapa em minha vida.

A minha orientadora, Professora Dra. Cinthya Pedroso, pela confiança, paciência, dedicação, e disposição em orientar essa dissertação.

Aos professores da Faculdade de Engenharia Agrícola, pelos ensinamentos.

Aos funcionários e colegas da FEAGRI, em especial os colegas do LabEND, por toda ajuda prestada durante esse período, saibam que deixaram lembranças e ensinamentos maravilhosos.

As empresas Cinexpan e Bautech por doar material utilizado nessa pesquisa.

Agradeço ao FAEPEX, por financiar minha Bolsa de Estudos de Mestrado, e a Fapesp, pelo auxílio financeiro através de projeto do grupo de pesquisa.

E por fim ao meu esposo Rodrigo pelo carinho, amor, por estar sempre ao meu lado me aconselhando, colaborando com tudo que precisei.

## RESUMO

O concreto para fins estruturais é assumido como isotrópico, sendo considerado com isotropia transversal ou ortotrópico apenas após sofrer um dano, porém a adoção desse comportamento pode não ser adequada, em função, por exemplo, da direção de compactação. No concreto, o agregado graúdo representa grande parte do seu volume total, sendo assim, é esperado que a granulometria e a densidade do agregado exerçam influências nas propriedades mecânicas finais do material, porém, a literatura ainda não apresenta resultado conclusivo a respeito desse assunto e são escassos estudos dessa natureza com uso de técnicas de propagação de ondas. Tendo em vista os aspectos mencionados, a pesquisa teve como objetivo testar a hipótese de comportamento isotrópico do concreto e avaliar a influência da dimensão e da natureza do agregado graúdo nas constantes elásticas e nos coeficientes de Poisson obtidos por meio de ensaios destrutivos e não destrutivos. Para os ensaios foram moldados corpos de prova de concreto utilizando-se traços com diferentes resistências características ( $f_{ck}$ ), com agregados graúdos convencionais e agregado leve (argila expandida). As propriedades elásticas do concreto foram obtidas através de ensaios de ultrassom em corpos de prova cilíndricos e poliédricos de 26 faces, e através de ensaios de compressão estática instrumentada em corpos de prova cilíndricos. Com os resultados da pesquisa foi possível confirmar a hipótese do comportamento isotrópico do concreto, assim como verificar que a dimensão e a natureza do agregado graúdo influenciam os parâmetros do concreto obtidos por ultrassom (velocidades longitudinais e transversais e, módulos de elasticidade longitudinais e transversais). Já as propriedades elásticas do concreto obtidas por ensaio estático, não apresentaram diferença estatisticamente significativa em função do tipo ou da dimensão do agregado graúdo. O coeficiente de Poisson não foi influenciado pelo tipo ou pela granulometria do agregado graúdo, tanto na caracterização por ultrassom como na caracterização por ensaio estático.

**Palavras-chave:** Ultrassom; Compressão estática; Anisotropia; Parâmetros elásticos.

## **ABSTRACT**

The concrete for structural purposes is considered an isotropic material, being considered with transverse isotropic or orthotropic only after damage, however the adoption of this behavior may not be adequate, in function, for example, the direction of compaction. For concrete, the coarse aggregate represents a large part of its total volume, so it's expected that the granulometry of the aggregate and density of the aggregate, has influence on the final mechanical properties of materials, however, the literature still not presents conclusive results regarding this subject, and are scarce the studies of this nature with the use of waves propagation technique, in view of the aspects mentioned. The aim of this research was to test the hypothesis of the isotropic behavior of the concrete and evaluate the influence of the size and the nature of the coarse aggregate in the elastic constants and in the Poisson' ratio obtained by destructive tests and non-destructive tests. For the experiments were molded concrete specimens using mixtures with different characteristic strengths ( $f_{ck}$ ), with conventional aggregates and lightweight aggregate (expanded clay). The elastic properties of the concrete were obtained through ultrasound tests in cylindrical specimens and a 26-face polyhedron, and through the instrumented static compression test in cylindrical specimens. With the results of the research it was possible to confirm the hypothesis of the isotropic behavior of the concrete, as well verify that the dimension and nature of the coarse aggregate influence the concrete parameters obtained by ultrasound test (longitudinal and transverse velocities and, longitudinal and transverse moduli of elasticity). The elastic properties of the concrete obtained through static test, don't present a statically significant difference concerning in the type and dimension of the coarse aggregate. The Poisson's ratio was not influenced by the type or by the granulometry of the coarse aggregate, both in ultrasound characterization as in the static test characterization.

**Keywords:** Ultrasound; Static compression; Anisotropy; Elastic parameters.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	9
2	ARTIGOS	11
2.1	Artigo 1: EVALUATION OF THE ELASTIC ANISOTROPY OF CONCRETE USING ULTRASOUND WAVE PROPAGATION	11
2.2	Artigo 2: INFLUÊNCIA DO AGREGADO GRAÚDO NA CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO POR ULTRASSOM	41
3.	DISCUSSÃO GERAL	66
3	CONCLUSÃO GERAL	68
4	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69



## 1 INTRODUÇÃO GERAL

Com o desenvolvimento de programas computacionais de cálculos estruturais, dia a dia mais precisos e com maior quantidade de recursos técnicos, torna-se cada vez mais comum e acessível o uso de modelagem estrutural, o que amplia a possibilidade de se elaborar projetos racionais, com utilização mais adequada do material, contribuindo para a economia e para o ambiente. No entanto, para que seja possível utilizar de forma correta, e obter resultados de acordo com a precisão desses programas, é necessário determinar as constantes elásticas do material de forma compatível com as características reais.

A dificuldade para obtenção dos parâmetros elásticos de um material (módulos de elasticidade longitudinais nas diferentes direções, módulos de elasticidade transversais nos diferentes planos e coeficientes de Poisson) depende da complexidade do mesmo em termos de anisotropia elástica. O material anisotrópico é aquele no qual as propriedades elásticas variam em diferentes direções, tal como ocorre em materiais com estrutura interna definida, como no caso da madeira (considerada ortotrópica). O material considerado mais simples é o que exhibe comportamento isotrópico, com resposta igual das propriedades para todas as direções. Quando o material responde de forma distinta para duas das três direções diz-se que possui isotropia transversal.

A determinação das propriedades elásticas realizada por métodos estáticos, como por exemplo o ensaio de compressão, é viável, mas trabalhoso e complexo em termos da necessidade de equipamentos e onerosos, pois é necessário o uso de grande quantidade de extensômetros, sendo estes descartados uma vez que o ensaio foi realizado.

A utilização de métodos de propagação de ondas na determinação de propriedades elásticas de materiais (matriz de rigidez) se fundamenta na teoria da elasticidade associada à teoria de propagação de ondas. A aplicação de tais métodos já é consolidada na área de metais e vem avançando de forma significativa na caracterização de outros materiais, como a madeira, o concreto, as rochas e os materiais compósitos. A adesão de diversos setores à utilização destes métodos é função dos fundamentos teóricos, que lhe conferem confiabilidade, bem como do fato de se constituir em técnica não destrutiva, que permite viabilizar ensaios *in-situ*, repetições de ensaios em uma mesma peça ou estrutura, acompanhamento de deterioração em estruturas etc.

O concreto é um material que apresenta estrutura interna complexa é o segundo produto mais consumido no mundo. Para sua fabricação, os agregados são os componentes que ocupam a maior porção volumétrica, sendo responsável por cerca de 70% do seu volume

total. O agregado graúdo, por sua vez, ocupa cerca de 30 a 40% do volume total do concreto. Sendo assim, a natureza, a granulometria do agregado e sua resistência, exercem grande influência nas propriedades do concreto, afetando diretamente nos parâmetros elásticos.

O concreto, para fins estruturais, é assumido como sendo isotrópico, sendo considerado com isotropia transversal ou ortotrópico apenas após sofrer um dano. Porém, a adoção do comportamento isotrópico pode não ser adequada, em função, por exemplo, da compactação.

Tendo em vista o que foi apresentado, a presente pesquisa teve como objetivo testar a hipótese de comportamento isotrópico do concreto e avaliar a influência da dimensão e da densidade do agregado graúdo nas constantes elásticas e nos coeficientes de Poisson do concreto obtidos por meio de ensaios destrutivos e não destrutivos.

O objetivo geral da pesquisa foi atingido por meio de dois objetivos específicos, foco de dois artigos que compõem a dissertação, a qual foi redigida em formato alternativo, previsto pela Instituição. De acordo com esse formato, a dissertação está dividida em três partes principais, a Introdução Geral, que antecede os artigos submetidos ou em fase de submissão à publicação, seguida da Discussão e das Conclusões Gerais, que buscam estabelecer vínculo dos artigos com o objetivo principal da pesquisa.

O primeiro artigo buscou avaliar o comportamento elástico do concreto, visando testar a hipótese de comportamento isotrópico do material, utilizando a propagação de ondas de ultrassom para simular três condições teóricas de comportamento elástico: isotropia, isotropia transversal e ortotropia. O delineamento experimental desse artigo consistiu na utilização de 18 poliedros de 26 faces de concreto produzidos com três diferentes resistências características e duas dimensões de agregados graúdos. Os poliedros foram ensaiados por equipamento de ultrassom e transdutores longitudinais e de cisalhamento de 1,0 MHz de frequência, assim foi possível obter as propriedades elásticas do concreto, sendo os resultados analisados assumindo diferentes condições de anisotropia para o material.

O segundo artigo visou avaliar a influência da granulometria e da natureza do agregado graúdo nos parâmetros elásticos do concreto obtidos por ultrassom e por ensaio estático. Para o delineamento experimental foram moldados 81 corpos de prova produzidos com concretos de duas granulometrias de agregado graúdo convencional (brita 0 e brita 1) e também com a utilização de agregado leve (argila expandida). Os corpos de prova cilíndricos de concreto foram caracterizados por ensaio destrutivo (compressão estática instrumentada) e não destrutivo (ultrassom).

## **2 ARTIGOS**

### **2.1 Artigo 1: EVALUATION OF THE ELASTIC ANISOTROPY OF CONCRETE USING ULTRASOUND WAVE PROPAGATION**

Artigo submetido a: Cement and Concrete Research

Data de submissão: 09 de maio de 2018.

Obs.: Formatação e idioma de acordo com normas do referido periódico.

## **EVALUATION OF THE ELASTIC ANISOTROPY OF CONCRETE USING ULTRASOUND WAVE PROPAGATION**

### **ABSTRACT**

The aim of this research was to test the hypothesis of the isotropic behavior of concrete by means of wave propagation tests. Concrete was analyzed using the theoretical aspects of three types of elastic behavior, isotropy, transverse isotropy and orthotropy, using concretes with different characteristic strengths and coarse aggregate size distributions. The isotropic behavior of the concrete was validated because regardless of the elastic behavior adopted in the analyses, there were no statistically significant differences in the elastic parameters on the three symmetry axes; the constitutive relation between the shear modulus and longitudinal modulus, which involves Poisson's ratio, was as expected for isotropic materials; and the elastic properties of the concrete differed equally as a function of the characteristic strength.

**Keywords:** Elastic moduli (C), mechanical properties (C), characterization (B).

## 1. INTRODUCTION

Concrete is a widely disseminated material and one of the most consumed materials in the world due to several factors, including its flexibility in structural design and its structural performance in different environments [1]. As a result, numerous studies have focused on this material to better understand its microstructural complexity and to test new compositions. However, concrete is generally assumed to display isotropic behavior, usually without much questioning, even though its heterogeneity and specific aspects of its molding have been recognized.

Elastic anisotropy defines a material based on its response to stresses in different directions. An anisotropic material is one in which the elastic properties vary in different directions, and anisotropy occurs in materials with a defined internal structure, such as wood (which is considered orthotropic). Thus, for wood, the values of the moduli of elasticity in the x, y, and z directions are different. A simpler material is one that exhibits isotropic behavior, with equal responses of the properties in all directions. When a material responds differently in two of the three directions, it is said to have transverse isotropy.

For structural purposes, concrete is assumed to be isotropic, and it is considered to have transverse or orthotropic isotropy only after suffering damage [2-5]. However, the assumption of isotropic behavior may not be appropriate due, for example, to compaction. The direction of compaction has a non-negligible effect on the expected isotropic behavior of concrete because the action of gravity favors compaction along one of the axes [6]. In addition, by

inserting concrete into a mold in the direction of compaction, the air bubbles that form may be prevented from rising to the surface and may become blocked and cause oriented defects under the aggregate layer, which may initiate microcracks in the same direction and thus modify the expected isotropic conditions [6]. This phenomenon gives rise to the so-called initial anisotropy of concrete, which leads to differences in the properties in the direction of compaction and in the directions perpendicular to compaction, both for the strength (compressive and tensile) [7] and the elastic properties [6]. Torrenti et al. [6] note that these differences tend to increase with an increase of the water-cement factor.

The difficulty in obtaining the elastic parameters of a material (longitudinal moduli of elasticity in different directions, transverse moduli of elasticity on different planes and Poisson's ratios) depends on the complexity of the material in terms of the elastic anisotropy. Twelve constants are required to describe the elastic behavior of an orthotropic material: three longitudinal modulus of elasticity ( $E_1, E_2, E_3$ ), three transverse modulus of elasticity ( $G_{12}, G_{13}, G_{23}$ ) and six Poisson's ratios ( $\mu_{12}, \mu_{21}, \mu_{23}, \mu_{32}, \mu_{13}, \mu_{31}$ ). In the case of materials with transverse isotropy with two planes with equal responses to the actions (e.g., planes 1 and 2), the rigidity matrix is simplified; it is composed of 7 elements ( $E_1, E_2=E_1, E_3, G_{12}, G_{13}, G_{23}=G_{13}, \mu_{12}, \mu_{21}=\mu_{12}, \mu_{23}, \mu_{32}, \mu_{13}=\mu_{23}, \mu_{31}=\mu_{32}$ ), 5 of which are independent. Finally, in the case of isotropic materials, the matrix has only 3 elements ( $E_1=E_2=E_3, G_{12}=G_{13}=G_{23}, \mu_{12}=\mu_{21}=\mu_{23}=\mu_{32}=\mu_{13}=\mu_{31}$ ), 2 of which are independent.

Determining these constants using static methods, such as compression testing, is feasible but cumbersome, complex in terms of the required equipment (testing machine and data

acquisition system) and costly because it is necessary to use many strain gauges, which are discarded after the test has been performed.

In describing the application of ultrasound tests to concrete, Bauer [8] shows that when a specimen is tested transversely to the concreting direction, the propagation velocity is on average slightly higher than that in the concreting direction, which indicates non-isotropic acoustic behavior. Ultrasound data provide important information about the mechanical and elastic properties of a material [9-17]. Wave propagation tests are usually used to determine the elasticity of a material [5, 18, 19], its microstructure (grain size, texture, and density) and discontinuities (porosity and damage) [16, 20, 21]. François et al. [22] carried out ultrasound studies on oak wood and concluded that the method was able to provide all of the elastic constants of the material with a single specimen; in addition, the method was easy to perform and reliable for the characterization of homogeneous materials. Other studies [23, 24] have successfully used the same specimen shape (polyhedral) for the complete characterization of wood by ultrasound.

The studies discussed above show that the behavior of concrete has been assumed to be isotropic, but no studies have empirically demonstrated this hypothesis. It is also clear that the ultrasound method has been adequate for obtaining the elastic parameters of complex materials in terms of anisotropy. The objective of this research was to test the hypothesis of the isotropic behavior of concrete using the propagation of ultrasound waves by simulating three theoretical conditions of elastic behavior: isotropy, transverse isotropy and orthotropy.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1 Dosing of concrete and preparation of test specimens

CPII-E-32 cement, medium size sand extracted from an excavation, and basalt rock, which was used as a coarse aggregate (gravel) with two granulometries, were used to produce the concrete. The aggregates were characterized according to Brazilian standards ABNT NBR 7211 [25] and ABNT NBR NM 52 [26] (Table 1).

Table 1. Properties of the small and coarse aggregates.

Aggregate	Maximum characteristic size (mm)	Fineness modulus	Classification	Density (kg.m <sup>-3</sup> )
Sand	4.75	2.8	Upper usable zone	2632
Gravel	9.5	6.55	Gravel 0 (G0)	2650
Gravel	12.5	7.23	Gravel 1 (G1)	2650

The method of the Brazilian Association of Portland Cement (ABCP), which is an adaptation of the American method proposed by the American Concrete Institute (ACI) for Brazilian aggregates, was used to define the mixtures. The bases for determination of the mixtures were 15, 25 and 35 MPa of the estimated characteristic strengths ( $f_{ckest}$ ) at 28 days, and they were calculated for concrete consistencies (slump tests) of 0.60 to 0.80 (Table 2). Two mixtures for each estimated characteristic strength were made, each with a different gravel size distribution (G0 or G1; Table 2).



Table 2. Estimated ( $f_{ckest}$ ) and effective ( $f_{ckef}$ ) characteristic strengths and mixtures used in the study (mass proportionality).

Mixture	Estimated characteristic strength ( $f_{ckest}$ )	Effective characteristic strength ( $f_{ckef}$ )	Cement CII-E-32	Small aggregate	Coarse aggregate	Water/cement ratio
I	15 MPa	18 MPa	1	2.45	2.32 (gravel 0)	0.60
II		21 MPa	1	2.27	3.12 (gravel 1)	0.60
III	25 MPa	28 MPa	1	1.77	1.84 (gravel 0)	0.47
IV		30 MPa	1	1.62	2.54 (gravel 1)	0.47
V	35 MPa	35 MPa	1	1.55	1.35 (gravel 0)	0.40
VI		34 MPa	1	1.23	2.14 (gravel 1)	0.40

To ensure the homogeneity of the mixture, all of the concrete used in this study was made in a cement mixer with an inclined axle with a capacity of 240 liters, and a vibration table was used for compaction until the concrete had a relatively smooth appearance. After 24 hours of molding, the specimens were removed from the molds, identified and stored in a tank with water according to ABNT NBR 5738 [27]. The specimens remained in the tank until they were 28 days old.

For each estimated characteristic strength (15 MPa, 25 MPa and 35 MPa) and type of coarse aggregate (gravel 0 and gravel 1), 9 cylindrical specimens 0.10 m in diameter and 0.20 m long [27] were prepared, for a total of 54 specimens. After 28 days of curing, 3 cylindrical specimens of each mixture (Table 2) were randomly separated. From the central part of each specimen, a 26-face polyhedron with approximately 60 mm between the faces was made (Figures 1a and b). The dimensions adopted for the specimen were defined to allow the transducer (1.0 MHz frequency) to be circumscribed to the faces of the polyhedron. The other

6 cylindrical specimens were used for the static compression test and to determine the effective characteristic resistance ( $f_{ck,ef}$ ; Table 2) according to ABNT NBR 5739 [28].

To make the polyhedron, direction 1 was identified as the direction of the largest length (direction of compaction) of the cylindrical specimen, and the other two directions (2 and 3) were randomly marked to form 3 perpendicular planes (Figure 1c).

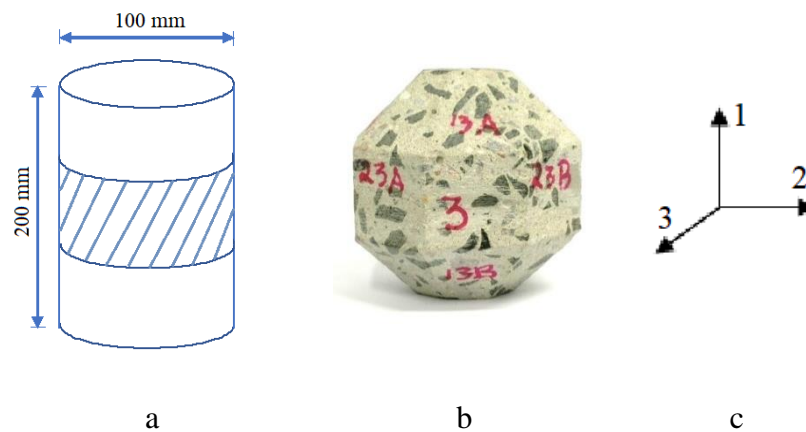


Figure 1. Region used to make the polyhedral test specimen in the cylinder (a), concrete polyhedron with 26 faces (b) and directions identified in the specimens (c).

The shape of the polyhedral specimen was adopted as a function of its use in the characterization of orthotropic materials, such as wood [23, 29-32], because it allows all of the terms of the stiffness matrix to be obtained with a single specimen.

## 2.2 Ultrasound testing

The ultrasound tests were performed with Epoch equipment (Epoch 1000, Olympus, USA) and compression (longitudinal) and shear (transverse) transducers with a frequency of 1.0 MHz (Figure 2). The coupling between the transducer and the concrete is important for the precision of the results [33], and the use of viscous material is suggested to eliminate the air between the transducers and the surface of the specimen. Thus, based on Gonçalves et al. [31], starch glucose was used as a coupling agent for the ultrasound tests, which gives good results for shear waves.



Figure 2. Ultrasound test on a polyhedral sample.

Based on ABNT NBR 8802 [33], Equation 1 was used to calculate the longitudinal velocities ( $V_{11}$ ,  $V_{22}$  and  $V_{33}$ ), in which the path length corresponds to the distance between the faces of the transducers, and the propagation times of the wave in directions 1, 2 and 3, respectively, are obtained using the longitudinal transducer.

$$V = \frac{L}{t} * 10^6 \quad \text{Equation 1}$$

where  $V$  is the wave propagation velocity in a particular direction ( $\text{m.s}^{-1}$ );  $L$  is the wave path length (m); and  $t$  is the wave propagation time in a given direction ( $\mu\text{s}$ ).

Considering the same directions but with the use of the shear transducer, the transverse velocities ( $V_{12}$ ,  $V_{13}$ ,  $V_{21}$ ,  $V_{31}$ ,  $V_{32}$  and  $V_{23}$ ) were calculated from the wave travel time ( $t_{12}$ ,  $t_{13}$ ,  $t_{21}$ ,  $t_{31}$ ,  $t_{32}$  and  $t_{23}$ ) in a given direction and its polarization in the other two perpendicular directions.

To determine the velocities corresponding to the propagation of the wave outside the symmetry axes, the wave propagation time was obtained using shear transducers on the faces oriented  $45^\circ$  to each plane.

First, the stiffness matrix  $[C]$  was determined assuming that the concrete is an orthotropic material; to do this, the nine independent stiffness coefficients were determined. The main diagonal coefficients ( $C_{11}$ ,  $C_{22}$ ,  $C_{33}$ ,  $C_{44}$ ,  $C_{55}$  and  $C_{66}$ ) were obtained using the Christoffel equation (Equation 2). For the calculation of the coefficients  $C_{44}$ ,  $C_{55}$  and  $C_{66}$ , the velocities were obtained from the shear transducer based on the times of wave propagation in the directions of the axes, the propagation of the wave in one direction, and its polarization along the two perpendicular axes. The numbering was related to the axes (propagation/polarization) as follows: 44 = planes 2 and 3; 55 = planes 1 and 3; and 66 = planes 1 and 2.

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix}$$

$$C_{ii} = \rho \cdot V_{ii}^2 \quad \text{Equation 2}$$

where:

$i = 1, 2, 3, 4, 5$  and  $6$

$\rho =$  density of the material ( $\text{kg.m}^{-3}$ )

$V =$  wave propagation velocity in the direction being considered ( $\text{m.s}^{-1}$ )

Equations 3, 4 and 5, which were deduced from the Christoffel tensor, were used to determine the 3 terms that were not on the diagonal ( $C_{12}$ ,  $C_{13}$  and  $C_{23}$ ).

$$(C_{12} + C_{66}) n_1 n_2 = [(C_{11} n_1^2 + C_{66} n_2^2 - \rho V_\alpha^2) (C_{66} n_1^2 + C_{22} n_2^2 - \rho V_\alpha^2)]^{1/2} \quad \text{Equation 3}$$

$$(C_{23} + C_{44}) n_2 n_3 = [(C_{22} n_2^2 + C_{44} n_3^2 - \rho V_\alpha^2) (C_{44} n_2^2 + C_{33} n_3^2 - \rho V_\alpha^2)]^{1/2} \quad \text{Equation 4}$$

$$(C_{13} + C_{55}) n_1 n_3 = [(C_{11} n_1^2 + C_{55} n_3^2 - \rho V_\alpha^2) (C_{55} n_1^2 + C_{33} n_3^2 - \rho V_\alpha^2)]^{1/2} \quad \text{Equation 5}$$

where:

$\alpha =$  angle ( $45^\circ$ )

$n_1 = \cos \alpha$ ;  $n_2 = \sin \alpha$ ; and  $n_3 = 0$  [ $\alpha$  is taken with respect to axis 1] (Plane 12)

$n_1 = \cos \alpha$ ;  $n_3 = \sin \alpha$ ; and  $n_2 = 0$  [ $\alpha$  is taken with respect to axis 1] (Plane 13)

$n_2 = \cos \alpha$ ;  $n_3 = \sin \alpha$ ; and  $n_1 = 0$  [ $\alpha$  is taken with respect to axis 2] (Plane 23)

By inverting the  $[C]^{-1}$  matrix, it was possible to obtain the flexibility matrix  $[S]$ , which is associated with the elastic parameters of the material (longitudinal modulus of elasticity ( $E$ ), transverse modulus of elasticity ( $G$ ) and Poisson's ratio ( $\nu$ )).

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix}$$

Assuming the material to have transverse isotropy, axis 1 (direction of compaction) was assumed to be different from axes 2 and 3, which were considered to have similar properties. The same velocity data used to determine the elastic properties assuming that the concrete is orthotropic were used to determine the 7 elastic properties of concrete assuming that it has transverse isotropy. However, the mean velocities were adopted for the calculations of the stiffness coefficients in the directions considered to be isotropic ( $C_{22}=C_{33}$ ,  $C_{55}=C_{66}$ ,  $C_{12}=C_{13}$ ).

When the concrete was evaluated assuming it was isotropic, the elastic properties along axes 1, 2 and 3 were considered to be equal. Thus, for the calculation of the stiffness coefficients ( $C_{11}=C_{22}=C_{33}$ ,  $C_{44}=C_{55}=C_{66}$  and  $C_{23}=C_{12}=C_{13}$ ), the mean velocities obtained along the three symmetry axes of the polyhedron (Figures 1b and 1c) with both the longitudinal transducer

and the shear transducer were used. The velocities obtained on the inclined planes were not used in this analysis.

### 2.3 Analysis of Results

First, when the concrete was characterized assuming it was an orthotropic material, twelve elastic parameters were determined, of which three were moduli of elasticity (directions 1, 2 and 3), three were shear moduli (related to planes 1-2, 1-3 and 2-3 and 3), and six were Poisson's ratios (planes 1-2, 2-1, 1-3, 3-1, 2-3 and 3-2). The values obtained for the moduli of elasticity on the different axes as well as the shear moduli and Poisson's ratios on the different planes were statistically evaluated by a comparison of the means (t test and multiple range tests) to verify the existence of differences between the values of the parameters obtained on the different axes and/or planes and the grouping of the statistically equivalent values at a 95% confidence level.

When the anisotropy analysis of the concrete was performed assuming it to have transverse isotropy, seven elastic properties were determined for the concrete (2 longitudinal moduli of elasticity (planes 1 and 2 = 3), 2 transverse moduli of elasticity (planes 2- 3 and 1-3 = 1-2), and 3 Poisson's ratios (planes 2-1 = 3-1, 1-2 = 1-3 and 3-2 = 2-3)). The values obtained for the moduli of elasticity on the two axis considered to be different as well as those obtained for the shear moduli on the two planes considered to be different were statistically evaluated using the confidence interval (CI) of the difference of the means. In this statistical test, if the

CI of the difference of the means is zero, there is no statistically significant difference between the parameters being compared at the 95% confidence level. In the case of the Poisson's ratios obtained by considering transverse isotropy, the t test and the multiple range test were used in a similar way to that for the theoretical considerations of orthotropy.

The t test and multiple range test were also used for the statistical analysis of the elastic properties of concretes with different characteristic strengths.

### **3. RESULTS AND DISCUSSIONS**

The characterization of the concrete considering it to be an orthotropic material (i.e., assuming it has distinct properties along the three symmetry axes) resulted in mean moduli of elasticity between 27,300 MPa and 44,400 MPa (Table 3), and the moduli varied as a function of the characteristic strength of the concrete and the size distribution used in the mixture. The same results occurred with the shear moduli, which varied from 12,700 MPa to 17,200 MPa (Table 3). Poisson's ratio ranged from 0.08 to 0.32, and the values were below 0.14 only for concrete with characteristic strengths of 18 and 21 MPa. For the other strengths, the mean Poisson's ratio was 0.27 (Table 3).

The Brazilian Standard for Concrete Structures Design (ABNT NBR 6118:2014) proposes a fixed value of 0.2 for Poisson's ratio of concrete. The data from this study showed that the



value for this parameter varies with the strength of the concrete, which can have important implications if it is necessary to use this elastic coefficient in computational simulations for structural analyses, in which precise values are crucial for obtaining accurate results. Wang et al. [35] determined the elastic properties of concrete with a characteristic strength of 22.6 MPa using dynamic tests and obtained mean values for the longitudinal and transverse moduli of elasticity of 29,000 MPa and 11,700 MPa, respectively. The mean dynamic Poisson's ratio coefficient was 0.18 [35].

The coefficients of variation of the mean moduli of elasticity, for each mixture, had values between 1% and 4%, whereas the coefficients of variation of the mean shear moduli were between 1% and 5% (Table 3). The coefficients of variation of the mean Poisson's ratio for each mixture had higher values from 4% to 20% (Table 3). Wang et al. [35] obtained values of 1.3% and 1.2% for the coefficients of variation of the mean moduli of elasticity and the mean shear moduli, respectively, from the dynamic characterization of concrete. The same authors, as well as this study, also obtained higher values for the coefficient of variation of the mean Poisson's ratio (5.1%) [35].

The low values for the coefficients of variation of the means of the elastic parameters (moduli of elasticity ( $E_1$ ,  $E_2$  and  $E_3$ ) and shear moduli ( $G_{23}$ ,  $G_{13}$  and  $G_{12}$ )) obtained in this study, which considered three axes of symmetry (orthotropic material), provide evidence for the isotropy of the concrete (Table 3).

The statistical analysis of the means of the moduli of elasticity and shear moduli did not indicate statistically significant differences at the 95% confidence level for the three directions evaluated (1, 2 and 3) (Table 3). Only the Poisson's ratios  $\nu_{32}$  and  $\nu_{23}$  of the concrete with a characteristic strength of 25 MPa produced with gravel 1 were significantly different from the Poisson's ratios on the other planes ( $\nu_{21}$ ,  $\nu_{31}$ ,  $\nu_{12}$  and  $\nu_{13}$ ; Table 3).

Table 3. Mean results of the elastic parameters and coefficients of variation (CV %) obtained for concretes with different strengths and types of gravel (gravel 0 (G0) and gravel 1 (G1)) for the characterization considering concrete as an orthotropic material.

Elastic parameters	18 MPa (G0)	21 MPa (G1)	28 MPa (G0)	30 MPa (G1)	35 MPa (G0)	34 MPa (G1)
$E_1$ (MPa)	28,258 (a) (3)	31,239 (b) (9)	39,270 (c) (8)	41,416 (d) (2)	38,859 (e) (1)	38,841 (f) (6)
$E_2$ (MPa)	27,745 (a) (2)	34,046 (b) (12)	37,646 (c) (2)	40,983 (d) (6)	39,275 (e) (1)	43,209 (f) (4)
$E_3$ (MPa)	27,086 (a) (7)	33,412 (b) (15)	37,250 (c) (5)	41,840 (d) (5)	3888(e) (2)	44,397 (f) (7)
<b>Mean (MPa)</b>	27,696 (3)	32,899 (1)	38,056 (4)	41,413 (2)	39,005 (1)	42,149 (1)
$G_{23}$ (MPa)	12,788 (g) (1)	14,928 (h) (8)	15,074 (i) (1)	15,379 (j) (5)	15,695 (k) (0)	17,140 (l) (4)
$G_{13}$ (MPa)	12,681 (g) (1)	14,992 (h) (9)	15,777 (i) (9)	16,225 (j) (8)	15,556 (k) (1)	16,968 (l) (5)
$G_{12}$ (MPa)	12,633 (g) (2)	14,496 (h) (4)	15,890 (i) (9)	17,216 (j) (6)	15,589 (k) (1)	17,028 (l) (5)
<b>Mean (MPa)</b>	12,701 (1)	14,805 (3)	15,581 (5)	16,273 (2)	15,613 (1)	17,045 (1)
$\nu_{21}$	0.13 (mn) (9)	0.08 (o) (61)	0.30 (pq) (14)	0.25 (r) (4)	0.26 (t) (6)	0.28 (u) (8)
$\nu_{31}$	0.12 (mn) (3)	0.14 (o) (27)	0.28 (pq) (3)	0.26 (r) (13)	0.24 (t) (6)	0.28 (u) (15)
$\nu_{12}$	0.13 (m) (8)	0.08 (o) (70)	0.32 (q) (24)	0.26 (r) (3)	0.26 (t) (6)	0.27 (u) (19)
$\nu_{32}$	0.11 (mn) (13)	0.11 (o) (62)	0.24 (p) (14)	0.32 (s) (9)	0.24 (t) (12)	0.26 (u) (10)
$\nu_{13}$	0.12 (mn) (1)	0.13 (o) (25)	0.29 (pq) (16)	0.26 (r) (7)	0.24 (t) (4)	0.26 (u) (5)
$\nu_{23}$	0.11 (m) (13)	0.11 (o) (53)	0.24 (pq) (12)	0.32 (s) (9)	0.25 (t) (14)	0.25 (u) (8)
<b>Mean</b>	0.12 (13)	0.11 (20)	0.28 (8)	0.28 (4)	0.25 (4)	0.27 (5)

Values in parentheses indicate coefficients of variation (%). Different letters indicate significantly different values.

$E_1$ ,  $E_2$  and  $E_3$  = moduli of elasticity of the concrete in the 1, 2 and 3 directions, respectively (Figure 1c);  $G_{23}$ ,  $G_{13}$  and  $G_{12}$  = shear moduli on planes 2-3, 1-3 and 1-2, respectively (Figure 1c);  $\nu_{21}$ ,  $\nu_{31}$ ,  $\nu_{12}$ ,  $\nu_{32}$ ,  $\nu_{13}$ ,  $\nu_{23}$  = Poisson's ratios on planes 2-1, 3-1, 1-2, 3-2, 1-3, and 2-3, respectively (Figure 1c).

The characterization performed by simplifying the anisotropy of the concrete and considering it a transverse isotropic material, where axis 1 (compaction direction) had different properties from axes 2 and 3 (which had similar properties), resulted in mean moduli of elasticity varying from 27,400 MPa to 43,800 MPa (Table 2), and the variation was a function of the characteristic strength of the concrete and the type of gravel used in the mixture. The shear moduli under these conditions varied from 12,700 MPa to 17,100 MPa (Table 2). The Poisson's ratios ranged from 0.09 to 0.32, and the values were below 0.11 (mean of 0.10) only for the concretes with characteristic strengths of 18 and 21 MPa. For the other strengths studied, the mean Poisson's ratio was 0.27 (Table 2).

Similar to the characterization that considered the concrete as an orthotropic material, the means of the elastic parameters (moduli of elasticity (E), shear moduli (G) and Poisson's ratios ( $\nu$ )) when considering the concrete to have transverse isotropy also had low coefficients of variation, which also indicates the isotropy of the concrete (Table 4).

The confidence intervals of the difference between the means of the moduli of elasticity and shear moduli, regardless of the strength or type of gravel used in the concrete, were zero, which indicates that there was no difference between the parameters in the two evaluated directions (1 and 2 = 3) at a confidence level of 95%. The results of the statistical analysis of the difference of the means of Poisson's ratios show that for all of the characteristic strengths and aggregate sizes (G0 and G1) used in the mixture, there were no significant differences between the parameters in the different planes evaluated (Table 4).

Table 4. Average results of the elastic parameters and coefficients of variation (CV) obtained for the concretes with different strengths and types of gravel (gravel 0 (G0) and gravel 1 (G1)) for the characterization considering the concrete as a transverse isotropic material.

Elastic parameters	18 MPa (G0)	21 MPa (G1)	28 MPa (G0)	30 MPa (G1)	35 MPa (G0)	34 MPa (G1)
$E_1'$ (MPa)	28,277 (3)	31,364 (6)	39,284 (8)	41,423 (2)	38,865 (0)	41,526 (12)
$E_2=E_3$ (MPa)	27,420 (4)	33,782 (0)	37,451 (3)	41,414 (6)	39,080 (1)	43,819 (5)
CI	-1447 +3161	-5419 +582	-3797 +7462	-3790 +3810	-782 +352	-10,972 +6387
<b>Mean (MPa)</b>	<b>27,849</b> (2)	<b>32,573</b> (5)	<b>38,368</b> (3)	<b>41,418</b> (0)	<b>38,972</b> (0)	<b>42,672</b> (4)
$G_{23}'$ (MPa)	12,788 (1)	14,928 (4)	15,074 (1)	15,379 (5)	15,695 (0)	17,140 (4)
$G_{12}=G_{13}$ (MPa)	12,657 (1)	14,738 (7)	15,834 (9)	16,716 (7)	15,572 (1)	16,998 (5)
CI	-135 +396	-1834 +2212	-3117 +1598	-3473 +799	-168 +412	-1590 +1874
<b>Mean (MPa)</b>	<b>12,722</b> (1)	<b>14,833</b> (1)	<b>15,454</b> (3)	<b>16,048</b> (6)	<b>15,634</b> (1)	<b>17,069</b> (1)
$\nu_{21}=\nu_{31}$	0.10 (a) (31)	0.11 (b) (5)	0.29 (c) (8)	0.26 (d) (8)	0.25 (f) (6)	0.28 (g) (5)
$\nu_{12}=\nu_{13}$	0.11 (a) (30)	0.10 (b) (11)	0.31 (c) (20)	0.26 (d) (2)	0.25 (f) (5)	0.26 (g) (10)
$\nu_{32}=\nu_{23}$	0.09 (a) (39)	0.11 (b) (81)	0.24 (c) (13)	0.32 (e) (9)	0.25 (f) (13)	0.26 (g) (9)
<b>Mean</b>	<b>0.10</b> (11)	<b>0.11</b> (4)	<b>0.28</b> (12)	<b>0.28</b> (13)	<b>0.25</b> (2)	<b>0.26</b> (4)

Values in parentheses indicate coefficients of variation (%). Different letters indicate significantly different values. CI = confidence interval of the difference of the means.

$E_1'$  and  $E_2=E_3$  = moduli of elasticity of the concrete in the 1 and 2 = 3 directions, respectively (Figure 1c);  $G_{23}'$  and  $G_{12}=G_{13}$  = shear moduli on planes 2-3 and 1-2 = 1-3, respectively (Figure 1c);  $\nu_{21}=\nu_{31}$ ,  $\nu_{12}=\nu_{13}$  and  $\nu_{32}=\nu_{23}$  = Poisson's ratios on planes 2-1 = 3-1, 1-2 = 1-3 and 3-2 = 2-3, respectively (Figure 1c).

Finally, the analysis of the elastic behavior of the concrete was performed considering it to be an isotropic material. For this analysis, the moduli of elasticity (E) varied from 27,800 MPa (strength of 18 MPa) to 42,400 MPa (strength of 34 MPa), and the shear moduli (G) ranged from 12,700 MPa (strength of 18 MPa) to 17,000 MPa (strength of 34 MPa) (Table 3 and Figure 7). Similar to when the concrete was analyzed as an orthotropic material or as having transverse isotropy, the Poisson's ratios were low (mean of 0.10) for strengths of 18 MPa and 21 MPa and ranged from 0.24 (strength of 34 MPa) to 0.28 (strength of 30 MPa) for the highest strengths (greater than 28 MPa) (Table 5 and Figure 8).

Table 5. Elastic parameters and coefficients of variation (CV) obtained for the concretes with different strengths and types of gravel (gravel 0 (G0) and gravel 1 (G1)) for the characterization considering the concrete as an isotropic material.

Elastic parameters	18 MPa (G0)	21 MPa (G1)	28 MPa (G0)	30 MPa (G1)	35 MPa (G0)	34 MPa (G1)
E (MPa)	27,762 (4)	32,782 (1)	39,394 (6)	41,565 (6)	39,091 (1)	42,365 (7)
G (MPa)	12,702 (1)	14,800 (6)	15,574 (7)	16,263 (6)	15,613 (1)	17,045 (5)
N	0.09 (43)	0.11 (30)	0.26 (2)	0.28 (1)	0.25 (1)	0.24 (22)

Values in parentheses indicate coefficients of variation (%).

E = moduli of elasticity of the concrete in the 1 = 2 = 3 directions (Figure 1c); G = shear moduli on planes 2-3 = 1-3 = 1-2 (Figure 1c);  $\nu$  = Poisson's ratios on planes 2-1 = 3-1 = 1-2 = 1-3 = 3-2 = 2-3 (Figure 1c).

A joint evaluation of the parameters obtained from the different anisotropy conditions (orthotropy, transverse isotropy and isotropy) shows that the variation of the parameters within each strength class and type of gravel (G0 or G1) was random with no trends that depended on the type of anisotropy assumed for the material (Figures 3, 4 and 5). The coefficients of variation of the moduli of elasticity obtained considering the different types of anisotropy ranged from 0.4% (strength of 35 MPa) to 4.7% (strength of 34 MPa), whereas those of the shear moduli varied from 0.4% (strength of 34 MPa and 35 MPa) to 4.5% (strength of 30 MPa) (Figures 3 and 4). The Poisson's ratios had higher coefficients of variation according to the type of anisotropy considered in the characterization of the concrete (CVs ranged from 3.1% to 19.2%), and the highest values were obtained for the concretes with lower strengths (18 MPa and 21 MPa) (Figure 5).

The mean standard deviation of the moduli of elasticity was lower when the characterization was performed considering the concrete as an orthotropic material (1515 MPa). The lowest mean standard deviation of the shear moduli was obtained when the material characterization

was performed considering the concrete to be a transverse isotropic material (621 MPa). The lowest mean standard deviation of Poisson's ratio was obtained by assuming the concrete to be a transverse isotropic or isotropic material. Thus, no theoretical assumption for the elastic behavior of the concrete (orthotropy, transverse isotropy or isotropy) produced more precise values of the elastic parameters when the concrete was characterized by ultrasound.

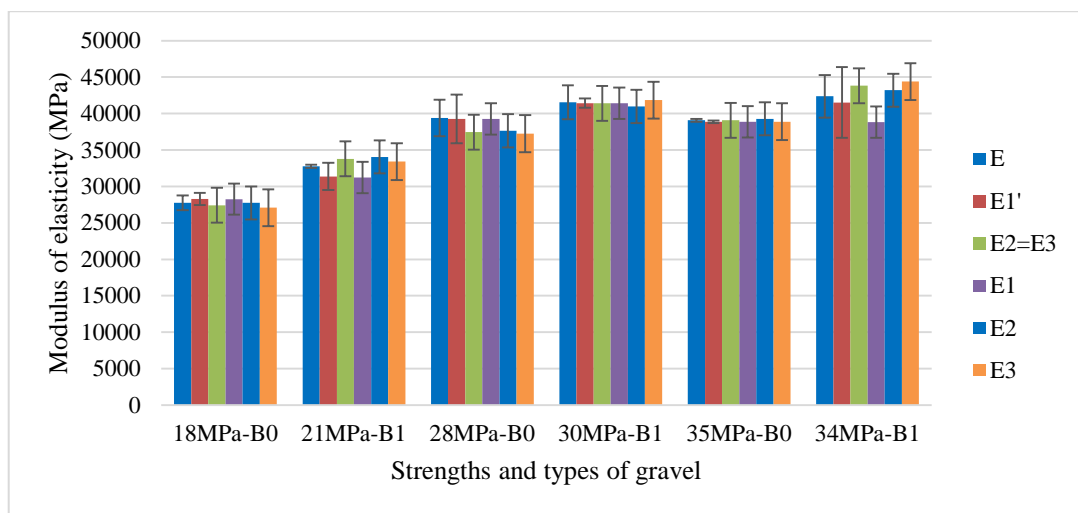


Figure 3. Mean moduli of elasticity and standard deviations obtained considering the concrete to have different anisotropy conditions. E is the modulus of elasticity obtained from the characterization considering the concrete as an isotropic material,  $E_1'$  and  $E_2=E_3$  are the moduli of elasticity obtained from the characterization considering the concrete as a material with transverse isotropy, and  $E_1$ ,  $E_2$  and  $E_3$  are the moduli of elasticity obtained from the characterization assuming the concrete as an orthotropic material.

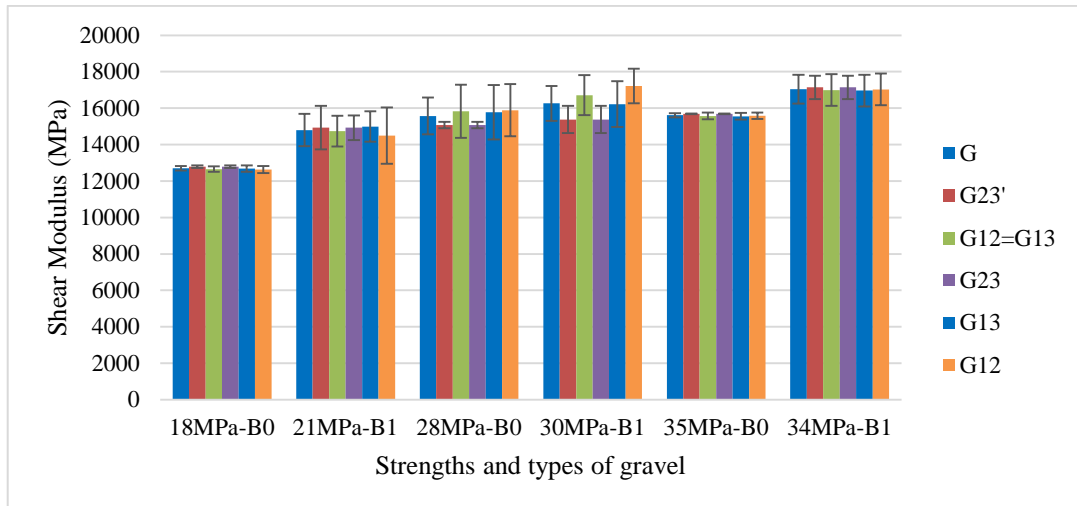


Figure 4. Mean shear moduli and standard deviations obtained considering the concrete to have different anisotropy conditions.  $G$  is the shear modulus obtained from the characterization considering the concrete as an isotropic material,  $G_{23}'$  and  $G_{12}=G_{13}$  are the shear moduli obtained from the characterization considering the concrete as a material with transverse isotropy, and  $G_{23}$ ,  $G_{13}$  and  $G_{12}$  are the shear moduli obtained from the characterization assuming the concrete as an orthotropic material.

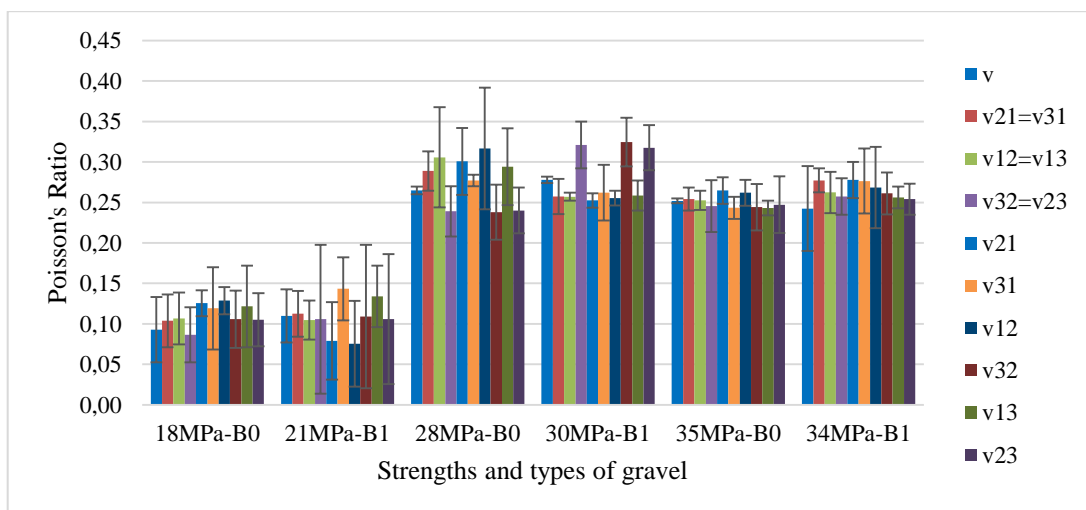


Figure 5. Mean Poisson's ratios and standard deviations obtained considering the concrete to have different anisotropy conditions.  $\nu$  is Poisson's ratio obtained by the characterization assuming the concrete as an isotropic material,  $\nu_{21}=\nu_{31}$ ,  $\nu_{12}=\nu_{13}$  and  $\nu_{32}=\nu_{23}$  are Poisson's ratios obtained from the characterization considering the concrete as a material with transverse isotropy, and  $\nu_{21}$ ,  $\nu_{31}$ ,  $\nu_{12}$ ,  $\nu_{32}$ ,  $\nu_{13}$  and  $\nu_{23}$  are Poisson's ratios obtained from the characterization assuming the concrete as an orthotropic material.

For isotropic materials, the constitutive relation between the moduli of elasticity (transverse (G) and longitudinal (E)) and Poisson's ratios ( $\nu$ ) given by  $G = E/2(1 + \nu)$  is used. The G/E ratios had values close to 0.4 for all of the theoretical elastic behaviors, and for most cases, the ratio was independent of the concrete strength or the dimensions of the coarse aggregate used in the mixture (Table 6). This result ( $G/E = 0.4$ ) is obtained using the expected constitutive relation for isotropic materials when Poisson's ratio is 0.20. Shi [36] and Wang et al. [35] also calculated a value of 0.4 for the ratio between the modulus of elasticity and the shear modulus of concrete.

Table 6. Relationship between the moduli of elasticity (longitudinal and transverse) and coefficients of variation (CV) considering the analyses of concrete with different types of anisotropy.

Anisotropy condition	Ratio between moduli	15 MPa (G0)	15 MPa (G1)	25 MPa (G0)	25 MPa (G1)	35 MPa (G0)	35 MPa (G1)	
Orthotropy	$G_{23}/E_1$	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	
	$G_{13}/E_1$	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	
	$G_{12}/E_1$	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	
	$G_{23}/E_2$	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	
	$G_{13}/E_2$	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	
	$G_{12}/E_2$	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	
	$G_{23}/E_3$	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	
	$G_{13}/E_3$	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	
	$G_{12}/E_3$	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	
		Mean	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
	CV (%)	2	6	3	5	1	6	
Transverse isotropy	$G_{23}'/E_1'$	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	
	$G_{12}=G_{13}/E_1'$	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	
	$G_{23}'/E_2=E_3$	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	
	$G_{12}=G_{13}/E_2=E_3$	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	
		Mean	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4
		CV (%)	2	4	4	5	1	3
Isotropy	G/E	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	

$E_1$ ,  $E_2$  and  $E_3$  = moduli of elasticity of the concrete in the 1, 2 and 3 directions, respectively (Figure 1c);  $G_{23}$ ,  $G_{13}$  and  $G_{12}$  = shear moduli on planes 2-3, 1-3 and 1-2, respectively (Figure 1c);  $E_1'$  and  $E_2=E_3$  = moduli of elasticity of the concrete in the 1 and 2 = 3 directions, respectively (Figure 1c);  $G_{23}'$  and  $G_{12}=G_{13}$  = shear moduli on planes 2-3 and 1-2 = 1-3, respectively (Figure 1c);  $E$  = moduli of elasticity of the concrete in the 1 = 2 = 3 directions (Figure 1c);  $G$  = shear moduli on planes 2-3 = 1-3 = 1-2 (Figure 1c);  $\nu$  = Poisson's ratios on planes 2-1 = 3-1 = 1-2 = 1-3 = 3-2 = 2-3 (Figure 1c).



The statistical differentiation between the elastic properties of concrete for different characteristic strengths and types of gravel used in its production was the same regardless of the theoretical elastic behavior assumed for the concrete (Table 7). In general, the statistical analysis divided the moduli of elasticity into three groups, one for the characteristic strength of 18 MPa, another for the characteristic strength of 21 MPa and a third for the other characteristic strengths (28 MPa, 30 MPa, 35 MPa and 34 MPa). Thus, regardless of the type of elastic behavior assumed, the longitudinal modulus of elasticity does not have a statistically significant growth at characteristic strengths above approximately 28 MPa (Table 7). The comparison of the means of the shear moduli differentiated two main groups, one for the strength of 18 MPa and another for the other strengths, regardless of the type of elastic behavior assumed (Table 7). A comparison of the means of Poisson's ratios also identified two main groups, one for characteristic strengths of 18 MPa and 21 MPa and another for the other characteristic strengths, regardless of the type of elastic behavior assumed (Table 7).

Table 7. Results of the statistical analysis of the means of the elastic parameters of the concrete as a function of the strength and size of the coarse aggregate used in its production.

Anisotropy condition	Elastic parameters	18 MPa (G0)	21 MPa (G1)	28 MPa (G0)	30 MPa (G1)	35 MPa (G0)	34 MPa (G1)
Orthotropy	<b>E<sub>1</sub> (MPa)</b>	28,258 (a)	31,239 (a)	39,270 (b)	41,416 (b)	38,859 (b)	38,841 (b)
	<b>E<sub>2</sub> (MPa)</b>	27,744 (a)	34,046 (b)	37,646 (c)	40,982 (cd)	39,275 (de)	43,209 (e)
	<b>E<sub>3</sub> (MPa)</b>	27,086 (a)	33,412 (b)	37,250 (c)	41,840 (cd)	38,881 (de)	44,397 (e)
	<b>G<sub>23</sub> (MPa)</b>	12,788 (a)	14,928 (b)	15,074 (b)	15,379 (b)	15,695 (b)	17,140 (c)
	<b>G<sub>13</sub> (MPa)</b>	12,681 (a)	14,992 (b)	15,777 (bc)	16,225 (bc)	15,556 (bc)	16,968 (c)
	<b>G<sub>12</sub> (MPa)</b>	12,633 (a)	14,496 (b)	15,890 (bc)	17,216 (bc)	15,589 (c)	17,028 (c)
	<b>v<sub>21</sub></b>	0.13 (a)	0.08 (a)	0.30 (b)	0.25 (b)	0.26 (b)	0.28 (b)
	<b>v<sub>31</sub></b>	0.12 (a)	0.14 (a)	0.28 (b)	0.26 (b)	0.24 (b)	0.28 (b)
	<b>v<sub>12</sub></b>	0.13 (a)	0.08 (a)	0.32 (b)	0.26 (b)	0.26 (b)	0.27 (b)
	<b>v<sub>32</sub></b>	0.11 (a)	0.11 (a)	0.24 (b)	0.32 (b)	0.24 (bc)	0.26 (c)
	<b>v<sub>13</sub></b>	0.12 (a)	0.13 (a)	0.29 (b)	0.26 (bc)	0.24 (bc)	0.26 (c)
	<b>v<sub>23</sub></b>	0.11 (a)	0.11 (a)	0.24 (b)	0.32 (bc)	0.25 (bc)	0.25 (c)
Transverse isotropy	<b>E<sub>1</sub>' (MPa)</b>	28,277 (a)	31,364 (a)	39,284 (b)	41,423 (b)	38,865 (b)	41,526 (b)
	<b>E<sub>2</sub>=E<sub>3</sub> (MPa)</b>	27,420 (a)	33,782 (b)	37,451 (c)	41,414 (cd)	39,080 (de)	43,819 (e)
	<b>G<sub>23</sub>' (MPa)</b>	12,788 (a)	14,928 (b)	15,074 (b)	15,379 (b)	15,695 (b)	17,140 (c)
	<b>G<sub>12</sub>=G<sub>13</sub> (MPa)</b>	126,575 (a)	14,738 (b)	15,834 (bc)	16,716 (bc)	15,572 (c)	16,998 (c)
	<b>v<sub>21</sub>=v<sub>31</sub></b>	0.10 (a)	0.11 (a)	0.29 (b)	0.26 (b)	0.25 (b)	0.28 (b)
	<b>v<sub>12</sub>=v<sub>13</sub></b>	0.11 (a)	0.10 (a)	0.31 (b)	0.26 (b)	0.25 (b)	0.26 (b)
	<b>v<sub>32</sub>=v<sub>23</sub></b>	0.09 (a)	0.11 (a)	0.24 (b)	0.32 (bc)	0.25 (bc)	0.26 (c)
Isotropy	<b>E (MPa)</b>	27,762 (a)	32,782 (b)	39,394 (c)	41,565 (c)	39,091 (c)	42,365 (c)
	<b>G (MPa)</b>	12,702 (a)	14,800 (b)	15,574 (bc)	16,263 (bc)	15,613 (cd)	17,045 (d)
	<b>v</b>	0.09 (a)	0.11 (a)	0.26 (b)	0.28 (b)	0.25 (b)	0.24 (b)

Different letters in the rows indicate significantly different values.

E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub> and E<sub>3</sub> = moduli of elasticity of the concrete in the 1, 2 and 3 directions, respectively (Figure 1c); G<sub>23</sub>, G<sub>13</sub> and G<sub>12</sub> = shear moduli on planes 2-3, 1-3 and 1-2, respectively (Figure 1c); v<sub>21</sub>, v<sub>31</sub>, v<sub>12</sub>, v<sub>32</sub>, v<sub>13</sub>, v<sub>23</sub> = Poisson's ratios on planes 2-1, 3-1, 1-2, 3-2, 1-3, and 2-3, respectively (Figure 1c); E<sub>1</sub>' and E<sub>2</sub>=E<sub>3</sub> = moduli of elasticity of the concrete in the 1 and 2 = 3 directions, respectively (Figure 1c); G<sub>23</sub>' and G<sub>12</sub>=G<sub>13</sub> = shear moduli on planes 2-3 and 1-2 = 1-3, respectively (Figure 1c); v<sub>21</sub>=v<sub>31</sub>, v<sub>12</sub>=v<sub>13</sub> and v<sub>32</sub>=v<sub>23</sub> = Poisson's ratios on planes 2-1 = 3-1, 1-2 = 1-3 and 3-2 = 2-3, respectively (Figure 1c); E = moduli of elasticity of the concrete in the 1 = 2 = 3 directions (Figure 1c); G = shear moduli on planes 2-3 = 1-3 = 1-2 (Figure 1c); v = Poisson's ratios on planes 2-1 = 3-1 = 1-2 = 1-3 = 3-2 = 2-3 (Figure 1c).

### 3 CONCLUSION

The isotropic behavior of concrete was validated because regardless of the elastic behavior adopted in the analyses, there were no statistically significant differences between the elastic parameters on the three symmetry axes; the constitutive relation between the shear and longitudinal moduli, which involves Poisson's ratio, was that expected for isotropic materials; and the elastic properties of the concrete differed equally as a function of the characteristic strength.

### 4 ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank Support Fund for Teaching, Research and Extension (FAEPEX) for the scholarship and the São Paulo Research Foundation (FAPESP), São Paulo, Brazil (Proc. 2016/00658-4) for the research funding.

### 5 REFERENCES

- [1] ISAIA, G.C. (Org.) **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**, v.2, 3<sup>o</sup>ed. São Paulo: IBRACON, 2017.

- [2] RASHID, Y.R. Analysis of Prestressed Concrete sure Vessels. **Nuclear Engineering and Design**, San Diego, v. 7, n.4, p.334-344, apr. 1968.
- [3] PAPA, E.; TALIERCIO, A. Anisotropic damage model for the multiaxial static and fatigue behaviour of plain concrete. **Engineering Fracture Mechanics**, v.55, n.2, p.163-179, sept., 1996.
- [4] CICEKLI, U.; VOYIADJIS, G. Z.; AL-RUB A. K. R. A plasticity and anisotropic damage model for plain concrete. **International Journal of Plasticity**, v.23, n.10, p. 1874-1900, oct./nov., 2007.
- [5] MIGLIORI, A.; MAYNARD, J. P. Implementation of a modern resonant ultrasound spectroscopy system for the measurement of the elastic moduli of small solid specimens. **Review of Scientific Instruments**, v.76, oct., 2005
- [6] TORRENTI, J. M.; PIJAUDIER-CABOT, G.; REYNOUARD, J. M. 2013. Mechanical Behavior of Concrete. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ USA. doi: 10.1002/9781118557587
- [7] HUGHES, B. P.; ASH, J. E. Anisotropy and failure criteria for concrete. *Mater. Struct.*, vol. 3, pp. 371–374, 1970.
- [8] BAUER, L.A. F. **Materiais de Construção**, 5º ed. Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos Editora SA, 2008.
- [9] MAYNARD, J. D. Resonant ultrasound spectroscopy for viscoelastic characterization of anisotropic attenuative solid materials. **Acoustical Society of America**. v.91, 1992.
- [10] HEYLIGER, P.; JILANI, A.; LEDBETTER, H.; LEISURE, R. G.; WANG, C. L. Elastic constants of isotropic cylinders using resonant ultrasound. **J. Acoust. Soc. Am.** v.94, p.1482–1487, 1993.

- [11] ISAAK, D. G.; OHNO, I. Elastic constants of chrome-diopside: application of resonant ultrasound spectroscopy to monoclinic single-crystals. **Physics and Chemistry of Minerals**, v.30, n. 7, p. 430-439, may, 2003.
- [12] MAYNARD, J. D.; LIU, G. Measuring elastic constants of arbitrarily shaped samples using resonant ultrasound spectroscopy. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v.131, mar., 2012.
- [13] SEINER, H.; BODNÁROVÁ, L. S. P.; KRUISOVÁ, A.; LANDA, M.; PABLOS, A.; BELMONTE, M. Sensitivity of the resonant ultrasound spectroscopy to weak gradients of elastic properties. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 131, 2012.
- [14] BERNARD, S; GRIMAL, Q.; LAUGIER, P. Resonant ultrasound spectroscopy for viscoelastic characterization of anisotropic attenuative solid materials. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 135, n.5, may, 2014
- [15] AGRAWAL, M.; Prasad, A.; Bellare, J. R.; Seshia, A. A. Characterization of mechanical properties of materials using ultrasound broadband spectroscopy. **Ultrasonics** v. 64 p.186–195, jan. 2016
- [16] MARTINOVIĆ, S. P; VLAHOVIĆ, M. M.; MAJSTOROVIC, J. B.; HUSOVIC, T. D. V. Anisotropy analysis of low cement concrete by ultrasonic measurements and image analysis. **Science of Sintering**. v.48, n.1, 57-70, jan./apr., 2016.
- [17] LIU, X; SHAPIRO, V.; Sample-based synthesis of two-scale structures with anisotropy, **Computer-Aided Design**, v.90, p.199-209, sept., 2017
- [18] MIGLIORI, A.; SARRAO, J.L.; VISSCHER, W. M.; BELL, T.M.; LEI, M.; FISK, Z.; LEISURE, R.G. Resonant ultrasound spectroscopic techniques for measurement of the elastic moduli of solids, **Physica B: Condensed Matter**, v.183, n.1-2, p.1-24, jan., 1993.

- [19] ULRICH, T.; MCCALL, K. R.; GUYER, R. A. Determination of elastic moduli of rock samples using resonant ultrasound spectroscopy. **J. Acous. Soc. Am.** v.111, p.1667–1674, 2002.
- [20] FIGUEIREDO, E. P. Inspeção e Diagnóstico de Estruturas de Concreto com Problemas de Resistência, Fissuras e Deformações. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, cap.33, v.2, p.985-1015. 2005.
- [21] PEREIRA, E.; MEDEIROS, M. H. F. de. Ensaio de "Pull Off" para avaliar a resistência à compressão do concreto: uma alternativa aos ensaios normalizados no Brasil. **Rev. IBRACON Estrut. Mater.** São Paulo, v.5, n.6, p.757-780, dec., 2012.
- [22] FRANÇOIS, M.; GEYMONAT, G.; BERTHAUD, Y. Determination of the symmetries of an experimentally determined stiffness tensor; application to acoustic measurements. **International Journal of Solids and Structures**, v.35, n.31-32, p.4091-4106, nov., 1998
- [23] GONÇALVES, R.; TRINCA, A. J.; PELLIS, B. P. Elastic constants of wood determined by ultrasound using three geometries of specimens. **Wood Science and Technology**. 48:269–287, 2014.
- [24] VÁZQUEZ, C.; GONÇALVES, R.; BERTOLDO, C.; BAÑO, V.; VEGA, A.; CRESPO, J.; GUAITA, M. Determination of the mechanical properties of *Castanea sativa* Mill. using ultrasonic wave propagation and comparison with static compression and bending methods. **Wood Sci Technol**, v. 49, n.3, p.607–622, 2015.
- [25] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009
- [26] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52: Agregado miúdo- Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009

- [27] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- [28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- [29] FRANÇOIS, M. **Identification des symmetries matérielles de matériaux anisotropes**. França, Tese de Doutorado –Universidade de Paris, p.137, 1995.
- [30] TRINCA, A. J. **Metodologia para determinação das constantes elásticas da madeira por ultrassom**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Na área de concentração de Construções Rurais e Ambiente, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas (SP), 2011.
- [31] GONÇALVES, R.; TRINCA, A. J.; CERRI, D. G. P. Comparison of elastic constants of wood determined by ultrasonic wave propagation and static compression test. **Wood and Fiber Science**, v. 43, n.1, p. 64-75, 2011.
- [32] BERTOLDO C.; GONÇALVES, R.; MERLO, E.S.; SANTA CLARA, O.; RUY, M.; MOREIRA, M.E.M. Elastic constants of Pinus pinaster wood determined by wave propagation. In: 18th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium. Madison, EUA, sept. 2013.
- [33] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-8802**, Concreto Endurecido – Determinação da velocidade de propagação da onda ultra-sônica. Rio de Janeiro, 2013.
- [34] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto. Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- [35] WANG, Z; GAO, Z; WANG, Y; CAO, Y; WANG, G; LIU, B; WANG, Z. A new dynamic testing method for elastic, shear modulus and poisson's ratio of concrete. **Construction and building materials**. V. 100, p. 129-135, dec. 2015.

[36] SHI, S. Shear strength, modulus of rigidity and Young's modulus of concrete. **China Civil Eng. J.**, v. 32, n.2, p.47-52, 1999.



## **2.2 Artigo 2: INFLUÊNCIA DO AGREGADO GRAÚDO NA CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO POR ULTRASSOM**

Artigo ainda não submetido.

Artigo a ser submetido a: Construction and Building Materials.

## INFLUÊNCIA DO AGREGADO GRAÚDO NA CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO POR ULTRASSOM

### RESUMO:

A relação entre a rigidez do concreto, a dimensão e a natureza dos agregados graúdos utilizados em sua composição ainda não apresenta resultado conclusivo na literatura e são escassos estudos dessa natureza com uso de técnicas de propagação de ondas. Sendo assim, o presente trabalho teve como objetivo, avaliar a influência da granulometria e da natureza do agregado graúdo, nos parâmetros elásticos do concreto obtidos por ultrassom e por ensaio estático. Para atingir os objetivos da pesquisa foram ensaiados 81 corpos de prova produzidos com concretos de duas granulometrias de agregado graúdo convencional/natural (brita 0 e brita 1) e também com a utilização de agregado leve/artificial (argila expandida). O concreto foi caracterizado por ensaio destrutivo (compressão estática instrumentada) e não destrutivo (ultrassom). Os resultados da pesquisa mostraram que os parâmetros elásticos (módulos de elasticidade longitudinal - E e transversal - G) obtidos por ultrassom, foram influenciados pelo tipo e dimensão do agregado graúdo utilizado nas misturas de concreto, enquanto que as propriedades elásticas do concreto obtidas por ensaio estático não apresentaram diferença estatisticamente significativa em função do tipo ou da dimensão do agregado graúdo. O coeficiente de Poisson não foi influenciado pelo tipo ou pela granulometria do agregado graúdo, tanto na caracterização por ultrassom como na caracterização por ensaio estático.

**Palavras-Chave:** Ultrassom, ensaio de compressão, módulo de elasticidade longitudinal, módulo de elasticidade transversal, coeficiente de Poisson.

## 1. INTRODUÇÃO

Cerca de 75% do volume do concreto é composto por agregados, dos quais cerca de 45% são agregados graúdos, sendo assim, presume-se que as propriedades dos agregados têm grande influência na durabilidade e no desempenho estrutural do material (Meddah et al., 2010), assim como nas propriedades mecânicas finais, afetando diretamente o módulo de elasticidade (Wu et al., 2001; Ahmad e Alghamdi, 2012; Uddin et al., 2017). O aumento da dimensão máxima do agregado graúdo diminui a extensão e a espessura da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado, fazendo com que a mistura necessite de menos água, gerando aumento de resistência a compressão nos primeiros dias e, com isso, aumento do módulo de elasticidade do concreto (Akçaoğlu et al., 2004; Ahmad e Alghamdi, 2012; Mehta e Monteiro, 2014). Por outro lado, agregados grandes tendem a formar zonas de transições mais fracas, com maior quantidade de microfissuras (Alhadas, 2008).

Algumas normas internacionais já levam em conta a origem do agregado no cálculo da estimativa do módulo de elasticidade (EUROCODE 2/2004; CEB FIP MC 90, 1993). Na norma brasileira (ABNT NBR 6118:2014) que trata de procedimentos para projetos de estruturas de concreto, a última atualização, adicionou valores estimados para o módulo de elasticidade em função do tipo de agregado, que até então era genérico. Entretanto quanto à dimensão máxima ( $D_{m\acute{a}x}$ ) característica do agregado graúdo, a literatura apresenta divergência da sua real influência sobre o módulo de elasticidade do concreto. Barbosa et al. (1999), Barbosa (2009) e Vu (2011) obtiveram valores de módulo de elasticidade maiores para concretos produzidos com agregados graúdos (basalto) maiores, enquanto Pereira Neto e Djanikian (1996), Rohden (2011) e Santos (2017) relatam que a dimensão máxima característica do agregado graúdo não influenciou significativamente o módulo de elasticidade de um mesmo concreto dosado com diferentes dimensões de agregados. Já para Yildırım e Sengul (2011) ao reduzir a  $D_{m\acute{a}x}$  do agregado de 32 mm para 16 mm ou 8 mm não houve influência no módulo de elasticidade do concreto mas os traços produzidos com um  $D_{m\acute{a}x}$  do agregado de 4 mm, apresentaram um menor módulo de elasticidade.

Além das alterações nas propriedades mecânicas do concreto provenientes de alterações na granulometria do agregado graúdo, a natureza do agregado também pode trazer influências no seu desempenho estrutural. Comparando o concreto tradicional, produzido com agregado graúdo convencional (brita), com o concreto totalmente elaborado com agregado leve, verifica-se acentuada redução nas propriedades mecânicas (Han e Xiang, 2017). Nos

casos em que o agregado leve é utilizado na produção do concreto, esses são os constituintes mais fracos da mistura, afetando notavelmente as propriedades de resistência e de rigidez do concreto (Cui et al., 2012).

Devido às dificuldades associadas à obtenção das propriedades de rigidez do concreto por meio de ensaios estáticos, pesquisas vem se desenvolvendo com a obtenção desses parâmetros através de ensaios dinâmicos (Abo-Qudais, 2005; Ali et al., 2012; Azenha et al., 2012; Wang et al., 2015; Uddin e Rahman, 2016), porém um número muito limitado relata a influência do agregado graúdo nos ensaios de propagação de ondas. A velocidade dos pulsos ultrassônicos que passam pelo material sólido depende da densidade e das propriedades elásticas desse material como um todo. Uddin e Hasan (2016) relatam que a velocidade do ultrassom aumenta com o aumento da granulometria do agregado graúdo, porém para Abo-Qudais (2005) essa relação é inversa, e justifica pelo fato de que quanto maior o tamanho agregado maior será a relação água-cimento, conseqüentemente, mais vazios na zona de transição, o que gera redução na velocidade do ultrassom no concreto.

Considerando que a relação entre a rigidez do concreto e a dimensão e a natureza dos agregados graúdos utilizados em sua composição ainda não apresenta resultado conclusivo na literatura e que ainda são escassos estudos dessa natureza com uso de técnicas de propagação de ondas, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência da granulometria e da natureza do agregado graúdo nos parâmetros elásticos do concreto obtidos por ultrassom e por ensaio estático.

Para o delineamento experimental foram produzidos 81 corpos de prova produzidos com concretos de duas granulometrias de agregado graúdo convencional/natural (brita 0 e brita 1) e também com a utilização de agregado leve/artificial (argila expandida). Os corpos de prova cilíndricos de concreto foram caracterizados por ensaio destrutivo (compressão estática instrumentada) e não destrutivo (ultrassom).

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 Dosagem do concreto e confecção dos corpos de prova**

Para a produção do concreto foi utilizado o cimento CII-E-32, areia média extraída de cava, e agregado graúdo obtido de rocha de origem basáltica, com duas granulometrias

(Brita 0 – B0 e Brita 1 – B1), e argila expandida (AE - Cinexpan 2215). Os agregados foram caracterizados de acordo com as normas brasileiras ABNT NBR 7211:2009 e ABNT NBR NM 52:2009 (Tabela 1).

Tabela 1. Propriedades dos agregados miúdo e graúdo.

Agregado	Dimensão máxima característica (mm)	Módulo de Finura	Classificação	Massa específica (g.cm <sup>-3</sup> )
Areia	4,75	2,8	Zona utilizável superior	2,632
Brita	9,5	6,55	Brita 0 (B0)	2,65
Brita	12,5	7,23	Brita 1 (B1)	2,65
Argila Expandida	19	7,00	Cinexpan 2215	0,64

Para o desenvolvimento da pesquisa foram confeccionados corpos de prova cilíndricos (100 mm x 200 mm), de acordo com a ABNT NBR 5738:2016. Para a definição dos traços foi utilizado o método da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), sendo este uma adaptação ao método americano proposto pela ACI (American Concrete Institute) para agregados brasileiros. As bases para a determinação dos traços foram de 15, 25 e 35 MPa de resistências características estimadas ( $f_{ckest}$ ) aos 28 dias, tendo sido calculados para a consistência do concreto (*slump test*) de 60 a 80 mm (Tabela 2). A dosagem (Tabela 2) do concreto leve (com utilização de argila expandida como agregado graúdo) foi experimental, tendo como referência estudos preliminares, no qual se avaliaram traços provenientes da própria empresa fornecedora da argila expandida, traços de outras pesquisas (Angelin, 2014) e através de amostras ensaiadas anteriormente no laboratório. Para cada resistência característica estimada foram elaborados três traços, cada um com uma granulometria de brita (B0 ou B1) e/ou com argila expandida (AE - Tabela 2). Não foi possível atingir a resistência característica estimada de 35 MPa quando o agregado graúdo utilizado para a produção do concreto foi a argila expandida (Tabela 2). Quando o concreto foi produzido com argila expandida foi necessário a utilização de aditivo plastificante e superplastificante (BAUTECH Polifuncional 4) (Tabela 2).

Tabela 2. Resistências características estimada ( $f_{ckest}$ ) e resistência característica (efetiva -  $f_{ck}$ ) e traços utilizados na pesquisa (proporcionalidade em massa).

Traço	Resistência característica estimada ( $f_{ckest}$ )	Resistência característica (efetiva - $f_{ck}$ )	Cimento CP2-E-32	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Relação água/cimento	Aditivo
I		18 MPa	1	2,45	2,32 (brita 0)	0,60	
II	15MPa	21 MPa	1	2,27	3,12 (brita 1)	0,60	
III		15 MPa	1	2,30	0,57 (argila)	0,63	0,008
IV		28 MPa	1	1,77	1,84 (brita 0)	0,47	
V	25MPa	30 MPa	1	1,62	2,54 (brita 1)	0,47	
VI		26 MPa	1	2,1	0,51 (argila)	0,45	0,008
VII	35MPa	35 MPa	1	1,55	1,35 (brita 0)	0,40	
VIII		34 MPa	1	1,23	2,14 (brita 1)	0,40	

Para garantir a homogeneidade da mistura, todo o concreto utilizado na pesquisa foi confeccionado em betoneira de eixo inclinado com capacidade de 240 litros, e adensamento em mesa vibratória até que apresentasse superfície relativamente lisa. Após 24h da moldagem os corpos de prova foram retirados das formas, identificados e armazenados em tanque com água conforme ABNT NBR 5738:2015, permanecendo nesse local até completarem 28 dias.

Para cada resistência característica (efetiva - cada traço), foram confeccionados 9 corpos de prova. Todas as amostras foram retificadas a fim de obter superfície mais regular possível. Após 28 dias de cura, todos os corpos de prova foram ensaiados com ultrassom, 6 corpos de prova de cada traço foram ensaiados à compressão simples para a determinação da resistência característica real, e os 3 restantes foram instrumentados e ensaiados à compressão estática instrumentada (Figura 1).

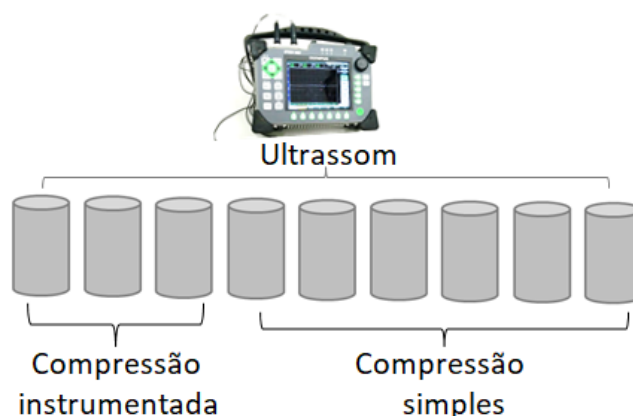


Figura 1 – Esquema da amostragem para os ensaios de ultrassom e de compressão simples e instrumentada

## 2.2 Ensaio de propagação de ondas

Para cada corpo de prova foram realizadas 3 leituras do tempo de propagação das ondas, com ultrassom (Epoch 1000, Olympus, Tokyo, Japão) e transdutores de compressão e de cisalhamento de 1 MHz de frequência, sempre na direção da altura da peça (Figura 2). Os valores médios de tempo de propagação foram utilizados para o cálculo das velocidades (Equação 1 - ABNT NBR 8802:2013).

$$V = \frac{L}{t} * 10^6 \quad (\text{Equação 1})$$

Onde V é velocidade de propagação da onda em uma determinada direção ( $\text{m.s}^{-1}$ ); L é o comprimento de percurso da onda (m) e t é o tempo de propagação da onda em uma determinada direção ( $\mu\text{s}$ ).

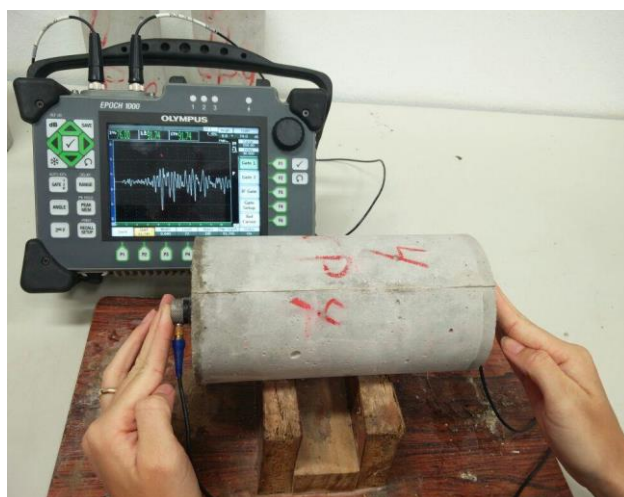


Figura 2 – Ensaio ultrassom.

Com as velocidades longitudinais (calculadas por meio do tempo de percurso obtido pelo transdutor de compressão) e as velocidades transversais (calculadas por meio do tempo de percurso obtido pelo transdutor de cisalhamento), foi possível determinar a matriz de rigidez [C] considerando o concreto com sendo um material isotrópico:

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} \end{bmatrix}$$

As constantes de rigidez  $C_{11}$  e  $C_{44}$  (MPa) foram calculadas por meio das equações 2 e 3, respectivamente.

$$C_{ii} = \rho * V_{ii}^2 * 10^{-6} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde  $\rho$  é a densidade do material ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) e  $V_{ii}$  é velocidade ( $\text{m.s}^{-1}$ ) obtida com o transdutor longitudinal e a propagação e a polarização da onda na mesma direção (i).

$$C_{ij} = \rho * V_{ij}^2 * 10^{-6} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde  $V_{ij}$  é velocidade ( $\text{m.s}^{-1}$ ) obtida com o transdutor de cisalhamento com a propagação da onda na direção i e a polarização da onda na direção j, ou vice-versa.

Considerando os argumentos da relação constitutiva da matriz de flexibilidade de materiais isotrópicos, também válidos para a matriz de rigidez, o coeficiente  $C_{12}$  foi calculado utilizando a Equação 4.

$$C_{12} = C_{11} - 2C_{44} \quad (\text{Equação 4})$$

Por meio da inversão da matriz de rigidez  $[C]$ , foi possível obter a matriz de flexibilidade  $[C]^{-1} = [S]$ , a qual está associada aos parâmetros elásticos do material (módulo de elasticidade – E, módulo de cisalhamento – G e coeficiente de Poisson -  $\nu$ ).



$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix}$$

### 2.3 Ensaio estático

Para o ensaio de compressão instrumentada, foi utilizado extensômetros elétricos resistivos (*strain gages* - KC-70-120-A1-11, KYOWA, Japão) de 70 mm de comprimento. Cada corpo de prova cilíndrico foi instrumentado com 4 extensômetros, sendo dois colados na direção do carregamento e em faces diametralmente opostas, e dois na direção perpendicular à do carregamento, também em posições diametralmente opostas (Figura 3a). A fixação dos *strain gages* nas faces do corpo de prova foi realizada com adesivo químico base – cianoacrilato.

Os ensaios foram realizados em Máquina Universal de Ensaio (DL 3000, EMIC, Brasil) com capacidade de 300 kN, os *strain gages* foram ligados à um sistema de aquisição de dados com 8 canais (HBM, Spider 8) para a leitura das deformações sofridas pelos corpos de prova durante o ensaio de compressão (Figura 3b).

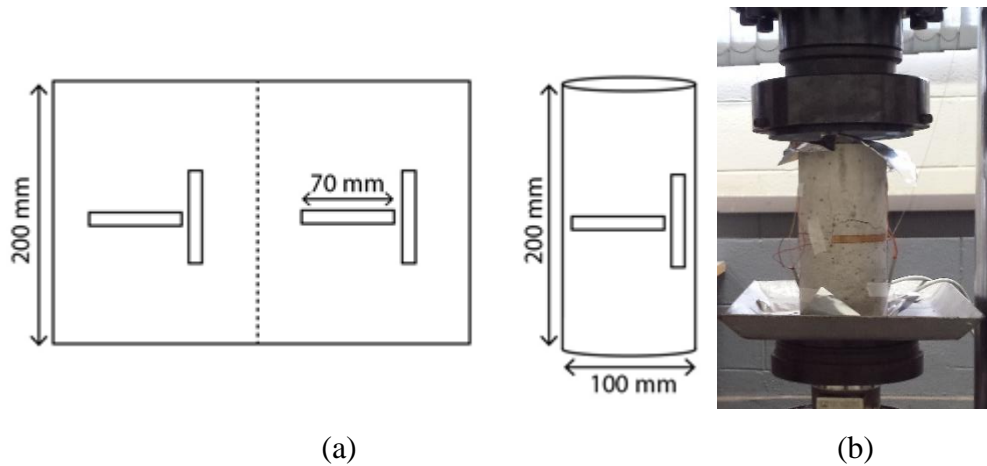


Figura 3. Esquema do posicionamento dos *strain gages* no corpo de prova de compressão (a) e ensaio de compressão estática no corpo de prova instrumentado (b).

Por meio do ensaio de compressão nos corpos de prova instrumentados determinou-se o módulo de elasticidade tangente à origem ou inicial ( $E_{ci}$  - Equação 5) e o módulo de elasticidade secante, correspondente ao coeficiente angular da reta secante ( $E_{cs}$ ) ao diagrama tensão-deformação específica ( $\sigma$ - $\varepsilon$ ) passando pelos pontos correspondentes a  $\sigma = 0,5$  MPa e por um ponto correspondente à uma tensão fixada ( $\sigma_n$ ), que no caso dessa pesquisa foi adotada com sendo 10 MPa (valor dentro do intervalo de  $0,2 \cdot f_c$  e  $0,8 \cdot f_c$ , conforme especificado pela ABNT NBR 8522/2017, considerando todos os corpos de prova ensaiados - Equação 6).

$$E_{ci} = \frac{\sigma_{0,3f_c} - 0,5}{\varepsilon_{0,3f_c} - \varepsilon_{0,5}} \quad (\text{Equação 5})$$

$$E_{cs} = \frac{\sigma_n - 0,5}{\varepsilon_n - \varepsilon_{0,5}} \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:  $\sigma_{0,3f_c}$  é tensão correspondente a 30% da tensão de ruptura ( $f_c$ );  $\varepsilon_{0,3f_c}$  é a deformação específica correspondente a 30% da tensão de ruptura;  $\varepsilon_{0,5}$  é a deformação específica para a tensão de 0,5 MPa;  $\sigma_n$  é uma tensão fixada e  $\varepsilon_n$  a deformação correspondente.

Por meio das deformações longitudinais e transversais, obtidas no ensaio de compressão instrumentado, foi determinado o coeficiente de Poisson ( $\nu$  - Equação 7).

$$\nu = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_l} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde  $\varepsilon_t$  é a deformação transversal e  $\varepsilon_l$  é a deformação longitudinal. As deformações utilizadas para o cálculo do coeficiente de Poisson foram as obtidas no trecho correspondente a 30% e 50% da tensão de ruptura ( $f_c$ ).

Após a obtenção do  $E_{cs}$  e do coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), foi possível calcular o módulo de cisalhamento do concreto ( $G_c$ ) utilizando relação constitutiva de materiais isotrópicos (Equação 8).

$$G_c = \frac{E_{cs}}{2(1+\nu)} \quad (\text{Equação 8})$$

## 2.4 Imagens

Visando analisar aspectos que poderiam ter influência nos resultados dos ensaios de ultrassom, tal como a existência de vazios no concreto, imagens fotográficas de seções transversais internas dos corpos de prova foram geradas e tratadas. Para isso, os corpos de prova foram serrados no Laboratório de Protótipos da Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI/UNICAMP) por meio de fresadora ferramenteira e em seguida foram fotografados.

As imagens fotográficas da seção transversal dos corpos de prova foram tratadas, utilizando o software *ImageJ*, de código aberto, a fim de aplicar máscaras de nitidez e calcular o volume de vazios. Para cada imagem de concreto foi selecionada uma área de 40x40 mm<sup>2</sup> e aplicado o filtro *Unsharp Mask* que aumenta a nitidez da imagem, com os valores de *Radius* igual a 100 e de *Mask weight* igual a 0,6.

Para o cálculo do volume de vazios as bandas de cores da imagem foram separadas utilizando a ferramenta *Split channels*, sendo em seguida aplicado o *Threshold*, ajustado de forma a destacar os vazios dos outros elementos da seção transversal. O cálculo do volume de vazios foi realizado utilizando a ferramenta *Analyse particles*, a qual gerou como resultado uma imagem com o contorno dos vazios numerados e uma tabela com o número dos vazios e suas respectivas áreas em mm<sup>2</sup>.

## 2.5 Análise dos Resultados

Os valores obtidos para os módulos de elasticidade, assim como para os módulos de cisalhamento e para os coeficientes de Poisson foram avaliados estatisticamente, considerando todas as de resistências características, por meio de comparação de médias (*Test t* e *Multiple*

*Range Tests*) a fim de verificar a existência de diferença entre os valores dos parâmetros obtidos, considerando as diferentes dimensões e natureza do agregado graúdo, com um nível de 95% de confiança.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As velocidades longitudinais e transversais de ultrassom nos corpos de prova cilíndricos de concreto variaram de  $3784 \text{ m.s}^{-1}$  a  $4421 \text{ m.s}^{-1}$  e de  $1917 \text{ m.s}^{-1}$  a  $2499 \text{ m.s}^{-1}$ , respectivamente, sendo essa variação consequência da natureza (basalto ou argila expandida), da dimensão (B0 ou B1) do agregado utilizado e da resistência característica do concreto (Figuras 4 e 5). As velocidades de propagação das ondas de ultrassom (longitudinal e transversal) foram superiores para o concreto produzido com brita de maior dimensão (B1), esse comportamento fica evidente quando observamos para os concretos com resistências características de 30 e 34 MPa, confeccionados com B1, apresentar maiores valores de velocidade longitudinal do que o concreto de resistência característica de 35 MPa produzido com B0 – Figura 4. O fato do concreto produzido com B1 apresentar maiores velocidades transversais do que o produzido com B0 pode ser evidenciado pela velocidade do concreto com  $f_{ck}$  de 21 MPa (B1 - velocidade transversal média de  $2335 \text{ m.s}^{-1}$ ) e os concretos de  $f_{ck}$  de 18 e 28 MPa (B0 – velocidades transversais médias de  $2150 \text{ m.s}^{-1}$  e  $2249 \text{ m.s}^{-1}$ , respectivamente) - Figura 5. Mesmo resultado foi obtido por Uddin e Hasan (2016), cujas velocidades de propagação de ondas longitudinais de ultrassom variaram de  $3100 \text{ m.s}^{-1}$  a  $3800 \text{ m.s}^{-1}$  com velocidades superiores para concretos produzidos com agregados de maior dimensão. As análises estatísticas de comparação de médias para as velocidades longitudinais de ultrassom indicaram diferenças estatisticamente significativa, com nível de confiança de 95%, com a dimensão (B0 e B1) e material (basalto e argila) do agregado graúdo utilizados na produção dos concretos para as diferentes resistências características, porém não houve diferença estatística para o concreto confeccionado com argila expandida, mesmo considerando um aumento na resistência em 11 MPa (Figuras 4). Para a velocidade transversal somente não houve diferença estatística para os concretos produzidos com brita 1 e resistências características de 30 e 34 MPa, para todos os outros concretos houve diferenças estatísticas em função da natureza do agregado (basalto ou argila), da dimensão do agregado (B0 ou B1) ou da resistência característica do concreto (Figura 5). Ainda considerando a velocidade

transversal, o concreto produzido com argila expandida apresentou os menores valores de velocidade, independente da resistência (Figura 5). No entanto, no caso da velocidade longitudinal, o concreto produzido com argila expandida apresentou valores maiores de velocidade do que o concreto produzido com B0 e resistência característica de 18 MPa (Figura 4). A menor velocidade para o concreto produzido com B0, quando comparado com o concreto produzido com AE para a resistência de 18 MPa, pode estar relacionada à diferença no volume de vazios presente nos corpos de prova produzidos com esses agregados. O concreto com essa resistência característica (18 MPa), produzido com brita 0 apresentou volume de vazios 34% superior quando comparado com o concreto produzido com AE e  $f_{ck}$  de 15 MPa (Figura 6), fato que não ocorreu para o concreto produzido com brita 0 e AE para a resistências características de 26 e 28 MPa, respectivamente (Figura 7).

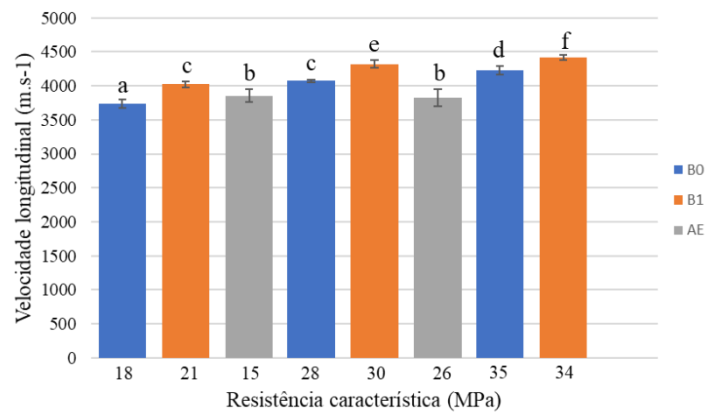


Figura 4. Velocidade longitudinal, desvio padrão e análise estatística de comparação de médias (letras diferentes indicam valores estatisticamente diferentes para as médias) para os concretos de diferentes resistências características produzidos com brita 0 (B0), brita 1 (B1) e argila expandida (AE).

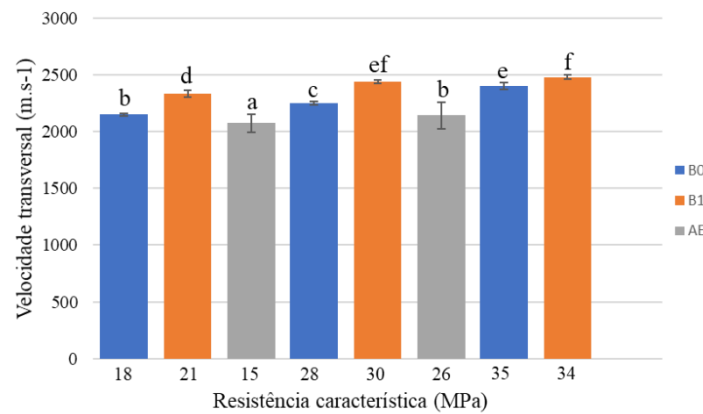


Figura 5. Velocidade transversal, desvio padrão e análise estatística de comparação de médias (letras diferentes indicam valores estatisticamente diferentes para as médias) para os concretos de diferentes resistências características produzidos com brita 0 (B0), brita 1 (B1) e argila expandida (AE).

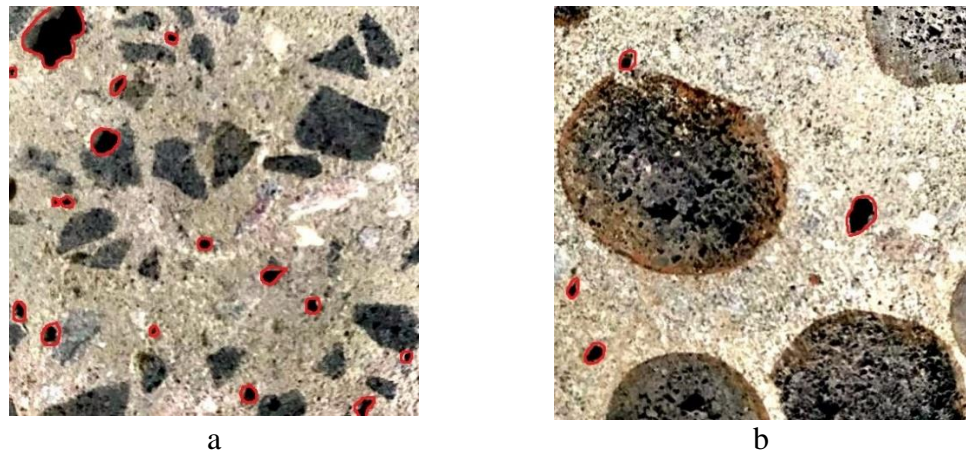


Figura 6. Exemplos de imagens da seção transversal de amostras de concreto produzidas com brita 0 (a) e com argila expandida (b) utilizadas para quantificar o volume de vazios – resistências características de 18 MPa (B0) e de 15 MPa (AE).

\*As zonas circundadas em vermelho indicam os vazios na seção transversal do corpo de prova



Figura 7. Exemplos de imagens da seção transversal de amostras de concreto produzidas com brita 0 (a) e com argila expandida (b) utilizadas para verificar a existência de vazios – resistência características de 28 MPa (B0) e de 26 MPa (AE).

O módulo de elasticidade e de cisalhamento do concreto, obtidos por meio da caracterização por ultrassom, apresentaram valores médios variando de 20611 MPa a 38463 MPa e de 8000 MPa a 15127 MPa, respectivamente, sendo essa variação, assim como no caso da velocidade, função da resistência característica do concreto ( $f_{ck}$ ), de 15 a 35 MPa, da natureza (basalto ou argila) e da dimensão do agregado graúdo de basalto utilizado (B0, B1) (Figuras 8 e 9). Esses valores apresentam a mesma ordem de grandeza dos valores médios obtidos por Wang et al. (2015), módulos de elasticidade longitudinal e de cisalhamento de 29000 MPa e 11700 MPa, respectivamente, também utilizando ensaio dinâmico em concreto com resistência característica de 22,6 MPa. Assim como ocorreu para a velocidade longitudinal, não houve diferença estatística nos módulos de elasticidade e de cisalhamento do concreto produzido com AE em função da resistência característica (15 e 26 MPa – Figura 8)

Os módulos de elasticidade e de cisalhamento do concreto, obtidos pelo ensaio de ultrassom, exibiram valores estatisticamente inferiores nos traços com a argila expandida (AE) como agregado graúdo, seguidos pelos concretos nos traços produzidos com agregados de basalto (B0) e, finalmente, de basalto (B1), sendo que o concreto produzido com B0 somente apresentou maiores valores para as propriedades elásticas avaliadas para a maior resistência característica ( $f_{ck}$  de 35 MPa - Figuras 8 e 9). Esse resultado mostra que, com 95% de nível de confiança, as propriedades de rigidez do concreto são afetadas tanto pela dimensão (B0 e B1) quanto pelo material (basalto e argila) do agregado graúdo utilizados em sua produção.

A determinação dos coeficientes de rigidez e, conseqüentemente dos parâmetros elásticos, estão diretamente relacionados com as velocidades obtidas por ultrassom e com as densidades dos materiais (Equações 2 e 3). Segundo aspectos teóricos de propagação de ondas de ultrassom, a velocidade é mais dependente da estrutura interna do material do que da densidade (Bucur, 2006), sendo mais baixa em materiais mais porosos (Martinović et al., 2016) e, em materiais com estruturas internas semelhantes, mais baixa para materiais menos densos (Bucur, 2006; Martinovic et al. 2016). Assim, diferenças na estrutura interna dos materiais podem justificar a velocidade levemente superior obtida para o concreto produzido com argila expandida em relação ao produzido bom brita zero (Figura 4), mas a maior densidade do concreto produzido com brita (B0 – densidade média de 2353 kg.m<sup>-3</sup>) em relação a densidade do concreto produzido com argila expandida (densidade média de 1831 kg.m<sup>-3</sup>) superou a diferença de velocidade, fazendo com que os módulos longitudinal e de

cisalhamento fossem inferiores para o concreto produzido com argila expandida. O concreto fabricado com agregado leve apresenta redução significativa no módulo de elasticidade e comportamento mais frágil quando comparado com as propriedades obtidas do concreto fabricado com agregado graúdo convencional (brita) (Dilli et al., 2017; Han e Xiang, 2017). Esse comportamento (módulo de elasticidade inferior para concreto produzido com argila expandida) está relacionado com a menor rigidez do próprio agregado em relação a brita (Moravia, 2007). Ainda segundo os aspectos teóricos da propagação de ondas que diz respeito da grande dependência da velocidade de ultrassom com a estrutura interna do material, esse comportamento pode justificar a ausência de diferença estatística na velocidade longitudinal e nas propriedades elásticas (módulos de elasticidade e de cisalhamento) apresentada pelos concretos produzidos com argila expandida com a variação da resistência característica, assim como ausência de diferença estatística entre a velocidade transversal e os concretos produzidos com B0 e resistências característica de 30 e 34 MPa (Tabela 5), ou seja, as características internas do agregado sobrepuseram a resistência do concreto.

Os coeficientes de variação médios, tanto para o módulo de elasticidade como para o módulo de cisalhamento obtidos por ultrassom, foram de 4%, sendo que os maiores coeficientes de variação foram obtidos nos traços que continham argila expandida (CV médio de 8% para o módulo de elasticidade e de 10% para o módulo de cisalhamento). Esse comportamento pode estar relacionado à variação da porosidade dos concretos produzidos com argila expandida, que afeta tanto a velocidade quanto a densidade do material.

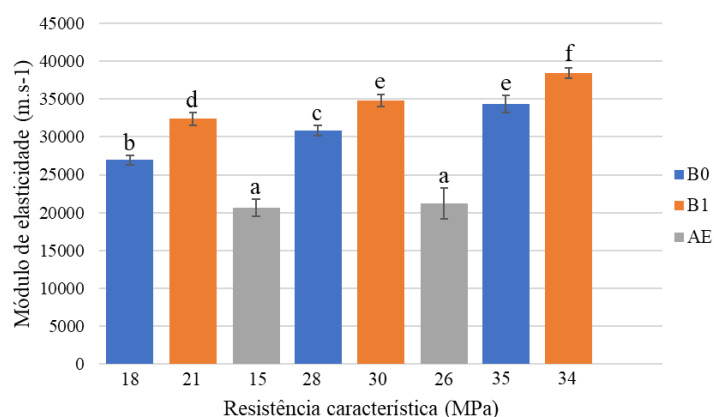


Figura 8. Módulo de elasticidade, desvio padrão e análise estatística de comparação de médias (letras diferentes indicam valores estatisticamente diferentes para as médias) para os concretos de diferentes resistências características produzidos com brita 0 (B0), brita 1 (B1) e argila expandida (AE). Ensaio dinâmico (ultrassom).



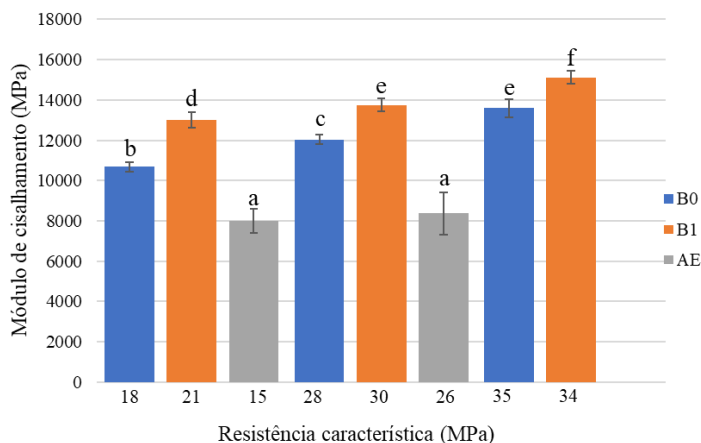


Figura 9. Módulo de cisalhamento, desvio padrão e análise estatística de comparação de médias (letras diferentes indicam valores estatisticamente diferentes para as médias) para os concretos de diferentes resistências características produzidos com brita 0 (B0), brita 1 (B1) e argila expandida (AE). Ensaio dinâmico (ultrassom).

O coeficiente de Poisson, obtido da caracterização do concreto por ultrassom, apresentou valores de 0,25 a 0,29 (Figura 10), com valor médio, independente da resistência característica e do agregado graúdo utilizado na sua produção, de 0,27. Esse valor médio foi superior ao valor de 0,18, obtido por Wang et al. (2015), em ensaio utilizando frequência de vibração, e ao valor de 0,2, proposto pela norma Brasileira de Projeto de Estruturas de Concreto (ABNT NBR 6118:2014). Segundo Neville (2011) o coeficiente de Poisson determinado por meio de ensaio estático pode apresentar valores entre 0,15 a 0,22, enquanto que, quando determinado através de ensaios dinâmicos, como é o caso do ensaio de ultrassom, o valor médio do parâmetro é de 0,24. Deformações mensuradas de forma interna no concreto, com extensômetros embebidos na massa, são 50% superiores às obtidas de forma externa, com extensômetros fixados externamente no corpo de prova (Klink, 1975). Medições de ultrassom são internas, podendo explicar os valores superiores para os coeficientes de Poisson obtidos por ultrassom nesta pesquisa, assim como em outras pesquisas utilizando ultrassom (Yaman et al., 2001; Gonçalves et al., 2011; Beniwal e Ganguli, 2015) quando comparados aos propostos pela ABNT (NBR 6118:2014).

O coeficiente de Poisson foi o que apresentou maior coeficiente de variação médio (6%) e, da mesma forma como ocorreu para os módulos de elasticidade e de cisalhamento obtidos por ultrassom, foram os traços que continham argila expandida em sua constituição que apresentaram maiores valores para esse parâmetro (CV médio de 13%). De maneira geral, as análises estatísticas de comparação de médias para o coeficiente de Poisson não indicaram diferenças estatisticamente significativa, com nível de confiança de 95%, com a dimensão (B0

e B1) ou com o material (basalto e argila) do agregado graúdo utilizados na produção dos concretos (Figura 10), mostrando ser esse um parâmetro menos sujeito a variações em função de variações na composição ou resistência do concreto.

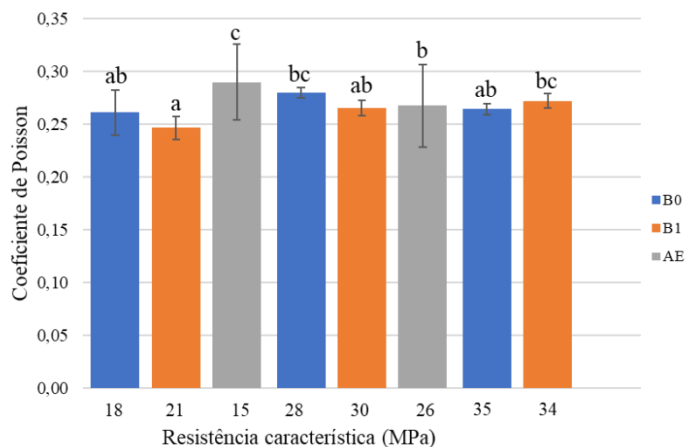


Figura 10. Coeficiente de Poisson, desvio padrão e análise estatística de comparação de médias (letras diferentes indicam valores estatisticamente diferentes para as médias) para os concretos de diferentes resistências características produzidos com brita 0 (B0), brita 1 (B1) e argila expandida (AE). Ensaio dinâmico (ultrassom).

Os resultados da caracterização do concreto por ensaio de compressão estática apresentaram valores médios para os módulos de elasticidade tangente inicial ( $E_{ci}$ ) e de cisalhamento ( $G_c$ ) variando de 19552 MPa a 38071 MPa e 8714 a 14702, respectivamente (Figuras 11 e 12), intervalos muito próximos aos apresentados para esses parâmetros obtidos no ensaio de propagação de ondas (ultrassom). Ao contrário da resposta dos parâmetros elásticos ( $E$  e  $G$ ) obtidos por ultrassom, para os ensaios de compressão estática não houve diferença estatisticamente significativa das médias (com nível de confiança de 95%) dos módulos de elasticidade e de cisalhamento em função do tipo ou da dimensão do agregado (Figuras 11 e 12). O fato das propriedades elásticas ( $E_{ci}$  e  $G_c$ ) do concreto, obtidas por meio dos ensaios estáticos, não terem apresentado diferenças de médias estatisticamente significativas com o tipo e dimensão do agregado pode ser justificado pelos elevados valores de coeficientes de variação (CV) desses parâmetros, os quais assumiram valores médios de 15% para o módulo de elasticidade e de 13% para o módulo de cisalhamento, muito superiores aos obtidos para essas propriedades por meio de ensaio dinâmico (CV médio de 4% tanto para  $E$  quanto para  $G$ ).

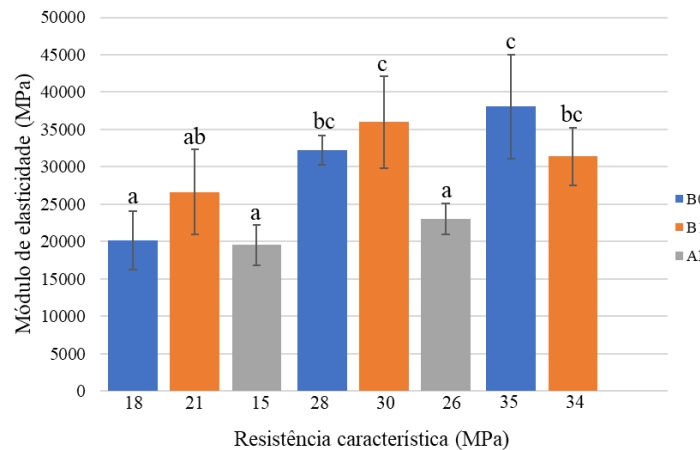


Figura 11. Módulo de elasticidade, desvio padrão e análise estatística de comparação de médias (letras diferentes indicam valores estatisticamente diferentes para as médias) para os concretos de diferentes resistências características produzidos com brita 0 (B0), brita 1 (B1) e argila expandida (AE). Ensaio estático (compressão instrumentada).

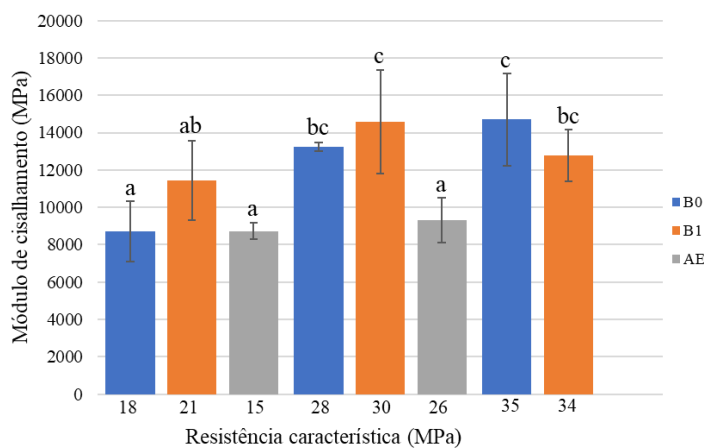


Figura 12. Módulo de cisalhamento, desvio padrão e análise estatística de comparação de médias (letras diferentes indicam valores estatisticamente diferentes para as médias) para os concretos de diferentes resistências características produzidos com brita 0 (B0), brita 1 (B1) e argila expandida (AE). Ensaio estático (compressão instrumentada).

O coeficiente de Poisson, obtido por meio do ensaio de compressão estática, apresentou valor médio de 0,21 e coeficiente de variação médio de 24%. Assim como no ensaio de ultrassom, a natureza ou a dimensão do agregado graúdo não influenciou nos valores obtidos para o coeficiente de Poisson, a avaliação estatística das médias indicou igualdade do parâmetro (com nível de confiança de 95%), independente do agregado graúdo utilizado na produção do concreto (Figura 13). Mesmo resultado foi obtido por Dilli et al. (2015) para os coeficientes de Poisson obtidos em concretos produzidos com agregado leve (argila expandida) e com agregado convencional, sendo que para ambos (concreto leve ou

convencional), o parâmetro assumiu valor médio de 0,21. Outras pesquisas (SIDERIS, 2004; LU, 2007; GONÇALVES et al. 2011, BENIWAL e GANGULI, 2015) também demonstram que os coeficientes de Poisson são, em geral, superiores ao valor usual geralmente adotado (0,20).

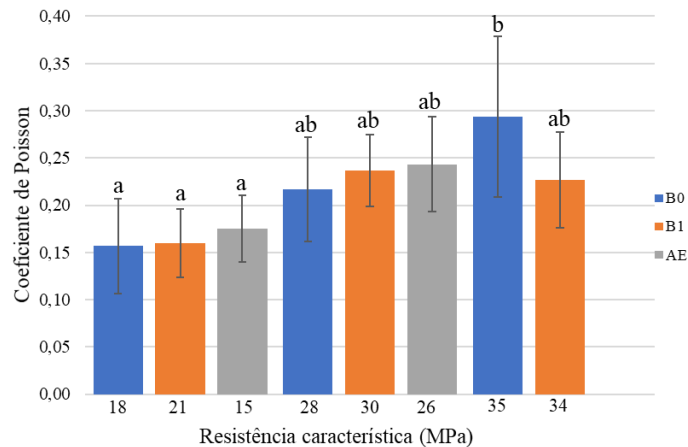


Figura 13. Coeficiente de Poisson, desvio padrão e análise estatística de comparação de médias (letras diferentes indicam valores estatisticamente diferentes para as médias) para os concretos de diferentes resistências características produzidos com brita 0 (B0), brita 1 (B1) e argila expandida (AE). Ensaio estático (compressão instrumentada).

#### 4. CONCLUSÃO

Os parâmetros elásticos (módulos de elasticidade - E e de cisalhamento - G), obtidos por ultrassom, foram influenciados pela natureza e dimensão do agregado graúdo utilizado nas misturas de concreto, sendo que a maior dimensão do agregado proporcionou maiores valores para as propriedades elásticas enquanto que a utilização de agregado leve (argila expandida) na produção do concreto levou aos menores valores para os parâmetros (E e G).

As propriedades elásticas do concreto obtidas por ensaio estático não apresentaram diferença estatisticamente significativa em função da natureza ou da dimensão do agregado graúdo.

O coeficiente de Poisson não foi influenciado pela natureza ou pela granulometria do agregado graúdo, tanto na caracterização por ultrassom como na caracterização por ensaio estático.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Fundo de Apoio ao Ensino, à Pesquisa e Extensão (FAEPEX) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) pela bolsa de estudos, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP – Proc.2016/00658-4) pelo financiamento da pesquisa e à aluna de doutorado Stella Stopa Assis Palma pela contribuição no tratamento das imagens.

## 6. BIBLIOGRAFIA

ABO-QUDAIS, SAAD A. "Effect of concrete mixing parameters on propagation of ultrasonic waves". **Construction and building materials**, v.19, n.4, p. 257-263, maio 2005.

AHMAD, S; ALGHAMDI SA. A study on effect of coarse aggregate type on concrete performace. **The Arabian Journal for Science and Engineering**, v.37, p. 1777-1786, ago. 2012.

AKÇAOĞLU, T.; TOKYAY, M.; ÇELIK, T. Effect of coarse aggregate size and matrix quality on ITZ and failure behavior of concrete under uniaxial compression. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, n. 6, p. 633-638, 2004.

ALI, M.; LIU, A.; SOU, H.; CHOUW, N. Mechanical and dynamic properties of coconut fibre reinforced concrete, **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 814–825, 2012.

ALHADAS, M. F. S. Estudo da influência do agregado graúdo de diferentes origens mineralógicas nas propriedades mecânicas do concreto. 2008.

ANGELIN, A. F. **Concreto leve estrutural - Desempenhos físicos, térmicos, mecânicos e microestruturais**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto. Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação.** Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR-8522 Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão.** Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR-8802, Concreto Endurecido – Determinação da velocidade de propagação da onda ultra-sônica.** Rio de Janeiro, ABNT, 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52: Agregado miúdo- Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

AZENHA, M.; FARIA, R.; MAGALHÃES, F.; RAMOS, L.; CUNHA, Á. Measurement of the Emodulus of cement pastes and mortars since casting, using a vibration based technique, *Mater. Struct.* 45 (2012) 81–92.

BARBOSA, I. L. S. **Influência dos Agregados Graúdos da Região de Goiânia no Módulo de Deformação Tangente Inicial do Concreto.** Goiânia, 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009.

BARBOSA, M. P.; AKASAKI, J. L.; ALCÂNTARA, M. A. M. A influência do tipo de agregado graúdo nos módulos de elasticidade e na resistência a tração dos concretos de elevado desempenho, In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 41., 1999, Salvador. **Anais...** Salvador: IBRACON, 1999.

BENIWAL, S.; GANGULI, A. Defect Detection around Rebars in Concrete using Focused Ultrasound and Reverse Time Migration. **Ultrasonics**, v. 62, p.112-125, maio, 2015.

BUCUR, V. **Acoustics of wood.** Springer-Verlag, Berlin, Germany. P. 223-225, 2006.

COMITE EURO-INTERNACIONAL du BETON. CEB – FIP Model Code 1990. Bulletin d'Information, maio, 1993.

CUI, H; LO, T, Y.; MEMON, S. A., XU, W. Effect of lightweight aggregates on the mechanical properties and brittleness of lightweight aggregate concrete. **Construction and Building Materials.** v.35, p.149-158, out. 1, 2012.

DILLI, ME; ATAHAN, HN; ŞENGÜL, C. A comparison of strength and elastic properties between conventional and lightweight structural concretes designed with expanded clay aggregates. **Construction and Building Materials**, v.101, n.1, p. 260-267, dez., 2015.

EUROCODE 2 – EUROPEAN STANDARD. *Design of concrete structures – Part 1: General rules and rules for buildings*. European Committee for Standardization. Brussels, 2004.

GOLEWSKI, G.J.; SADOWSKI, T. An analysis of shear fracture toughness  $K_{IIc}$  and microstructure in concretes containing fly-ash. **Construction and Building Materials**, v.51, p.207-214, jan. 2014.

GONÇALVES, R.; GIACON JR., M.; LOPES, I. M. Determining the concrete stiffness matrix through ultrasonic testing. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n.3, p. 427-437, 2011.

HAN, B; XIANG, T. Axial compressive stress-strain relation and Poisson effect of structural lightweight aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v.146, p.338-343, ago., 2017.

KLINK, S. A. Poisson's ratio variations in concrete. **Experimental Mechanics**, v.15, n.4, abr., 1975.

LU, X.; HSU, C.T. T. Tangent Poisson's ratio of high-strength concrete in triaxial compression. **Magazine of Concrete Research**, v.59, n.1, p.69-77, fev. 2007.

MARTINOVIĆ, S. P; VLAHOVIĆ, M. M.; MAJSTOROVIC, J. B.; HUSOVIC, T. D. V. Anisotropy analysis of low cement concrete by ultrasonic measurements and image analysis. **Science of Sintering**. v.48, n.1, 57-70, jan./abr., 2016

MEDDAH, MS; ZITOUNI, S; BELÂABES, S. Effect of content and particle size distribution of coarse aggregate on the compressive strength of concrete. **Construction and Building Materials**. v.24, p.505-512, Jan., 2010.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto Microestrutura: Propriedade e Materiais**, 2ª ed., São Paulo: IBRACON, p. 751, 2014.

MORAVIA, W.G. **Influência de parâmetros microestruturais na durabilidade do concreto leve produzido com argila expandida**. Tese de Doutorado, Pós-Graduação em

Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

PEREIRA NETO, P. M., DJANIKIAN, J. G. A influência do tipo de agregado e da dimensão máxima característica nos módulos de elasticidade do concreto de alto desempenho, **Revista IBRACON**, v.12, São Paulo-SP, abr, 1996.

ROHDEN, A. B. **Efeito da resistência e da dimensão máxima característica do agregado graúdo nas propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) UFRGS, Porto Alegre, 2011.

ROSSIGNOLO, J.A.; AGNESINI, M.V.C.; MORAIS, J.A. Properties of high-performance LWAC for precast structures with Brazilian lightweight aggregates. **Cement & Concrete composites**, v.25, n.1, p.77-82, jan. 2003.

SANTOS, A. C.; ARRUDA, A. M. de; SILVA, T. J.; VITOR, P. C. P. TRAUTWEIN, L. M. Influence of coarse aggregate on concrete's elasticity modulus. **Acta Scientiarum. Technology**, Maringá, v. 39, n.1, p. 17-25, 2017.

SIDERIS, K.K.; MANITA, K.; SIDERIS, K. Estimation of ultimate modulus of elasticity and Poisson ratio of normal concrete. **Cement & Concrete Composites**, v.26, p. 623-631, 2004.

UDDIN, M. T.; HASAN, A. M.; KAMAL, R.I.; YASHIN, S.M.; ZIHAN, Z. U. A. Effects of maximum size of brick aggregate on properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v.134, p.713-726, mar., 2017.

UDDIN, M. T; HASAN, A. M. Effects of maximum aggregate size on UPV of brick aggregate concrete. **Ultrasonics**, v.69, p. 129–136, 2016.

UDDIN, M. T; RAHMAN, M. N. Effect of types of aggregate and sand-to-aggregate volume ratio on UPV in concrete, **Construction and Building Materials**, v.125, p. 832-841, 2016.

VU, X. H.; DAUDEVILLE, L.; MALECOT, Y. Effect of coarse aggregate size and cement paste volume on concrete behavior under high triaxial compression loading. **Construction and Building Materials**, v.25, n.10, p.3941-3949, maio, 2011.



WANG, Z; GAO, Z; WANG, Y; CAO, Y; WANG, G; LIU, B; WANG, Z. A new dynamic testing method for elastic, shear modulus and poisson's ratio of concrete. **Construction and Building Materials**. v. 100, p. 129-135, dez. 2015.

WU, K., CHEN, B., YAO, W., ZHANG, D. Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v.31, n.10, p 1421-1425, out. 2001.

YAMAN, I. O. et al. Ultrasonic Pulse Velocity in Concrete Using Direct and Indirect Transmission. **ACI Materials Journal**, v.98, n. 6, p. 450-457, Nov.-Dez. 2001.

YILDIRIM, H.; SENGUL, O. Modulus of elasticity of substandard and normal concretes, **Construction and Building Materials**, v. 25, n.4, p. 1645-1652, 2011.

### 3. DISCUSSÃO GERAL

De acordo com os resultados apresentados nos dois artigos que compõem a dissertação foi possível avaliar o comportamento elástico do concreto simulando três condições teóricas do comportamento elástico (isotropia, isotropia transversal e ortotropia) e também como a dimensão e a densidade do agregado graúdo afetam as constantes elásticas (longitudinais e transversais) e os coeficientes de Poisson do concreto obtidos tanto por meio de ensaios destrutivos como não destrutivos.

No primeiro artigo os ensaios foram realizados com objetivo de verificar se a anisotropia do concreto pode ser assumida como isotrópica, sem trazer prejuízos para a obtenção de suas propriedades ou se, a caracterização não simplificada (material com isotropia transversal ou ortotropia), traz importantes diferenças entre as propriedades do material nas diferentes direções. Logo na primeira análise realizada para o material, considerando o concreto como sendo ortotrópico, os baixos valores de coeficiente de variação e de desvio padrão da média dos parâmetros elásticos (módulos de elasticidade –  $E_1$ ,  $E_2$  e  $E_3$ , módulos de cisalhamento –  $G_{23}$ ,  $G_{13}$  e  $G_{12}$ ), considerando os três eixos de simetria (material ortotrópico) já deram um indício de isotropia do concreto. O mesmo fato ocorreu quando o concreto foi analisado como material que apresenta isotropia transversal.

As análises estatísticas de comparação de médias para os parâmetros elásticos não indicaram diferença estatisticamente significativa, com intervalo de confiança de 95%, para as três direções avaliadas (1, 2 e 3), quando o concreto foi analisado como sendo ortotrópico, nem para as 2 direções avaliadas (1 e 2=3), quando o concreto foi analisado como tendo isotropia transversal. Todos os parâmetros elásticos obtidos (módulos de elasticidade longitudinal e transversal e coeficientes de Poisson) apresentaram variações que ocorreram em função da resistência característica do concreto e da granulometria do agregado graúdo utilizada no traço.

Não houve nenhum tipo de anisotropia analisada (ortotropia, isotropia transversal ou isotropia) que produziu valores mais precisos para os parâmetros elásticos na caracterização do concreto por ultrassom, a variação dos parâmetros elásticos, dentro da classe de resistência (15, 25 ou 35 MPa) e do tipo de brita (B0 ou B1), foi aleatória, não apresentando tendência dependendo do tipo de anisotropia adotada para o material. O corpo de prova poliédrico de 26 faces, utilizado para analisar o comportamento elástico do concreto, se mostrou prático e eficaz.

O segundo artigo teve o intuito de avaliar a influência da granulometria e da natureza do agregado graúdo nos parâmetros elásticos do concreto obtidos por ultrassom e por ensaio estático. Os resultados adquiridos com o segundo artigo mostraram que os dados obtidos de forma dinâmica responderam de maneira distinta quando comparado com os dados obtidos de maneira estática. As velocidades longitudinais e transversais, assim como os módulos de elasticidade longitudinal e transversal, obtidos por meio do ultrassom apresentaram-se estatisticamente diferentes, tanto considerando a dimensão como a natureza do agregado graúdo utilizado na produção do concreto, sendo que, de forma geral, os maiores valores para os parâmetros foram obtidos para a maior dimensão do agregado (B1) e os menores valores para os parâmetros foram apresentados para os concretos produzidos com o agregado de menor densidade (AE).

Quando os resultados dos parâmetros elásticos ( $E_{ci}$  e  $G_c$ ) foram obtidos por meio de ensaio estático, não houve diferenças estatísticas significativas com as alterações consideradas para o agregado graúdo (dimensão e natureza) utilizado em cada traço. A diferenciação ou não no valor das propriedades obtidas por ultrassom e por ensaio estático, em função da dimensão e da natureza do agregado graúdo, pode ser justificada pelas diferenças nos valores dos coeficientes de variação dos parâmetros apresentadas por essas duas formas de ensaio, sendo muito inferiores para os ensaios de ultrassom.

O coeficiente de Poisson não apresentou diferença estatística significativa com a dimensão ou a natureza do agregado graúdo utilizado na produção do concreto, dentro de um mesmo grupo de resistência, independente do tipo de ensaio utilizado para a sua obtenção (dinâmico e estático). O coeficiente de Poisson médio obtido por ultrassom apresentou valor superior (0,27) quando comparado com o parâmetro obtido por compressão estática (0,21), essa diferença pode ser justificada pela diferença na maneira da obtenção das deformações considerando esses dois tipos de ensaio, sendo que por ultrassom são consideradas as deformações internas e por compressão estática são consideradas as deformações externas do corpo de prova.

### **3 CONCLUSÃO GERAL**

Os resultados da pesquisa comprovaram a hipótese de comportamento isotrópico do concreto, pois não há diferença estatisticamente significativa para os parâmetros elásticos nos três eixos de simetria.

Além disso, foi possível verificar que a dimensão e a natureza do agregado graúdo influenciam os parâmetros do concreto obtidos por ultrassom (velocidades longitudinal e transversal e, módulos de elasticidade longitudinal e transversal) sendo que, maiores valores para os parâmetros foram obtidos para o concreto produzido com agregado graúdo de maior dimensão e os menores valores foram obtidos para o concreto produzido com agregado artificial (menor densidade). Já as propriedades elásticas do concreto obtidas por ensaio estático não apresentaram diferença estatisticamente significativa em função do tipo ou da dimensão do agregado graúdo. O coeficiente de Poisson não foi influenciado pelo tipo ou pela granulometria do agregado graúdo, tanto na caracterização por ultrassom como na caracterização por ensaio estático.

#### 4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABO-QUDAIS, SAAD A. "Effect of concrete mixing parameters on propagation of ultrasonic waves". *Construction and building materials*, v.19, n.4, p. 257-263, maio 2005.

AGRAWAL, M.; Prasad, A.; Bellare, J. R.; Seshia, A. A. Characterization of mechanical properties of materials using ultrasound broadband spectroscopy. *Ultrasonics* v. 64 p.186–195, jan. 2016.

AHMAD, S; ALGHAMDI SA. A study on effect of coarse aggregate type on concrete performace. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, v.37, p. 1777-1786, ago. 2012.

AKÇAOĞLU, T.; TOKYAY, M.; ÇELİK, T. Effect of coarse aggregate size and matrix quality on ITZ and failure behavior of concrete under uniaxial compression. *Cement and Concrete Composites*, v. 26, n. 6, p. 633-638, 2004.

ALHADAS, M. F. S. Estudo da influência do agregado graúdo de diferentes origens mineralógicas nas propriedades mecânicas do concreto. 2008.

ALI, M.; LIU, A.; SOU, H.; CHOUW, N. Mechanical and dynamic properties of coconut fibre reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, v. 30, p. 814–825, 2012.

ANGELIN, A. F. **Concreto leve estrutural - Desempenhos físicos, térmicos, mecânicos e microestruturais**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR-8522 Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR-8802**, Concreto Endurecido – Determinação da velocidade de propagação da onda ultra-sônica. Rio de Janeiro, ABNT, 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto. Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52: Agregado miúdo- Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

AZENHA, M.; FARIA, R.; MAGALHÃES, F.; RAMOS, L.; CUNHA, Á. Measurement of the Emodulus of cement pastes and mortars since casting, using a vibration based technique, **Mater. Struct.** v.45, p.81–92, 2012

BARBOSA, I. L. S. **Influência dos Agregados Graúdos da Região de Goiânia no Módulo de Deformação Tangente Inicial do Concreto**. Goiânia, 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009.

BARBOSA, M. P.; AKASAKI, J. L.; ALCÂNTARA, M. A. M. A influência do tipo de agregado graúdo nos módulos de elasticidade e na resistência a tração dos concretos de elevado desempenho, In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 41., 1999, Salvador. **Anais...** Salvador: IBRACON, 1999.

BAUER, L.A. F. **Materiais de Construção**, 5º ed. Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos Editora SA, 2008.

BENIWAL, S.; GANGULI, A. Defect Detection around Rebars in Concrete using Focused Ultrasound and Reverse Time Migration. **Ultrasonics**, v. 62, p.112-125, maio, 2015.

BERNARD, S; GRIMAL, Q.; LAUGIER, P. Resonant ultrasound spectroscopy for viscoelastic characterization of anisotropic attenuative solid materials. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 135, n.5, maio, 2014

BERTOLDO C.; GONÇALVES, R.; MERLO, E.S.; SANTA CLARA, O.; RUY, M.; MOREIRA, M.E.M. Elastic constants of Pinus pinaster wood determined by wave propagation. In: 18th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium. Madison, EUA, set. 2013.

BUCUR, V. **Acoustics of wood**. Springer-Verlag, Berlin, Germany. P. 223-225, 2006.

CICEKLI, U.; VOYIADJIS, G. Z.; AL-RUB A. K. R. A plasticity and anisotropic damage model for plain concrete. **International Journal of Plasticity**, v.23, n.10, p. 1874-1900, out./nov., 2007.

COMITE EURO-INTERNACIONAL du BETON. CEB – FIP Model Code 1990. Bulletin d'Information, maio, 1993.

CUI, H; LO, T, Y.; MEMON, S. A., XU, W. Effect of lightweight aggregates on the mechanical properties and brittleness of lightweight aggregate concrete. **Construction and Building Materials**. v.35, p.149-158, out. 1, 2012.

DILLI, ME; ATAHAN, HN; ŞENGÜL, C. A comparison of strength and elastic properties between conventional and lightweight structural concretes designed with expanded clay aggregates. **Construction and Building Materials**, v.101, n.1, p. 260-267, Dez., 2015.

EUROCODE 2 – EUROPEAN STANDARD. *Design of concrete structures – Part 1: General rules and rules for buildings*. European Committee for Standardization. Brussels, 2004.

FIGUEIREDO, E. P. Inspeção e Diagnóstico de Estruturas de Concreto com Problemas de Resistência, Fissuras e Deformações. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, cap.33, v.2, p.985-1015. 2005.

FRANÇOIS, M. **Identification des symmetries matérielles de matériaux anisotropes**. França, Tese de Doutorado –Universidade de Paris, p.137, 1995.

FRANÇOIS, M.; GEYMONAT, G.; BERTHAUD, Y. Determination of the symmetries of an experimentally determined stiffness tensor; application to acoustic measurements. **International Journal of Solids and Structures**, v.35, n.31-32, p.4091-4106, nov., 1998

GOLEWSKI, G.J.; SADOWSKI, T. An analysis of shear fracture toughness  $K_{IIc}$  and microstructure in concretes containing fly-ash. **Construction and Building Materials**, v.51, p.207-214, jan. 2014.

GONÇALVES, R.; GIACON JR., M.; LOPES, I. M. Determining the concrete stiffness matrix through ultrasonic testing. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n.3, p. 427-437, 2011.

GONÇALVES, R.; TRINCA, A. J.; CERRI, D. G. P. Comparison of elastic constants of wood determined by ultrasonic wave propagation and static compression test. **Wood and Fiber Science**, v. 43, n.1, p. 64-75, 2011.

GONÇALVES, R.; TRINCA, A. J.; PELLIS, B. P. Elastic constants of wood determined by ultrasound using three geometries of specimens. **Wood Science and Technology**. 48:269–287, 2014.

HAN, B; XIANG, T. Axial compressive stress-strain relation and Poisson effect of structural lightweight aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v.146, p.338-343, Ago., 2017.

HEYLIGER, P.; JILANI, A.; LEDBETTER, H.; LEISURE, R. G.; WANG, C. L. Elastic constants of isotropic cylinders using resonant ultrasound. **J. Acoust. Soc. Am.** v.94, p.1482–1487, 1993.

HUGHES, B. P.; ASH, J. E. Anisotropy and failure criteria for concrete. *Mater. Struct.*, vol. 3, pp. 371–374, 1970.

ISAAK, D. G.; OHNO, I. Elastic constants of chrome-diopside: application of resonant ultrasound spectroscopy to monoclinic single-crystals. **Physics and Chemistry of Minerals**, v.30, n. 7, p. 430-439, maio, 2003.

ISAIA, G.C. (Org.) **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**, v.2, 3ªed. São Paulo: IBRACON, 2017.

KLINK, S. A. Poisson's ratio variations in concrete. **Experimental Mechanics**, v.15, n.4, abr, 1975.

LIU, X; SHAPIRO,V.; Sample-based synthesis of two-scale structures with anisotropy, **Computer-Aided Design**, v.90, p.199-209, set., 2017

LU, X.; HSU, C.T. T. Tangent Poisson's ratio of high-strength concrete in triaxial compression. **Magazine of Concrete Research**, v.59, n.1, p.69-77, fev. 2007.

MARTINOVIĆ, S. P; VLAHOVIĆ, M. M.; MAJSTOROVIC, J. B.; HUSOVIC, T. D. V. Anisotropy analysis of low cement concrete by ultrasonic measurements and image analysis. **Science of Sintering**. v.48, n.1, 57-70, jan./abr., 2016.



MARTINOVIĆ, S. P.; VLAHOVIĆ, M. M.; MAJSTOROVIC, J. B.; HUSOVIC, T. D. V. Anisotropy analysis of low cement concrete by ultrasonic measurements and image analysis. **Science of Sintering**. v.48, n.1, 57-70, jan./abr., 2016

MAYNARD, J. D. Resonant ultrasound spectroscopy for viscoelastic characterization of anisotropic attenuative solid materials. **Acoustical Society of America**. v.91, 1992.

MAYNARD, J. D.; LIU, G. Measuring elastic constants of arbitrarily shaped samples using resonant ultrasound spectroscopy. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v.131, mar., 2012.

MEDDAH, MS; ZITOUNI, S; BELÂABES, S. Effect of content and particle size distribution of coarse aggregate on the compressive strength of concrete. **Construction and Building Materials**. v.24, p.505-512, Jan., 2010.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto Microestrutura: Propriedade e Materiais**, 2ª ed., São Paulo: IBRACON, p. 751, 2014.

MIGLIORI, A.; MAYNARD, J. P. Implementation of a modern resonant ultrasound spectroscopy system for the measurement of the elastic moduli of small solid specimens. **Review of Scientific Instruments**, v.76, out., 2005

MIGLIORI, A.; SARRAO, J.L.; VISSCHER, W. M.; BELL, T.M.; LEI, M.; FISK, Z.; LEISURE, R.G. Resonant ultrasound spectroscopic techniques for measurement of the elastic moduli of solids, **Physica B: Condensed Matter**, v.183, n.1-2, p.1-24, jan., 1993.

MORAVIA, W.G. **Influência de parâmetros microestruturais na durabilidade do concreto leve produzido com argila expandida**. Tese de Doutorado, Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

PAPA, E.; TALIERCIO, A. Anisotropic damage model for the multiaxial static and fatigue behaviour of plain concrete. **Engineering Fracture Mechanics**, v.55, n.2, p.163-179, set., 1996.

PEREIRA NETO, P. M., DJANIKIAN, J. G. A influência do tipo de agregado e da dimensão máxima característica nos módulos de elasticidade do concreto de alto desempenho, **Revista IBRACON**, v.12, São Paulo-SP, Abril, 1996.

PEREIRA, E.; MEDEIROS, M. H. F. de. Ensaio de "Pull Off" para avaliar a resistência à compressão do concreto: uma alternativa aos ensaios normalizados no Brasil. **Rev. IBRACON Estrut. Mater.** São Paulo, v.5, n.6, p.757-780, dez., 2012.

RASHID, Y.R. Analysis of Prestressed Concrete sure Vessels. **Nuclear Engineering and Design**, San Diego, v. 7, n.4, p.334-344, abr. 1968.

ROHDEN, A. B. **Efeito da resistência e da dimensão máxima característica do agregado graúdo nas propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho.** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) UFRGS, Porto Alegre, 2011.

ROSSIGNOLO, J.A.; AGNESINI, M.V.C.; MORAIS, J.A. Properties of high-performance LWAC for precast structures with Brazilian lightweight aggregates. **Cement & Concrete composites**, v.25, n.1, p.77-82, jan. 2003.

SANTOS, A. C.; ARRUDA, A. M. de; SILVA, T. J.; VITOR, P. C. P. TRAUTWEIN, L. M. Influence of coarse aggregate on concrete's elasticity modulus. **Acta Scientiarum. Technology**, Maringá, v. 39, n.1, p. 17-25, 2017.

SEINER, H.; BODNÁROVÁ, L. S. P.; KRUISOVÁ, A.; LANDA, M.; PABLOS, A.; BELMONTE, M. Sensitivity of the resonant ultrasound spectroscopy to weak gradients of elastic properties. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 131, 2012.

SHI, S. Shear strength, modulus of rigidity and Young's modulus of concrete. **China Civil Eng. J.**, v. 32, n.2, p.47-52, 1999.

SIDERIS, K.K.; MANITA, K.; SIDERIS, K. Estimation of ultimate modulus of elasticity and Poisson ratio of normal concrete. **Cement & Concrete Composites**, v.26, p. 623-631, 2004.

TORRENTI, J. M.; PIJAUDIER-CABOT, G.; REYNOUARD, J. M. 2013. Mechanical Behavior of Concrete. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ USA. doi: 10.1002/9781118557587

TRINCA, A. J. **Metodologia para determinação das constantes elásticas da madeira por ultrassom**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Na área de concentração de Construções Rurais e Ambientação, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas (SP), 2011.

UDDIN, M. T.; HASAN, A. M.; KAMAL, R.I.; YASHIN, S.M.; ZIHAN, Z. U. A. Effects of maximum size of brick aggregate on properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v.134, p.713-726, mar., 2017.

UDDIN, M. T; HASAN, A. M. Effects of maximum aggregate size on UPV of brick aggregate concrete. **Ultrasonics**, v.69, p. 129–136, 2016.

UDDIN, M. T; RAHMAN, M. N. Effect of types of aggregate and sand-to-aggregate volume ratio on UPV in concrete, **Construction and Building Materials**, v.125, p. 832-841, 2016.

ULRICH, T.; MCCALL, K. R.; GUYER, R. A. Determination of elastic moduli of rock samples using resonant ultrasound spectroscopy. **J. Acous. Soc. Am.** v.111, p.1667–1674, 2002.

VÁZQUEZ, C.; GONÇALVES, R.; BERTOLDO, C.; BAÑO, V.; VEGA, A.; CRESPO, J.; GUAITA, M. Determination of the mechanical properties of *Castanea sativa* Mill. using ultrasonic wave propagation and comparison with static compression and bending methods. **Wood Sci Technol**, v. 49, n.3, p.607–622, 2015.

VU, X. H.; DAUDEVILLE, L.; MALECOT, Y. Effect of coarse aggregate size and cement paste volume on concrete behavior under high triaxial compression loading. **Construction and Building Materials**, v.25, n.10, p.3941-3949, maio, 2011.

WANG, Z; GAO, Z; WANG, Y; CAO, Y; WANG, G; LIU, B; WANG, Z. A new dynamic testing method for elastic, shear modulus and poisson's ratio of concrete. **Construction and Building Materials**. v. 100, p. 129-135, dez. 2015.

YAMAN, I. O. et al. Ultrasonic Pulse Velocity in Concrete Using Direct and Indirect Transmission. **ACI Materials Journal**, v.98, n. 6, p. 450-457, nov.-dez. 2001.

WU, K., CHEN, B., YAO, W., ZHANG, D. Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v.31, n.10, p 1421-1425, out. 2001.

YILDIRIM, H.; SENGUL, O. Modulus of elasticity of substandard and normal concretes, **Construction and Building Materials**, v. 25, n.4, p. 1645-1652, 2011.