

CONCRETO AUTOADENSÁVEL: INFLUÊNCIA DA ARGILA EXPANDIDA NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Aline Lauers Vervloet (Engenheira Civil/ UNASP) E-mail: aline.lauers@hotmail.com
Lucas da Silva Barboza (Professor Doutor/UNASP) E-mail: lucas.barboza@unasp.edu.br
Artur Lenz Sartorti (Professor Doutor/UNASP) E-mail: artur.sartorti@unasp.edu.br

Resumo: O concreto autoadensável foi desenvolvido na intenção de garantir perfeita compactação do material mesmo em face de elevado grau de armadura; por isso, oferece vantagens no tempo de concretagem e redução da mão de obra necessária, tornando-se atrativo para indústrias de pré-fabricados e obras de grande porte. Entretanto, nestes setores o peso próprio das estruturas pode se tornar um fator limitante das atividades. Sob essa ótica, esta pesquisa objetiva a análise do comportamento mecânico do concreto autoadensável fabricado com argila expandida brasileira, unindo as vantagens do concreto autoadensável às do concreto leve estrutural. Para tanto, decorreu-se o estudo comparativo entre o material fabricado com argila expandida e com agregado natural. Foram realizados os ensaios de compressão direta, tração por compressão diametral, tração na flexão e módulo de elasticidade dos corpos de prova nas idades de 3, 7, 28 e 91 dias. Os resultados apresentaram queda considerável na resistência – especialmente à compressão direta – quando comparados ao concreto autoadensável fabricado com agregado basáltico, todavia, não houve comprometimento da funcionalidade estrutural do material. No que se refere ao módulo de elasticidade, os valores do concreto leve autoadensável são de um terço em relação aos valores do autoadensável convencional, indicando redução das tensões internas da peça o que diminui a chance de microfissuração.

Palavras-chave: Concreto autoadensável, argila expandida, resistência, agregado leve.

SELF-COMPACTING CONCRETE: INFLUENCE EXPANDED CLAY IN COMPRESSION RESISTANCE

Abstract: The self-supporting concrete was developed with the intention of guaranteeing perfect compaction of the material even in the face of a high degree of reinforcement; therefore, offers advantages in the time of concreting and reduction of the necessary workforce, making it attractive for pre-fabricated and large-scale works. However, in these sectors the inherent weight of the structures can become a limiting factor of the activities. From this perspective, this research aims to analyze the mechanical behavior of the self-compacting concrete fabricated with brazilian expanded clay, combining the advantages of self-supporting concrete and light structural concrete. For that, a comparative study was carried out between the material manufactured with expanded clay and with natural aggregate. The tests of direct compression, diametral compression traction, flexural traction and modulus of elasticity of the specimens were performed at ages 3, 7, 28 and 91 days. The results presented a considerable decrease in the resistance - especially to the direct compression - when compared to the self-compacting concrete made with basaltic aggregate, however, there was no harm of the structural functionality of the material. About the modulus of elasticity, the values of self-supporting lightweight concrete are one-third of the conventional self-supporting values, indicating reduction of internal stresses of the piece, which reduces the chance of microcracking.

Keywords: Self-compacting, Expanded clay, resistance, lightweight aggregate.

1. Introdução

Dentre os diversos métodos construtivos existentes o concreto apresenta-se como material de grande destaque na construção civil ao redor do mundo. Suas propriedades, unidas às do aço na concepção do concreto armado, realizam a tarefa de resistir de

maneira satisfatória aos esforços presentes na estrutura. Segundo Mehta e Monteiro (2014), a facilidade de aplicação in loco dá-se como fator determinante para a predominância do material ao redor do mundo.

Essa afirmação, no entanto, pode ser colocada à prova em construções de designers mais arrojados e/ou regiões com alta taxa de armadura, onde o concreto convencional apresenta dificuldades de preenchimento e adensamento nas formas. Nessas situações, em que ainda pode-se somar o despreparo da mão de obra disponível, é comum a ocorrência de queda na qualidade do produto final (OKAMURA e OUCHI, 2003).

Na intenção de combater este cenário foi desenvolvido o concreto autoadensável (CAA). A NBR 15823 (ABNT, 2017) o caracteriza por dispensar a vibração e garantir perfeita compactação, ou seja, possuir a capacidade de fluir pela forma utilizando unicamente o peso próprio e a ação da gravidade, livre de segregação. Por manter essas propriedades mesmo em condições de elevado nível de armadura, o CAA apresenta à construção civil industrialização e qualidade tecnológica antes indisponíveis (EFNARC, 2005; TUTIKIAN e MOLIN, 2008).

Assunção (2016) destaca que o CAA configura uma alternativa atraente para as indústrias de pré-fabricados em função do tempo de concretagem acelerado e redução da mão de obra necessária, quando comparado ao concreto convencional (CC). Neste segmento, no entanto, precisam ser consideradas as etapas de manuseio e transporte, diretamente relacionadas ao peso do material. Nessa lógica surge o conceito do concreto leve autoadensável (CLAA), um material que propõe a união das vantagens do CAA às propriedades do concreto leve estrutural (CLE).

A NBR 8953 (ABNT, 2015) classifica o CLE, segundo o próprio nome, pela redução significativa do peso específico em comparação ao CC, em uma ordem de até 1150 kg/m³. Isso se dá em função da utilização de agregados com massa específica menor do que os originários de rochas duras, como por exemplo: escória expandida, vermiculita, pedra pomes, argila expandida, entre outros. Sua utilização tenciona diminuir os esforços provenientes do peso próprio na estrutura e, conseqüentemente, reduzir gastos em elementos de fundação e formas (NEVILLE, 2016).

2. Concreto Leve Autoadensável

Poucas são as pesquisas, em nível nacional, a respeito de seu comportamento, tanto no estado fresco como endurecido, especialmente com argila expandida. As pesquisas existentes tratam o assunto exclusivamente em termos acadêmicos, o que dificulta sua implementação na prática. A nível mundial, é reconhecido como alternativa viável para pré-fabricados e tem sido analisado em outras aplicações como lajes e reforços estruturais (ASSUNÇÃO, 2016).

A substituição do agregado natural pela argila expandida é a mais indicada dentre os agregados leves disponíveis, no entanto, usualmente a escolha é feita em função da disponibilidade na respectiva região e/ou preço de mercado (MEHTA e MONTEIRO, 2014). A razão da preferência pela argila expandida dá-se, entre outros motivos, pela constatação feita por Rossignolo (2009). De acordo com o autor, os concretos produzidos com argila expandida possuem zona de transição pasta/agregado menor do que os concretos produzidos com outros agregados, inclusive os naturais.

Isso ratifica o fato de que concretos produzidos com agregados leves se comportam de maneira distinta aos produzidos com agregados convencionais. A literatura justifica a melhor durabilidade dos CLE baseada no comportamento da zona de transição do material, ausente de microfissuração (ASSUNÇÃO, 2016; ROSSIGNOLO, 2009).

Além disso, constatou-se que ocorre menor hidratação dos grãos de cimento nessa região, o que acarreta diminuição da relação água/cimento e permeabilidade no concreto. Rossignolo (2009), destaca que, apesar do agregado leve possuir menor resistência do que os convencionais, essas características podem contribuir positivamente no comportamento mecânico do material quando comparado ao CLE produzido com outros agregados.

Neville (2016) afirma que o formato e a constituição porosa da argila expandida, que facilitam a absorção de água pelo agregado, influem diretamente nas características reológicas do concreto. Por demandar mais água no momento da mistura, especialmente se estiver seca, sua dosagem precisa ser ajustada a fim de manter o abatimento desejado. Almeida Filho (2006) salienta ainda que a deformabilidade do CAA no estado fresco, medida pelos ensaios de abatimento, é fundamental para manutenção de suas propriedades compactantes.

Contudo, deve-se atentar para que, se verificada a necessidade de adição de água a fim de manter a trabalhabilidade, não se comprometa o teor ótimo da mesma em relação à mistura. Quantidades exageradas podem influir no aumento dos poros do concreto, levando à corrosão, carbonatação e diminuição da resistência mecânica. Concretos produzidos com argila expandida costumam apresentar queda na resistência mecânica, quando comparados ao CC, e alteração de propriedades como: trabalhabilidade, retração e isolamento térmico (BAUER, 2013; ROSSIGNOLO e AGNESSINI, 2011).

Isso posto, Rossignolo e Agnessini (2011) sugerem que o agregado leve seja saturado ou impermeabilizado, com pasta de cimento ou latex polimérico, de antemão. Dessa forma, impede-se que o mesmo absorva água de amassamento da mistura, o que resultaria em perda de fluidez e trabalhabilidade. Essas medidas, de acordo com Mehta e Monteiro (2014), solucionam o problema da absorção de água por parte do agregado graúdo, entretanto, tornam impossível saber com precisão a verdadeira relação água/cimento da mistura, uma vez que não se pode mais determinar se haverá, e em que quantidade, esse fenômeno.

Por esses motivos, é comum observar o acréscimo de cimento (em quantidades que não comprometam o peso específico esperado desse tipo de material) em traços de CLE com agregados não saturados. Dessa forma é possível manter a relação água/cimento de um CC e evitar grandes perdas de resistência mecânica, por melhorar as características da zona de transição da peça. Entretanto, essa providência não eleva a resistência do agregado leve, menor que a do natural, levando a peça ao rompimento por ruptura do agregado leve. Além disso, elevar o uso de aglomerante vai de encontro à medidas sustentáveis de utilização dos recursos naturais (ASSUNÇÃO, 2016; BARBOZA, 2016; NEVILLE, 2016; ROSSIGNOLO e AGNESSINI, 2011).

Giovannetti (1989), discorrendo sobre o CAA, ressalta que este não apresenta diferenças significativas em suas propriedades mecânicas quando comparado ao CC. As principais diferenças do material encontram-se no estado fresco do concreto. Pode-se inferir, portanto, que as características mais distoantes do CLAA sejam advindas das peculiaridades do agregado leve (argila expandida brasileira) apresentadas anteriormente.

Sendo assim, é possível observar que ainda existem muitas variáveis a serem analisadas na produção do CLAA: O melhor tipo de agregado leve, microestrutura do concreto em função do agregado leve, medidas para impedir a flutuação dos grãos (segregação), manutenção das propriedades no estado fresco, desempenho mecânico. Muitas são as perguntas em um universo pouco explorado (ASSUNÇÃO, 2016; GRABOIS, 2012).

O desenvolvimento desse tipo de concreto pode representar um avanço ao CAA. Pela união ao CLE espera-se obter vantagens como: diminuição do peso específico, durabilidade acentuada, resistência a ataques químicos e ao fogo, além de todas as propriedades do CAA. Se bem-sucedida, essa tecnologia apresenta um novo futuro para edificações como grandes edifícios e pontes (ASSUNÇÃO, 2016; PAPANICOLAOU e KAFFETZAKIS, 2011).

Em vista disso, pretende-se analisar o comportamento do concreto autoadensável (CAA) à compressão, tração e módulo de elasticidade, frente à substituição total do agregado graúdo natural (pedra britada basalto) por agregado leve (argila expandida brasileira), nas idades de 3,7, 28 e 91 dias. Os resultados servirão como base para determinação da viabilidade do uso deste material na indústria da construção civil brasileira.

3. Procedimento Experimental

A metodologia é dividida entre escolha e caracterização dos materiais, método de dosagem e, por fim, caracterização do concreto no estado fresco e endurecido. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais e Estruturas do UNASP-EC.

3.1 Materiais

Os materiais utilizados foram: cimento CP-II-Z-32 fabricado pela Votorantim, com massa específica determinada segundo as prescrições da NBR 16697 (ABNT, 2018), de $2,96 \text{ g/cm}^3$ e superfície Blaine indicada pelo fabricante, de $4595 \text{ cm}^2/\text{g}$ (VOTORANTIM, 2017); sílica ativa da empresa TECNOSIL, com massa específica de $2,22 \text{ g/cm}^3$ e teor de $\text{SiO}_2 > 90\%$ (TECNOSIL, 2017); fíler proveniente do calcário, compacto, de coloração branca e granulação fina (diâmetro médio de $45 \mu\text{m}$), da empresa BRASILMINAS (BRASILMINAS, 2017); e aditivo superplastificante ADVA™ CAST 525, produzido pela GRACE, fornecido em consistência líquida, na cor amarelo claro, que apresenta massa específica de $1,06 \text{ kg/m}^3$ (GRACE, 2017).

No que tange aos agregados, foram utilizados o miúdo e graúdo naturais e a argila expandida brasileira. O agregado miúdo classifica-se como uma areia quartzosa oriunda da região de Campinas-SP. Sua massa específica foi encontrada em conformidade com a NBR NM 52 (ABNT, 2009). A massa unitária no estado solto e índice de vazios foram determinados de acordo com a NBR NM 45 (ABNT, 2006), para amostras não compactadas (Método C). O índice de vazios foi determinado utilizando a massa unitária. Os ensaios de composição granulométrica, módulo de finura e dimensão máxima característica foram realizados em conformidade com a norma vigente: NBR NM 248 (ABNT, 2003). A classificação granulométrica procedeu como indicada pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

No que se refere ao agregado natural para o CAA de referência foi utilizada pedra britada de origem basáltica, oriunda da região de Engenheiro Coelho-SP. Sua massa específica deu-se em conformidade com a NBR NM 53 (ABNT, 2009). Os ensaios de massa unitária no estado solto e índice de vazios procederam segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003). Como foram realizados para o agregado miúdo, procederam-se os ensaios de composição granulométrica, módulo de finura e dimensão máxima característica, em conformidade com a NBR NM 248 (ABNT, 2003). A classificação granulométrica foi realizada como indicada pela NBR 7211 (ABNT, 2009). Todos os resultados estão contidos na Tabela 1.

Tabela 1 - Caracterização física dos agregados miúdo e graúdo natural

Agregado	DMC (mm)	Módulo de Finura	Classificação	Massa específica seca (g/cm ³)	Massa unitária solta (g/cm ³)	Índice de vazios (%)
Miúdo	4,8	4,17	Grossa	2,571	1,495	41,14
Graúdo	9,5	5,92	4,75/12,5	2,887	1,448	49,01

A argila expandida utilizada na pesquisa é fabricada e fornecida pela empresa CINEXPAN Indústria e Comércio de Argila Expandida Ltda (Várzea Paulista/SP). Dentre as granulometrias disponíveis selecionou-se o tipo 1056, correspondente ao tamanho da brita 0, mais usual para produção de concretos autoadensáveis. Na Tabela 2 são apresentadas as características físicas e químicas do agregado.

Tabela 2 - Características físicas e químicas da argila expandida

Parâmetro	Valores obtidos
Resistência à compressão por esmagamento (MPa)	12
Massa volumétrica seca (kg/m ³)	547,5
Classe granulométrica (mm)	6 – 15
Absorção de água por imersão (% em volume 24h)	7
Compactabilidade (%)	<10
Massa específica (kg/dm ³)	1,11

Fonte: Adaptado de Cinexpan (2017).

3.2 Dosagem do concreto autoadensável

A técnica de dosagem utilizada seguiu o indicado por Gomes (2002), para concretos autoadensáveis de alta resistência. Dentre as técnicas disponíveis, julgou-se ser esta a mais adequada, tendo em vista que a mesma visa benefícios no comportamento do concreto no estado endurecido, que é o objetivo deste estudo. Além disso, também é a mais favorável pelo viés financeiro, o que é um fator determinante para a futura aplicação da pesquisa em campo. Foram elaborados um concreto de referência e um concreto com agregado leve.

O método de dosagem considera o CAA como composto por três etapas distintas: pasta, agregados (esqueleto granular) e concreto. Norteia-se, portanto, em otimizar separadamente cada uma destas etapas. A pasta é constituída por cimento, sílica ativa, fíler, água e aditivo superplastificante e o esqueleto granular composto pela otimização entre agregados miúdo e graúdo de modo a encontrar a maior massa compactada seca, sem haver a necessidade de compactar o material; determinando assim a mistura com menor índice de vazios (GETTU e AGULLÓ, 2004; GOMES, 2002).

3.2.1 Etapa pasta

Gettu e Agulló (2004) delimitam algumas relações em peso importantes para a composição da pasta, sendo elas: água/cimento (A/C), sílica ativa/cimento (SA/C), superplastificante/cimento (SP/C) e fíler/cimento (F/C). Em seu estudo, os autores fixaram como ponto de partida na formação de concretos de alta resistência os valores de A/C em 0,4 e de SA/C em 0,1.

No que se refere à relação F/C, um dos responsáveis pela manutenção da fluidez sem presença de segregação, Gomes (2002) aponta que valores acima de 0,4 resultam em maior necessidade de aditivo superplastificante, sem aumento significativo na fluidez. Por outro lado, baixas relações F/C podem conduzir à segregação na presença de altas

relações SP/C. Adotou-se portanto, a relação F/C=0,4 indicada pelo autor.

Por fim, determina-se a relação SP/C. Os fabricantes do produto indicam que o melhor desempenho do aditivo encontra-se entre teores de 0,5 a 1,0%. Entretanto, Barboza (2016) apresenta teor ótimo de aditivo igual a 2%, levando em consideração o tipo de cimento utilizado e as outras relações predeterminadas. Vale ressaltar que o ajuste da quantidade de aditivos deve ser feito para cada situação em particular, levando em consideração o custo benefício para o empreendimento em questão. Neste estudo, será utilizado o teor proposto de 2%.

3.2.2 Etapa agregado

Nesta fase, busca-se o teor ótimo de agregados, ou seja, a mistura entre agregados graúdos e miúdos que garante a maior massa específica e o menor índice de vazios. Gomes (2002) esclarece que essa medida implica na redução do volume de pasta, além de menor porosidade e retração.

Para tal, foi realizado o ensaio de empacotamento utilizando a metodologia apresentada por Rebmann (2011), das misturas sucessivas. Nesse método é possível analisar a proporção ótima entre os agregados graúdo e miúdo, tanto em termos de massa unitária, quanto pelo índice de vazios. Os resultados do ensaio entre argila expandida e areia e entre basalto e areia seguem apresentados nas Figuras 1 e 2, respectivamente.

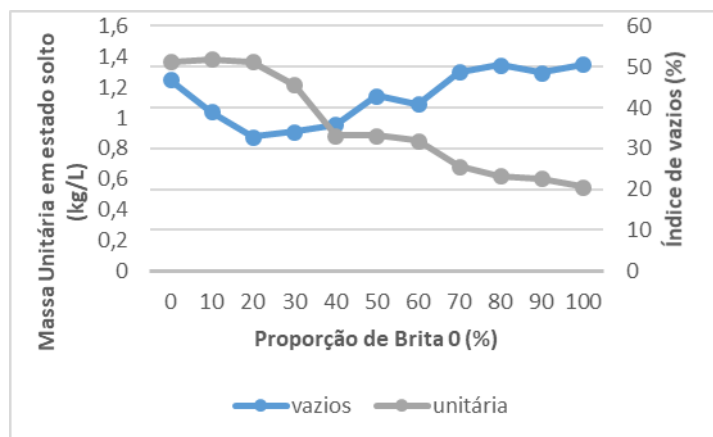


Figura 1 - Empacotamento argila expandida e areia

É possível observar que na Figura 1 não existe relação bem definida entre teores ótimos de agregados. Quanto maior o teor de argila expandida na mistura eleva-se também o índice de vazios e decresce a massa unitária, em função da baixa massa específica e alta porosidade do material. A proporção ideal entre argila expandida e areia para a dosagem, portanto, não pôde ser inferida por meio do ensaio. Por isso, a proporção adotada seguiu o indicado pelo ensaio entre basalto e areia, visando a manutenção do efeito comparativo da pesquisa.

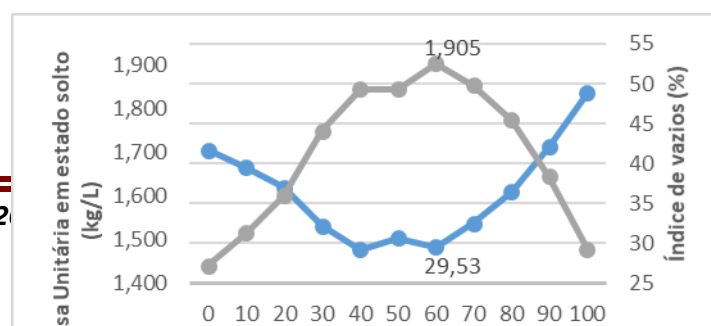


Figura 2 - Empacotamento basalto e areia

Na Figura 2 encontra-se o teor de 60% de agregados graúdos para o menor índice de vazios e maior massa específica. Essa proporção, entretanto, quando aplicada ao primeiro grupo de agregados resulta em um altíssimo volume de agregado graúdo leve em relação ao volume de pasta.

Para a argila expandida, portanto, não foi aplicado o mesmo critério do concreto de referência apresentado anteriormente, que baseia-se na massa dos elementos. Passou-se à uma análise da argila expandida que corresponde volumetricamente ao apontado pelo empacotamento do agregado natural, técnica difundida para dosagens de concreto leve com EPS (*expanded polystyrene* – EPS), que resultou em uma proporção de agregados de 40% para graúdos e 60% para miúdos no CLAA.

3.2.3 Etapa concreto

Tendo determinadas as relações da etapa pasta e do esqueleto granular (agregados), pode-se calcular a composição do CAA, segundo o apresentado por Gomes (2002). A seguir, na Equação 1, é apresentado o roteiro de cálculo para a determinação da quantidade de cada material em 1 m³ de CAA.

$$V_a + V_G + V_p = 1m^3 \quad (01)$$

Sendo V_p o volume de pasta, V_a o volume de agregado miúdo e V_G o volume de graúdo. Levando em consideração a composição e o volume de pasta da mistura, calcula-se a massa de cimento (Equação 2).

$$\omega_c = \left[\frac{V_p \cdot \rho_p}{1 + A/C + 0,01 \cdot \omega_f + 0,01 \cdot SP/C} \right] \quad (02)$$

Para os agregados considera-se:

$$\omega_g = \left(\frac{1 - V_p}{\frac{AF}{AG} + \frac{1}{\rho_{sd}}} \right) \quad e \quad \omega_s = \left(\frac{(AF/AG) \cdot (1 - V_p)}{\frac{AF}{AG} + \frac{1}{\rho_{sd}}} \right) \quad (03)$$

Tem-se que:

$$\omega_w = \left(\frac{a}{c} \right) \cdot \omega_c, \quad \omega_f = \left(\frac{SA/C + F/C}{100} \right) \cdot \omega_c \quad e \quad \omega_{sp} = \left(\frac{SP/C}{100} \right) \cdot \omega_c \quad (04)$$

Sendo: ω_{sd} = massa da areia seca por m³ [kg]; ω_p = massa de pasta por m³ [kg]; ω_w = massa de água por m³ [kg]; ω_f = massa de fíler por m³ [kg]; ω_{sp} = massa de superplastificante [kg]; ω_a = massa de brita por m³ [kg]; A/C = relação água/cimento;

SA/C = relação sílica ativa/cimento; F/C = relação fíler/cimento; SP/C = relação superplastificante/cimento; AF/AG = relação agregado miúdo/agregado graúdo; ρ_p = massa unitária da pasta [kg]; ρ_{sd} = massa específica da areia seca [kg]; ρ_{ad} = massa específica da brita seca [kg].

É importante ressaltar que, levando em consideração a elevada capacidade de absorção de água por parte da argila expandida, optou-se por realizar a mistura com o agregado graúdo na condição saturada, desconsiderando, portanto, esse fenômeno nos cálculos de dosagem. No que se refere ao agregado miúdo, foi considerado 0,5% de capacidade de absorção, acrescida à quantidade de água apresentada.

De maneira análoga, determinou-se a composição do concreto de referência (CAA_R) considerando a absorção de ambos os agregados. Para o basalto esse teor é de 1,05%. Obteve-se, por fim, a dosagem de 1 m³ de material para os concretos em estudo apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição de 1 m³ de CLAA e CAAR

Material	CLAA	CAA _R
Cimento	412,36	412,36
Sílica ativa	41,24	41,24
Agregado miúdo	799,94	670,33
Fíler calcário	164,94	164,94
Argila expandida tipo 1056	342,83	---
Pedra Britada Basalto	---	1005,49
Água	164,94	164,94
Aditivo Superplastificante	8,25	8,25
A/C	0,4	0,4
SA/C	0,1	0,1
FC/C	0,4	0,4
SP/C	2%	2%

3.3 Concreto no estado fresco

O processo de mistura deu-se utilizando uma betoneira por gravidade com capacidade para 400 L. Tanto para o concreto de referência, como para o de agregado leve, seguiu-se a seguinte sequência de mistura para tecnologia de concretos autoadensáveis: Adiciona-se o agregado graúdo mais $\frac{3}{4}$ da água total e mistura-se por 30 s; adicionam-se o cimento, a sílica ativa e o fíler calcário com o superplastificante e o restante da água e mistura-se por 120 s; adiciona-se o agregado graúdo e mistura-se por 120 s.

Essa sequência baseia-se nas indicações do Laboratório de Materiais Avançados à Base de Cimento e dura 270 s (ALMEIDA FILHO, 2006). Barboza (2016) salienta que após a homogeneização, caso verifique-se a necessidade, devem ser feitos ajustes a fim de que o concreto apresente a trabalhabilidade esperada.

Concluída a mistura e alcançada a trabalhabilidade esperada, foram realizados os ensaios de estado fresco: Caixa L, Funil V e espalhamento (*slump-flow test*) segundo a NBR 15823 (ABNT, 2017), além da determinação da massa específica de acordo com a NBR 9833 (ABNT, 2009). Os resultados de ambas as misturas no estado fresco são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Caracterização no estado fresco

Propriedades	Limites NBR 15823:2017	CLAA	CAAR
Slump-flow, df (mm)	$660 \leq df \leq 750$	610,00	680,00
T_{500} (s)	> 2	09"68	5"56
Caixa L, h_2/h_1	$\geq 0,80$	1,00	0,96
Caixa L, t_{20} (s)	---	02"43	1"37
Caixa L, t_{40} (s)	---	04"61	3"44
Funil V, t_v (s)	$9 \leq t_v \leq 25$	21"36	9"95
Massa específica (g/cm^3)	---	1,675	2,430

Verifica-se que o concreto leve ensaiado, em oposição ao de referência, apresentou fluidez abaixo do esperado para sua classe normativa, entretanto, ainda dentro dos parâmetros de um CAA. Os resultados favoráveis encontrados nos ensaios do estado fresco no CLAA confirmam, portanto, a premissa adotada nesta pesquisa, sustentada por Papanicolaou e Kaffetzakis (2011).

Nesta, observa-se que o agregado leve saturado reage adequadamente à misturas com mesmo teor de finos dos agregados naturais, bem como aos métodos de ensaios no estado fresco aplicados, sem com isso apresentar sinais de flutuação dos grãos ou perda significativa de trabalhabilidade. Pela Figura 3 nota-se que o concreto produzido com agregado leve apresentou bom aspecto de acabamento e nenhuma evidência de segregação.

Figura 3 - Aspecto do CLAA no estado fresco após o *slump flow test*

3.4 Concreto no estado endurecido

Na intenção de caracterizar o CLAA no estado endurecido e comparar seu comportamento com o concreto de referência, foram realizados os ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade estático.

Foram ensaiados 3 corpos de prova cilíndricos e 2 prismáticos para cada idade, sendo elas: de 3, 7, 28 e 91 dias. Antes da realização dos ensaios todos os corpos de prova foram retificados por uma retífica de eixo vertical, a fim de regularizar a superfície, como apresenta a NBR 5738 (ABNT, 2016).

Após a retificação foram extraídos dados como dimensões (altura e largura) e massa dos corpos de prova. Esta, foi determinada por meio da massa e volume dos corpos de prova ensaiados aos 28 dias. O resultado encontrado foi de $1,733 g/cm^3$ para o CLAA,

correspondente ao indicado pela NBR 8953 (ABNT, 2015) como um concreto leve estrutural, e de 2,433 para o CAAR. Percebe-se que ambos os concretos apresentaram aumento da massa específica em relação ao estado fresco, decorrência natural da hidratação dos grãos de cimento na pasta.

Para a realização dos ensaios utilizou-se uma prensa universal servo-hidráulica de Classe I, com capacidade para 1000 kN.

4 Análises de resultados

4.1 Resistência à compressão axial

Avaliou-se a resistência à compressão do CLAA produzido em comparação ao CAAR de acordo com o determinado pela NBR 5739 (ABNT, 2018). Os resultados dos ensaios são apresentados na Tabela 5 e na Figura 4. Na tabela é possível observar que o CLAA apresentou valores elevados do coeficiente de variação aos 3 e 7 dias. Isso pode ser explicado pelo processo de moldagem, retificação, ou até mesmo o posicionamento de algum dos corpos de prova no equipamento durante o ensaio, que apresentou disparidade na resistência quando comparado às outras amostras, elevando o desvio padrão.

Tabela 5 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão.

Ensaio	CLAA				CAAR			
	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
Número de CP's	3	3	3	3	3	3	3	4
Média (MPa)	21,35	28,27	35,41	36,62	41,39	46,47	75,14	83,60
Desvio Padrão (MPa)	3,43	1,73	1,54	0,49	1,65	1,28	0,57	0,58
CV%	16,07	6,12	4,35	1,34	3,98	2,74	0,76	0,69

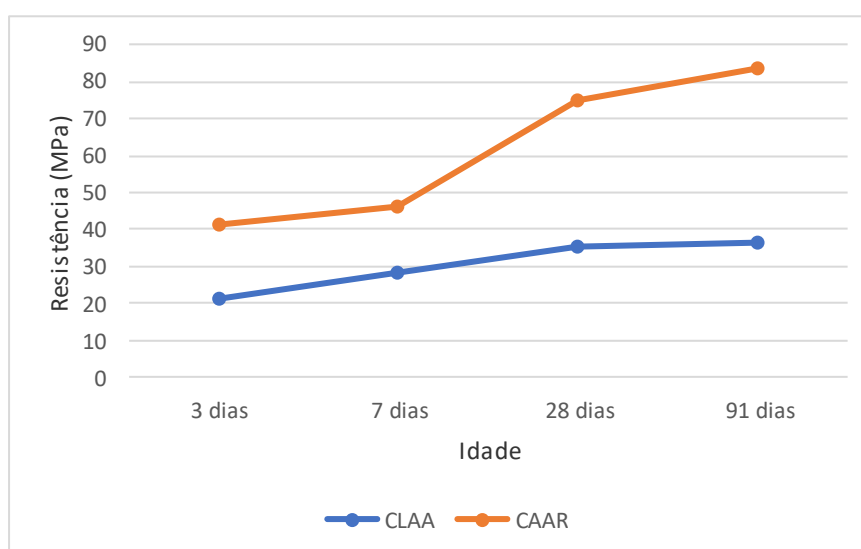


Figura 4 - Comparativo de resistência à compressão dos concretos em análise

Nos dois concretos verifica-se que a resistência aumentou conforme o tempo e mesmo na menor idade os resultados encontram-se satisfatoriamente acima do mínimo exigido

pela NBR 8953 (ABNT, 2015) para concretos com fins estruturais, que é o propósito desta pesquisa. Os valores otimistas de resistência podem ser explicados como resultado da técnica de dosagem utilizada (GOMES, 2002), que propõe misturas para concretos de alta resistência no estado endurecido.

Dito isso, é possível observar que o concreto composto por agregado leve mantém, em todos os períodos observados, valores inferiores aos do concreto com agregado natural. Isso confirma a hipótese formada por Rossignolo e Agnessini (2011), de que a resistência mecânica do concreto é negativamente afetada pelo agregado leve, em razão de sua porosidade e menor aderência com a pasta. No que se refere à ruptura do CLAA, pôde-se observar que em todos os casos os grãos de argila expandida foram rompidos na linha de fissura da peça, revelando a fragilidade do agregado em relação à matriz cimentícia, o que ratifica a queda de resistência em termos comparativos.

4.2 Resistência à tração por compressão diametral

Estão contidos na Tabela 8 os resultados dos ensaios de tração por compressão diametral, realizados em conformidade com a NBR 7222 (ABNT, 2011).

Tabela 6 - Resultados da resistência à tração por compressão diametral

Ensaio	CLAA				CAA _R			
	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
Número de CP's	3	3	3	3	3	3	3	4
Média (MPa)	2,49	3,31	3,77	3,53	4,54	4,45	7,26	7,45
Desvio Padrão (MPa)	0,38	0,09	0,48	0,72	0,15	0,09	0,21	0,02
CV%	15,26	2,72	12,73	20,40	3,22	2,01	2,86	0,33

É possível observar que os resultados encontrados para ambos os concretos correspondem à aproximadamente 11% dos valores de resistência à compressão axial apresentados anteriormente, que pode ser considerada uma proporção típica para este ensaio. Entende-se, portanto, que o agregado leve não apresentou alterações significativas no comportamento à tração por compressão diametral do concreto. Além disso, pelas mesmas razões das amostras do ensaio de compressão simples, as idades de 3, 28 e 91 dias apresentaram elevado coeficiente de variação.

4.3 Módulo de elasticidade estático

O módulo de elasticidade do concreto é determinado, essencialmente, pelo tipo de agregado graúdo que o compõe. Sendo assim, seu aferimento é importante nesta pesquisa que busca analisar a viabilidade do uso da argila expandida como agregado graúdo para o CAA. Os resultados encontrados nos ensaios, em conformidade com a NBR 8522 (ABNT, 2008), estão dispostos na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados do módulo de elasticidade estático

Ensaio	CLAA				CAAR	
	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias	28 dias	91 dias
Número de CP's	3	3	3	3	3	3
Média (GPa)	18,56	21,87	17,63	18,23	46,38	53,08
Desvio Padrão (GPa)	0,98	5,99	4,22	5,87	1,71	0,24
CV%	5,28	27,39	23,94	32,20	3,68	0,46

Observa-se que os coeficientes de variação encontrados no CLAA apresentam grande disparidade entre si. Isso pode ser justificado pelos mesmos motivos dos ensaios anteriores, entretanto, deve-se atentar para o fato de que este ensaio pode ter seus resultados mascarados por má aferição ou disposição dos equipamentos.

Os resultados encontrados para o CLAA variam entre 17 e 22 GPa, aproximadamente um terço dos valores apresentados pelo CAAR, o que condiz com o apresentado pela literatura a respeito de concretos com agregado leve. Entende-se, portanto, que os concretos com agregados naturais possuem maior rigidez quando submetidos ao carregamento imposto pelo ensaio.

Gumieri, Moravia e Vasconcelos (2010) apontam que os resultados do concreto leve, apesar de numericamente menores do que o CAAR, podem inferir maior capacidade de absorção das deformações impostas à estrutura de CLAA, gerando menores tensões internas – que é a leitura realizada pelo aparelho de ensaio, justificando os resultados obtidos. Este comportamento dificulta a microfissuração, o que estende a vida útil da peça.

4.4 Resistência à tração na flexão

Os corpos de prova prismáticos ensaiados para determinação da resistência à tração na flexão romperam, conforme o esperado, dentro do terço médio. Os resultados, obtidos conforme as prescrições da NBR 12142 (ABNT, 2010), são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados da resistência à tração na flexão

Ensaio	CLAA				CAAR	
	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias	28 dias	91 dias
Número de CP's	2	2	2	2	3	3
Média (MPa)	1,11	1,35	1,66	1,45	7,74	7,74
Desvio Padrão (MPa)	0,10	0,01	0,12	0,06	0,14	0,27
CV%	9,01	0,74	7,23	4,14	1,78	3,45

Pelos motivos vistos anteriormente, o coeficiente de variação no CLAA apresentou valores maiores para as idades de 3 e 28 dias. Os resultados encontrados no CLAA indicam uma resistência de 5% em relação à resistência à compressão encontrada, um valor consideravelmente abaixo do usual (15 a 20%) para concretos com agregados naturais. Dessa maneira, pode-se perceber que o agregado leve utilizado altera de maneira considerável o comportamento da peça solicitada à flexão.

5 Conclusão

Esta pesquisa teve por objetivo desenvolver um concreto que apresentasse as características do autoadensável e do leve estrutural, tanto no estado fresco como no endurecido, denominado CLAA. Para tanto, foi produzido a partir de cimento CP-II-Z-32, sílica ativa, fíler calcário, areia grossa quartzosa, argila expandida brasileira e aditivo superplastificante.

Foi utilizada a dosagem proposta por Gomes (2002), que mostrou-se adequada para a composição do material, contudo, o uso do agregado leve impôs adequações na composição do esqueleto granular, visto que o mesmo possui características físicas, como massa específica e porosidade, altamente díspares dos agregados convencionais. O método de composição mais adequado foi o que considerou a proporção volumétrica entre os agregados graúdo e miúdo.

As características no estado fresco corroboraram o indicado pela NBR 15823 (ABNT, 2017) para um concreto autoadensável. Um fator importante a se destacar foi a ausência de exsudação ou segregação na mistura. A argila expandida pode tender à estes fenômenos, levando em consideração que o material possui poucos pontos de aderência com a pasta e disposição à flutuação.

No que se refere ao estado endurecido, os resultados encontrados para o ensaio de resistência à compressão foram menores do que os do concreto de referência, principalmente por conta das características da argila expandida. Contudo, todos os ensaios realizados encontram-se satisfatoriamente dentro dos padrões para concretos leve estruturais.

Os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade estático do CLAA são de aproximadamente um terço dos valores obtidos para o concreto de referência. Infere-se, portanto, que o agregado leve eleva a capacidade do concreto em absorver pequenas deformações, o que reduz significativamente as tensões internas da peça que conduzem à microfissuração, elevando a vida útil do material em relação ao CAAR.

Portanto, a viabilidade da utilização deste material encontra-se principalmente na redução da massa específica do conjunto, fator determinante na composição do custo total de uma obra. Entretanto, deve-se levar em conta a limitação da capacidade mecânica decorrente da aplicação da argila expandida, além da necessidade de um severo controle técnico no momento da produção deste material.

Referências

ALMEIDA FILHO, F. M. *Contribuição ao estudo da aderência entre barras de aço e concretos autoadensáveis*. São Carlos, 2006. 291f. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: *Agregados – determinação da massa unitária e do volume de vazios*. Rio de Janeiro: 2006.

_____. **NBR NM 52**: *Agregado miúdo – determinação da massa específica e massa específica aparente*. Rio de Janeiro: 2009.

_____. **NBR NM 53**: *Agregado graúdo – determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água*. Rio de Janeiro: 2009.

_____. **NBR NM 248**: *Agregados – determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro: 2003.

_____. **NBR 5738**: *Concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro: 2016.

- _____. **NBR 5739**: *Concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro: 2018.
- _____. **NBR 7211**: *Agregados para concreto – especificação*. Rio de Janeiro: 2009.
- _____. **NBR 7222**: *Argamassa e concreto – determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro: 2011.
- _____. **NBR 8522**: *Concreto – determinação do módulo estático de elasticidade à compressão*. Rio de Janeiro: 2008.
- _____. **NBR 8953**: *Concreto para fins estruturais – classificação por grupos de resistência*. Rio de Janeiro: 2015.
- _____. **NBR 9833**: *Concreto fresco – determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico*. Rio de Janeiro: 2009.
- _____. **NBR 12142**: *Concreto – determinação da resistência à tração na flexão em corpos de prova prismáticos*. Rio de Janeiro: 2010.
- _____. **NBR 15823**: *Concreto autoadensável*. Rio de Janeiro: 2017.
- _____. **NBR 16697**: *Cimento Portland - Requisitos*. Rio de Janeiro: 2018.
- ASSUNÇÃO, J.W.** *Concreto leve autoadensável: avaliação da influência da argila expandida no processo de dosagem e nas propriedades do concreto*. São Carlos, 2016. 256f. Tese (Doutorado). Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.
- BARBOZA, L. S.** *Estudo sobre o impacto da redução do consumo de cimento no comportamento mecânico do concreto autoadensável*. São Carlos, 2016. 174f. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2016.
- BAUER, L. A. F.** *Materiais de Construção*. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. v. 1.
- BRASILMINAS** (2017). *Pó de Calcário (Ficha técnica do produto)*. Disponível em: <http://www.brasilminas.net/produtos_item.php?id=calc%C3%A1rio>. Acesso em: 24 out.2017.
- CINEXPAN** (2017). *Argila expandida brasileira (Ficha técnica do produto)*. Disponível em: <<http://www.cinexpan.com.br/pdf/ficha-tecnica-1506.pdf>>. Acesso em: 10 ago.2017.
- EFNARC**, European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems. *Specification and guidelines of self-compacting concrete*. EFNARC, 2005.
- GETTU, R.; AGULLÓ, L.** *Estado del arte del hormigón autocompactable y su caracterización. Cemento Hormigón*. N° 861. April, 2004. P 50-67.
- GIOVANNETTI, E.** *Princípios básicos sobre o concreto fluido*. São Paulo: PINI: IBRACON, 1989.
- GOMES, P. C. C.** *Optimization and characterization of high-strength selfcompacting concrete*. Barcelona, 2002. 150f. Tese (Doutorado). Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2002.
- GRABOIS, T. M.** *Desenvolvimento e caracterização experimental de concretos leves autoadensáveis reforçados com fibras de sisal e aço*. Rio de Janeiro, 2012. 119f. Dissertação (Mestrado). Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.
- GRACE** (2017). *Aditivos para concreto*. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/cls/catalogos/grace/adva_cast525.pdf>. Acesso em: 24 out.2017.
- GUMIERI, A. G.; MORAVIA, W. G.; VASCONCELOS, W. L.** *Efficiency Factor and Modulus of Elasticity of Lightweight Concrete with Expanded Clay Aggregate*. IBRACON Structures and Materials Journal. Vol 3, N° 2, June, 2010. P 195-204.
- MEHTA, K. P.; MONTEIRO, M. J. P.** *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.
- NEVILLE, A. M.** *Propriedades do concreto*. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.
- OKAMURA, H.; OUCHI, M.** *Self-Compacting Concrete*. Journal of Advanced Concrete Technology, Vol 1, N° 1, April, 2003. P 5-15.

PAPANICOLAOU, C. G.; KAFFETZAKIS, M. I. *Lightweight Aggregate Self-Compacting Concrete: State-of-the-Art and Pumice Application*. Journal of Advanced Concrete Technology. Vol 9, N° 1, January, 2011. P 15-29.

REBMANN, M. S. *Durabilidade de concretos estruturais com baixo consumo de cimento Portland e alta resistência*. São Carlos, 2011. 213f. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

ROSSIGNOLO, J. A. *Concreto leve estrutural: influência da argila expandida na microestrutura da zona de transição pasta/agregado*. Ambiente Construído, 2009. P 119-127.

ROSSIGNOLO, J. A.; AGNESINI, M. V. C. *Concreto leve estrutural*. In: ISAIA, G. C. *Concreto: Ciência e Tecnologia*. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. v. 2. p. 1531-1568.

TECNOSIL (2017). *Sílica Ativa (Ficha técnica do produto)*. Disponível em: <<http://www.tecnosilbr.com.br/produtos-aditivos-saco-soluvel-concreto/>>. Acesso em: 24 out.2017.

TUTIKIAN, B. F.; MOLIN, D. C. D. *Concreto auto-adensável*. São Paulo: Pini, 2008

VOTORANTIM (2017). *Cimento Portland Composto (Ficha técnica do produto)*. Disponível em: <<http://www.votorantimcimentos.com.br/hotsites/cimento/base.htm>>. Acesso em: 26 out.2017.