

## EXPERIMENTAL STUDY OF THE STATIC AND DYNAMIC MODULUS OF ELASTICITY OF LIGHTWEIGHT CONCRETE WITH THE USE OF EXPANDED CLAY FOR STRUCTURAL PURPOSES

A.A. MELO\*, O.M.L. ALMEIDA, H.J.L. DIÓGENES

Universidade Federal da Paraíba

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4040-9428>\*

[arlan85@hotmail.com](mailto:arlan85@hotmail.com)\*

Submitted September 26, 2022 - Accepted November 27, 2023

DOI: 10.15628/holos.2023.14312

### ABSTRACT

Structural lightweight concrete has been presented as a promising solution due to its low specific mass, enabling lighter, slender and economical structures. In this research, the conventional aggregates were partially replaced by two granulometry expanded clay. Static and dynamic modulus of elasticity tests were performed for both concretes. The experimental results were also compared to the analytical predictions of the literature and norms, where the variation between these results

was discussed. The lightweight concrete obtained showed a loss compressive strength of 16.5% and a tensile strength of 19.8%, a specific mass reduction of 32.6% and a gain of 24.0% in the efficiency factor, compared to normal concrete. In the first, the lightweight concrete showed a modulus of the order of 56.5% of that identified for normal concrete. The dynamic tests showed results 11.29% and 11.05% higher than the static tests for normal and lightweight concrete, respectively.

**KEYWORDS:** Lightweight concrete, Expanded clay, Experimental, Modulus of elasticity

## ESTUDO EXPERIMENTAL DO MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E DINÂMICO DE CONCRETOS LEVES COM O EMPREGO DE ARGILA EXPANDIDA PARA FINS ESTRUTURAIS

### RESUMO

O concreto leve estrutural vem apresentando-se como uma solução promissora em função de sua baixa massa específica, possibilitando estruturas mais leves, esbeltas e econômicas. Neste trabalho, os agregados convencionais foram substituídos parcialmente por duas granulometrias de argila expandida. Foram realizados ensaios de módulo de elasticidade estático e dinâmico para ambos os concretos. Os resultados experimentais foram ainda comparados às previsões analíticas da literatura e normatizações, onde a variação entre esses

resultados foi discutida. O concreto leve obtido apresentou perda de resistência à compressão de 16,5% e à tração de 19,8%, redução de massa específica de 32,6% e ganho de 24,0% no fator de eficiência, comparado ao concreto normal. No primeiro, o concreto leve evidenciou módulo da ordem de 56,5% do identificado para o concreto normal. Os ensaios dinâmicos apresentaram resultados 11,29% e 11,05% superiores aos ensaios estáticos para os concretos normal e leve, respectivamente.

**Palavras chave:** Concreto leve, Argila expandida, Experimental, Módulo de elasticidade

## 1 INTRODUÇÃO

Do ponto de vista estrutural, os concretos leves vêm ganhando espaço e competitividade ao longo das últimas décadas, dado especialmente à redução de sua massa específica, inferior a  $2.000 \text{ kg/m}^3$ , conforme define a NBR 12655 (ABNT, 2015).

Rossignolo (2009) sugere que a aplicação dos concretos leves permite, entre outras vantagens, a redução das seções transversais de diversos elementos em toda a estrutura, impactando significativamente nos carregamentos e dimensões das fundações. Este mesmo autor, Rossignolo (2009), afirma que no contexto de estruturas pré-moldadas, além do impacto direto na redução do peso próprio das estruturas, ocorre um ganho de produtividade no que tange às atividades complementares do processo construtivo, isto é, usinagem do concreto, transportes interno e externo e içamentos.

O ganho financeiro com o aumento de produtividade nas atividades logísticas quando se emprega concreto leve é superior a sete vezes o custo incrementado dos insumos necessários à usinagem do mesmo (ACI 213R-14, 2014).

Todavia, o emprego dos concretos leves é fortemente dependente dos agregados leves disponíveis na região. Segundo Silva (2007), nos Estados Unidos usa-se muito o xisto expandido (Stalite), já na Holanda e Reino Unido, os agregados leves mais utilizados são produzidos a partir de cinzas volantes, de nome comercial Lytag e Aardelite, enquanto na Noruega e Alemanha, utilizam-se extensamente os agregados leves de argila expandida, haja vista as disponibilidades locais e o grande desenvolvimento no campo das pesquisas nesta área.

O agregado de argila expandida leve, conhecido na literatura internacional por LECA (*lightweight expanded clay aggregate*), é produzido em mais de vinte países, possuindo diferentes denominações, por exemplo: "Leca" no Reino Unido, Irã, Portugal, Finlândia, Alemanha, Itália, Dinamarca e Suíça; "Keramzite" na Suécia, China, Polônia e Rússia; "Liapour" na Espanha; e "Argex" na África do Sul (RASHAD, 2018).

No Brasil, a argila expandida fabricada em fornos rotativos, por meio de processo intitulado de "nodulação", é um agregado leve que possui granulometria variada, formato arredondado regular e núcleo poroso, sua superfície externa é vitrificada e lhe confere resistência e baixa permeabilidade. Esse agregado é o principal insumo utilizado na confecção de concretos leves estruturais no país (ANGELIN, 2014).

Santo *et al.* (2012) identificou um crescimento de 57,2% no consumo de agregados naturais britados, entre os anos de 2004 e 2011, no Brasil, quantificando assim a evolução de uma demanda crescente por um recurso mineral limitado e que impõe significativos danos ambientais na sua geração e beneficiamento. A exploração deste recurso causa desmatamento, movimentação de terra, vibrações no terreno, geração de gases poluentes, poluição sonora, poeira, impactos às populações locais, entre outros impactos (MECHI e SANCHES, 2010; SILVA NETO *et al.*, 2021). Nessa conjuntura, em função de suas potencialidades, a argila expandida apresenta-se como um substituto aos agregados naturais na confecção dos concretos estruturais.

Para Rossignolo (2009), a argila expandida brasileira configura-se como uma solução promissora, técnica e economicamente, para a produção de concretos leves estruturais de

resistência à compressão de até 50 MPa e massa específica seca da ordem de 1.400 a 1.800 kg/m<sup>3</sup>. Apesar do significativo avanço de seu emprego nos últimos anos, as pesquisas relacionadas às propriedades mecânicas do concreto leve com LECA brasileira são escassas e indicam a existência de lacunas, principalmente no que tange ao seu módulo de deformação. Informações essas necessárias ao aprimoramento técnico deste compósito com potencial tão promissor, possibilitando a sua maior difusão e aplicabilidade como solução construtiva.

Neste contexto, a utilização de ensaios não destrutivos na caracterização mecânica deste material apresenta-se alinhada aos princípios de eficiência, economia e sustentabilidade. Por exemplo, o ensaio dinâmico não destrutivo é desejável na elaboração de projetos estruturais, uma vez que o módulo de elasticidade do material pode ser monitorado ao longo da vida útil da estrutura a partir de um único corpo de prova, sem a necessidade de moldar vários espécimes (DIÓGENES *et al.*, 2011). Forigo *et al.* (2021) reforça ainda que os ensaios não destrutivos podem ser realizados em um número maior de amostras, com uma rapidez superior aos ensaios destrutivos, tornando-se mais viáveis economicamente e sem a necessidade de danos nas estruturais para os casos de ensaios *in loco*.

Nesta investigação, além da caracterização dos principais parâmetros mecânicos do concreto estrutural leve com LECA brasileira e suas correlações com previsões normativas e da literatura, investigou-se ainda o módulo de elasticidade dinâmico, por meio das frequências naturais obtidas pela técnica de excitação por impulso – SONELASTIC®. Em seguida, os módulos de elasticidade obtidos pelos métodos destrutivos e não destrutivos foram correlacionados entre si e com previsões da literatura. Essa investigação possibilitou uma ampliação no estado d'arte quanto ao tema, bem como possibilitará o desenvolvimento de novas pesquisas a partir dos seus achados.

## 2 BREVE REVISÃO

Segundo Rossignolo (2014), a resistência à compressão e a massa específica são os parâmetros mais utilizados na caracterização dos concretos leves estruturais, sendo essas propriedades diretamente influenciadas pelo tipo e granulometria dos agregados leves. Ademais, a alta porosidade da argila expandida impacta diretamente nas menores massas específicas do concreto, em contrapartida o penaliza com menores resistências mecânicas.

De uma forma geral, nos concretos convencionais, o módulo de deformação dos agregados é maior que o da argamassa. Assim, normalmente, a ruptura do concreto inicia na zona de transição, criando uma linha de fratura ao redor do agregado. Nesse modelo, o agregado é a fase mais resistente, sendo a resistência à compressão da argamassa e da zona de transição pasta-agregado os fatores limitantes à resistência do concreto. Já nos concretos leves com LECA, por exemplo, existe uma maior similaridade entre os módulos de deformação do agregado e da argamassa. Dessa forma, a ruptura deste concreto ocorre pelo colapso da argamassa, criando um plano de fratura que atravessa os agregados (ROSSIGNOLO, 2009).

Hashad (2018), em sua pesquisa de revisão, identificou vinte e nove trabalhos sobre o emprego de LECA em concretos e argamassas, na literatura internacional. Os diversos autores avaliaram a substituição dos agregados miúdos e graúdos individual e simultaneamente, o percentual desta substituição e a granulometria dos agregados leves experimentados. Das vinte e nove investigações, apenas Scotta e Giorgi (2016) não identificaram redução na resistência à

compressão do concreto com a utilização de LECA. Em todas as demais pesquisas, a resistência à compressão do concreto leve foi penalizada em função do uso de LECA como agregado. O maior fator de redução de resistência à compressão foi verificado por Wegin (2012), da ordem 69,45% de minoração.

Dessa forma, essa significativa faixa de variação da resistência à compressão, de 0% a 69,45%, identificada na revisão de Rashad (2018), corrobora o papel fundamental que as propriedades físicas do agregado leve aliadas aos parâmetros de dosagem podem influenciar na resistência à compressão dos respectivos concretos leves.

A NBR 8953 (ABNT, 2015) e a NBR 12655 (ABNT, 2015) prescrevem que os concretos leves apresentem massas específicas secas inferiores a 2.000 kg/m<sup>3</sup>. Enquanto a ACI 213R-14 (2014) normatiza que os concretos leves estruturais possuam massa específica da ordem de 1.120 a 1.920 kg/m<sup>3</sup>.

Hassad (2018) consolidou os resultados de vinte quatro pesquisas que investigaram a influência da substituição (parcial ou total) dos agregados convencionais por LECA na massa específica do concreto, onde todos os resultados apontaram para redução deste parâmetro. Rashad (2005) identificou uma redução de 48,6% na massa específica aparente de uma argamassa, com a substituição de 100% do agregado miúdo convencional por agregado leve. Para os concretos, Mostafa e Hossam (2010) obtiveram uma redução de 44,4% também na massa específica aparente, por meio da substituição total de agregados miúdos e graúdos convencionais por leves.

Os valores de resistência à tração dos concretos leves, seja por compressão diametral ou na flexão, de modo global, são inferiores aos verificados nos concretos convencionais, para níveis similares de resistência à compressão. Isso se deve ao elevado volume de vazios dos agregados leves. Para os concretos com LECA brasileira, a resistência à tração por compressão diametral varia entre 6 e 9% da resistência à compressão, enquanto a tração na flexão varia entre 8 e 11% (EVANGELISTA *et al.* (1996); GOMES NETO (1998); ROSSIGNOLO e AGNESINI (2005); e ROSSIGNOLO (2009)).

Angelin (2014), em seu trabalho experimental, identificou a redução de 47,5% na resistência à tração por compressão diametral, por ocasião da substituição de 100% do agregado graúdo convencional por argila expandida (CINEXPAN 1506), de DMC 12,5 mm. Este mesmo percentual de redução foi observado para as idades de 7 e 28 dias.

O módulo de deformação dos concretos leves varia entre 50 e 80% do módulo dos concretos convencionais, para resistências à compressão da ordem de 20 a 50 MPa. Essa relação é válida inclusive para os concretos que utilizam argila expandida brasileira. A curva tensão-deformação dos concretos com LECA brasileira indica comportamento elástico-linear até cerca de 80% do carregamento último. Enquanto nos concretos convencionais, esse valor é cerca de 60% (ROSSIGNOLO, 2009).

Assunção (2016) investigou o comportamento de concretos leves estruturais autoadensáveis com a substituição do agregado graúdo natural por argila expandida brasileira, de DMC 12,5 mm (CINEXPAN, AE1506), para diferentes teores de substituição (0, 20, 40, 60, 80 e 100%). Nessa oportunidade, o autor evidenciou maior linearidade do trecho ascendente da curva

com o aumento da resistência à compressão, bem como uma queda mais brusca de resistência no trecho pós-pico.

Moravia (2007) investigou o comportamento de concretos leves com o uso de LECA brasileira de DMC 19,0 mm, como substituição total ao agregado graúdo convencional. Nesta oportunidade, o autor verificou que o módulo de elasticidade dinâmico foi 15,94% maior que o estático para os concretos normais e 13,75% maior para os concretos leves. Sendo que para o concreto leve, os resultados experimentais foram significativamente próximos aos valores previstos pela ACI 318 (2008). O referido autor salienta, ainda, que as menores grandezas do módulo de elasticidade do concreto leve, em torno de um terço menor que os concretos convencionais, evidenciam a maior capacidade deste em absorver pequenas deformações, por exemplo, as oriundas dos esforços de retração, reduzindo assim as tensões internas e formação de microfissuras, quando comparado ao concreto convencional.

A obtenção do módulo de elasticidade dinâmico por meio do método das frequências naturais de vibração é uma técnica relativamente recente, tendo sido normatizada no Brasil por meio da NBR 8522-2 (ABNT, 2021), cuja sua primeira edição foi publicada em 2021. Segundo a referida Norma, as frequências naturais de vibração são particulares de cada corpo em vibração livre, determinadas pelas suas dimensões, geometria e massa, bem como pelas propriedades elásticas do material.

### 3 MATERIAIS E MÉTODO

A caracterização dos agregados correspondeu à primeira atividade desenvolvida na etapa experimental desta pesquisa.

As dosagens investigadas nesta pesquisa utilizaram areia de granulção média e agregado graúdo britado, de classificação comercial brita 1 e de origem de rocha do tipo gnaise, como agregados naturais. Os agregados leves empregados foram do tipo argila expandida, da fabricante nacional CINEXPAN, produzidos na cidade de Várzea Paulista/SP, de duas granulometrias, uma graúda (AE1506) e uma miúda (AE0500). A caracterização física desses agregados está apresentada na Tabela 1, bem como por meio da Figura 1, é possível comparar a ordem de grandeza de suas granulometrias.

Tabela 1: Caracterização física dos agregados.

Caracterização física	Tipo de agregado			
	Areia	AE0500	Brita 1	AE1506
Módulo de finura	2,70	4,89	5,87	6,50
Diâmetro máximo característico (mm)	2,40	6,30	12,5	19,0
Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )	1.579	775,7	1.525,1	596,5
Massa específica real (kg/m <sup>3</sup> )	2.656	1.265,4	2.694,5	852,3
Teor de material pulverulento (%)	3,0	0,3	-	0,1
Absorção de água (%)	-	21,3	1,61	13,42

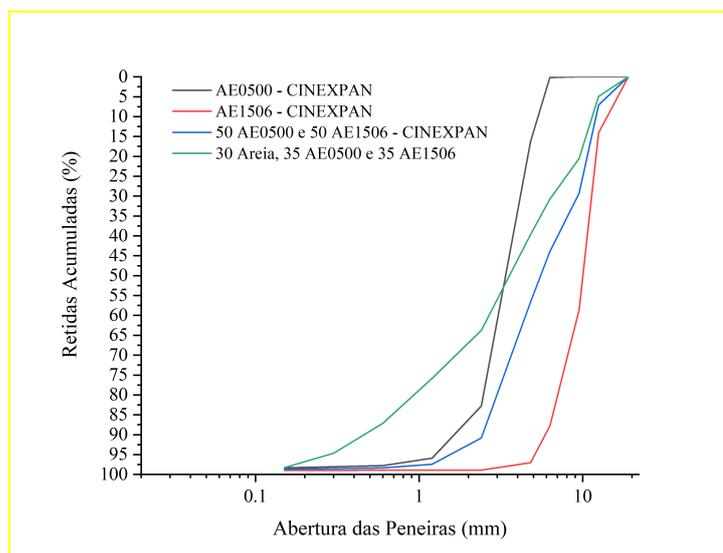


**Figura 1: Comparação entre as granulometrias dos agregados utilizados: (a) areia natural; (b) AE0500; (c) AE1506; (d) brita 1 (DMC 12,5 mm).**

Foram utilizados, ainda, cimento de alta resistência inicial da marca Cimento Nacional, CP V-ARI MAX, sílica ativa da fabricante Ferbasa, na proporção de 10% em massa em relação ao consumo de cimento, e aditivo plastificante da fabricante VEDACIT, denominado CEMIX 2000, na proporção de 1,5% em relação à massa de cimento.

A metodologia de dosagem adotada foi definida por Rossignolo (2003), que busca a combinação do máximo fator de empacotamento dos agregados, às condições de trabalhabilidade que permita o uso do concreto em peças pré-moldadas além de propriedades do concreto em seu estado endurecido que o classificassem como estrutural. Com esse intuito, o agregado total obtido pelo Autor combinou 35% da AE1506, 35% da AE0500 e 30% de areia natural. Com o emprego da mesma, foi dimensionada uma dosagem de concreto leve de resistência à compressão de 35 MPa, para 28 dias.

A NBR NM 35 (1995), que regula especificamente os agregados leves para concreto estrutural, define enquadramentos granulométricos por faixa para esses agregados. As argilas AE0500 e AE1506, individualmente, não obedecem às especificações desta norma, apresentando distribuições granulométricas descontínuas. Entretanto, a combinação de 50% de AE0500 e 50% de AE1506 apresenta uma melhoria significativa na distribuição granulométrica da mistura, conforme se verificada na Figura 2. Ocorrendo um ganho mais expressivo ainda com a elaboração do agregado total (35/35/30% - AE0500; AE1506; e areia natural, respectivamente), identificando-se um ganho no arranjo granulométrico das partículas, gerando uma distribuição contínua e uniforme.



**Figura 2: Distribuição granulométrica dos agregados leves e suas composições (50% AE1506 e 50% AE0500) e (50% AE1506, 50% AE0500 e 30% areia natural).**

Após a definição da dosagem do concreto leve, determinou-se a dosagem do concreto convencional realizando-se a substituição da AE0500 por areia natural e da AE1506 pela brita 1, de DMC 12,5 mm. As referidas substituições foram calculadas em função da proporcionalidade entre as massas unitárias dos agregados substituído e substituto. A Tabela 2 detalha os consumos definidos em cada dosagem.

**Tabela 2: Comparação entre as dosagens para o concreto leve e normal.**

Concreto Leve		Concreto Normal	
INSUMOS	Dosagem 35 MPa (kg/m <sup>3</sup> )	INSUMOS	Dosagem 35 MPa (kg/m <sup>3</sup> )
Cimento	394,3	Cimento	394,3
Sílica ativa	39,4	Sílica ativa	39,4
Areia	165,6	Areia	607,4
AE0500	193,2	Brita 12,5 mm	586,6
AE1506	193,2	Água	216,9
Água	216,9	Plastificante	5,9
Plastificante	5,9	a/c	0,5
a/c	0,5		

Haja vista os altos teores de absorção da argila expandida, superiores a 10%, foi realizada a pré-saturação desta. Para os concretos leves, esse teor de umidade absorvido pelo agregado leve, durante a imersão por 24 horas, foi subtraído da quantidade prevista no momento da mistura. Esse procedimento teve o objetivo de manter o fator água/cimento definido para cada dosagem, tendo em vista a significância do volume de água “armazenado” na argila expandida.

Em decorrência desse procedimento, houve uma diferença significativa na trabalhabilidade dos concretos leve e convencional. Por conta dessa particularidade, adotou-se o abatimento de tronco de cone para caracterização do concreto leve, de acordo com a NBR NM 67 (1998), e os

ensaios de espalhamento e t500 para o concreto convencional, segundo NBR 15823-2 (2017), já que este último apresentou características similares a um concreto autoadensável.

Todos os concretos confeccionados nesta pesquisa, independente do tipo ou destinação, foram preparados em betoneira elétrica, semifixa, com capacidade de 200 litros. O tempo de homogeneização dos materiais foi da ordem de 5 minutos. O adensamento foi realizado com o emprego de haste de adensamento, de acordo com as preconizações da ABNT NBR 5738 (2015), com o intuito de se evitar uma possível “flutuação” da argila expandida no concreto leve. O método de cura adotado foi a “cura úmida” e todos os corpos de prova tiveram suas extremidades regularizadas com o uso de retificadora mecânica, antes da realização dos ensaios.

Os ensaios de compressão axial dos concretos leve e convencional foram realizados com o intuito de obtenção somente de suas resistências últimas. Estes seguiram as recomendações da NBR 5739 (2018). Foi empregada uma máquina de ensaios mecânicos universal SHIMADZU UH-F, com capacidade para 1000 kN, sendo a coleta dos dados efetivada por meio do Software TRAPEZIUM2. Esses mesmos equipamentos foram utilizados nos ensaios de tração por compressão diametral e módulo de elasticidade estático. O ensaio de tração obedeceu às padronizações da NBR 7222 (2011).

Na realização dos ensaios de módulo estático, a velocidade de carregamento foi de 0,45 MPa/s. Para captação dos dados de deslocamento, foram utilizados dois relógios comparadores, com resolução de 0,001 mm. Estes foram fixados em bases metálicas independentes, com base de medida de 132 mm, conforme está ilustrado na Figura 3. Nesta etapa experimental, a NBR 8522-1 (2021) foi atendida parcialmente, haja vista que o procedimento de carregamentos cíclicos prévios não foi realizado, em virtude de limitações operacionais do software de captação dos dados.

Empregou-se a metodologia de cálculo “A”, preconizada pela NBR 8522-1 (2021), para a obtenção do  $E_c$ , com o emprego de tensão constante. Neste trabalho, de forma similar ao realizado por Diógenes (2010), a reta secante à curva tensão versus deformação foi definida pelos pontos correspondentes à tensão de 5% e 50% da tensão de ruptura. Os resultados numéricos de tensão e deformação correspondentes a esse intervalo demonstraram a viabilidade desta aproximação por meio de regressões lineares e seus respectivos coeficientes de determinação.

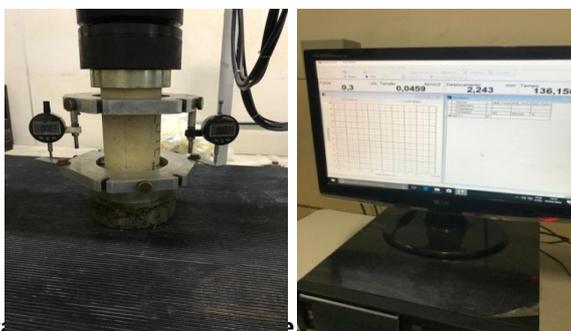


Figura 3. Montagem experimental para ensaio de módulo de elasticidade estático.

Para determinação do módulo de elasticidade dinâmico dos concretos leve e convencional foram realizados ensaios não destrutivos, por meio das frequências naturais obtidas pela técnica de excitação por impulso – SONELASTIC®. Este equipamento está disponível no MIMME/CT/UFPB e se baseia na Técnica de Excitação por Impulso. Todos os procedimentos foram realizados de acordo com a NBR 8522-2 (2021), estando o esquema do ensaio ilustrado na Figura 4.



Figura 4: Esquema de ensaio de módulo de elasticidade dinâmico.

Foram realizados também ensaios de massa específica, absorção e índice de vazios para ambos os concretos investigados, conforme preconizações da NBR 9778 (2009).

Para o tratamento estatístico das amostras correspondentes aos resultados da caracterização dos concretos foi utilizado o teste “t” de *Student* para a construção de intervalos de confiança, com nível de significância de 5%. Segundo Morettin e Bussab (2010), o teste “t” pode ser utilizado para a definição de intervalos de confiança para a média de populações que possuam distribuição normal e variância desconhecida. Após a definição desses intervalos de confiança, a média amostral foi recalculada, excluindo-se os valores extremos, de forma que o valor médio amostral calculado seja o mais representativo da população referente à variável de interesse. Para verificação da normalidade das amostras utilizou-se o teste de Shapiro Wilk. A referida verificação foi realizada com o emprego do software Statistica.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A caracterização no estado fresco de ambos os concretos está apresentada na Tabela 3. Observa-se, por meio dos resultados apresentados à direita que o concreto normal não apresentou fluidez ou capacidade de preenchimento em fluxo livre que o enquadrasse como concreto autoadensável, de acordo com as classes de espalhamento preconizadas na NBR 15823-1 (ABNT, 2017), cuja primeira faixa é de 550 a 650 mm.

Quanto à viscosidade plástica aparente do concreto normal, mensurado pelo parâmetro t500, observa-se que os resultados são superiores a 2 (dois) segundos, ou seja, o concreto ora investigado enquadra-se na classe de viscosidade VS 2, segundo a NBR 15823-1 (ABNT, 2017), cuja classificação é adequada para a maioria das aplicações correntes.

Já quanto à estabilidade visual sob fluxo livre, qualitativamente, o concreto não apresentou evidências de segregação, apresentando boa distribuição dos agregados graúdos e argamassa na mistura, nem tampouco exsudação, podendo ser classificado como IEVO (Índice de Estabilidade Visual), segundo NBR 15823-1 (ABNT, 2017).

Tabela 3: Resultados de *Slump Test* para o concreto leve e de Espalhamento e t500 para o concreto normal.

Concreto Leve		Concreto Normal	
Lote	Slump Test (mm)	Espalhamento (mm)	t500 (s)

Lote 01	115	500	3,5
Lote 02	130	510	4,0
Lote 03	120	500	4,4
Lote 04	120	520	4,7

Em relação à resistência à compressão, a Tabela 4 apresenta os resultados, tanto para as amostras de concreto leve quanto de concreto normal. Os valores médios destacados foram obtidos por meio do tratamento estatístico já descrito. Assim, observa-se que o concreto leve apresentou uma diminuição de resistência da ordem de 16,5%, quando comparado ao concreto convencional.

**Tabela 4: Comparação entre os resultados de resistência à compressão dos concretos leve e normal.**

Dados tratados			
Concreto Leve		Concreto Normal	
Parâmetro	Resistência à compressão	Parâmetro	Resistência à compressão
Média (MPa)	<b>29,55</b>	Média (MPa)	<b>35,40</b>
Tamanho da amostra	10	Tamanho da amostra	10
Desv. Pad. (MPa)	1,60	Desv. Pad. (MPa)	0,57
Coef. Var (%)	5,4	Coef. Var (%)	1,6

A substituição total do agregado graúdo natural pela argila expandida AE1506 e a substituição parcial da areia natural pela argila expandida AE0500 possibilitaram uma redução de 32,6% na massa específica aparente do concreto leve comparado ao concreto convencional, esse parâmetro foi reduzido de 2,24 g/cm<sup>3</sup> (concreto normal) para 1,51 g/cm<sup>3</sup> (concreto leve).

A redução da massa específica veio atrelada à penalização dos parâmetros de porosidade e permeabilidade do concreto leve. Este apresentou índice de vazios e absorção maiores que o concreto convencional, 19,2 e 38,6% maiores, respectivamente. Os referidos resultados estão apresentados nas Tabelas 5 e 6.

A ordem de grandeza dos resultados está coerente com a literatura, ressalvadas as particularidades da dosagem ora experimentada. A metodologia de dosagem do concreto leve, que é específica para o uso da argila expandida ora investigada, busca o equilíbrio entre a limitação de resistência imposta pelo agregado leve ao concreto e o alívio de seu peso próprio conferido pela leveza do agregado. O referido equilíbrio é exatamente o conceito de resistência ótima definido por Rossignolo (2009).

A maior absorção do concreto leve, 38,6%, está diretamente relacionada à estrutura porosa do agregado leve. Deve-se reiterar que estes apresentaram absorção da ordem de 13,42 e 21,3% para granulometria graúda e miúda, respectivamente. Enquanto o agregado graúdo natural apresentou absorção de 1,61%. O maior índice de vazios também é, predominantemente, justificado pela porosidade da argila expandida. Deve-se observar que a relação entre porosidade e permeabilidade é muito íntima, sendo essa última propriedade possibilitada pelos poros interconectados ou comunicáveis.

O uso da sílica ativa em ambas as dosagens conjugado com a cura interna conferida pelo agregado leve também possuem sua contribuição para melhorar as propriedades da matriz cimentícia nos quesitos de sua densificação e, conseqüentemente, minoração dos índices de vazios e porosidade.

**Tabela 5: Resultados de massa específica, absorção e índice de vazios para o concreto normal.**

Dados tratados						
Parâmetros	Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )	Massa específica saturada (g/cm <sup>3</sup> )	Massa específica real (g/cm <sup>3</sup> )	Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção (%)	Índice de vazios (%)
Média	<b>1,85</b>	<b>2,03</b>	<b>2,26</b>	<b>2,24</b>	<b>9,78</b>	<b>15,21</b>
Tamanho da amostra	10					
Desv. Pad.	0,028	0,010	0,012	0,014	0,262	0,726
Coef. Var.	1,5%	0,5%	0,5%	0,6%	2,7%	4,8%

**Tabela 6: Resultados de massa específica, absorção e índice de vazios para o concreto leve.**

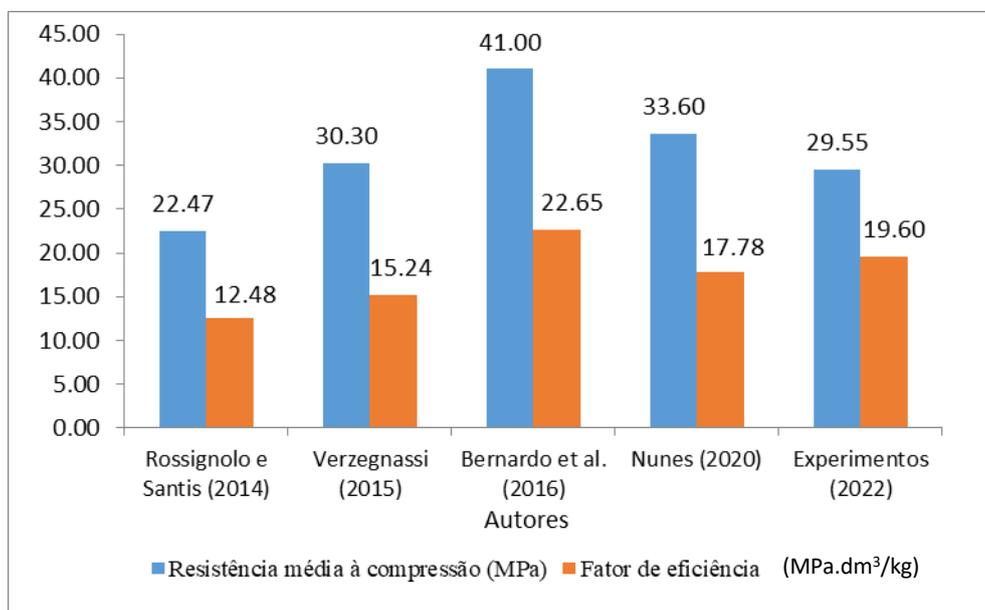
Dados tratados						
Parâmetros	Massa específica a seca (g/cm <sup>3</sup> )	Massa específica saturada (g/cm <sup>3</sup> )	Massa específica real (g/cm <sup>3</sup> )	Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção (%)	Índice de vazios (%)
Média	<b>1,34</b>	<b>1,53</b>	<b>1,63</b>	<b>1,51</b>	<b>13,55</b>	<b>18,12</b>
Tamanho da amostra	10					
Desv. Pad.	0,024	0,024	0,024	0,033	0,388	0,376
Coef. Var.	1,8%	1,6%	1,5%	2,2%	2,9%	2,1%

Em virtude das diferentes dosagens investigadas na literatura, a comparação de parâmetros como resistência à compressão e massa específica isoladamente torna-se inconclusiva. De tal sorte que o parâmetro fator de eficiência, por meio da correlação entre resistência e massa específica, define uma variável numérica, possibilitando a comparação de desempenho entre diferentes dosagens.

Nesta pesquisa, corroborou-se experimentalmente a propriedade dos concretos leves em apresentar fatores de eficiência superiores ao concreto convencional, ratificando as investigações desenvolvidas por Moravia (2007), Santis e Rossignolo (2014), Verzeznassi (2015), Bernardo *et al.* (2016) e Nunes (2020). O fator de eficiência identificado nesta pesquisa para o concreto leve foi de 19,60 MPa.dm<sup>3</sup>/kg, 24,0% superior ao verificado para o concreto convencional, 15,81 MPa.dm<sup>3</sup>/kg.

Para os concretos de classe de resistência similares ao investigado neste trabalho, classe de resistência de 30 MPa aos 28 dias de idade, por intermédio da Figura 5, que consolida esses dados para algumas das pesquisas mais recentes com o emprego da argila expandida nacional, verifica-se que a investigação ora desenvolvida apresentou fator de eficiência superior ao registrado na literatura.

Bernardo *et al.* (2016) registrou fator de eficiência de 22,65 MPa.dm<sup>3</sup>/kg, entretanto o referido autor utilizou corpos de prova cúbicos de 150 mm nos ensaios de resistência à compressão e massa específica seca para o cálculo desse parâmetro. Considerando-se um fator de forma de 1,10 entre a resistência à compressão de CPs cúbicos e cilíndricos de 100 x 200 mm, bem como se utilizando o resultado médio de massa específica seca de 1,34 g/cm<sup>3</sup> ao invés da massa específica aparente, obtém-se nesta pesquisa um fator de eficiência de 24,3 MPa.dm<sup>3</sup>/kg, superior ao identificado por Bernardo *et al.* (2016).



**Figura 5: Comparação dos resultados de resistência à compressão e fator de eficiência dos concretos leves confeccionados com argila expandida nacional (Adaptado de Nunes, 2020).**

O concreto leve ora investigado apresentou resistência média à tração por compressão diametral da ordem 1,71 MPa, 19,8% menor que o concreto referencial de massa específica normal. A resistência média identificada para o concreto normal foi de 2,13 MPa. Essa perda de resistência está diretamente vinculada ao índice de vazios do concreto, sendo este último consequência direta do tipo de agregado leve e dosagem utilizada. Os dados de resistência à tração estão apresentados na Tabela 7.

A resistência média à tração de 1,71 MPa do concreto leve representou 5,8% da resistência média à compressão deste, identificada da ordem de 29,55 MPa. As pesquisas desenvolvidas por Evangelista *et al.* (1996), Gomes Neto (1998), Rossignolo e Agnesini (2005) e Rossignolo (2009), com o emprego de argila expandida nacional, verificaram uma correlação entre esses dois parâmetros na faixa de 6,0 a 9,0%. Assim, consideradas as particularidades de cada dosagem e a aproximação do resultado ora mensurado com o limite inferior deste faixa, julga-se que este resultado esteja coerente com o estado geral d’arte.

**Tabela 7: Resultados de resistência à tração por compressão diametral para os concretos leve e normal.**

Dados tratados			
Concreto Leve		Concreto Normal	
Parâmetro	Resistência à tração	Parâmetro	Resistência à tração

Média	<b>1.71</b>	Média	<b>2.13</b>
Tamanho da amostra	10	Tamanho da amostra	10
Desv. Pad.	0.07	Desv. Pad.	0.06
Coef. Var.	4.1%	Coef. Var.	2.7%

O resultado experimental de resistência à tração para o concreto leve foi comparado a algumas previsões analíticas (HOFF (1991), ACI 318 (2008) e EN 1992-1-1 (2004)), conforme detalhado na Tabela 8. Por meio dessa, percebe-se que o resultado experimental se aproximou substancialmente das previsões da EN 1992-1-1 (2004) – Eurocode 2, com um fator de correlação da ordem de 1,01. Deve-se pontuar que essa normatização estima a resistência à tração por compressão diametral do concreto leve em função de sua massa específica e da resistência à tração correspondente ao concreto de massa específica normal de dosagem equivalente. Enquanto as demais expressões possuem somente a resistência à compressão do concreto leve como variável independente. Julga-se que essa expressão tenha apresentado a melhor representatividade entre as demais em função de sua maior complexidade numérica, maior número de variáveis independentes. O conceito de “resistência ótima” demonstra a existência de um equilíbrio entre minoração da massa específica, ponto positivo, e minoração das resistências, ponto negativo.

**Tabela 8: Comparação entre a resistência à tração por compressão diametral experimental e previsões analíticas.**

Referência	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	Fator de correlação (Previsão analítica/ Resultado médio experimental)	Observação
HOFF (1991)	2.66	1.56	-
ACI 318 (2008)	2.28	1.34	Dosagem apenas com agregado leve
ACI 318 (2008)	2.61	1.53	Dosagem com areia e agregado leve
EN 1992-1-1 (2004)	1.73	<b>1.01</b>	Calculado a partir da resistência à tração da dosagem similar de concreto normal
Resultado médio experimental	1.71	1.00	-

Por meio da Figura 6, são comparadas as curvas tensão-deformação para os concretos leve e normal investigados nesta pesquisa. Observa-se a maior linearidade do trecho ascendente da curva para o concreto leve, bem como uma queda mais abrupta da resistência no trecho pós-pico. Esse comportamento está coerente com as investigações de Rossignolo (2009), o qual verificou um comportamento elástico-linear para os concretos leves com Leca brasileira até cerca de 80% do carregamento último, enquanto os concretos convencionais apresentaram o mesmo comportamento até a ordem de 60%.

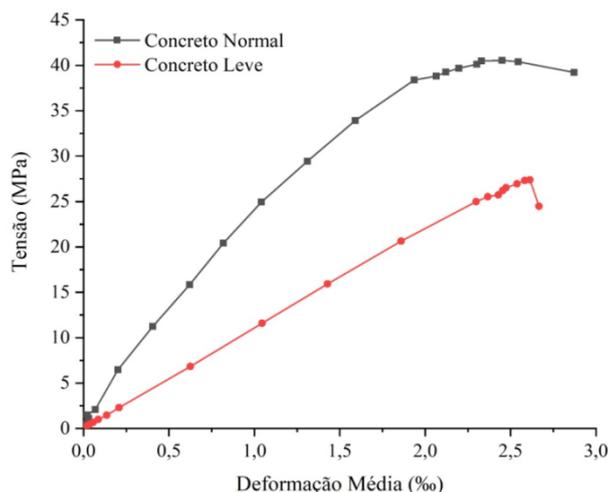


Figura 6: Comparação entre as curvas tensão versus deformação dos concretos normal e leve investigados.

O módulo de deformação estático médio obtido para o concreto leve foi da ordem de 12.231 MPa, sendo esse valor 56,5% do valor identificado para o concreto convencional, 21.660 MPa. Esse percentual está alinhado com a literatura, que prevê uma relação da ordem de 50 a 80% entre os citados módulos, para concretos de 20 a 50 MPa, inclusive com o emprego de argila expandida nacional (ROSSIGNOLO, 2009). O resumo dos resultados de módulo estático está apresentado na Tabela 9.

Tabela 9: Resultados para os ensaios de módulo de elasticidade estático dos concretos leve e normal.

Dados tratados			
Concreto Leve		Concreto Normal	
Parâmetro	Módulo de elasticidade estático	Parâmetro	Módulo de elasticidade estático
Média (MPa)	<b>12.231</b>	Média (MPa)	<b>21.660</b>
Tamanho da amostra	10	Tamanho da amostra	10
Desv. Pad. (MPa)	297	Desv. Pad. (MPa)	1.549
Coef. Var. (%)	2.4	Coef. Var. (%)	7.2

O módulo de deformação estático médio experimental foi comparado com previsões analíticas apresentadas em publicações acadêmicas e normatizações, conforme detalhado na Tabela 10. Por meio desta, verifica-se que a previsão mais próxima ao resultado experimental se encontra no trabalho de Rossignolo (2009), superior apenas em 1% à média experimental. Esse resultado encontra coerência no fato de que essa pesquisa está reproduzindo a metodologia de dosagem apresentada pelo referido Autor.

Observa-se, ainda, que todas as previsões normativas apresentaram valores inferiores ao experimental: NS 3473 (2003), 11% menor; EN 1992-1-1 (2004), 29% menor; e ACI 318 (2008), 11% menor. Pontua-se que as normas NS 3473 (2003) e ACI 318 (2008) apresentaram previsões praticamente idênticas. Já as previsões oriundas de trabalhos acadêmicos apresentaram previsões superiores ao experimental: Valente (2007), 23% maior; e Assunção (2016), 59% maior.

Quanto ao alinhamento das previsões normativas apresentarem valores inferiores, julga-se que essas são frutos de pesquisas mais amplas, onde são realizadas ponderações entre diferentes dosagens, ou seja, as previsões possuem um caráter mais generalista. Deve-se pontuar ainda a possível aplicação de fatores de segurança, bem como tratamentos estatísticos que minorem o resultado numérico esperado. Em contrapartida, os resultados apresentados em pesquisas acadêmicas refletem as particularidades de cada estudo de caso ali investigados.

**Tabela 10: Comparação entre o módulo de elasticidade experimental e previsões analíticas.**

Autor/Norma	Módulo de elasticidade estático experimental (MPa)	Relação entre (Estimativa analítica e o Resultado médio experimental)
NS 3473 (2003)	10.907	0,89
EN 1992-1-1 (2004)	8.633	0,71
Valente (2007)	15.093	1,23
ACI 318 (2008)	10.839	0,89
<b>Rossignolo (2009)</b>	<b>12.351</b>	<b>1,01</b>
Assunção (2016)	19.406	1,59
<b>Programa Experimental</b>	<b>12.231</b>	<b>1,00</b>

Nesta pesquisa, investigou-se ainda a correlação numérica entre os módulos de deformação obtidos pela metodologia estática, segundo a NBR 8522-1 (2021), e a dinâmica, preconizada pela NBR 8522-2 (2021).

Na Tabela 11, coluna (4), verifica-se que o módulo obtido pela metodologia dinâmica foi 11,29% e 11,05% superior ao obtido pela metodologia estática, para os concretos normal e leve, respectivamente. Inicialmente, de forma qualitativa, estes resultados corroboram uma previsão preconizada pela NBR 8522-2 (2021) de que o módulo de elasticidade dinâmico é sempre maior ou igual ao módulo tangente inicial estático.

Do ponto de vista quantitativo, os resultados ora identificados aproximaram-se dos achados de Moravia (2007), que investigou o comportamento de concretos leves com o uso de LECA brasileira de DMC 19,0 mm. Naquela oportunidade, o autor verificou que os módulos de elasticidade dinâmicos foram 15,94% e 13,75% maiores que os estáticos, para os concretos normal e leve, respectivamente.

Resguardadas as particularidades de cada pesquisa, do ponto de vista do tamanho da amostra e tratamento estatístico empregado, julga-se que a ordem de grandeza dos resultados identificados em ambas às pesquisas possui coerência. Deve-se ressaltar, ainda, que a proximidade numérica da relação identificada para os dois tipos de concreto, normal e leve, de 11,29% e 11,05% apontam para uma uniformidade de procedimentos na fase experimental, preparação das amostras e coleta dos dados, bem como para uma possível similaridade das correlações para os concretos leve e convencional.

A NBR 8522-1 (2021), em seu Anexo “B”, apresenta uma metodologia de cálculo para estimação do módulo de elasticidade estático em função do módulo de elasticidade dinâmico e da massa específica aparente do concreto. A referida estimativa foi calculada e apresentada na coluna (5), da Tabela 11. Já na coluna (6), ainda na Tabela 11, verifica-se que essa estimativa foi 24,09% e

10,60% inferior ao módulo estático médio experimental identificado nesta pesquisa, para os concretos normal e leve, respectivamente. Já em seu item “B.2”, do Anexo “B”, a citada Norma disserta sobre a incerteza da estimação do módulo estático a partir do dinâmico para concretos brasileiros, utilizando-se a metodologia nela preconizada, fruto do Modelo de Popovics, alertando sobre um erro médio da ordem de -6,7%, com desvio-padrão de 7,1% para a estimação em pauta.

A NBR 8522-1 (2021) esclarece, ainda, que a principal motivação para tal incerteza deve-se à dispersão dos resultados obtidos a partir do método estático, onde, em programas interlaboratoriais realizados anualmente pela Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaios do Inmetro, tem-se verificado desvios-padrões da ordem de 12% neste tipo de ensaio. Enquanto a ACI 318 (2008) considera um desvio-padrão de até 20% como aceitável para este parâmetro.

Do ponto de vista qualitativo, os valores estimados comportaram-se como o esperado, minorados em relação ao valor obtido experimental pelo método estático. Do ponto de vista quantitativo, verifica-se que o resultado para o concreto leve resguardou a ordem de grandeza da estimativa, segundo a NBR 8522-1 (2021), valor estimado -10,60% inferior ao obtido pelo método estático experimental.

Por meio da análise dos dados brutos dos dois ensaios de módulo estático (concreto leve e normal), antes do tratamento estatístico, verifica-se que o coeficiente de variação para o concreto leve foi de 7,0%, enquanto para o concreto normal foi de 18,6%. A menor dispersão nos resultados numéricos para o concreto leve pode ser justificada pela maior linearidade na curva tensão versus deformação em seu trecho ascendente do concreto leve se comparado ao normal. Essa maior dispersão, ainda abaixo do recomendado pela ACI 318 (2008), pode justificar numericamente o percentual de -24,09% identificado na estimativa, coluna (6) da Tabela 11, para o concreto normal.

**Tabela 11: Relação entre módulo de elasticidade estático e dinâmico para os concretos leve e normal.**

Tipo de concreto	Resistência média à compressão (MPa) (1)	Módulo de elasticidade estático experimental (MPa) (2)	Módulo de elasticidade dinâmico experimental (MPa) (3)	Variação percentual entre módulo estático e dinâmico (4)	Estimativa do módulo estático a partir do dinâmico (Anexo B, NBR8522-1, 2021) (5)	Variação percentual entre módulo estático e sua estimativa (NBR8522-1, 2021) (6)
Concreto normal	35,40	21.660	24.106	11,29%	16.443	24,09%
Concreto leve	29,55	12.231	13.583	11,05%	10.935	10,60%

## 5 CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos por meio da revisão bibliográfica e dos achados desta investigação experimental, chegou-se às seguintes considerações finais:

a) O concreto leve investigado apresentou resistência à compressão da ordem de 16,5% inferior ao concreto convencional de dosagem similar. Essa particularidade está alinhada às previsões da literatura e deve-se à menor resistência da argila expandida em comparação com o agregado graúdo natural. Mesmo com essa minoração, o valor médio de resistência obtido de 29,55 MPa permite o enquadramento deste concreto como leve estrutural, segundo as preconizações da NBR 6118 (ABNT, 2014) e ACI 213R-14 (2014).

b) Em contrapartida à perda de resistência, houve uma redução de 32,6% na massa específica aparente do concreto leve comparado ao concreto convencional, esse parâmetro foi reduzido de 2,24 g/cm<sup>3</sup> (concreto normal) para 1,51 g/cm<sup>3</sup> (concreto leve). O referido resultado permite a classificação deste concreto como leve, segundo a NBR 8953 (ABNT, 2015) e NBR 12655 (ABNT, 2015). Os resultados de resistência e massa específica também possibilitaram o enquadramento deste concreto como leve, conforme a NBR NM 35 (ABNT, 1995). A redução da massa específica veio atrelada à penalização dos parâmetros de porosidade e permeabilidade do concreto leve. Este apresentou índice de vazios e absorção maiores que o concreto convencional, 19,2% e 38,6% maiores, respectivamente. Características essas também coerentes com a revisão da literatura, em parte, impacto direto das altas absorções identificadas nas argilas expandidas.

c) Ponderando-se resistência à compressão e massa específica, o concreto leve apresentou um fator de eficiência da ordem de 19,60 MPa.dm<sup>3</sup>/kg, 24,0% superior ao identificado para o concreto de massa específica normal (15,81 MPa.dm<sup>3</sup>/kg). Esse resultado ratifica as pesquisas anteriores e é justificado pela maior impacto na redução na massa específica do concreto leve que sua perda de resistência.

d) Ainda quanto ao fator de eficiência, a dosagem do concreto leve investigada nesta pesquisa obteve o máximo desempenho comparado aos demais autores apresentados na Figura 05, pesquisas recentes com o uso de LECA brasileira. O fator de eficiência de 19,60 MPa.dm<sup>3</sup>/kg evoluiu para 24,3 MPa.dm<sup>3</sup>/kg se calculado sob a mesma metodologia adotada por Bernardo *et al.* (2016). Dessa forma, corrobora-se a eficiência da metodologia de dosagem desenvolvida por Rossignolo (2003), que busca um equilíbrio entre a minoração da massa específica do concreto e a maximização de sua resistência à compressão.

e) O desempenho estrutural do concreto leve com LECA corroborado nesta pesquisa e expresso pelo seu fator de eficiência demonstra o potencial deste compósito para o seu emprego em estruturas pré-fabricadas, alinhada às tendências da construção civil de modularização, reaproveitamento, economicidade e sustentabilidade. Como oportunidade de pesquisas futuras, julga-se que o desenvolvimento de novas tecnologias que busquem a redução da permeabilidade do concreto leve com LECA, diminuindo os poros comunicáveis e assim tornando-o menos susceptível aos ataques dos agentes externos, apresenta-se como um tema relevante.

f) Os resultados de resistência à tração por compressão diametral apontaram para um valor médio de 1,71 MPa, valor esse 19,8% menor que o apresentado para o concreto referencial (2,13 MPa). Esse resultado representa 5,8% da resistência média à compressão, valor esse próximo à faixa identificada na literatura de 6,0 a 9,0% para o concreto leve com o emprego de argila expandida nacional, alinhando os achados desta investigação às pesquisas já realizadas. O resultado experimental aproximou-se da previsão analítica prevista no Eurocode 2, com um fator de correlação de 1,01. Julga-se que essa previsão analítica com um erro médio de 1% seja fruto da maior complexidade algébrica da expressão preconizada por essa Normativa, que possui como variáveis independentes a massa específica do concreto leve e a resistência à tração do concreto de massa específica normal de dosagem equivalente. As demais previsões analíticas aqui verificadas utilizam apenas a resistência à compressão como variável independente na expressão da resistência à tração, correlações essas que não se mostraram tão fortes quanto à prevista no Eurocode 2.

g) O módulo de elasticidade estático médio obtido para o concreto leve foi da ordem de 12.231 MPa, valor esse 56,5% do identificado para o concreto convencional, 21.660 MPa. Esse percentual está alinhado com a literatura, que prevê uma relação da ordem de 50 a 80% entre os citados módulos, para concretos de 20 a 50 MPa, inclusive com o emprego de argila expandida nacional. Este menor módulo de elasticidade permite ao concreto absorver pequenas deformações minimizando suas tensões internas, se comparado ao concreto convencional. Essa particularidade do concreto leve com LECA pode ser explorada em linhas de pesquisa que exijam um grau de fissuração maior do concreto em estados de menores níveis de tensão. Por exemplo, no emprego do concreto leve em pilares mistos preenchidos, o desenvolvimento de maiores deformações transversais iniciais pode ativar precocemente a contenção lateral provida pelo revestimento metálico e, conseqüentemente, poderá melhorar o desempenho estrutural do núcleo de concreto confinado. Assim, esta investigação pode subsidiar outras pesquisas na área de elementos mistos de aço-concreto.

h) Os resultados experimentais do módulo estático do concreto leve foram comparados às previsões analíticas, sendo mais fortemente correlacionado às expressões de Rossignolo (2009), com fator de correlação da ordem de 1,01. Esse resultado corrobora as expectativas desta pesquisa haja vista que a dosagem do concreto leve adotada partiu da metodologia do referido Autor. Portanto, o menor erro em relação a sua expressão analítica ratifica todo o processo de investigação científica aqui desenvolvida, bem como corrobora o trabalho desenvolvido por aquele Autor. Verificou-se que todas as previsões normativas analisadas apresentaram resultados inferiores ao experimental, evidenciando estudos mais generalistas com aplicação de fatores de segurança em seus tratamentos estatísticos. Enquanto as estimativas oriundas de trabalhos acadêmicos apontaram para resultados de módulo superiores aos evidenciados nesta investigação. Essa divergência pode ser justificada pelas particularidades de cada estudo de caso ali investigados, por exemplo, variações de dosagem e metodologia de ensaios.

i) Verificou-se que o módulo de elasticidade obtido pela metodologia dinâmica foi 11,29% e 11,05% superior ao obtido pela metodologia estática, para os concretos normal e leve, respectivamente. Qualitativamente, esses resultados ratificam a NBR 8522-2 (ABNT, 2021), que esclarece que o módulo dinâmico é sempre maior ou igual ao estático. Do ponto de vista quantitativo, esses resultados estão próximos aos achados de Moravia (2007), que identificou módulos dinâmicos superiores em 15,94% e 13,75% aos módulos estáticos para os concretos normal e leve, respectivamente. Assim, os resultados identificados nestas duas pesquisas sobre concreto leve com LECA demonstram uma similaridade considerável entre os comportamentos dos concretos normal e leve quanto à correlação entre os módulos dinâmico e estático.

j) Por fim, a estimativa do módulo estático a partir do módulo dinâmico, apresentada no Anexo B.1, da NBR 8522-1 (ABNT, 2021), que leva em consideração a massa específica aparente do concreto, foi 24,09% e 10,60% inferior aos valores experimentais obtidos para o concreto normal e leve, respectivamente. A referida Norma alerta para um erro médio da ordem de -6,7%, com desvio-padrão de 7,1% para a estimação em pauta. Julga-se que a maior linearidade da curva tensão versus deformação do trecho elástico para o concreto leve permitiu uma menor dispersão dos resultados para o módulo estático (coeficiente de variação de apenas 7,0%). Já os dados oriundos do concreto normal apontaram para um coeficiente de variação de 18,6%. Assim, essa maior dispersão identificada para o concreto normal pode justificar esse percentual de (-24,09%). De forma global, observou-se que as estimativas da Norma são conservadoras na previsão dos

valores de módulo estático a partir do módulo dinâmico. Sendo que a dispersão dos dados provenientes do ensaio de módulo de elasticidade estático compromete a aferição do real valor deste fator de segurança.

## 6 REFERÊNCIAS

American Concrete Institute. ACI 213R-14: Guide for structural lightweight aggregate concrete. USA, 2014.

American Concrete Institute. ACI 318-08: Code requirements for reinforced concrete. USA, 2008.

Angelin, A. F. (2014). *Concreto leve estrutural: desempenhos físicos, térmicos, mecânicos e microestruturais*. Dissertação (Mestrado em Tecnologia). Programa de Mestrado em Tecnologia. Universidade Estadual de Campinas, 126 p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 35: Agregados leves para concreto estrutural – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 67: Concreto - determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5738: Concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5739: Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7222: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8522-1: Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação - Parte 1: Módulos estáticos à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8522-2: Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação - Parte 2: Módulo de elasticidade dinâmico pelo método das frequências naturais de vibração. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8953: Concreto para fins estruturais: classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9778: Argamassa e concretos endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12655: Concreto de cimento Portland: preparo, controle, recebimento e aceitação – procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15823-1: Concreto autoadensável - Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15823-2: Concreto autoadensável – Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual – Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- Assunção, J.W. (2016). *Concreto leve autoadensável – Avaliação da influência da argila expandida no processo de dosagem e nas propriedades do concreto*. Tese (Doutorado no Instituto de Arquitetura e Urbanismo). Universidade de São Paulo, 256 p.
- Bernardo, L. F. A.; Nepomuceno, M. C. S.; Pinto, H. A. S. (2016). Flexural ductility of Lightweight aggregate concrete beams. *Journal of Civil Engineering and Management*, v. 66, p. 121.
- Diógenes, H.J.F. (2010). *Análise tipológica de elementos e sistemas construtivos pré-moldados de concreto do ponto de vista de sensibilidade de vibrações em serviço*. Dissertação (Mestrado na Escola de Engenharia de São Carlos). Universidade de São Paulo, 248 p.
- Diógenes, H.J.F.; Cossolino, L.C.; Pereira, A. H. A.; El Debs, M. K.; El Debs, A. L. H. C. (2011). Determination of modulus of elasticity of concrete from the acoustic response. *IBRACON Structures and Materials Journal*, v. 4, nº 5, p. 792-813.
- Diógenes, H. J. F. (2013). *Análise Numérica e Experimental de Ligações por aderência Aço – Concreto Aplicada em Estruturas Mistas*. Tese (Doutorado na Escola de Engenharia de São Carlos). Universidade de São Paulo, 198 p.
- European Committee for Standardization. EN1992-1-1: Design of concrete structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings. Bruxelas, 2004.
- Evangelista, A. C. J.; Shehata, L. C.D.; Almeida, I. R. (1996). Características mecânicas de concretos leves de alta resistência com argila expandida, produzidos no Brasil. In: *International Congress On High-Performance Concrete, And Performance And Quality Of Concrete Structures*. Florianópolis, p. 170-189.
- Forigo, C.; Lopes, Y.D.; Vanalli, L. (2021). Determinação da resistência à compressão do concreto exposto a altas temperaturas pelo método de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. *HOLOS*, ano 37, v.7, e9904.
- Gomes Neto, D. P. (1998). *Dosagem de microconcretos leves de alto desempenho para a produção de pré-fabricados de pequena espessura – estudo de caso*. Dissertação (Mestrado em Engenharia na Escola de Engenharia de São Carlos). Universidade de São Paulo, 156 p.
- Hoff, G. C. (1991). High strength lightweight concrete for Artic applications. In: *Aci Symposium on Performance of Structural Lightweight Concrete*. USA, 1991.
- Mechi, A.; Sanches, D. L. (2010). Impactos ambientais da mineração no Estado de São Paulo. *Revista Estudos Avançados (USP)*, ano 24, v. 68.

- Moravia, W. G. (2007). *Influência de parâmetros microestruturais na durabilidade do concreto leve produzido com argila expandida*. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal de Minas Gerais, 187 p.
- Morettin, P. A; Bussab, W. O. (2010). *Estatística Básica*. (6ª ed.). Saraiva.
- Mostafa, A. M. A.; Hossam, H. (2010). Experimental investigation and development of artificial neural network model for the properties of locally produced light weight aggregate concrete. *Engineering*, v. 02, p. 408-419.
- Nunes, J. J. B.C. (2020). *Concreto autoadensável com agregados leves para terminais de transportes*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Instituto Militar de Engenharia, 187 p.
- Norwegian Standartization. NS 3473 E 2003: Design of concrete structures – Design and detailing rules. Oslo, 2003.
- Rashad, A. M. (2005). Mitigating the elevated temperature effects and predicting the residual strength of loaded RC short columns. Thesis – PhD (Structural Engineering). Faculty of Engineering.
- Rashad, A. M. (2018). Lightweight expanded clay aggregates as a building material – An Overview. *Construction and Building Materials*, v. 170, p. 757-775.
- Rossignolo, J. A.; Agnesini, M.V.C. (2005). Concreto leve estrutural, In: ISAIA, G.C. (Ed), Concreto, ensino, pesquisa e realizações. *IBRACON*, v. 02, p. 1333-1362.
- Rossignolo, J. A. (2009). *Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestrutura e aplicações*. (1ª ed.). PINI.
- Rossignolo, J. A. (2003). *Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos – dosagem, produção, propriedades e microestrutura*. Tese (Doutorado em Engenharia - Escola de Engenharia de São Carlos). Universidade de São Paulo, 220 p.
- Santis, B. C.; Rossignolo, J. A. (2014). Avaliação da influência de agregados leves de argila calcinada no desempenho de concretos estruturais. *Ambiente Construído*, v. 14, n. 4, p. 21–32.
- Santos, R. A.; Lira, B. B.; Ribeiro, A. C. M. (2012). Argamassa com substituição de agregado natural por resíduo de britagem de granito. *HOLOS*, ano 28, v. 5.
- Scotta, R.; Giorgi, P. (2016). Comparative cyclic tests of exterior flat slab column connections in normal concrete and fiber-reinforced lightweight aggregate concrete. *Materials and Structures*, v. 49, p. 4049–4067.
- Silva, B. M. M. (2007). *Betão leve estrutural com agregados de argila expandida*. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 180 p.
- Silva Neto, J. A. DA; Lima, M. S. DE; Azerêdo, A. F. N. DE; Azerêdo, G. A. DE. (2021). Influência do pó de pedra e borracha de pneu inservível como agregados no concreto. *HOLOS*, Ano 37, v.2, e9661.

Valente, M.I.B. (2007). *Estudo Experimental de Sistemas de Conexão para Pontes Mistas de Aço e Betão Leve*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Portugal.

Verzegnassi, E. (2015). *Estudo das propriedades no estado fresco e endurecido do concreto leve autoadensável*. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, 145 p.

Wegin, F. M. (2012). Strength properties of lightweight concrete made with LECA grading. *Australian Journal of Civil Engineering*, v. 10, p. 11-22.

#### COMO CITAR ESTE ARTIGO:

Araújo Melo, A., Lima Almeida, O. M., & José Farkat Diógenes, H. (2023). ESTUDO EXPERIMENTAL DO MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E DINÂMICO DE CONCRETOS LEVES COM O EMPREGO DE ARGILA EXPANDIDA PARA FINS ESTRUTURAIS. HOLOS, 3(39). Recuperado de <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/14312>

#### SOBRE OS AUTORES

##### A. A. MELO

Universidade Federal da Paraíba

E-mail: arlan85@hotmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4040-9428>

##### O. M. L. ALMEIDA

Universidade Federal da Paraíba

E-mail: orlandomlmeida@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5504-8015>

##### H. J. F. DIÓGENES

Universidade Federal da Paraíba

E-mail: hidelbrando@ct.ufpb.br

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2480-7688>

**Editora Responsável:** Francinaide de Lima Silva Nascimento

**Pareceristas Ad Hoc:** Eduardo Chahud e Arthur Gomes Dantas de Araújo



Submitted September 26, 2022

Accepted November 27, 2023

Published December 15, 2023

