



Efeito do Uso da Argila Expandida como Agregado Graúdo para Produção de Concreto Leve

Igor Leite Pozzoco¹; Eduardo Polesello¹

✉ eduardopolesello@feevale.br

Universidade Feevale - Novo Hamburgo - RS, Brasil.

Histórico do Artigo: O autor detém os direitos autorais deste artigo.

Recebido em: 09 de março de 2024 Aceito em: 20 de março de 2024 Publicado em: 20 de dezembro de 2024

Resumo: O concreto leve destaca-se como alternativa para situações em que seja necessário a busca por um material de menor densidade em relação ao concreto convencional. A utilização desse tipo de material se justifica, principalmente, pela sua principal característica, a diminuição da massa específica, que é de aproximadamente 1800 kg/m³, enquanto no concreto convencional aproxima-se de 2400 kg/m³. No entanto, é importante destacar que o concreto leve apresenta uma redução na resistência mecânica quando comparado ao concreto convencional, sendo sua utilização, geralmente, especificada para vedações e enchimentos, por exemplo. Diante destes aspectos, este estudo pretende avaliar o comportamento do concreto leve considerando o uso de diâmetros de grãos e percentuais da argila expandida, em substituição ao agregado basáltico, com posterior comparação ao desempenho do concreto convencional. O estudo analisou a resistência à compressão, absorção de água e densidade de massa dos concretos produzidos. Os resultados mostraram que a substituição do agregado graúdo basáltico pelo agregado graúdo leve impacta diretamente na diminuição da massa específica e resistência à compressão, além de um aumento da absorção de água por capilaridade. Ao se substituir totalmente o agregado basáltico pela argila expandida, de composição granulométrica semelhante, registrou-se uma redução na massa específica do concreto de 30%. Ainda, registrou-se uma diminuição da resistência à compressão de 24% e aumento da absorção de água por capilaridade de III%.

Palavras-chave: Concreto leve; Argila expandida; Massa específica; Resistência à compressão.

Effect of Using Expanded Clay as Heavyweight Aggregate for Lightweight Concrete Production

Abstract: Lightweight concrete stands out as an alternative for situations where it is necessary to search for a material with lower density compared to conventional concrete. The use of this type of material is mainly justified by its main characteristic, the reduction in specific mass, which is approximately 1800 kg/m³, while in conventional concrete it is close to 2400 kg/m³. However, it is important to highlight that the lightweight concrete presents a reduction in your mechanical strength when compared to conventional concrete, and its use is generally specified for sealing and filling, for example. In view of these aspects, this study aims to evaluate the lightweight concrete behavior, considering the use of different grain diameters and percentages of expanded clay, replacing basalt aggregate, with subsequent comparison to the performance of conventional concrete. The study analyzed compression strength, water absorption by capillarity and specific mass of the concrete produced. The results showed that the replacement of basaltic coarse aggregate with light coarse aggregate directly impacts the reduction in specific mass and compressive strength, in addition to an increase in water absorption by capillarity. When the basaltic aggregate was completely replaced by expanded clay, with a similar particle size composition, a specific mass reduction of 30% was observed. Furthermore, there was a decrease in compressive strength of 24% and an increase in water absorption by capillarity of III%.

Keywords: Light concrete; expanded clay; specific mass; compressive strength.

Efecto del Uso de Arcilla Expandida como Agregado Grueso para la Producción de Hormigón Ligero

Resumen: El hormigón ligero destaca como una alternativa para situaciones en las que es necesario buscar un material con menor densidad respecto al hormigón convencional. El uso de este tipo de material se justifica principalmente por su principal característica, la reducción de masa específica, que es de aproximadamente 1800 kg/m³, mientras que en el hormigón convencional se acerca a los 2400 kg/m³. Sin embargo, es importante resaltar que el concreto liviano presenta una reducción en la resistencia mecánica en comparación con el concreto convencional, y su uso generalmente se especifica para sellado y relleno, por ejemplo. Teniendo en cuenta estos aspectos, este estudio tiene como objetivo evaluar el comportamiento del hormigón ligero considerando el uso de diámetros de grano y porcentajes de arcilla expandida, en sustitución del árido basáltico, con posterior comparación con el comportamiento del hormigón convencional. El estudio analizó la resistencia a la compresión, la absorción de agua y la masa específica del hormigón producido. Los resultados mostraron que el reemplazo del agregado grueso basáltico por agregado grueso ligero impacta directamente en la reducción de la masa específica y la resistencia a la compresión, además de un aumento en la absorción de agua por capilaridad. Al sustituir completamente el árido basáltico por arcilla expandida, de similar composición granulométrica, se observó una reducción de la masa específica del 30%. Además, hubo una disminución de la resistencia a la compresión del 24% y un aumento de la absorción de agua por capilaridad del 111%.

Palabras clave: Concreto ligero; arcilla expandida; masa específica; resistencia a la compresión.

INTRODUÇÃO

Existem diversas normas e referências para a definição do concreto leve e, particularmente, no Brasil, podem ser observadas as NBR 6118 (ABNT, 2023) e NBR 12655 (ABNT, 2015), que consideram como um material que apresente massa específica inferior a 2000 kg/m³. O concreto leve pode ser produzido totalmente com agregados leves ou, ainda, com substituição de forma parcial o agregado convencional pelo agregado leve. Levando em consideração a trabalhabilidade e outras propriedades, é usual utilizar o agregado miúdo convencional, uma areia natural, e limitar a dimensão do agregado graúdo leve em 19 mm (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Para Rossignolo (2009), o concreto produzido com agregados leves apresenta um melhor isolamento térmico e acústico, porém apresenta diminuição na resistência mecânica à compressão e aumento no custo. Entre os materiais utilizados como agregados leves, destaca-se a vermiculita, EPS e a argila expandida. De acordo com Mioranza e Bellei (2018) em uma comparação entre a utilização de argila expandida e EPS como agregado graúdo na produção de concreto leve, a argila apresenta resistência à compressão e massa específica superiores, ao avaliar o comportamento quanto à resistência à compressão, registrado em três diferentes idades.

Cavalcanti *et al.* (2018) destacam que concretos leves produzidos com a argila caracterizada por diâmetro de grãos entre 0 e 5 mm apresentam a maior resistência à compressão em relação a concretos produzidos com argilas expandidas com grãos entre 6 e 15 mm e entre 22 e 32 mm. No entanto, é importante destacar, conforme registro de Nunes *et al.* (2021), que quanto maior é o diâmetro máximo dos grãos de argila expandida, mais arredondadas são as partículas e, em contrapartida, para diâmetros menores as particular se mostram mais lamelares, que são agregados achatados, onde a espessura é pequena em relação a outras dimensões, possuindo formatos de lâminas.

Para Oliveira *et al.* (2019), a argila expandida é caracterizada como um material com formato arredondado, diâmetro de grãos entre 0 mm e 32 mm e com uma densidade entre 300 kg/m³ e 900 kg/m³. São produzidas industrialmente através da queima da argila natural em fornos rotativos, com temperatura de aproximadamente 1200 °C. Após processo de fabricação, apresenta um formato arredondado, rugoso por fora e poroso por dentro, característica que aumenta consideravelmente a absorção de água (ROSSIGNOLO, 2009). Ainda, segundo Nunes *et al.* (2021), a textura superficial das argilas expandidas apresenta menor aderência entre o agregado e a matriz de cimento, associado a aspectos de rugosidade e absorção de água. Para Zulkarnain e Ramli (2008), um agregado leve em imersão possui de 5% a 20% de absorção de água em 24 horas, fator que varia de acordo com o material e sua qualidade, enquanto os agregados tradicionalmente usados no concreto possuem aproximadamente 2% de absorção.

A busca por alternativas que possam substituir o concreto convencional, quando necessário, visando diminuir o peso próprio das estruturas, e conseqüentemente as cargas nas edificações, justificam mais estudos que analisem o comportamento de agregados leves na mistura. Assim, o presente trabalho irá abordar os comportamentos mecânicos do concreto leve utilizando argila expandida como agregado graúdo, registrando também a influência nas densidades, além de verificar o comportamento quanto a absorção de água, possibilitando a comparação e análise das principais diferenças do concreto leve com o concreto convencional.

MATERIAL E MÉTODOS

Os materiais utilizados foram definidos pela disponibilidade para consumo na região do Vale dos Sinos, no estado do Rio Grande do Sul.

Materiais Utilizados

O aglomerante utilizado foi o cimento Portland tipo pozolânico, ensacado, caracterizado, segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018), como CP IV, e apresentou massa específica de 2,72 g/cm³.

O agregado miúdo utilizado na produção dos concretos foi uma areia natural de origem quartzosa e o agregado graúdo uma brita de origem basáltica. As características desses agregados, assim como as respectivas normas utilizadas para caracterização, estão apresentadas na tabela 1.

Tabela 1. Características dos agregados miúdo e graúdo

Agregado	Característica avaliada	Resultado
Miúdo	Módulo de finura - NBR 17054 (ABNT, 2022)	2,03
	Dimensão máx. do grão - NBR 17054 (ABNT, 2022)	2,36 mm
	Massa específica - 16916 (ABNT, 2021)	2,62 g/cm ³
	Massa unitária - NBR 16972 (ABNT, 2021)	1,53 g/cm ³
	Absorção de água - 16916 (ABNT, 2021)	0,90 %
Graúdo	Módulo de finura - NBR 17054 (ABNT, 2022)	6,40
	Dimensão máx. do grão - NBR 17054 (ABNT, 2022)	19,00 mm
	Massa específica - NBR 16917 (ABNT, 2021)	2,73 g/cm ³
	Massa unitária - NBR 16972 (ABNT, 2021)	1,62 g/cm ³
	Absorção de água - NBR 16917 (ABNT, 2021)	2,94 %

Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

A argila expandida foi o agregado graúdo utilizado para produção dos concretos leves, em substituição ao agregado graúdo convencional. Foram utilizadas argilas expandidas com duas distribuições granulométricas diferentes, caracterizadas com diâmetro de grãos entre 6 e 15 mm e 15 e 22 mm, tratadas nesse estudo como AE 6-15 e AE 15-22, respectivamente. De acordo com o fabricante das argilas, o tipo AE 6-15 possui uma densidade aproximada de 600 kg/m³ e granulometria equivalente a um agregado graúdo basáltico de diâmetro máximo 12,5 mm. Já, o tipo AE 15-22, também segundo o fabricante, possui densidade aproximada de 500 kg/m³ e apresenta uma granulometria equivalente a um agregado de origem basáltica com diâmetro máximo de 19 mm.

A caracterização das argilas seguiu os mesmos procedimentos adotados para o agregado graúdo, de acordo com as normas NBR 17054 (ABNT, 2022) e NBR 16972 (ABNT, 2021), respectivamente, para ensaios de granulometria e massa unitária, e a NBR 16917 (ABNT, 2021)

para densidade e absorção de água. A tabela 2 apresenta os resultados encontrados na caracterização das argilas expandidas utilizados no estudo.

Tabela 2. Características das argilas expandidas utilizados no estudo

Característica avaliada	Resultado AE 6-15	Resultado AE 15-22
Módulo de finura	6,57	7,38
Dimensão máx. do grão	19,0 mm	25,0 mm
Massa específica	1,28 g/cm ³	1,27 g/cm ³
Massa unitária	0,57 g/cm ³	0,59 g/cm ³
Absorção de água	11,2 %	9,09 %

Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

Observa-se que os resultados encontrados nos ensaios de caracterização diferem um pouco das especificações apresentadas pela fabricante na ficha técnica do produto. Para sequência do estudo adotaram-se os resultados obtidos nos ensaios, executados conforme procedimentos das normas supracitadas. É importante observar a alta absorção de água da argila expandida ao ser comparada com o agregado de origem basáltica, evidenciando para futuros estudos a possibilidade de efetuar eventual tratamento superficial da argila expandida visando reduzir a absorção de água, aspecto relevante para análise do desempenho do concreto produzido.

O aditivo químico que utilizado para produção dos concretos, comercialmente conhecido como plastificante polifuncional, segundo a NBR 11768-1 (ABNT, 2019) classifica-se como redutor de água do tipo 1. As características do aditivo, segundo informações da ficha técnica do fabricante, estão apresentadas na tabela 3.

Tabela 3. Características do aditivo redutor de água

Especificação	Parâmetro de referência	Resultado do lote utilizado
Cor	-	Líquido marrom
Massa específica (g/cm ³)	1,065 a 1,105	1,090
pH	9,0 a 11,0	10,67
Teor de sólidos (%)	16,50 a 20,50	18,74

Fonte: Adaptado das fichas técnicas dos fabricantes, 2023.

Para a produção dos concretos foi utilizada a água potável disponibilizada pelo laboratório onde a pesquisa foi desenvolvida, que, segundo a 15900-1 (ABNT, 2009), ao ter essa classificação a água pode ser utilizada como água de amassamento para a produção de concreto.

Planejamento Experimental

A produção dos concretos foi realizada em betoneira de eixo inclinado, com capacidade de 450 litros. A ordem de colocação dos materiais foi a mesma para todos os traços, sendo realizada da seguinte forma: agregado graúdo - parte da água - cimento - agregado miúdo - água final e aditivo. A opção de adição do aditivo ao final segue a indicação de Angelin (2012).

Para verificar a massa específica dos concretos, foi realizada a pesagem de três corpos de provas para cada traço, forma do CP vazia e após preenchida com o concreto. Após registro desses dados, considerando o volume conhecido do cilindro utilizado, no qual possui as dimensões de 10 cm x 20 cm, foi possível definir a massa específica para cada concreto produzido.

Considerando o uso de concretos em zonas urbanas que, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2023), estabelece classe de agressividade ambiental II, estabeleceu-se, para definição do traço referência, o limite máximo para a relação a/c igual a 0,60 e classe de resistência mínima C25. Com base nas características dos materiais utilizados, foi, previamente, definido um teor de argamassa para a mistura de 54%, permitindo um concreto com características adequadas para lançamento e adensamento.

De acordo com a ACI 213R-03 (2003), para a produção de concreto com agregados leves recomenda-se um consumo de cimento acima de 300 kg/m³, de modo que se possa assegurar uma boa trabalhabilidade para o material. Outro importante aspecto, em função da alta permeabilidade dos agregados leves, é realizar uma pré-saturação dos agregados antes de adicioná-los na mistura ou simplesmente acrescentar uma quantidade de água a mais na mistura, limitada à água registrada no ensaio de absorção do agregado leve. Esta última alternativa foi a adotada nesta pesquisa.

Ainda, considerando as classes de abatimento especificadas na NBR 8953 (ABNT, 2015), definiu-se como classe de consistência S220, que contempla o abatimento do concreto entre 160 e 220 mm. Quanto ao consumo de aditivo, considerou-se as recomendações do fornecedor que limita a dosagem entre 0,5% e 1,0%, adotando-se no estudo o valor intermediário de 0,75%.

Pela definição deste estudo ser a análise da substituição parcial, até substituição total, do agregado graúdo basáltico pela argila expandida, optou-se em considerar a definição do traço através de método convencional de dosagem, já que o estudo considera o traço referência apenas com agregado basáltico. Considerando os aspectos de dosagem experimental apresentado pelo método do IPT/EPUSP, obteve-se como traço unitário em massa 1:2,40:2,90. A tabela 4 detalha o traço de concreto referência, para a produção de 1 m³ de concreto.

Tabela 4. Detalhamento do traço referência, para 1 m³ de concreto

Traço	Relação a/c	Cimento (kg)	Agregado miúdo (kg)	Agregado graúdo 19 mm (kg)	Aditivo (g)	Água (kg)
T-REF	0,58	342,0	821,0	991,0	2,56	198,0

Fonte: Autores, 2023.

Para análise do efeito do uso da argila expandida, a pesquisa contemplou duas abordagens distintas. Inicialmente, o agregado basáltico foi substituído pela argila expandida, caracterizada como argila AE 6-15, que apresenta distribuição granulométrica semelhante ao agregado graúdo basáltico utilizado. Com o intuito de traçar um comportamento do concreto com a substituição da brita basáltica pela argila expandida, além dos pontos extremos, 100% com agregado basáltico 19 mm e 100% com argila expandida, optou-se por estabelecer mais três pontos distribuídos de forma equidistante desses extremos. Logo, além do traço referência, a substituição se deu por quatro percentuais diferentes, conforme detalha a tabela 5.

Tabela 5. Composição dos traços detalhando os percentuais de substituição do agregado de origem basáltica pela argila expandida AE 6-15

Traço	REF	T1	T2	T3	T4
Agregado graúdo 19mm	100%	75%	50%	25%	0%
Argila expandida AE 6-15	0%	25%	50%	75%	100%

Fonte: Autores, 2023.

Como segunda análise do uso da argila expandida na produção de concreto, considerou-se o uso de duas argilas com diferentes características granulométricas. Para tal, tomou-se como referência o traço produzido com 100% do agregado graúdo com a argila AE 6-15 e analisou-se a substituição, parcial e total, desta pela argila AE 15-22. Analogamente, além

dos pontos extremos da curva, 100% argila expandida AE 6-15 e 100% argila expandida AE 15-22, e pela disponibilidade de materiais, optou-se por mais dois pontos equidistantes entre esses extremos. Assim, além do traço com 100% de argila AE 6-15, foram adotados mais três diferentes percentuais, conforme apresentado na tabela 6.

Tabela 6. Composição dos traços somente com argila expandida detalhando os percentuais de utilização entre cada uma das argilas

Traço	T4	T5	T6	T7
Argila expandida AE 6-15	100%	67%	33%	0%
Argila expandida AE 15-22	0%	33%	67%	100%

Fonte: Autores, 2023.

Destaca-se que na definição das quantidades dos agregados graúdos, para todos os concretos produzidos, além do percentual de substituição estabelecido para cada dosagem, considerou-se o comportamento dos materiais quando sua caracterização da massa unitária e, ainda, na definição da quantidade de água da mistura, considerou-se a absorção de água dos agregados leves, que conforme os ensaios, foi de 11,2% para a argila AE 6-15 e 9,9% para a argila AE 15-22.

Após a mistura e homogeneização dos materiais, foi realizado o ensaio de abatimento do tronco de cone, seguindo as orientações da NBR 16889 (ABNT, 2020). Mostrando-se o abatimento em concordância com a classe de abatimento especificada, foram moldados os corpos de prova. Para os procedimentos de moldagem e cura dos corpos de prova, seguiu-se as orientações da NBR 5738 (ABNT, 2015). Os corpos de prova permaneceram em processo de cura até as idades de 7 e 28 dias, de acordo com cada ensaio estabelecido nesta metodologia.

Ensaio Realizados

Além das análises do comportamento dos concretos no estado fresco, analisou-se o desempenho em relação à resistência à compressão e à absorção de água por capilaridade.

O ensaio de resistência mecânica à compressão foi realizado aos 7 e 28 dias de idade para todos os concretos produzidos, seguindo as orientações da NBR 5739 (ABNT, 2018). Para cada traço foram rompidos 3 corpos de prova em cada idade. O processo de preparação das bases foi dado por retificação, e o rompimento realizado em prensa da marca Emic com capacidade de aplicação de carga de 2000 kN com uma velocidade de aplicação constante de $(0,45 \pm 0,15)$ MPa/s. Ao final, para cada idade de ensaio, além dos resultados individuais obtidos, foram apresentados a média, desvio padrão e coeficiente de variação.

Em relação ao ensaio de absorção de água por capilaridade, realizado aos 28 dias de idade, respeitou-se as determinações estabelecidas pela NBR 9779 (ABNT, 2012), que especifica a colocação dos CPs em uma lâmina de água de 5 mm e registro das massas saturadas em 3h, 6h, 24h, 48h e 72h. Esse procedimento foi realizado para três corpos de prova de cada traço. Como resultado, foi apresentado a quantidade de absorção de água de cada concreto, expresso em gramas por centímetro quadrado (g/cm^2), e calculado através de uma relação entre a massa seca, massa saturada e seção transversal em contato com a água.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na sequência apresentam-se os comportamentos registrados, segundo metodologia proposta, analisando a influência e principais diferenças nos concretos produzidos, ao se substituir, parcial e total, o agregado graúdo convencional, de origem basáltica, por agregado leve, a argila expandida.

Estado Fresco do Concreto

Com o intuito de analisar as propriedades do concreto no estado fresco, foram realizados os ensaios de abatimento de tronco de cone e massa específica para todos os traços produzidos. Para o abatimento de tronco de cone, detalham-se os resultados obtidos na tabela 7.

Tabela 7. Resultados encontrados no ensaio de abatimento de tronco de cone

Traço	REF	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Abatimento (mm)	190	205	220	215	200	230	203	230

Fonte: Autores, 2023.

Praticamente todos os concretos se encontram de acordo com a classe definida na metodologia da pesquisa, exceto os traços T5 e T7 que apresentaram um abatimento um pouco superior. Observa-se que os concretos produzidos com agregado leve, nos quais foi incorporada a água correspondente à absorção destes agregados, evitando maior demanda de água e alteração da relação a/c, apresentaram um abatimento maior do que o concreto referência, associando seu comportamento ao formato mais arredondado dos grãos.

Caso o percentual de água registrado pelo ensaio de absorção de água, da argila expandida, não tivesse sido adicionado na mistura, o ensaio de abatimento apresentaria

resultados diferentes, pois conforme cita Rossignolo (2009) o concreto leve, normalmente, apresenta valores de abatimento menores do que os encontrados para concretos convencionais, devido à menor deformação por ação da gravidade. Mioranza e Bellei (2018) validam essa informação em seu estudo, ao produzirem concretos com a mesma argila utilizada neste estudo, AE 15-22, como agregado leve e registrando abatimentos bem inferiores, de 100 mm, porém não consideraram na mistura a água referente a absorção do agregado leve.

Pelas tabelas 8 e 9 é possível visualizar o efeito da presença do agregado leve na massa específica do concreto, ao se considerar a média de três resultados individuais de massa específica encontrados para o estado fresco, além de apresentar o desvio padrão e coeficiente de variação para cada traço.

Tabela 8. Massa específica média, desvio padrão e coeficiente de variação, para todos os concretos produzidos com substituição do agregado graúdo natural pela argila expandida AE 6-15

Traço	REF	T1	T2	T3	T4
Massa Específica Média (kg/m³)	2350,30	2297,23	2140,75	1995,56	1646,20
Desvio Padrão	52,86	3,77	11,47	11,94	21,62
Coeficiente de Variação	2,25%	0,16%	0,54%	0,60%	1,31%

Fonte: Autores, 2023.

Tabela 9. Massa específica média, desvio padrão e coeficiente de variação, para todos os concretos produzidos com duas diferentes granulometrias de argila expandida, AE 6-15 e AE 15-22

Traço	T4	T5	T6	T7
Massa Específica Média (kg/m³)	1646,20	1704,81	1752,66	1741,71
Desvio Padrão	21,62	19,18	47,20	8,69
Coeficiente de Variação	1,31%	1,12%	2,69%	0,50%

Fonte: Autores, 2023.

Nota-se que para os concretos onde a presença do agregado graúdo basáltico ocorreu de forma decrescente, houve redução de sua massa específica de maneira gradual (tabela 8). Essa redução da massa específica para os concretos com agregado leve, corrobora com o que destaca Araújo Melo et. al (2023), atrelando tal comportamento aos parâmetros de porosidade e permeabilidade, índice de vazios e absorção maiores, se comparado ao concreto convencional.

Já para os concretos produzidos somente com o agregado graúdo leve (tabela 9), não foi identificada esse comportamento já que a alteração está apenas na granulometria do

agregado e não no tipo de agregado. Destaca-se que no traço T7, onde foi utilizado 100% da argila AE 15-22 como agregado graúdo, foram encontrados valores muito próximos aos apresentados por Cavalcanti *et al.* (2018) ao utilizar esse mesmo tipo de argila. No estudo em questão, os autores obtiveram uma massa específica de 1772,90 kg/m³; já para os concretos em que foram adotados 100% da argila AE 6-15, caso do traço T4, registrou-se uma massa específica de 1780,41 kg/m³, um pouco superior às apresentadas neste estudo.

Estado Endurecido do Concreto

Conforme já citado, no estado endurecido analisou-se o comportamento dos concretos quanto à resistência à compressão e à absorção de água por capilaridade. As idades de ensaio foram aos 7 e 28 dias, para resistência à compressão, e aos 28 dias, para absorção de água por capilaridade.

Os resultados da resistência à compressão obtidos nas idades estudadas, 7 dias e 28 dias, para os concretos produzidos com substituição do agregado natural pela argila expandida AE 6-15 estão detalhados nas tabelas 10.

Tabela 10. Resistência à compressão os concretos produzidos com substituição do agregado graúdo natural pela argila expandida AE 6-15

	REF	T1	T2	T3	T4	
7 dias	CPI (MPa)	22,5	20,5	13,6	16,2	15,9
	CP2 (MPa)	21,6	20,0	18,9	17,9	14,9
	CP3 (MPa)	21,4	20,8	15,2	16,8	16,1
	Média (MPa)	21,6	20,5	15,2	16,8	15,9
	Desvio Padrão (MPa)	0,59	0,40	2,72	0,86	0,64
	Coefficiente de Variação	2,71%	1,97%	17,88%	5,13%	4,04%
28 dias	CPI (MPa)	30,4	27,0	25,8	21,0	24,3
	CP2 (MPa)	30,2	27,5	23,2	22,9	21,3
	CP3 (MPa)	32,7	26,4	25,3	24,5	23,1
	Média (MPa)	30,4	27,0	25,3	22,9	23,1
	Desvio Padrão (MPa)	1,39	0,55	1,38	1,75	1,51
	Coefficiente de Variação	4,57%	2,04%	5,45%	7,65%	6,54%

Fonte: Autores, 2023.

Os resultados da resistência à compressão analisando concretos produzidos apenas com argila expandida como agregado graúdo, aos 7 dias e 28 dias, estão detalhados nas tabelas 11.

Tabela II. Resistência à compressão os concretos produzidos com duas diferentes granulometrias de argila expandida, AE 6-15 e AE 15-22

		T4	T5	T6	T7
7 dias	CPI (MPa)	15,9	16,8	17,9	17,8
	CP2 (MPa)	14,9	13,8	17,4	17,0
	CP3 (MPa)	16,1	17,2	19,1	17,6
	Média (MPa)	15,9	16,8	17,9	17,6
	Desvio Padrão (MPa)	0,64	1,86	0,87	0,42
	Coefficiente de Variação	4,04%	11,06%	4,88%	2,37%
28 dias	CPI (MPa)	24,3	22,1	23,3	22,7
	CP2 (MPa)	21,3	25,8	23,1	22,9
	CP3 (MPa)	23,1	21,4	22,3	23,2
	Média (MPa)	23,1	22,1	23,1	22,9
	Desvio Padrão (MPa)	1,51	2,36	0,53	0,25
	Coefficiente de Variação	6,54%	10,70%	2,29%	1,10%

Fonte: Autores, 2023.

O comportamento médio registrado pode melhor ser visualizado, graficamente, pelos gráficos 1 e 2, respectivamente para os concretos produzidos com agregado graúdo natural e agregado leve e somente com agregado leve composto por duas granulometrias diferentes.

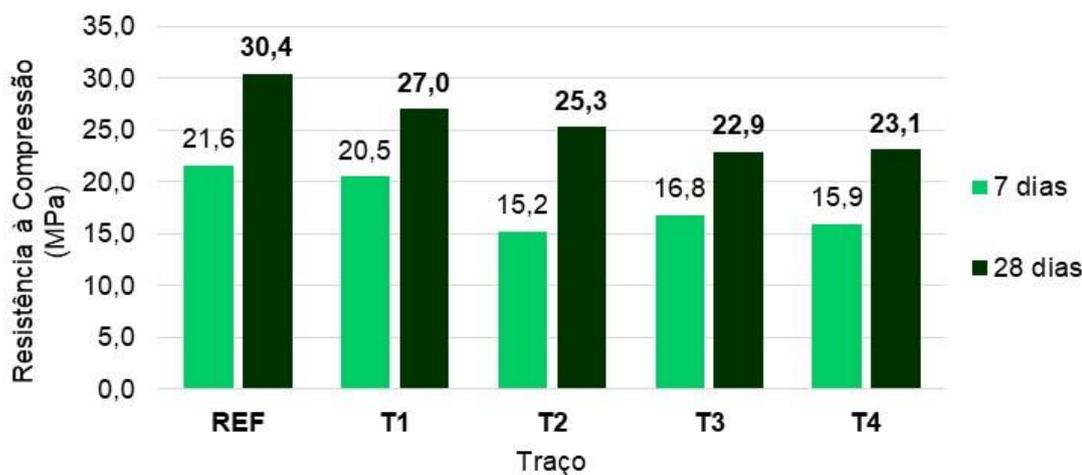


Gráfico 1. Comportamento da resistência média à compressão dos concretos com substituição do agregado graúdo natural pela argila expandida AE 6-15

Fonte: Autores, 2023.

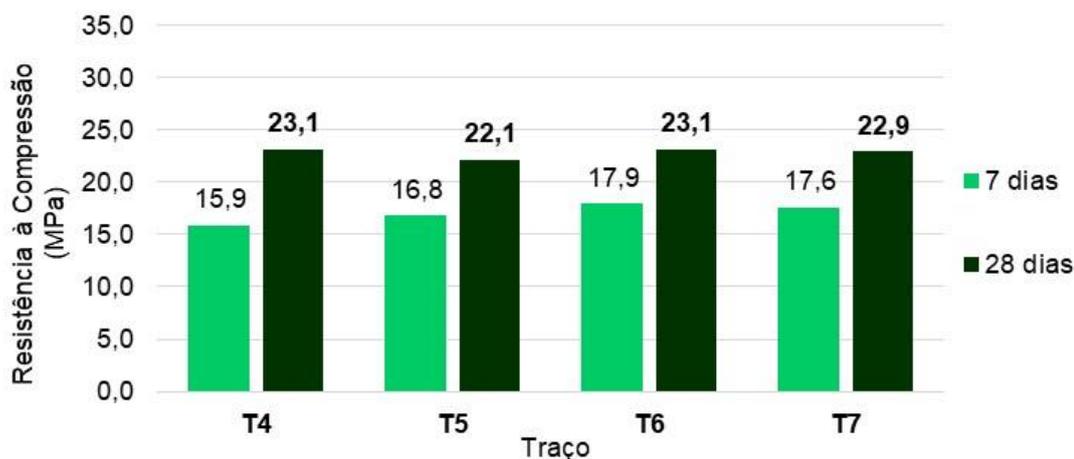


Gráfico 2. Comportamento da resistência média à compressão dos concretos com duas diferentes granulometrias de argila expandida, AE 6-15 e AE 15-22

Fonte: Autores, 2023.

Ao analisar o comportamento aos 7 dias de idade, destaca-se que as maiores resistências aos 7 dias foram encontradas nos traços REF e T1 (gráfico 1), justificados por terem a maior presença de agregado de origem basáltico. Já para os concretos apenas com argila expandida (gráfico 2), a maior resistência encontrada foi para o traço T6, com 17,9 MPa, sendo inclusive superior a alguns traços com presença de agregado graúdo basáltico, caso do T2 e T3, por exemplo.

Após os 28 dias, os concretos com a presença de agregado graúdo basáltico apresentaram resultados de resistência maiores em relação aos concretos com apenas argila expandida, o que corrobora com o resultado encontrado por Rossignolo (2009), onde a utilização dos agregados leves diminuíra a resistência dos concretos. Rossignolo (2009) menciona ainda que concretos produzidos com agregado leve apresentaram uma menor elevação dos seus valores de resistência para os 28 dias de idade, no entanto esse comportamento não foi identificado no atual estudo. Registrou-se um crescimento médio, dos 7 para os 28 dias, de 41% na resistência do traço referência, enquanto para o traço T4, produzido apenas com argila expandida, esse crescimento foi de 45%.

Os resultados do estudo mostram-se em concordância com o estudo realizado por Oliveira *et al.* (2019), ao registrar valores de resistência, aos 28 dias, semelhantes aos apresentados no traço T3 da presente pesquisa. Os autores utilizaram uma proporção muito semelhante, sendo 30% de agregado basáltico e 70% de argila expandida, apresentando uma resistência média de 22,2 MPa. Já para o traço referência, onde foi produzido o concreto convencional, os concretos produzidos por Oliveira *et al.* (2019) apresentaram uma resistência

média de 40,55 MPa, sendo bem superior aos 30,4 MPa encontrados aqui neste estudo. Como justificativa está o tipo de cimento utilizado, que foi do tipo CPV ARI, e não o mesmo utilizado neste estudo, CP IV.

Conforme já destacado ao longo do texto, concretos produzidos com agregados leves perdem desempenho em relação ao comportamento mecânico, fato associado a porosidade do agregado quando comparado ao agregado de origem basáltica, por exemplo. Neste sentido, a figura 1 apresenta uma análise microscópica dos concretos produzidos, ao ilustrar imagens do concreto convencional em comparação ao produzido com argila expandida.

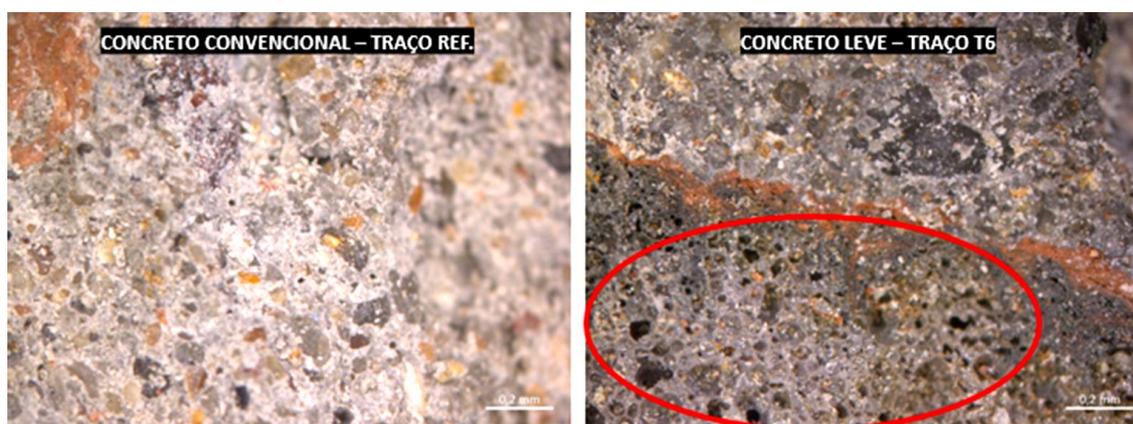


Figura 1. Análise microscópica do concreto convencional e de um concreto produzido apenas com argila expandida

Fonte: Autores, 2023.

Através do ensaio de microscopia (figura 1), ilustrados pelo traço referência, TREF, que se utilizou 100% de agregado natural de origem basáltica, e o traço T6, no qual foi utilizado 100% de agregado graúdo leve, é possível visualizar essa maior porosidade presente em concretos produzido com argila expandida, validando a informação que essa porosidade é um dos fatores que interferem na redução do desempenho mecânico em concretos leves, registrado neste estudo pela resistência à compressão.

Mehta e Monteiro (2014) observam que a taxa de absorção de água por capilaridade é uma boa forma de avaliar a durabilidade potencial de um concreto, pois quanto menor for essa absorção, maior será a dificuldade de íons agressivos do meio penetrarem no concreto. Neste sentido, o resultado obtido no comportamento da absorção de água dos concretos, ao longo do período de ensaio de absorção de água por capilaridade, é ilustrado no gráfico 3.

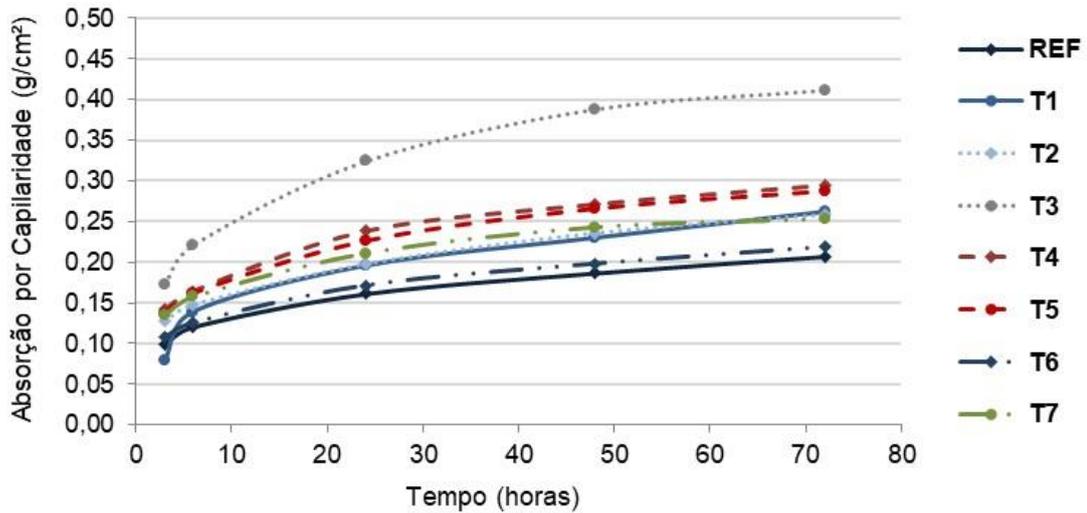


Gráfico 3. Comportamento da absorção de água por capilaridade ao longo das 72 horas de ensaio, realizado aos 28 dias de idade
 Fonte: Autores, 2023.

Já a figura 2 apresenta, em porcentagem, a absorção por capilaridade dos concretos registrada ao final do ensaio.

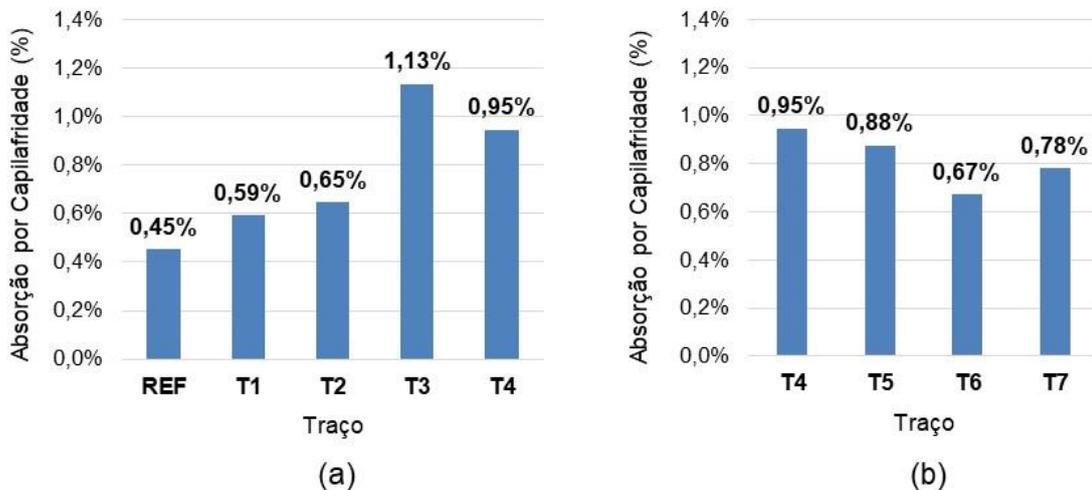


Figura 2. Absorção de água por capilaridade, em porcentagem, registrada ao final do ensaio aos 28 dias de idade: (a) concretos com substituição do agregado graúdo natural pela argila expandida AE 6-15, (b) concretos com duas diferentes granulometrias de argila expandida (AE 6-15 e AE 15-22)
 Fonte: Autores, 2023.

Como esperado, fica evidente que a presença da argila expandida como agregado graúdo no concreto aumenta a absorção de água da mistura, já que este comportamento, assim como mencionado por Araújo Melo *et. al* (2023), está diretamente relacionada à estrutura porosa do agregado leve.

Observa-se que os resultados registrados se mostram inferiores aos obtidos no estudo de Nechel (2018), que utilizou a mesma argila e composição do traço T4 deste estudo. A porcentagem de absorção encontrada, no estudo citado, após 72h foi de 3,17%, superior aos 0,95% encontrados nesta pesquisa, com semelhante registro para o concreto convencional, ao observar uma absorção de 1,17%, também superior ao 0,45% aqui identificado (figura 2). Os comportamentos de uma maneira geral foram semelhantes à presente pesquisa, onde o concreto leve apresenta absorções superiores ao concreto convencional, porém, os resultados inferiores registrado neste estudo associa-se a diferenças entre os materiais utilizados. Em particular, ao tipo de cimento e presença do aditivo químico, já que Nechel (2018) utilizou CP II, e não CPIV como no presente estudo, e, especialmente, ao fato do autor optar em não utilizar aditivo químico, enquanto neste estudo utilizou-se um aditivo redutor de água.

Também é possível observar que a menor quantidade absorção de água foi encontrada no traço referência, como esperado. Entretanto observa-se que a maior absorção foi para o traço T3, produzido com 25% de agregado graúdo basáltico e 75% da argila AE 6-15, sendo inclusive uma absorção superior aos traços com apenas agregados leves. Uma possível justificativa pode ser a distribuição dos agregados nos corpos de prova dos concretos do traço T3, conforme pode ser observado na figura 3.

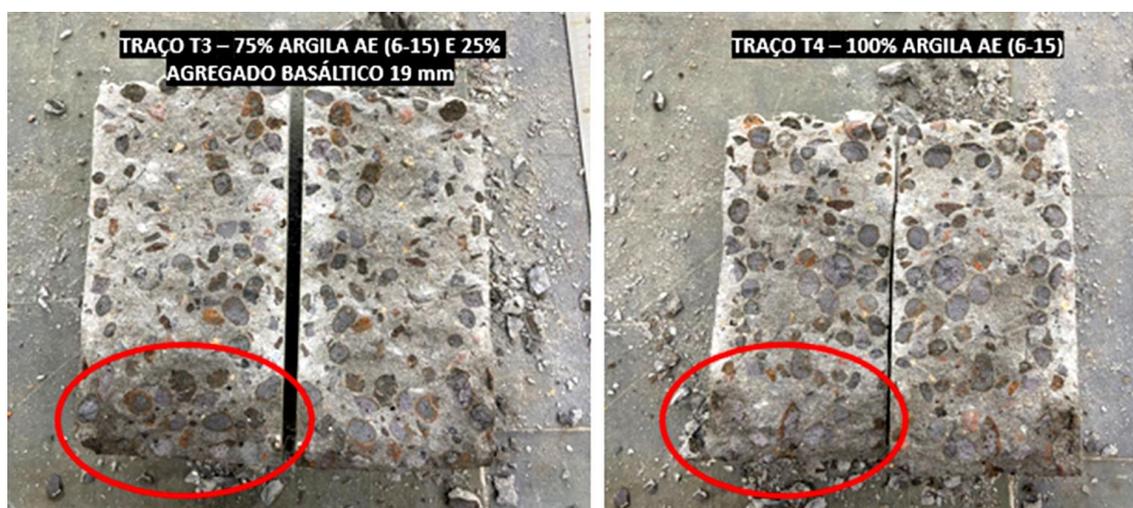


Figura 3. Análise da distribuição dos agregados leves para os concretos caracterizados como T3 e T4

Fonte: Autores, 2023.

Pela figura 3 observa-se que os concretos do traço T3 tiveram uma maior concentração de agregados leves na parte inferior (contato com a água no ensaio) dos corpos de prova em relação ao traço T4, logo, o que pode ter influenciado e justificar a maior absorção que foi

registrada para o T3. Como já destacado anteriormente, através do ensaio de microscopia, o índice de vazios dos concretos leves interfere no comportamento do concreto, permitindo, na absorção de água por capilaridade, que ocorra maior facilidade de a água ser absorvida pelo material, devido à alta porosidade da argila expandida, justificando também a menor absorção ter sido registrada para o traço referência.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através do presente estudo buscou-se analisar os comportamentos dos concretos ao se utilizar argila expandida como agregado graúdo, em substituição total e parcial ao agregado graúdo natural de origem basáltica. Com base nos resultados encontrados, é possível inferir as seguintes conclusões:

- As massas específicas apresentaram reduções consideráveis ao substituir o agregado graúdo convencional pelo agregado leve. As reduções ocorreram de forma gradual com o aumento da porcentagem dos agregados leves e redução do agregado basáltico. Em uma comparação entre o traço referência (REF) e um traço com somente argila expandida (T4), a redução foi de 30%;
- Ao se aumentar os teores de agregado leve nos concretos estudados, assim como no comportamento das massas específicas, as resistências diminuíram de forma gradual. Ao se comparar os mesmos traços REF e T4, houve uma redução considerável de resistência à compressão, 24%;
- Analisando apenas os concretos com argila expandida, sem o agregado graúdo natural, registrou-se que as diferentes composições entre os dois tipos de argila utilizadas, AE 6-15 e AE 15-22, não apresentaram grandes mudanças nos resultados de massa específica e resistência à compressão. Em uma comparação entre os traços T4 e T7, produzidos apenas com as argilas AE 6-15 e AE 15-22, respectivamente, para os resultados de resistência à compressão, aos 28 dias, a variação foi de menos de 1%, e para massa específica uma variação de apenas 5%;
- A presença da argila expandida aumentou de uma maneira geral a absorção de água por capilaridade dos concretos. Porém, a maior absorção encontrada foi para o traço T3, no qual tinha a presença de 25% de agregado graúdo basáltico e 75% de agregado graúdo leve, comportamento atribuído pela maior concentração de agregado leve na face do corpo de prova em contato com a água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI. Guide for structural lightweight aggregate concrete. ACI 213R-03. ACI Manual of Concrete Practice, 2003.

ANGELIN, Andressa Fernanda. Concreto leve estrutural – Desempenhos físicos, térmicos, mecânicos e microestruturais. 2014. 126 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2014.

ARAÚJO MELO, A., LIMA ALMEIDA, O. M., DIÓGENES, H. J. F. Estudo experimental do módulo de elasticidade estático e dinâmico de concretos leves com o emprego de argila expandida para fins estruturais. *HÓLOS*, Ano 39, v.3, 2023. Recuperado de <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HÓLOS/article/view/14312>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. NBR 5739: Concreto – Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2023.

_____. NBR 8953: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

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

_____. NBR 11768-1: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Parte I: Requisitos. Rio de Janeiro, 2019.

_____. NBR 12655: Concreto de Cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2022.

_____. NBR 15900-1: Água para amassamento do concreto – Parte I: Requisitos. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. NBR 16889: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.

_____. NBR 16916: Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

_____. NBR 16917: Agregado graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

_____. NBR 16972: Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.

_____. NBR 17054: Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.

CAVALCANTI, M. P.; et. al. A análise das propriedades mecânicas utilizando diferentes tipos de Argila Expandida no Concreto Leve; 60º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON (ISSN 2175-8182), Foz do Iguaçu, 2018.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. 2o. [S. l.: s. n.], 2014.

MIORANZA, J. P.; BELLEI, P. Análise Comparativa das Propriedades do Concreto Leve com Agregados de Argila Expandida e Poliestireno Expandido (EPS); 60º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON (ISSN 2175-8182), Foz do Iguaçu, 2018.

NECHEL, Wagner Roberto. Análise comparativa entre a resistência à compressão, massa específica e absorção de água do concreto normal e concreto leve. Ijuí, 2018.

NUNES, J. J. B. de C.; TEIXEIRA, A. M. A. J.; SARAIVA, R. M. D. de C. Caracterização morfológica do agregado leve de argila expandida brasileira com utilização do AIMS. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 21, n. 3, p. 213-227, jul./set. 2021. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212021000300547>.

OLIVEIRA, A.I; et. al. Concreto leve reforçado com argila expandida; 61º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON (ISSN 2175-8182), Foz do Iguaçu, 2019.

ROSSIGNOLO, João Adriano. *Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestrutura e aplicações*. Editora PINI. São Paulo. 2009.

ZULKARNAIN, F; RAMLI; M. *Durability Performance of Lightweight Aggregate Concrete for Housing Construction*. Penang, Malaysia, 2008.