

Módulo de elasticidade estático e dinâmico para concretos leves

Static and dynamic resilient modulus for lightweight concrete

*Artur Lenz Sartorti(1); Lucas da Silva Barboza(2); Ellen Siqueira de Oliveira(3);
Kevlin Oliveira Brito(4); Thaillys Caroline de Rocco Lima(5)*

1 Engenheiro Civil pelo Centro Universitário Adventista de São Paulo, UNASP (2005). Mestre em Estrutura pela UNICAMP (2008). Doutor em Ciências (Estruturas) pela USP – EESC (2015). Professor do Centro Universitário Adventista de São Paulo, UNASP, Brasil.

E-mail: artur.sartorti@ucb.org.br

2 Engenheiro Civil pelo Centro Universitário Adventista de São Paulo, UNASP (2013). Mestre em Estrutura e Construção Civil pela UFSCar (2016). Doutorando do Programa de pós-graduação em Engenharia Civil – UFSCar. Professor do Centro Universitário Adventista de São Paulo, UNASP, Brasil.

E-mail: lucas.barboza@ucb.org.br

3 Engenheira Civil pelo Centro Universitário Adventista de São Paulo, UNASP (2015), Brasil.

E-mail: ellenoliveira_12@hotmail.com

4 Engenheira Civil pelo Centro Universitário Adventista de São Paulo, UNASP (2015), Brasil.

E-mail: kevinbrito@hotmail.com

5 Engenheira Civil pelo Centro Universitário Adventista de São Paulo, UNASP (2015), Brasil.

E-mail: thaillyslima@gmail.com

Revista de Engenharia Civil IMED, Passo Fundo, vol. 5, n. 1, p. 32-51, Jan.-Jun. 2018 - ISSN 2358-6508

[Recebido: Outubro 02, 2017; Aceito: Dezembro 14, 2017]

DOI: <https://doi.org/10.18256/2358-6508.2018.v5i1.2173>

Endereço correspondente / Correspondence address

Artur Lenz Sartorti

Estrada Municipal Pr. Walter Boger, s/n, km 3,4, Bairro

Lagoa Bonita, Engenheiro Coelho – SP.

CEP: 13165-000

Sistema de Avaliação: *Double Blind Review*

Editora-chefe: Luciana Oliveira Fernandes

Como citar este artigo / How to cite item: [clique aqui! / click here!](#)

Resumo

Uma das grandes desvantagens, para determinadas aplicações, do concreto convencional é seu peso próprio elevado. A resistência à compressão do concreto leve é menor quando comparada ao concreto convencional, porém a principal característica apresentada pelo concreto leve é a baixa massa específica, que gera uma redução de seu peso próprio nas estruturas. Portanto, o concreto com agregados leves apresenta uma vantagem nesta característica. Este artigo tem por objetivo comparar os módulos de elasticidade estático e dinâmico de concretos com agregados leves: argila expandida, pedra pomes, poliestireno expandido (EPS) e vermiculita, contrapostos a um concreto de referência com agregado graúdo basáltico. Os resultados indicam que a determinação do módulo de elasticidade dinâmico, além de ser muito mais simples de ser obtido, possui uma boa proximidade com o módulo de elasticidade estático para concretos leves.

Palavras-chave: Concreto leve. Módulo de elasticidade estático. Módulo de elasticidade dinâmico.

Abstract

One of the major disadvantages, for specific applications, of conventional concrete is its high self weight. The compression resistance of lightweight concrete is smaller when compared to conventional concrete, although the main characteristic presented by lightweight concrete is its low specific mass, that generates a reduction of its self weight in the structures. Therefore, the concrete with light aggregates presents a new advantage in this characteristic. This article has the objective to compare the static and dynamic resilient modulus of concrete with lightweight aggregates: expanded clay, pumice stone, expanded polystyrene (EPS), vermiculite, counterposed to a reference concrete with basalt aggregate. The results indicate that the determination of dynamic resilient modulus, besides being much simpler to obtain, it has a good proximity with the static resilient modulus to lightweight concrete.

Keywords: Lightweight concrete. Static resilient modulus. Dynamic resilient modulus. Non-destructive testing. Natural frequencies.

1 Introdução

Os agregados leves em concretos têm sido utilizados desde a antiguidade, como pode ser observado na cobertura do Panteão em Roma. Atualmente o concreto leve é empregado na construção civil como material estrutural em pré-fabricados ou em estruturas convencionais moldadas *in loco*, destacando-se a execução de lajes. O desenvolvimento de estudos nessa área se torna importante devido à desvantagem do alto peso próprio do concreto convencional.

Uma propriedade importante do concreto em geral é o módulo de elasticidade, ou de *Young*, por estar diretamente associada à resistência a compressão do mesmo (GAGLIARDO *et al.*, 2013). Com a alteração do agregado graúdo na composição do concreto, o módulo de elasticidade consequentemente será influenciado. Dentre as características que afetam o módulo de elasticidade do concreto, a principal é a porosidade em relação ao agregado graúdo, ou seja, a porosidade do agregado determina a sua rigidez, que por sua vez, controla a capacidade do agregado de restringir a deformação da matriz (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Neville (2016) afirma, que agregados densos possuem um módulo de elasticidade mais alto. Em geral, quanto maior a quantidade de agregados graúdos com alto módulo de elasticidade em uma mistura de concreto, maior será o módulo de elasticidade do concreto. Em concretos de alta resistência, por exemplo, as propriedades elásticas do agregado graúdo influenciam fortemente seu módulo de elasticidade (NETO *et al.*, 2011).

Segundo a NBR 6118: 2014 (ABNT, 2014) a deformação elástica do concreto depende fundamentalmente da sua composição, especialmente o tipo de agregado empregado. Portanto, os valores obtidos nesta referida norma devem ser verificados por ensaios específicos em caso de estruturas especiais, pois o módulo de elasticidade do concreto é sensível ao módulo do agregado e pode diferir do valor especificado.

A obtenção do módulo de elasticidade estático do concreto apresenta dificuldades devido ao material ser heterogêneo (CANESSO *et al.*, 2008). Porém, a utilização de ensaios não destrutivos (END) oferece benefícios de agilidade além de não levar a amostra à ruína. Via de regra, os END são ensaios simples, rápidos e que possibilitam o acompanhamento da estrutura durante sua vida útil.

Ao oposto do ensaio dinâmico tem-se o ensaio para determinação do módulo de elasticidade estático, que é um ensaio destrutivo devido à fissuração causada pela aplicação de uma carga sobre o corpo de prova (CP) de forma que este não pode ser refeito (GAGLIARDO *et al.*, 2013).

Devido à importância do módulo de elasticidade do concreto leve, o objetivo deste trabalho é comparar os resultados de módulo de elasticidade obtidos entre o ensaio estático e o ensaio dinâmico por resposta acústica e analisar a influência que cada tipo de agregado leve utilizado teve nos resultados.

Os agregados graúdos leves analisados são argila expandida, pedra pomes, poliestireno expandido (EPS) e vermiculita. Para efeitos de comparação também é analisado um concreto de referência, utilizando o basalto como agregado graúdo. Todos os agregados citados foram usados para a moldagem de corpos de prova e então submetidos aos ensaios dinâmicos e estáticos.

2 Agregados leves pesquisados

Como é de conhecimento geral o concreto convencional é composto de cimento Portland, agregado miúdo (normalmente areia), agregado graúdo, e água. Para a confecção de um concreto leve é necessário substituir um dos seus elementos, neste caso o agregado graúdo ou parte do agregado miúdo. Esta mudança por si só demonstra uma diminuição considerável no peso específico, o material substituído deve manter essa característica no concreto. Entretanto, a utilização de agregados leves diminui consideravelmente a resistência e o módulo de elasticidade do material resultante, devido a, geralmente, ser muito porosa a estrutura do agregado leve.

Os quatro agregados leves que foram utilizados nesta pesquisa têm diferentes características, sendo a baixa massa específica a única característica comum entre eles. No qual apresentam respectivamente massa específica de 1,11 g/cm³ para argila expandida, 1,60 g/cm³ para pedra pomes, poliestireno expandido 0,18 g/cm³ e por fim para vermiculita 0,14 g/cm³.

A expansão de argilas especiais expostas a altas temperaturas em grandes fornos rotativos tem como resultado a argila expandida. Ela é um produto leve e de boa resistência mecânica (FREITAS Jr., 2013). Ela tem um elevado desempenho estrutural com resistências à compressão superiores a 30 MPa e a massa específica variável entre 1.200 e 1.950 kg/m³ (CINEXPAN, 2015).

Rocha ígnea, cor clara, baixa densidade, e elevada porosidade são os atributos da pedra pomes (ROSSIGNOLO, 2009). É muito conhecida pela área de produtos cosméticos, sendo utilizada para a esfoliação da pele, porém tem sido usada na fabricação do concreto leve a mais de 2500 anos.

O poliestireno expandido (EPS), por sua vez, é muito utilizado no ramo da construção civil por ser de fácil controle e baixo custo (SANTOS *et al.*, 2013). Sua utilização é comum em lajes nervuradas treliçadas no formato de lajotas de enchimento, diminuindo consideravelmente o peso próprio da laje já que é um material composto por 98% de ar (SARTORTI, 2015).

Como último agregado citado aparece a vermiculita, de origem mineral ela é caracterizada pela superposição de lâminas finas que submetidas a altas temperaturas se expandem até vinte vezes do seu volume original. O resultado é um material de baixa densidade e condutibilidade, incomburente, indissolúvel em água, não tóxico nem abrasivo, inodoro e que não se deteriora (CATAI *et al.*, 2006).

Devido a essas características distintas de cada agregado, cada amostra de concreto teve suas particularidades no preparo e na moldagem. Os procedimentos utilizados para confecção dos CP's são descritos ao comentar a moldagem das amostras.

3 Moldagem dos corpos de prova

Para cada tipo de concreto foram moldados 6 CP's cilíndricos de 10 x 20 cm (diâmetro x altura). Com exceção dos CP's com EPS, que foram curados envoltos em lona plástica, todos os demais CP's com outros agregados foram submetidos à cura úmida por submersão. O processo de confecção de todos CP's até a sua cura está de acordo com a NBR 5738:2015 (ABNT, 2015). As quantidades dos materiais usadas para produzir cada concreto estão indicadas na Tabela 1.

Tabela 1. Massas/volume das amostras de concreto

Material	Cimento (kg)	Areia (kg)	Água (kg)	Agregado graúdo (kg)	Super Plastificante (g)
EPS	3,00	3,00	0,87	6,00 L*	30,00
Vermiculita	5,00	8,00	4,50	1,10	-
Pedra Pomes	7,00	14,00	3,50	1,75	-
Argila expandida	6,41	12,82	3,21	8,82	-
Basalto	6,67	13,33	3,33	13,33	-

* Devido o EPS ser um material com densidade muito baixa sua quantidade está representada em volume. Salienta-se que esta é uma prática convencional nas dosagens de concreto com EPS como pode ser visto em Catoia (2012).

Fonte: Os autores.

Após 28 dias os CP's foram retirados da cura e colocados em uma estufa a 105 °C por 24 horas para secar. Na condição seca os CP's, antes de serem ensaiados, foram pesados. A Tabela 2 apresenta os valores das massas de cada CP utilizado no trabalho de acordo com as nomenclaturas adotadas. Como se pode observar, o material mais leve é o EPS, e em ordem crescente vem: vermiculita, argila expandida, pedra pomes e por fim o basalto.

A massa dos agregados tem grande influência no peso específico do concreto e na determinação do seu módulo de elasticidade. Comparando a densidade, que é por definição a massa dividida pelo volume, enquanto a de um concreto estrutural convencional é cerca de 2400 kg/m³, a de um concreto estrutural leve fica reduzida para 1800 kg/m³ nos concretos com areia leve considerando que a mesma quantidade dos outros materiais fosse mantida (BREMNER, 1998). As densidades das amostras de concreto leve obtidas neste trabalho variam de 1172,65 kg/m³ para o EPS até 1480,14 kg/m³ para a argila expandida, em comparação com 2191,88 kg/m³ do concreto com

basalto. As vantagens que resultam desta redução de peso podem acabar compensando os custos adicionais de produzir, manusear e transportar os agregados leves.

Tabela 2. Valores e Média das Massas dos CP's (kg)

Argila Expandida		Basalto		EPS		Pedra Pomes		Vermiculita	
AE 1	2,329	B 1	3,450	EPS 1	1,799	PP 1	2,622	V 1	2,340
AE 2	2,331	B 2	3,456	EPS 2	1,850	PP 2	2,569	V 2	2,264
AE 3	2,322	B 3	3,414	EPS 3	1,906	PP 3	2,680	V 3	2,374
AE 4	2,346	B 4	3,452	EPS 4	1,840	PP 4	2,694	V 4	2,444
AE 5	2,323	B 5	3,400	EPS 5	1,821	PP 5	2,629	V 5	2,163
AE 6	2,297	B 6	3,486	EPS 6	1,833	PP 6	2,666	V 6	2,344
Média	2,325	Média	3,443	Média	1,842	Média	2,643	Média	2,322

Fonte: Os autores.

A sequência dos ensaios seguiu a ordem de primeiramente avaliar o módulo de elasticidade dinâmico por meio de resposta acústica utilizando o equipamento Sonelastic®. Posteriormente, os CP's foram capeados, com caulim e enxofre, e então foram executados os ensaios de módulo de elasticidade estático.

4 Ensaios de módulo de elasticidade

Neste item são descritas as principais características dos ensaios dinâmicos e estáticos para a determinação do módulo de elasticidade.

4.1 Módulo de elasticidade dinâmico

Para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico, foi utilizada a técnica de END de resposta acústica por impulso com o equipamento Sonelastic®, ilustrado na Figura 1. Este aparelho pode ser definido como sendo um conjunto de soluções para a caracterização não destrutiva dos módulos elásticos e do amortecimento de materiais, baseado na técnica de excitação por impulso.

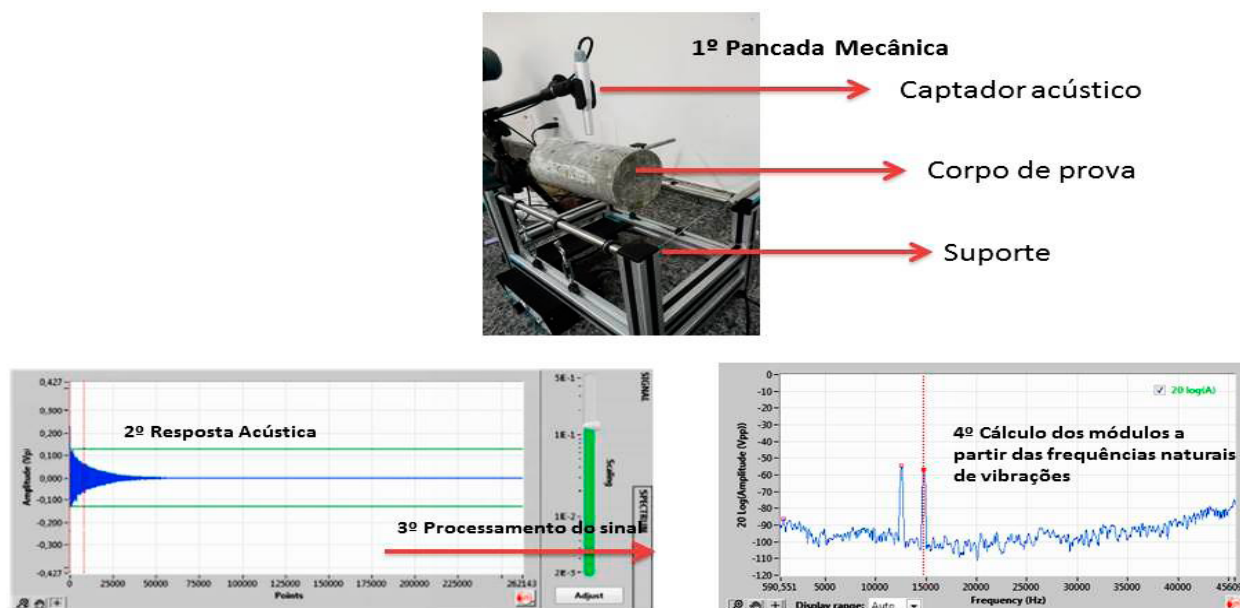
Figura 1. Visão geral do Sonelastic®

Fonte: Os autores.

O funcionamento do Sonelastic® é simples. Através de um impacto no CP ensaiado gera-se um som que é captado por um microfone. Este sinal é analisado levando-se em conta a massa e as dimensões do CP, facilmente medidas com paquímetro e balança (ATCP, 2015). Há muitas vantagens neste equipamento, sendo algumas delas:

- ♦ Procedimento de medição rápido e prático (DIÓGENES *et al.*, 2012);
- ♦ Alto grau de precisão, até 10 vezes mais preciso que ensaios estáticos (ATCP, 2015);
- ♦ Montagem simples, pois não demanda a fixação de sensores (DIÓGENES *et al.*, 2011).

Para que os resultados do ensaio dinâmico sejam obtidos o CP deve ser suportado por fios em seus pontos nodais, no sentido da vibração de interesse. A haste utilizada para gerar o impacto tem massa calibrada para excitar as frequências naturais de interesse. O som é captado por um microfone posicionado no outro lado do objeto. Quando se trata de peças com geometrias simples, como cilindros, barras, placas, etc., existe uma relação entre as frequências naturais de vibração com as dimensões e massas do objeto de estudo (GAGLIARDO *et al.*, 2013). Esta vibração do corpo é proporcional ao módulo de elasticidade associado à direção da vibração. Portanto, o sinal é processado através de uma Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* – FFT) identificando as frequências naturais de interesse (ATCP, 2015). A Figura 2 resume em quatro passos o processo de funcionamento do equipamento: 1º Pancada Mecânica, 2º Resposta Acústica, 3º Processamento do sinal e 4º Cálculo do módulo de elasticidade a partir das frequências naturais de vibração com a formulação da ASTM E1876-1:2005.

Figura 2. Esquema de funcionamento do Sonelastic®

Fonte: Adaptada de Gagliardo *et al.* (2013).

Uma particularidade neste sistema é que a placa de áudio do próprio computador é utilizada, não sendo necessário o uso de *hardwares* adicionais (DIÓGENES *et al.*, 2012). O ensaio é feito em segundos e repetido quantas vezes forem necessárias.

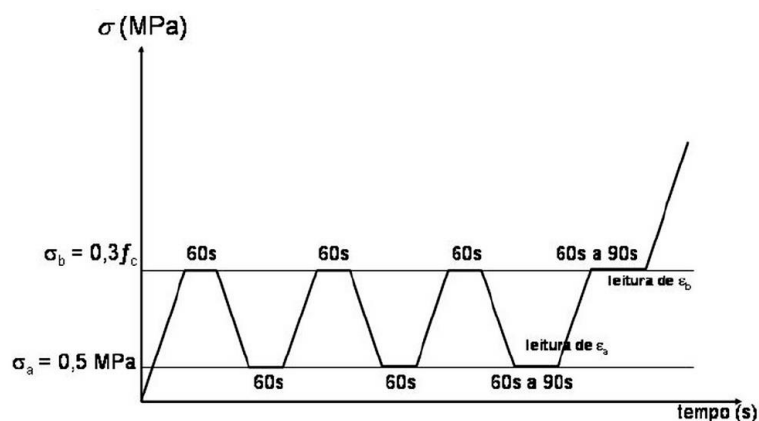
4.2 Módulo de elasticidade estático

Ao contrário do ensaio dinâmico o processo do ensaio estático demanda mais tempo, podendo um ensaio levar até 30 minutos para ser executado. O ensaio para determinação do módulo de elasticidade estático é regido pela norma NBR 8522:2008 (ABNT, 2008). Para a execução deste ensaio é necessário antes determinar a resistência estimada à compressão de cada CP, de acordo com o que estabelece a NBR 5739:2007 (ABNT, 2007), para que o CP não atinja seu limite, rompendo e inutilizando todo o processo.

A Figura 3 ilustra o esquema de carregamento usado no tipo de metodologia utilizada no trabalho. A pesquisa foi conduzida utilizando a Metodologia A, em que a tensão s_a é fixa, e suas etapas são descritas no item 6.2.2.1 da NBR 8522:2008 (ABNT, 2008).

É ainda possível observar na Figura 3 que ao final da leitura da deformação e_p o carregamento continua até a ruptura, desta forma é então obtida a resistência efetiva ($f_{c,ef}$) de cada CP à compressão. A Figura 4 ilustra o ensaio de compressão, o ensaio de módulo de elasticidade estático em diferentes CP's e a ruptura de um deles.

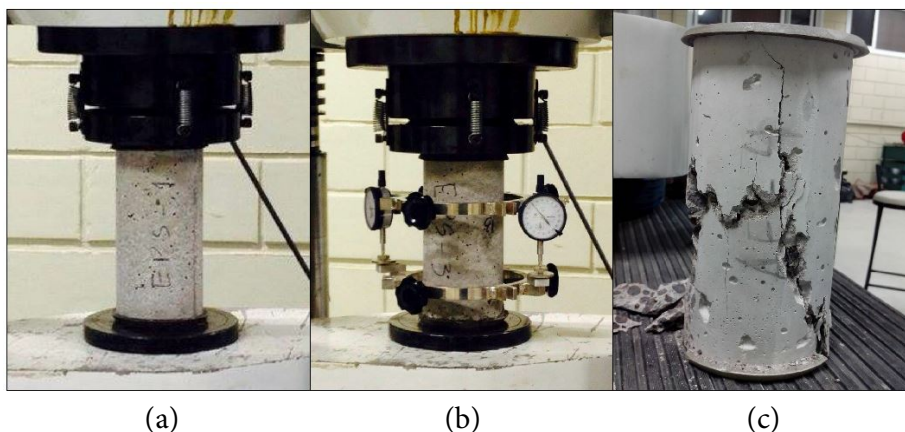
Figura 3. Representação esquemática do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade - Metodologia A



Fonte: NBR 8522:2008.

Sendo: s_a e s_b tensões aplicadas no corpo de prova; f_c a tensão máxima de compressão resistida pelo concreto; e_b e e_s deformações lidas nos instantes determinados; s o tempo em segundos.

Figura 4. Exemplo de (a) ensaio de compressão, (b) ensaio de módulo de elasticidade estático, e (c) CP após a ruptura



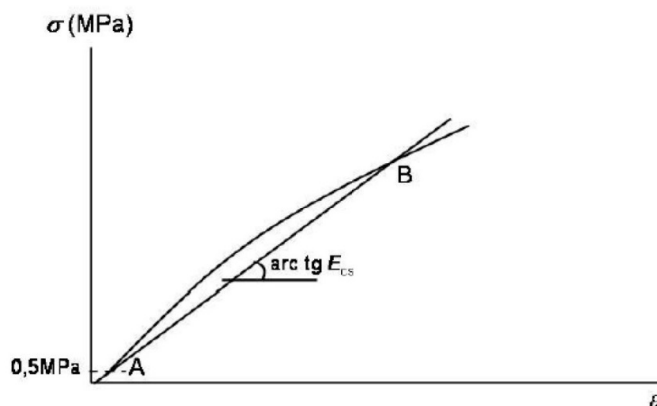
Fonte: Os autores.

A relação entre as tensões axiais de compressão e as deformações específicas do concreto é afetada pelo método de ensaio utilizado e pelas características do concreto. A análise elástica do concreto é importante na determinação de esforços solicitantes e no diagnóstico do comportamento de suas estruturas em geral. Neste ensaio o comportamento elástico aproximado do concreto é apresentado. Isso resulta do fato de que o comportamento do concreto sob tensões normais de compressão não apresenta um trecho linear-elástico em sua curva de tensão-deformação, como prevê a Lei de Hooke (ALMEIDA, 2012).

Através da NBR 8522:2008 (ABNT, 2008) é possível obter-se tanto o módulo de elasticidade secante (E_{cs}) quando o módulo de elasticidade tangente inicial (E_{ci}). Almeida (2012) define o módulo de elasticidade secante (E_{cs}) como a propriedade do concreto

cujo valor numérico é o coeficiente angular da reta secante ao diagrama tensão-deformação específica, passando pelos pontos A e B correspondentes, respectivamente à tensão de 0,5 MPa e à tensão considerada no ensaio, como ilustra a Figura 5.

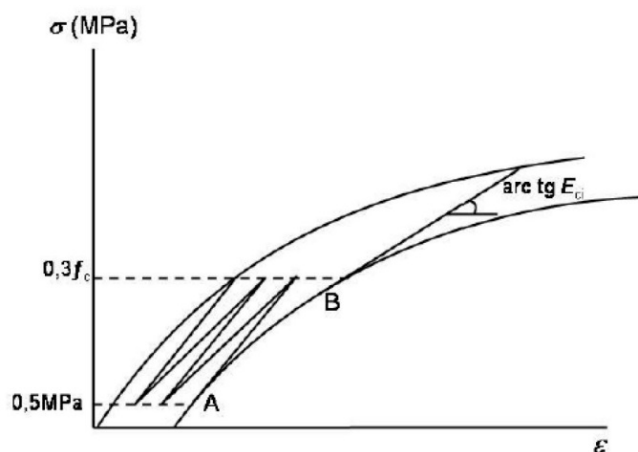
Figura 5. Representação do módulo de deformação secante, E_{cs}



Fonte: Almeida (2012).

O módulo de elasticidade resultante entre 0,5 MPa e 30% de f_c , também chamado de módulo de deformação cordal, é o módulo de elasticidade tangente inicial (E_{ci}). A Figura 6 demonstra no gráfico o módulo de deformação tangente inicial (E_{ci}), que pode ser considerado como módulo de elasticidade quando se trabalha com o material no regime elástico (ALMEIDA, 2012).

Figura 6. Representação do módulo de deformação tangente inicial, E_{ci}



Fonte: Almeida (2012).

5 Comparação entre o ensaio dinâmico e o ensaio estático

Segundo Diógenes *et al.* (2011) a dificuldade para determinar o módulo de elasticidade estático é devido a não linearidade da curva tensão *versus* deformação. Diferente do módulo de elasticidade dinâmico que possui uma linearidade, além de ser obtido com facilidade sem provocar fissuras na amostra.

As diferenças são inúmeras, como em relação à facilidade da execução dos ensaios, precisão dos resultados, tempo de realização entre outras. O ensaio dinâmico apresenta facilidades por ser realizado em poucos segundos, enquanto o estático pode demorar até 30 minutos para ser executado, além de seus resultados apresentarem uma margem de erro menor em comparação com o estático. A deterioração completa do material é mais uma desvantagem do estático em relação ao dinâmico, sendo este último realizado sem nenhum tipo de fissura (GAGLIARDO *et al.*, 2013). A Tabela 3 ilustra algumas dessas diferenças.

Tabela 3. Comparação entre os métodos estáticos e dinâmicos

	Ensaio destrutivo	Incerteza na medida	Tempo de medida	Amostras caracterizáveis	Constantes elásticas	Medida em função da temperatura
Métodos quase estáticos	Sim	15% ou mais	**	Principalmente metais	Foco no E	Difícil
Métodos dinâmicos	Não	< 2%	Segundos	Qualquer material sólido	E, G e ν	Fácil

Sendo: E o módulo de elasticidade; G o módulo de elasticidade transversal; ν o coeficiente de Poisson.
 ** Depende do equipamento e de quem executa.

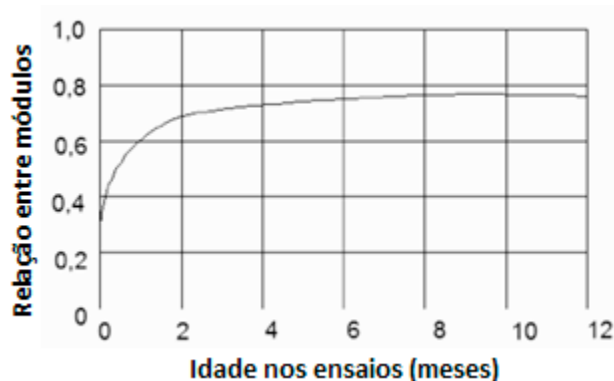
Fonte: Adaptado de GAGLIARDO *et al.* (2013).

6 Fatores que influenciam o módulo de elasticidade

Alguns fatores influenciam na relação entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico, tais como:

- ♦ **Idade:** De acordo com Neville (2016) a razão entre os módulos (estático e dinâmico) tendem a um valor final de 0,8, como mostra a Figura 7;

Figura 7. Relação entre os módulos estáticos e dinâmicos do concreto em idades diferentes



Fonte: Neville (2016).

- ♦ **Resistência:** Segundo Neville (2016), em concretos diferentes, a relação entre módulos é tanto maior quanto maior a resistência do concreto;
- ♦ **Temperatura de cura:** O aumento da temperatura faz com que o valor estático se aproxima do valor de dinâmico (LYNDON; BALADRAN, 1986);
- ♦ **Proporções da mistura e propriedades dos agregados:** O módulo dinâmico aumenta quanto maior a quantidade de agregado para a mesma relação água/cimento e o aumento da quantidade de água ou do teor de ar incorporado reduz o módulo dinâmico (MALHOTRA, 1986);
- ♦ **Tamanho de corpo de prova:** Quanto maior a amostra, menor a frequência de ressonância (DIÓGENES *et al.*, 2011);
- ♦ **Condições de cura:** O concreto é mantido úmido, o módulo aumenta com a idade e se o concreto for exposto à secagem, o módulo reduz com a idade (MALHOTRA, 1986).

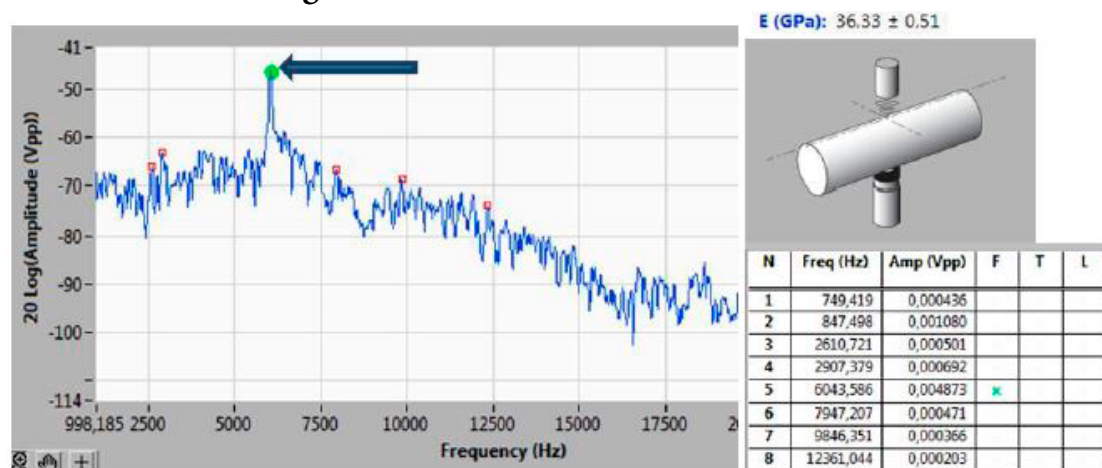
Nos CP's objetos deste estudo, os fatores que mais diferem entre as amostras de concreto leve são consequentemente as proporções da mistura e propriedades dos agregados.

7 Resultados

No presente item são apresentados os resultados obtidos no programa experimental.

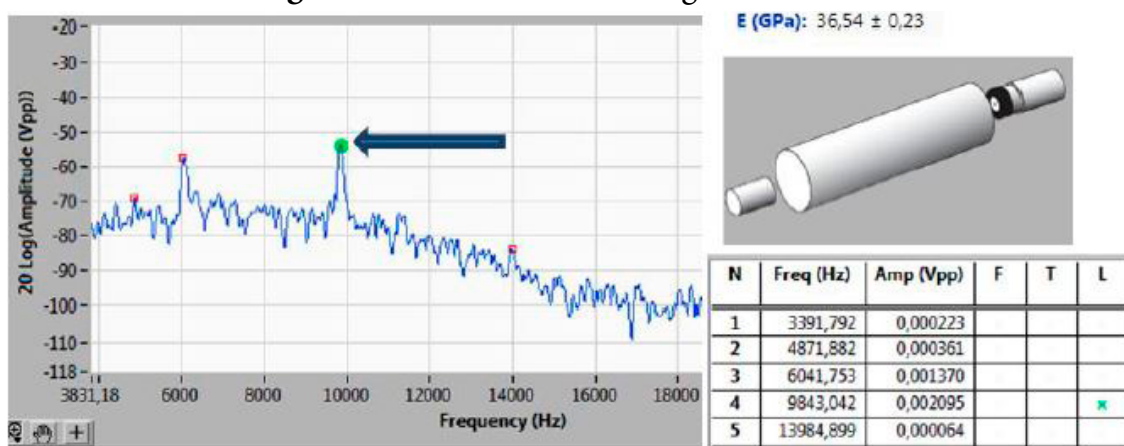
7.1 Ensaio de módulo de elasticidade dinâmico

Como já foi comentado anteriormente o resultado de módulo de elasticidade neste tipo de ensaio é obtido através da identificação das frequências naturais o corpo de prova. Os dois principais tipos de frequências naturais são a longitudinal e a flexional, ou flexural como também é conhecida. Essas diferentes frequências naturais são captadas através da mudança de posicionamento do receptor acústico e do impacto no CP ensaiado. No modo flexional o microfone é posicionado na parte inferior central do CP deitado com o golpe paralelo ao microfone, como ilustra a Figura 8. No longitudinal, como é ilustrado na Figura 9, a captação é feita na extremidade do corpo de prova, do lado contrário de onde a repercussão acústica é gerada (ASTM C215, 2008).

Figura 8. Ensaio dinâmico flexional

Fonte: Gagliardo *et al.* (2013).

Uma maneira de captar ambos os modos é posicionando o microfone acima do centro de gravidade da lateral do CP e a batida feita na extremidade contrária, isso porque as frequências dos dois modos costumam aparecer em todos os ensaios e cabe ao pesquisador saber interpretá-las (GAGLIARDO *et al.*, 2013). Esta foi a forma utilizada para a leitura das frequências naturais nesta pesquisa. Portanto, cada ensaio foi realizado no mínimo duas vezes, o que não é uma dificuldade já que o ensaio é feito em segundos.

Figura 9. Ensaio dinâmico longitudinal

Fonte: Gagliardo *et al.* (2013).

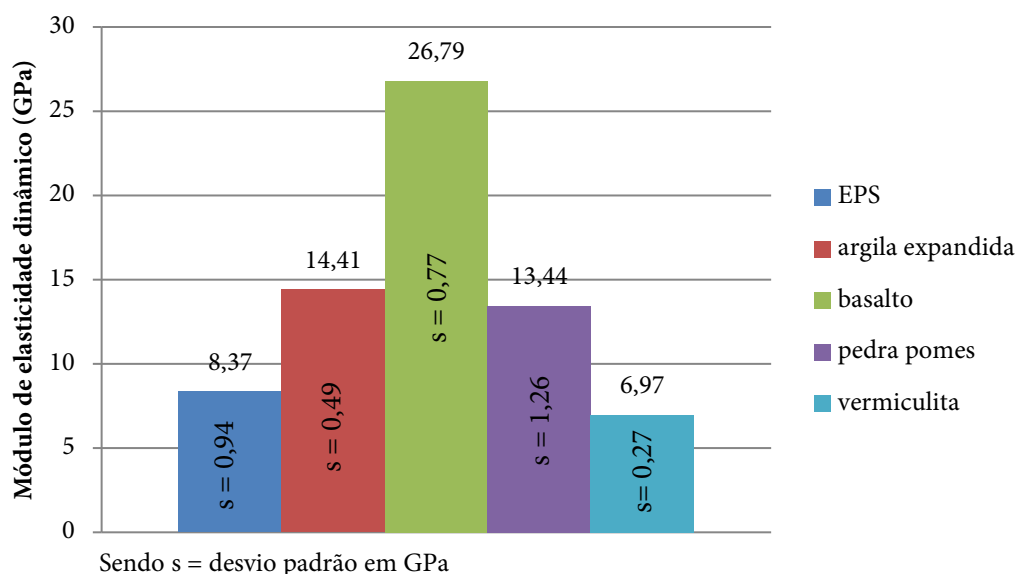
Sartorti (2015) destaca que o módulo de elasticidade é uma propriedade única do material. A frequência longitudinal ou flexural apenas diferencia a forma de aquisição do mesmo módulo de elasticidade.

Na Figura 10 podem ser observados os resultados obtidos no ensaio de módulo de elasticidade dinâmico, sendo os resultados uma média dos valores obtidos nos modos flexional e longitudinal para os 6 CP's de cada concreto. É possível notar que o concreto de referência com o agregado basalto tem o valor maior em destaque. A média para essa amostra de concreto com basalto foi de 26,79 GPa, com um desvio padrão de

0,77. Por exemplo, a relação entre o concreto com basalto e o concreto leve com argila expandida, indica que o concreto constituído com argila expandida apresenta uma redução no módulo de elasticidade dinâmico de 46,2%.

Uma singularidade observada é em relação ao concreto com pedra pomes com módulo de elasticidade em média de 13,44 GPa com desvio padrão de 1,26 GPa. É possível perceber que apesar de o valor médio da pedra pomes ser aproximado ao módulo de elasticidade dinâmico da argila o agregado sofre uma inconstância nos resultados. Isso é demonstrado pelo valor do seu desvio padrão, o maior da amostra, de 1,26 GPa.

Figura 10. Resultado do módulo de elasticidade dinâmico



Fonte: Os autores.

7.2 Ensaio de módulo de elasticidade estático

Os valores de módulo de elasticidade estático não são obtidos instantaneamente, como no ensaio dinâmico. É necessário calcular, utilizando os valores das leituras obtidas nos relógios, de acordo com NBR 8522:2008 (ver Figura 3). A deformação é calculada pela Equação 1 e o módulo de elasticidade estático tangente inicial pela Equação 2.

$$\varepsilon = \frac{\Delta \ell}{L} \quad \text{Eq. 1}$$

Sendo: $\Delta \ell$ a relação entre os valores dos relógios; L a distância fixa entre garras do compressômetro.

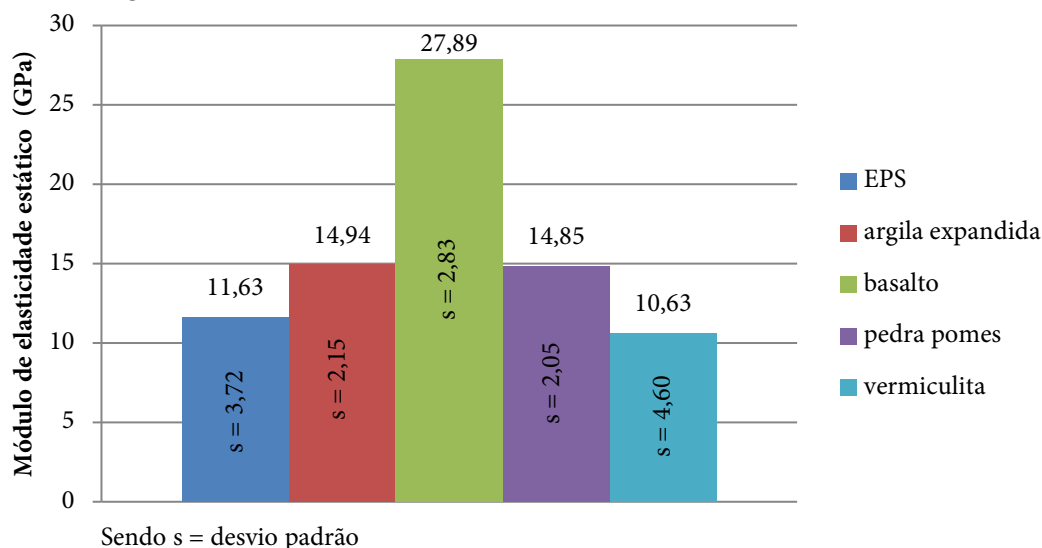
$$E_e = \frac{\sigma_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \quad \text{Eq. 2}$$

Sendo: s_b a tensão maior, em MPa, ($s_b = 0,3 f_c$); 0,5 a tensão básica, em MPa; ε_b a deformação específica do corpo de prova sob a tensão s_b , conforme a Equação 1; ε_a

a deformação específica do corpo de prova sob a tensão básica (0,5 MPa); f_c a tensão resistente à compressão do corpo de prova.

Após o cálculo do módulo de elasticidade estático apresentado, obtiveram-se os resultados representados na Figura 11.

Figura 11. Resultados do módulo de elasticidade estático

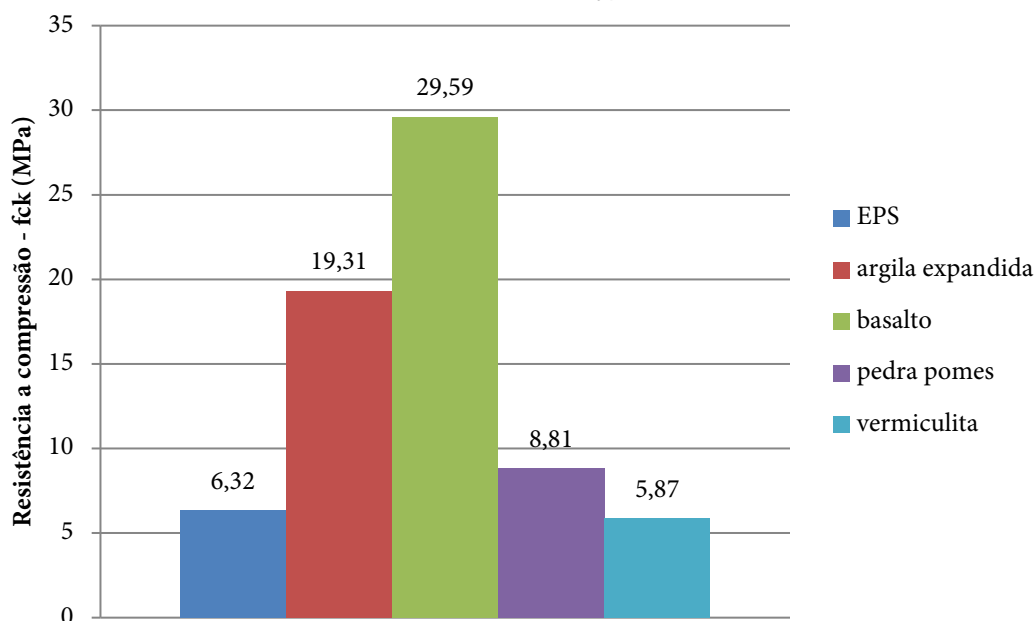


Fonte: Os autores.

Como pode ser observado, o ensaio estático possui uma grande variação nos seus resultados quando se analisa o desvio padrão.

Analisando os CP's de EPS, nota-se que os resultados possuem um grande desvio padrão. Porém, os resultados do módulo de elasticidade do agregado leve EPS, de acordo com Catoia (2012), variam entre 9 GPa a 12 GPa para módulo de elasticidade tangente inicial, e 8 GPa a 11 GPa para o módulo de elasticidade secante, portando encontra-se dentro do esperado.

Segundo Schwantes (2012), os resultados para o módulo de elasticidade em concretos com argila expandida ficam entre 14 GPa e 18 GPa, sendo assim, observa-se que o resultado obtido de 14,94 GPa está coerente com o esperado. Dentre os agregados leves, ilustrados na Figura 11, a argila expandida apresentou a maior média de módulo de elasticidade. Entretanto, o mais interessante foi o valor obtido do f_{ck} , apresentado na Figura 12. Sua resistência foi alta, superior aos demais agregados leves, podendo assim, ser comparada até mesmo com a resistência de um concreto de referência, neste caso o basalto.

Figura 12. Resultados de f_{ck} em MPa

Fonte: Os autores.

De todos os agregados leves o que demonstrou menor desempenho, tanto no módulo de elasticidade quanto na resistência, foi a vermiculita. Seu resultado é de aproximadamente 60% menor que o módulo de elasticidade do basalto, e aproximadamente 30% menor que o agregado leve de melhor desempenho, a argila expandida.

8 Análise comparativa entre os ensaios estáticos e dinâmicos

Em ambas as metodologias de ensaios de módulo de elasticidade, o desempenho das amostras de concreto com diferentes agregados segue o mesmo padrão. A argila expandida, com 14,94 GPa no ensaio estático e com média de 14,41 GPa no ensaio dinâmico foi a que obteve os melhores resultados dentre os agregados leves.

É importante observar que o valor maior do seu módulo de elasticidade é compatível com o valor maior de sua resistência à compressão, ilustrada na Figura 12, que está com média de 23,36 MPa. Isso não acontece ao se analisar os CP's de concreto com pedra pomes. Apesar do seu módulo de elasticidade, tanto no ensaio dinâmico quanto no ensaio estático, ter apresentado o segundo maior valor para os agregados leves, próximo a argila expandida, sua resistência à compressão não acompanha o mesmo parâmetro. O f_{ck} do concreto com pedra pomes é 55% menor que o da argila expandida. Algo semelhante acontece ao analisar os resultados dos concretos com EPS e com vermiculita. No ensaio estático o valor do módulo de elasticidade de ambos é equivalente, mas da mesma forma a resistência à compressão não acompanha o parâmetro. Observando o ensaio estático desses dois agregados a diferença de módulo de elasticidade se torna maior.

Os concretos com agregados leves em comparação com a amostra de concreto de referência, têm claramente um módulo de elasticidade menor, tanto no ensaio dinâmico quanto no ensaio estático. Em relação com a argila expandida, a diferença é aproximadamente 46% menor no valor do módulo de elasticidade obtido em ambos os ensaios. Esta diferença é esperada devido a diferença de densidade dos materiais. No entanto, é preciso observar que a argila expandida é também um material muito mais leve que o basalto, como é visto na Tabela 2. A amostra de concreto com basalto é 32,5% mais pesada que a de argila expandida. E comparando então o valor das resistências obtidas, o concreto com argila expandida resiste 72,4% do concreto de referência.

Ao analisar apenas os valores dos dois ensaios (estático *versus* dinâmico), é interessante observar que o ensaio dinâmico proporcionou valores do módulo de elasticidade inferiores aos valores do ensaio estático. Segundo Mehta e Monteiro (2014), os módulos de elasticidade do ensaio dinâmico são 20%, 30%, ou 40% maiores que os valores de módulo estático, o que não foi observado nesta pesquisa. Alguns fatores podem ter sido causadores desta diferença, entre outros: capeamento com enxofre e caulim para a avaliação do módulo estático; quantidade reduzida de CP's; grande desvio padrão dos ensaios estáticos; e a indicação de Mehta e Monteiro (2014) refere-se a concretos de densidade normal.

Analisando os ensaios de forma geral é possível comparar seus desvios padrão, observando que no ensaio dinâmico é menor que o ensaio estático, chegando a mais de 50% de diferença. Assim, o ensaio dinâmico se torna menos variável e com proporção de erro inferior, sendo indicado como uma conveniente alternativa em relação ao ensaio estático.

9 Considerações finais

Mediantes aos resultados apresentados pode-se concluir que o agregado leve que apresentou o melhor desempenho frente ao módulo de elasticidade foi a argila expandida, tendo seus valores comparados ao basalto. O f_{ck} do concreto com argila também foi próximo ao concreto com basalto, resultando aproximadamente 20 MPa, como mostra a Figura 12.

Dentre os métodos estudados para determinação do módulo de elasticidade, dinâmico e estático, obtiveram-se algumas dificuldades neste último ensaio devido a não precisão do método, por ser um ensaio destrutivo não permitindo repetição. Ele também gera uma curva não linear tendo assim que descartar alguns resultados para a análise. Em comparação com ensaio dinâmico, a discrepância é grande. Este não apresentou nenhuma inconveniência, sendo possível ensaiar os CP's quantas vezes foi preciso, boa precisão, um ensaio simples e prático.

O objetivo deste trabalho foi alcançado proporcionando uma comparação entre os ensaios, dinâmico e estático, e analisando a influência que cada tipo de agregado leve possui sobre o módulo de elasticidade do concreto.

Destaca-se que os resultados carecem de maiores repetições para que possa ser ratificada a observação de que os concretos com agregados leves possuem módulo estático e dinâmico com valores próximos.

Referência bibliográfica

ALMEIDA, S. M. *Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto de cimento Portland através de ensaios de compressão simples e de frequência ressonante*. Tese (mestrado) – Programa de Pós-graduação em Construção Civil – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. C215-08: Standard Test method for fundamental transverse, longitudinal and torsional frequencies of concrete specimens. Philadelphia, 2008.

_____. E1876-1: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. Philadelphia, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Concreto – Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, 2015.

_____. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2007.

_____. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 221p.

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

ATCP, *Engenharia Física*. Disponível em: <<http://www.atcp.com.br/pt/produtos/caracterizacao-materiais/sonelastic.html>>.

BREMNER, T. W. Concreto de agregado leve. In: 40° IBRACON, 1998, Rio de Janeiro. *Anais do 40° Congresso Brasileiro do Concreto*. Ibracon, 1998. Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/37/artigo287164-1.aspx>>.

CANESSO, F.A.C.; CORREA, E.C.S.; SILVA, A.P.E.; AGUILAR, M.T.P.; CETLIN, P. R. *Módulo de elasticidade dinâmico e estático do concreto*. 18° CBECIMat, 2008, Porto de Galinhas. 18° Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2008.

CATAL, R. E.; PENTEADO, A. P.; DALBELLO, P. F. *Materiais, Técnicas e Processos para Isolamento Acústico*. In: 17° CBECIMat, 2006, Foz do Iguaçu. 17° Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2006.

CATOIA, T. *Concreto Ultraleve® estrutural com pérolas de EPS: caracterização do material e estudo de sua aplicação em lajes*. 154f. Tese (Doutorado) – Escola e Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

CINEXPAN, *Argila Expandida*. Disponível em: <<http://www.cinexpan.com.br/argila-expandida-leve-resistente.html>>.

DIÓGENES, H. J. F.; COSSOLINO, L. C.; PEREIRA, A.H.A.; EL DEBS, M. K.; EL DEBS, A.L.H.C. Determinação do módulo de elasticidade do concreto a partir da resposta acústica. In: IBRACON, 2011. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, Volume 2, número 5. Ibracon, 2011. p. 792-813.

- DIÓGENES, H. J. F.; HAACH, V. G.; CARRAZEDO, R.; BELLUCIO, E. K.; DEBS, M. K. E. *Avaliação experimental de prismas de concreto com fibras de aço utilizando ensaios não-destrutivos caseados na resposta acústica*. In: 54° IBRACON, 2012, Maceió. Anais do 54° Congresso Brasileiro do Concreto. Ibracon, 2012.
- GAGLIARDO, D. P.; GAGLIARDO, J. C.; BARBOZA, L. S.; SILVA, M. B. M.; MASCIA, N. T. *Módulo de elasticidade do concreto: comparativo de resultados a partir de ensaios estáticos e ensaios dinâmicos de resposta acústica*. In: 55° IBRACON, 2013, Gramado. Anais do 55° Congresso Brasileiro do Concreto. Ibracon, 2013.
- FREITAS Jr., J. A. *Materiais de construção: Agregados*. 2013. 110 f. Notas de aula.
- LYNDON, F. D.; BALADRAN, R. V. Some observations on elastic properties of plain concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 16, n. 3, p. 314-324. 1986.
- MALHOTRA, V. M. *Testing Hardened Concrete: Nondestructive Methods*. ACI Monograph n° 9. The Iowa State University Press, 1986.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 1.ed. São Paulo: Ibracon, 2014.
- NETO, B. B. P.; OLIVEIRA, D. R. C.; RAMOS, D. Efeitos do tipo, tamanho e teor de agregado graúdo no módulo de deformação do concreto de alta resistência. *Revista Matéria*, v. 16, n. 2, p. 690-702, 2011.
- NEVILLE, A. M. *Propriedades do concreto*. 5.ed. São Paulo: Editora Bookman, 2016.
- ROSSIGNOLO, João Adriano. *Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestrutura e aplicações*. São Paulo: Pini, 2009
- SANTOS, C. G.; PALHARES, L.B.; DUARTE, R.O.; GONÇALVES, T.H.C.; HORTA, M.M.A.; REIS, W.A.; STRAELH, R.V.S. *Poliestireno expandido na construção civil*. Pós em Revista, 2013.
- SARTORTI, Artur Lenz. *Comportamento Dinâmico de Lajes Maciças de Concreto Leve com Pérolas de EPS*. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2015.
- SCHWANTES, C. G. G. *Concreto Estrutural Leve: Resistência à compressão e módulo de elasticidade usando argila expandida como agregado graúdo*. Monografia – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.