

EFEITO DA SÍLICA ATIVA NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO LEVE COM ARGILA EXPANDIDA

EFFECT OF SILICA FUME IN THE PROPERTIES OF LIGHTWEIGHT CONCRETE WITH EXPANDED CLAY

MARINA COSTA DE SOUZA | UNIEURO

AMÁLIA DE SOUSA DAVI | UNIEURO

YURI SOTERO BOMFIM FRAGA, MSc | UNIEURO

RESUMO

A utilização de concreto leve (CL) representa grande desafio devido a redução das propriedades mecânicas causadas pela substituição do agregado convencional por agregado leve. Frente ao exposto, este trabalho objetivou verificar o efeito da adição de 10% de sílica ativa (SA) em traços de concretos com substituição de 50% e 100% do volume de brita por argila expandida (AE). No estado fresco, foi analisado o teor de aditivo superplastificante necessário para obter a consistência de 100 ± 20 mm através do ensaio de slump test. No estado endurecido, foram analisadas as resistências à tração e à compressão aos 3, 7 e 21 dias de hidratação. Foi observada diminuição do desempenho mecânico do concreto quando a brita foi substituída por AE. Apesar dessa diminuição, os concretos leves resultaram em maiores relações resistência/peso. Foi observado que a adição de SA melhorou significativamente as propriedades mecânicas dos concretos leves. Dessa forma é possível concluir que a adição de SA pode compensar a perda de desempenho mecânico provocado pela substituição do agregado graúdo convencional pela argila expandida, sem ser necessário aumentar a quantidade de cimento da mistura.

29

PALAVRAS-CHAVE: Concreto leve; Sílica ativa; Argila expandida; Fator de eficiência.

ABSTRACT

The use of lightweight concrete (LC) represents a great challenge due to the reduction of the mechanical properties caused by the substitution of conventional aggregate for light aggregate. In view of the above, this paper aimed to verify the effect of the addition of 10% of silica fume (SF) in mixtures of concrete with replacement of 50% and 100% of the volume of crushed stone by expanded clay (EC). In the fresh state, the content of superplasticizer additive needed to obtain a consistency of 100 ± 20 mm was analyzed using the slump test. In the hardened state, tensile and compressive strengths were analyzed at 3, 7 and 21 days of hydration. A decrease in the mechanical performance of the concrete was observed when the gravel was replaced by EC. Despite this decrease, lightweight concretes resulted in greater strength/weight ratios. It was observed that the addition of SF significantly improved the mechanical properties of lightweight concrete. Thus, it is possible to conclude that the addition of SF can compensate for the loss of mechanical performance caused by the replacement of conventional coarse aggregate with expanded clay, without the need to increase the amount of cement in the mixture.

KEY WORDS: Lightweight concrete; Silica fume; Expanded clay; Efficiency factor.



1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, devido à modernização de equipamentos e ao aprofundamento de pesquisas em benefício do concreto, grandes conquistas foram alcançadas como o desenvolvimento de concretos especiais. Eles são utilizados com finalidades específicas, que demandam propriedades que não poderiam ser alcançadas com o concreto convencional (CC). São exemplos desse tipo de concreto, concreto leve (CL), concreto de alto desempenho (CAD), concreto auto-adensável (CAA) e concreto compactado a rolo (CCR) (LIMA *et al.*, 2014; DONATO, 2003; BONIFÁCIO; GODINHO, 2015).

Para a produção do CL, materiais alternativos aos tradicionais como argila expandida, cinzas volantes, xisto, vermiculita, entre outros, são utilizados com o objetivo de diminuir a massa específica do concreto e aumentar a relação resistência/peso, também conhecida como fator de eficiência. A substituição do agregado convencional pela utilização de um material poroso de baixa massa específica, é fundamental para fabricação do CL (MORAVIA, 2010).

Segundo Mo *et al.* (2017), o CL possui melhores propriedades de isolamento térmico e acústico e possibilita vencer grandes vãos com maior facilidade quando comparado com o CC. Sua densidade é inferior a 2.000 kg/m³, enquanto a do CC varia em torno de 2.400 kg/m³. Essa redução de densidade induz menor carga a estruturas de concreto e conseqüentemente incide em menores gastos em custos de transporte e manuseio.

A adição de um agregado poroso resulta na diminuição da resistência à compressão do CL em relação ao CC, sendo necessário aumentar o teor de cimento Portland para compensar a perda de desempenho mecânico. Apesar disso, o uso de cimento está atrelado a um alto custo ambiental devido às altas emissões de dióxido de carbono (CO₂) geradas durante sua produção (REVILLA-CUESTA *et al.*, 2020; KHAN *et al.*, 2020). Substituir parte do cimento em concretos leves por materiais cimentícios suplementares (MCS) se mostra uma alternativa para reduzir consumo de cimento e os problemas ambientais associados à sua produção.

Com o uso de MCS altamente reativos como a sílica ativa (SA) é possível reduzir o impacto ambiental para produção do concreto leve. Esses materiais, ao reagirem com o hidróxido de cálcio (CH) gerado na hidratação do cimento, possibilitam a melhoria nas propriedades do concreto em seus estados fresco e endurecido, através da formação de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) adicionais, reação denominada de pozolânica (FERNANDES, 2018). Com isso, a diminuição do desempenho mecânico do concreto com a utilização de

agregados leves pode ser compensada pelo aumento do desempenho mecânico oriundo da reação pozolânica.

A possibilidade de utilizar um material pozolânico é desejável para reduzir o consumo de cimento e a pegada de carbono. Dessa forma, este trabalho teve como objetivo verificar o efeito da substituição da brita por AE e adição de SA na consistência dos concretos leves, assim como, verificar as resistências à tração e à compressão e o fator de eficiência desses concretos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Concreto leve

Para atender as necessidades de obras que demandam propriedades específicas, concretos especiais vêm sendo desenvolvidos, como o CAA, o CCR, concreto reforçado com fibras e o CL (LIMA *et al.*, 2014; DONATO, 2003; BONIFÁCIO; GODINHO, 2015). O CL, objeto em estudo no presente trabalho, em geral, têm apresentado massa específica seca abaixo de 2.000 kg/m³ e tem como objetivo reduzir o peso das estruturas (SACHT; ROSSIGNOLO; SANTOS, 2010).

A substituição do agregado convencional por agregado de menor densidade incide na redução da massa específica, entretanto, pode ocasionar alterações significativas em outras importantes características do concreto, com destaque significativo na diminuição da resistência mecânica (ROSSIGNOLO; OLIVEIRA, 2005; GOMES *et al.*, 2015).

A NBR 6118 (ABNT, 2014) estabelece a resistência mínima do concreto para utilização estrutural de 20 MPa. O *American Concrete Institute* (Instituto de Concreto Americano), por meio da norma 213R-03 (ACI, 2003), indica resistência mínima à compressão aos 28 dias do concreto para utilização estrutural de 17 MPa. Segundo Rossignolo *et al.* (2003), é considerado concreto leve de alto desempenho um concreto com fator de eficiência acima de 25 MPa.dm³/kg.

O fator de eficiência (FE) pode ser interpretado como um parâmetro da razão entre a resistência à compressão e a massa específica seca do concreto. Esta análise é realizada conforme mostrado na Equação (1) (ROSSIGNOLO *et al.*, 2003; ANGELIN *et al.*, 2014; SCOBAR *et al.*, 2016).

$$FE = \frac{\text{Resistência à compressão}}{\text{Massa específica seca do concreto}} \quad (1)$$

São muito procurados para diminuir a massa específica seca do concreto materiais como a vermiculita do grupo de minerais de estrutura

micáceo-lamelar e clivagem basal que expande 20 a 30 vezes a sua espessura inicial, o EPS (poliestireno expandido), mais conhecido como isopor®, que possui fácil manuseio e é um excelente isolante e a argila expandida (SUTCU, 2015; STOCCO, 2009).

2.2 Concreto leve com argila expandida

A argila expandida é um agregado derivado do aquecimento de uma mistura de diferentes tipos de argilas a temperaturas extremamente elevadas (>1200°C). Durante o processo de aquecimento, há o aumento de volume do material, cerca de sete vezes o seu tamanho inicial (BONIFÁCIO; GODINHO, 2015).

Durante o processo de calefação da argila, os gases liberados por efeito do aquecimento das misturas de argila acabam sendo incorporados pela massa sinterizada e ficam retidos no interior do agregado. Esse aprisionamento do ar na estrutura celular do agregado contribui de maneira relevante para mudanças significativas nas propriedades térmicas do concreto, contribui para a redução da massa unitária, e concomitantemente, diminui o peso das estruturas de concreto (MORAVIA *et al.*, 2006; SACHT; ROSSIGNOLO; SANTOS, 2010).

A AE é um material bastante procurado para uso no CL devido ao bom desempenho na trabalhabilidade dos concretos. Um exemplo da utilização do material é a execução do tabuleiro da ponte Stovset (1997), construída na Noruega, na qual a sua utilização possibilitou a redução das dimensões dos elementos estruturais e viabilizou o aumento dos vãos (ROSSIGNOLO, 2009; MAYCÁ *et al.*, 2008).

2.3 Concreto leve com sílica ativa

A SA ou microssílica é um material em pó fino obtido como subproduto da fabricação do silício metálico e de ligas de ferro silício. Normalmente a SA contém alto teor de SiO₂ (> 90%), distribuídos em um diâmetro médio de 0,1 µm e área superficial na ordem de 20.000 a 25.000 m²/kg (FRAGA *et al.*, 2020; LIMA *et al.*, 2018; VASKE; CAMPAGNOLO; DAL MOLIN, 2010). Esse material possui partículas muito finas, com elevada superfície específica e alta energia superficial.

A SA, quando comparada a outros MCS, é o elemento que possui melhor contribuição para aumentar o desempenho de resistência mecânica nos produtos cimentícios. Este ônus influencia diretamente na criação de uma estrutura compacta, com redução da porosidade e no refinamento da distribuição do tamanho dos poros nos compósitos cimentícios (FRAGA *et al.*, 2020; GUIMARÃES, 2014).

Quando utilizada como MCS, a SA pode agir quimicamente através da reação pozolânica com o hidróxido de cálcio, o que resulta numa quantidade adicional de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), proporcionando aumento da resistência mecânica do concreto e acréscimo na resistência ao ataque de agentes agressivos. Também possui ação física com o efeito fíler, devido as partículas da SA possuírem pequena extensão proporcionando maior empacotamento, conforme mostrado na figura 1 (HERMANN *et al.*, 2016; ROMANO *et al.*, 2008; VASKE; CAMPAGNOLO; DAL MOLIN, 2010).

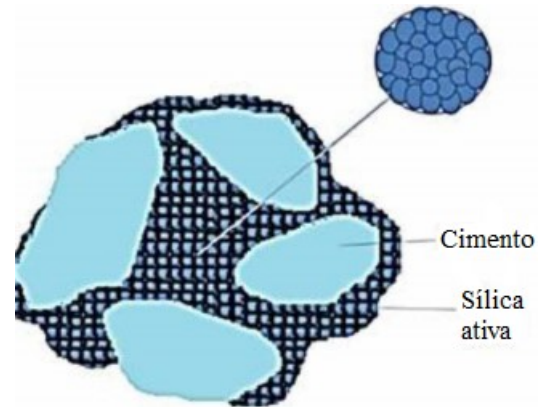


Figura 1. Efeito fíler da SA em materiais cimentícios. Fonte: Sousa, (2017).

Comumente, a utilização da SA varia em teores de 5 até 15% acerca da massa de cimento. Quando adicionada em teores superiores a 15%, este material deixa de atuar no efeito químico (pozolânico) para atuar apenas com o efeito físico (fíler), o que torna maior a demanda de água devido as partículas muito finas da SA possuírem maior superfície específica que o cimento Portland (HERMANN *et al.*, 2016).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Para realização deste trabalho, foram utilizados cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI) Cauê - Grupo Intercement, aditivo superplastificante Tecflow 50N da Grace e sílica ativa da Elkem. Os agregados utilizados foram areia natural quartzosa, brita zero, e argila expandida tipo 2215 da Cinexpan. A água utilizada foi da Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB). No quadro 1 são mostradas as propriedades dos materiais utilizados e na figura 2 são apresentadas as curvas de distribuição granulométrica dos agregados miúdos e graúdos.

O agregado miúdo utilizado corresponde aos limites de zona utilizável em concretos, atendendo aos pré-requisitos da ABNT NBR 7211 (2009), conforme pode-se observar na figura 2(a).

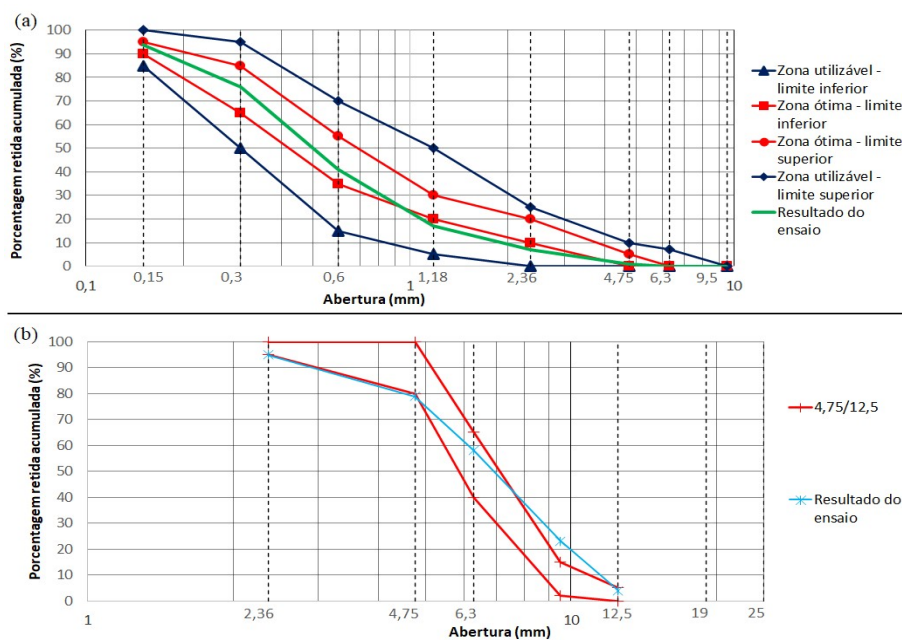


Figura 2. Curva granulométrica do agregado (a) miúdo; (b) graúdo. Fonte: autores.

QUADRO 1: Propriedades dos materiais utilizados

MATERIAL	PROPRIEDADES	VALOR
CP V - ARI	Massa específica (g/cm ³)	3,15
	Finura por meio da peneira 75 µm (%)	2,00
	Tempos de pega	Início (min)
Fim (min)		204,0
Agregado miúdo	Dimensão máxima característica (mm)	4,75
	Módulo de finura (%)	3,34
	Massa específica (g/cm ³)	2,65
Agregado graúdo (brita 0)	Dimensão máxima característica (mm)	12,5
	Módulo de finura (%)	5,85
	Massa específica (g/cm ³)	1,41
Agregado graúdo (argila expandida)	Classes granulométricas (cm)	1,50 - 2,20
	Densidade aparente (kg/m ³)	500 ± 10
	Massa específica (kg/dm ³)	0,64
	Massa unitária (g/cm ³)	0,49
Aditivo superplastificante	Massa específica (g/cm ³)	1,090 - 1,130
	Aspecto/cor	Alaranjado
	Dosagem recomendada (% SPC)	0,30 - 1,20
Sílica ativa	Massa específica (g/cm ³)	2,20
	Densidade aparente em estado solto (kg/m ³)	682,7

O mesmo encontra-se quase em sua totalidade dentro da zona ótima. Observa-se na figura 2(b), que o agregado graúdo se encontra na faixa de 4,75mm/12,5mm (menor/menor dimensão), com ensaio executado de acordo com a metodologia da NBR 7211 (ABNT, 2009).

3.2 Preparação dos concretos

A definição dos traços de concreto foi realizada buscando-se analisar o efeito da substituição volumétrica do agregado graúdo natural por agregado graúdo leve de argila expandida. A nomenclatura dos traços adotados é apresentada no quadro 2.

QUADRO 2: Nomenclatura e composição dos traços

CONCRETO	COMPOSIÇÃO
REF	Concreto convencional.
50B50AE	Concreto com substituição de 50% da brita por argila expandida.
50B50AE10SA	Concreto com substituição de 50% da brita por argila expandida e adição de 10% de sílica ativa.
100AE	Concreto com substituição de 100% da brita por argila expandida.
100AE10SA	Concreto com substituição de 100% da brita por argila expandida e adição de 10% de sílica ativa.

Para a definição do proporcionamento dos materiais utilizados em cada traço, foi utilizada a metodologia adaptada de Helene e Terzian (1992). Por meio dessa metodologia, chegou-se ao traço do concreto REF igual a 1:1,57:1,93, com relação água/cimento igual a 0,45 e teor de aditivo

superplastificante igual a 0,40% em relação à massa de cimento. Dessa forma, todos os concretos seguiram esse mesmo traço, havendo apenas a substituição, em volume, da brita pela argila expandida e/ou a adição, em massa, de 10% de sílica ativa. A relação a/c foi mantida constante para não influenciar no desempenho mecânico dos concretos. Além disso, foi fixada a consistência dos concretos em 100±20 mm no ensaio de abatimento

do tronco de cone, realizado conforme a NBR 67 (ABNT, 1998). Para isso, foi variado o teor de aditivo superplastificante de cada concreto estudado. O quantitativo dos materiais utilizados para moldagem de seis corpos de prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura pode ser observado no quadro 3.

QUADRO 3: Quantitativo para moldagem de seis corpos de prova cilíndricos de concreto com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura.

Concreto	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Argila expandida (kg)	Sílica ativa (kg)	Água (kg)	Aditivo Superplastificante		Abatimento do tronco de cone (mm)
							(%)	(g)	
REF	7,0	10,99	13,51	-	-	3,15	0,40	28,0	80,0
50B50AE	7,0	10,99	6,80	2,34	-	3,15	0,20	14,0	80,0
50B50AE10SA	7,0	10,99	6,80	2,34	0,70	3,15	0,55	38,50	90,0
100AE	7,0	10,99	-	4,68	-	3,15	0,25	17,50	95,0
100AE10SA	7,0	10,99	-	4,68	0,7	3,15	0,55	38,50	80,0

Com o teor de aditivo superplastificante definido, foram moldados 90 corpos de prova cilíndricos. Após a moldagem e decorridas 24 horas cobertos com uma lona plástica para evitar a perda de água do concreto por evaporação, os corpos de prova foram desmoldados e colocados submersos em água saturada de cal até a idade da determinação das resistências à tração e à compressão, aos 3, 7 e 21 dias de hidratação.

3.3 Resistências à tração e à compressão dos concretos

A verificação da resistência à tração por compressão diametral foi realizada conforme determinações da ABNT NBR 7222 (2011) e a verificação da resistência à compressão foi regulamentada pela ABNT NBR 5739 (2018).

Em ambos ensaios, três corpos de prova de cada traço foram capeados e rompidos em uma máquina universal para ensaios mecânicos nas idades de 3, 7 e 21 dias de hidratação. A tolerância de tempo para rompimento dos concretos foi respeitada de acordo com as recomendações da ABNT NBR 5739 (2018).

A partir dos resultados obtidos na realização dos dois ensaios, precedeu-se uma análise estatística com o software STATÍSTICA v10, em que cada traço foi testado a um nível de significância (α) de 0,05 por idade avaliada. Foi realizada uma análise de variância ANOVA dos dados dos ensaios de tração e compressão, com o intuito de identificar se as resistências dos traços diferem de maneira significativa. Essa influência é indicada por meio da

probabilidade significativa (p-valor), na qual para os resultados significativos o p-valor não deve ser maior que o nível de significância (α). Caso o p-valor seja igual ou superior a 0,05, o resultado é considerado não significativo, ou seja, as resistências são estatisticamente iguais.

Em seguida, com o auxílio do software STATÍSTICA v10, foi realizado o teste de Duncan, na qual os dados gerados foram submetidos à uma comparação múltipla entre si, separando-os por classes homogêneas de resistências, levando em consideração a média e o desvio padrão das duas resistências para cada ensaio separadamente, a um nível de confiança de 95%.

3.4 Fator de eficiência

Foi realizado o cálculo do fator de eficiência, conforme mostrado na Equação (1), para relacionar a resistência mecânica com a massa específica dos concretos. Os valores de resistência mecânica utilizados foram os resultados das médias de cada idade avaliada e a massa específica considerada foi resultado do valor médio das massas dos concretos estudados aos 21 dias de hidratação.

4. RESULTADOS

4.1 Propriedades no estado fresco

Foi realizado o ensaio de abatimento do tronco de cone para verificar se o abatimento atingiu o valor predeterminado de 100±20 mm. Na figura 3 é mostrado o procedimento de verificação do abatimento dos concretos, sequencialmente, do primeiro (REF) ao último traço (100AE10SA).



Figura 3. Ensaio de abatimento do tronco de cone.

Como pode ser observado na Figura 3 e no Quadro 3, a adição de AE melhorou a fluidez do concreto, diminuindo a necessidade de aditivo superplastificante, resultado do formato arredondado do agregado, que proporciona efeito de rolagem e melhora a trabalhabilidade do concreto (ROSSIGNOLO, 2009). Por outro lado, a adição de SA tornou o concreto menos fluido, sendo necessário adicionar mais aditivo superplastificante, por causa da elevada superfície específica do material, que torna maior o consumo de água (HERMANN *et al.*, 2016).

o aumento da resistência à tração do concreto. Os traços 100AE e 100AE10SA apresentaram uma redução de 34,80% em relação ao REF. Segundo Rossignolo *et al.* (2003) o grande volume de vazios proporcionados pelos agregados leves em relação aos agregados convencionais, com até 50% do volume total para argilas expandidas, é o fator responsável pela diminuição da resistência à tração dos concretos, o que corrobora com os resultados em que houveram redução de resistência mecânica.

Considerando-se a média dos resultados à tração das três idades analisadas, a adição de SA nos traços 50B50AE10SA e 100AE10SA aumentou em média 10% a resistência à tração dos concretos em relação aos traços 50B50AE e 100AE. Esse aumento de resistência justifica-se pela reação pozolânica, que resulta numa quantidade adicional de C-S-H (HERMANN *et al.*, 2016; ROMANO *et al.*, 2008; VASKE; CAMPAGNOLO; DAL MOLIN, 2010).

De acordo com a análise de variância (*one-way ANOVA*) da resistência à tração, o p-valor foi equivalente a 0,304180 para 3 dias, e 0,543385 para 7 dias de hidratação, confirmando que os dados não diferem entre si de maneira significativa.

4.2 Resistência à tração dos concretos

Os resultados de resistência média à tração dos concretos aos 3, 7 e 21 dias de hidratação são mostrados na figura 4.

Nas idades de 3 e 7 dias, no que se refere à resistência à tração, notou-se que todos os concretos apresentaram similaridade nos resultados. Aos 21 dias de hidratação, o traço 50B50AE apresentou média similar ao REF e o traço 50B50AE10SA apresentou aumento de 8,70% em relação ao REF, mostrando que a SA contribuiu para

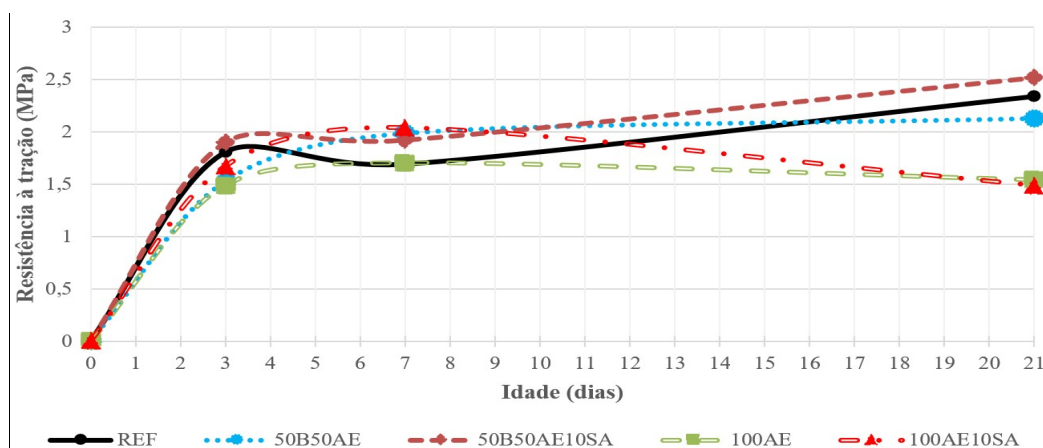


Figura 4. Resistência média à tração dos concretos aos 3, 7 e 21 dias de hidratação

Aos 21 dias, o p-valor foi equivalente a 0,020088. Dessa forma, como o p-valor foi menor do que o nível de significância (0,05), houve diferença significativa na resistência à tração entre os concretos aos 21 dias de hidratação. Com isso, para comparar os dados de resistência à tração dos concretos aos 21 dias, foi realizada uma análise estatística através do teste de Duncan, como mostrado no quadro 4.

Foram formados 2 grupos de resistência à tração dos concretos, nos quais foi possível observar que os concretos REF, 50B50AE e 50B50AE10SA resultaram em maior resistência à tração que os demais, pois foram classificados no grupo 2 (de maior resistência). Os traços com 100% de argila expandida (100AE e 100AE10SA), resultaram em média 53% de redução da resistência à tração, em relação à média dos traços classificados no grupo 2, devido os traços com argila expandida possuírem

maior índice de vazios (até 50% do volume total), conforme (ROSSIGNOLO e OLIVEIRA, 2007).

4.3 Resistência à compressão dos concretos

Os resultados de resistência média à compressão dos concretos aos 3, 7 e 21 dias de hidratação são mostrados na figura 5.

Aos 7 dias, os concretos REF e 50B50AE10SA apresentaram maiores resistências à compressão. Entre 7 e 21 dias de hidratação, o concreto 50B50AE10SA apresentou maior aumento de resistência (27%) em relação aos demais, resultando na maior resistência média à compressão aos 21 dias de hidratação com 41,5 MPa.

QUADRO 4. Classificação por grupos de resistência à tração dos concretos aos 21 dias de hidratação

Idade	Concreto	Resistência média à tração (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Grupo 1	Grupo 2
21 dias	REF	2,34	0,30		x
	50B50AE	2,13	0,60	x	x
	50B50AE10SA	2,52	0,40		x
	100AE	1,54	0,20	x	
	100AE10SA	1,49	0,20	x	

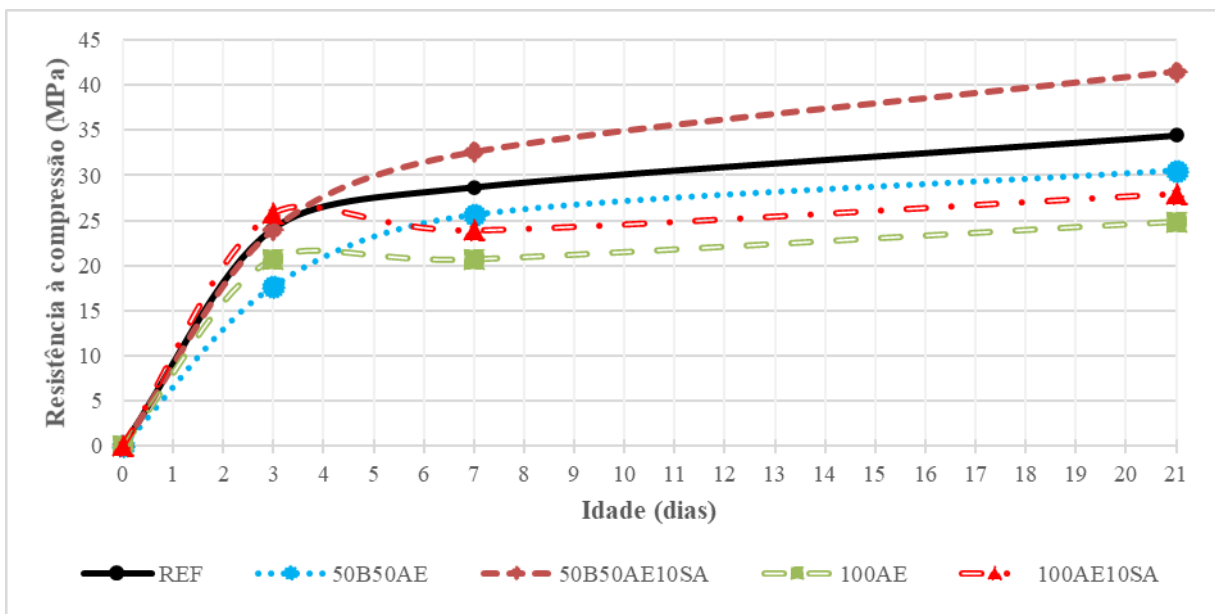


Figura 5. Resistência média à compressão dos concretos aos 3, 7 e 21 dias de hidratação

Foi possível observar, na análise de variância (one-way ANOVA), que aos 3 dias de hidratação o p-valor foi igual a 0,001117, aos 7 dias o p-valor foi igual a 0,00822 e aos 21 dias o resultado do p-valor foi igual a 0,000309, ou seja, todos foram menores que o nível de significância de 0,05 e, conseqüentemente, a resistência à compressão dos concretos diferiram de maneira significativa nas três idades avaliadas.

Dessa forma, com o auxílio do software STATÍSTICA v10, foi realizado o teste de Duncan, no qual os dados de resistência à compressão foram submetidos à uma comparação múltipla entre si, conforme mostrado no quadro 5.

Aos 3 dias de hidratação foram formados 2 grupos

de resistência, sendo que o grupo 1 corresponde à menor resistência e o grupo 2 à maior resistência. A resistência à compressão dos traços 100AE10SA e 50B50AE10SA apresentaram valores similares à resistência à compressão do traço REF, enquanto os traços 50B50AE e 100AE apresentaram redução de resistência à compressão, em comparação com o traço REF. Como o agregado leve é mais poroso que o agregado convencional, a ruptura ocorre através da própria argila expandida, que não suporta os esforços mecânicos, conforme mostrado na figura 6.

QUADRO 5 - Classificação por grupos de resistência à compressão dos concretos aos 3, 7 e 21 dias de hidratação

Idade	Concreto	Resistência média à compressão (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
3 dias	REF	24,1	1,1		x		
	50B50AE	17,7	2,5	x			
	50B50AE10SA	23,9	1,9		x		
	100AE	20,7	0,1	x			
	100AE10SA	25,7	1,7		x		
7 dias	REF	28,7	1,4			x	x
	50B50AE	25,6	2,5		x	x	
	50B50AE10SA	32,6	1,9				x
	100AE	20,6	3,6	x			
	100AE10SA	23,9	1,3	x	x		
21 dias	REF	34,4	4,7			x	
	50B50AE	30,5	2,9		x	x	
	50B50AE10SA	41,5	1,1				x
	100AE	24,8	2,1	x			
	100AE10SA	27,9	1,1	x	x		

Observação: Os grupos são independentes entre as idades. Dessa forma, os grupos de uma idade não estão relacionados com os grupos das demais idades.



Figura 6. Rompimento do concreto na argila expandida.

Aos 7 dias foram formados 4 grupos de resistência. Foi observado que o traço 100 AE resultou na menor resistência à compressão entre os concretos avaliados. O traço 100AE10SA obteve uma redução de 8% de 3 para 7 dias de hidratação. Essa redução é resultado da maior presença de argila nos corpos de prova, o que tornou possível o aumento do índice de vazios e concomitantemente, a redução da resistência à compressão. Conforme Mehta e Monteiro (2008), a combinação da espessura e qualidade da zona de transição influencia diretamente na resistência mecânica, o que corrobora com os resultados verificados para o traço 100AE10SA. O traço 50B50AE obteve aumento de resistência em torno de 44%, enquanto o traço 50B50AE10SA em torno de 36%, superando o traço REF. Borja (2011), associa esse aumento da

resistência mecânica à diminuição da zona de transição entre agregado e pasta de cimento provocada pela ligação da argila expandida com a sílica ativa.

Aos 21 dias também foram formados 4 grupos de resistência. Todos os concretos apresentaram aumento de resistência à compressão em relação às idades anteriores. Esse aumento de resistência à compressão representa uma porcentagem de 43% em relação aos dados obtidos aos 3 dias de hidratação e 20% em relação aos dados obtidos aos 7 dias de hidratação. Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), a resistência mínima do concreto para

utilização estrutural é de 20 MPa. Já a ACI 213R-03 (2003), a resistência mínima à compressão aos 28 dias do concreto para utilização estrutural é de 17 MPa. Nesse trabalho, a menor média de resistência à compressão aos 21 dias é apresentada pelo traço 100AE, com valor de 24,8 MPa, consolidando a utilização de todos os concretos estudados para uso estrutural.

4.4 Fator de eficiência

Os resultados do fator de eficiência dos concretos são mostrados no quadro 6.

QUADRO 6. Fator de eficiência dos concretos.

Concreto	Densidade (kg/dm ³)	Fator de Eficiência (MPa.dm ³ /kg)		
		Idade (dias)		
		3	7	21
REF	2,35	10,25	12,20	14,64
50B50AE	1,97	8,96	13,00	15,49
50B50AE10SA	1,99	12,01	16,34	20,80
100AE	1,62	12,76	12,73	15,29
100AE10SA	1,67	15,46	14,35	16,77

Quanto aos valores obtidos no ensaio de massa específica seca, a média dos resultados do concreto REF foi de 2.349 kg/m³. O traço 50B50AE obteve média de 1.971 kg/m³ e o traço 50B50AE10SA, obteve média de 1.994 kg/m³, reduzindo 19% e 17,8%, respectivamente, o peso do concreto REF, enquanto os concretos 100AE e 100AE10SA, com 100% de argila expandida, obtiveram média de 1.621 kg/m³ e 1.666 kg/m³, com redução média de 40% da massa específica seca em relação ao concreto REF. A massa específica aparente dos concretos com argila expandida obteve resultados inferiores a 2.000 kg/m³, o que torna possível a classificação de todos os concretos com substituição parcial e total do agregado graúdo por agregado leve, como concretos leves.

Aos 3 dias, é possível observar que o fator de eficiência do traço 50B50AE é inferior ao REF. Essa redução de 14% é resultado da maior presença de argila nos corpos de prova, o que tornou possível o aumento do índice de vazios e concomitantemente, a redução da resistência à compressão para a idade avaliada. Nas demais idades, é possível observar que todos os traços apresentaram maiores fatores de eficiência do que o concreto REF. Essa característica é facilmente visualizada quando

levada em consideração a menor massa específica pertinente dos concretos leves.

5. CONCLUSÃO

A partir dos resultados experimentais, ficou evidente que a substituição total do agregado graúdo convencional por um agregado leve, de menor densidade, não confere efeitos positivos ao concreto quando comparado ao traço convencional. Entretanto, a partir do acréscimo da sílica ativa no teor de 10%, apesar da redução dos valores de resistência, há um aumento significativo do fator de eficiência em relação ao concreto referência.

Os concretos pesquisados contendo argila expandida, com ou sem sílica ativa, podem ser considerados leves devido à massa específica seca ter apresentado resultados inferiores a 2.000 kg/m³. A adição de sílica ativa aumentou o desempenho mecânico dos concretos leves sem ser necessário incorporar um maior teor de cimento Portland, resultando em menores impactos ambientais para produção do concreto leve.

Dessa forma concluiu-se que a argila expandida como agregado leve é uma alternativa viável para preparação de concretos, sendo recomendada a sua

utilização com sílica ativa para melhoria das propriedades mecânicas.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR 7211 - Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro, 2009.

ANGELIN, A. F. **Concreto leve estrutural - Desempenhos físicos, térmicos, mecânicos e microestruturais**. 2014. p. 1-98. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) - Tecnologia e Inovação. Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2014.

BONIFÁCIO, J. S. R.; GODINHO, D. S. S. **Estudo do efeito das fibras de vidro e polipropileno nas propriedades mecânicas do concreto**. 2015. 19 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2015.

BORJA, E.V. **Efeito da adição da argila expandida e adições minerais na formulação de concretos estruturais leves autoadensáveis**. 2011. p. 1-230. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

DONATO, M. **Comportamento mecânico de concreto compactado com rolo reforçado com fibras de polipropileno**. 2003. p. 1-82. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (FIB). **Lightweigh aggregate concrete**. Guidance Documents - Bulletin 8. FIB, Lousanne, Suíça, 2000.

FERNANDES, A. J. M. **Influência do teor de sílica e alumina no comportamento pozolânico de materiais cimentícios suplementares**. 2018. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Engenharia Civil. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação, São Leopoldo, RS, 2018.

FRAGA, Y. S. B.; RÊGO, J. H. S.; CAPUZZO, V. M. S.; ANDRADE, D. S. **Efeito da ultrasonicação da sílica ativa e da nanossílica coloidal em pastas de cimento**. *Revista Matéria*, v. 25, n.4, p. 1-16, 2020.

GOMES, P. C. C.; ALENCAR, T. F. F. De; SILVA, N. V. Da; MORAES, K. A. de M.; ANGULO, S. C. **Obtenção de concreto leve utilizando agregados reciclados**. *Ambiente Construído*, v. 15, n. 3, p. 31-46, 2015.

GUIMARÃES, J. P. F. **Sinergia entre a nanossílica e a sílica ativa na produção do concreto**. In: **56º Congresso Brasileiro do Concreto**, 2014, Natal. Anais [...]. Natal: Ibracon, 2014.

HELENE, P., TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**, São Paulo, PINI. SENAI., 1992.

HERMANN, A.; LANGARO, E. A.; SILVA, S. H. L.; KLEIN, N. S. **Empacotamento de partículas de cimento e sílica ativa em pastas pelo uso de modelo analítico**. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 9, n. 1, p. 48-65, 2016.

LIMA, C. I. V.; COUTINHO, C. O. D.; AZEVEDO, G. G. C.; BARROS, T. Y. G.; TAUBER, T. C.; LIMA, S. F. **Concreto e suas inovações**. *Ciências exatas e tecnológicas*, p. 31-40, 2014.

KALPANA, M.; TAYU, A. **Experimental investigation on lightweight concrete added with industrial waste (steel waste)**. *Materials Today: Proceedings*, v. 22. p. 887-889, 2019.

KHAN, M. N. N.; SAHA, A. K.; SARKER, P. K. **Reuse of waste glass as a supplementary binder and aggregate for sustainable cement-based construction materials: A review**. *Journal of Building Engineering*, v. 28, p. 101052, 2020.

LIMA, B. L. N.; OLIVEIRA, M. S.; OLIVEIRA, P. T.; SILVA, L. **Análise do potencial da sílica ativa na resistência à compressão do concreto**. In: **59ª edição Congresso Brasileiro do Concreto**. 2017, p. 0-11, 2018.

MAYCÁ, Jefferson.; CREMONINI, Ruy A.; RECENA, Fernando A. P. **Contribuição ao estudo da argila expandida nacional como alternativa de agregado graúdo para concretos leves estruturais (CLE)**. 2018.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 1ª Edição, São Paulo, IBRACON, 2008.

MO, K. H.; LEE, H. J.; LIU, M. Y. J.; LING, T. C. **Incorporation of expanded vermiculite lightweight aggregate in cement mortar**. *Construction and Building Materials*, v. 179, p. 302-306, 2018.

MO, K. H.; LING, T. C.; ALENGARAM, U. J.; YAP, S. P.; YUEN, C. W. **Overview of supplementary cementitious materials usage in lightweight aggregate concrete**. *Construction and Building Materials*, v. 139, p. 403-418, 2017.

MORAVIA, W. G.; GUMIERI, A. G.; VASCONCELOS, W. L. **Efficiency factor and modulus of elasticity of lightweight concrete with expanded clay aggregate**. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*. São Paulo, v. 3, n. 2, p. 195-204, junho de 2010.

MORAVIA, W. G.; OLIVEIRA, C. A. S.; GUMIERI, A. G.; VASCONCELOS, W. L. **Caracterização microestrutural da argila expandida para aplicação como agregado em concreto estrutural leve**. *Cerâmica*, v. 52, n. 322, p.193-199, 2006.

REVILLA-CUESTA, V.; SKAF, M.; FALESCHINI, F.; MANSO, J. M.; ORTEGA-LÓPEZ, V. Self-compacting concrete manufactured with recycled concrete aggregate: An overview. *Journal of Cleaner Production*, v. 262, p. 1-19, 2020.

ROMANO, R. C. O.; SCHREURS, H.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. Influência da técnica de dispersão nas propriedades de sílica ativa. *Cerâmica*, v. 54, n. 332, p. 456-461, 2008.

ROSSIGNOLO, J. A.; OLIVEIRA, I. L. Concreto leve estrutural com metacaulim. *Revista Minerva*. v. 3, n. 2, p. 177-187, 2005.

ROSSIGNOLO, J. A.; OLIVEIRA, I. L. **Efeito do Metacaulim nas propriedades do concreto leve estrutural**. *Acta Scientiarum - Technology*, v.29, 2007.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestrutura e aplicações**. 1 ed. São Paulo: PINI, 2009.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos - Dosagem, produção, propriedades e microestrutura**. 2003. p. 1-211. Tese (Doutorado em Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais) - Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

ROSSIGNOLO, J. A.; OLIVEIRA, I. L. **Efeito do Metacaulim nas propriedades do concreto leve estrutural**. *Acta Scientiarum - Technology*, v.29, 2007.

SACHT, H. M.; ROSSIGNOLO, J. A.; SANTOS, W. N. Avaliação da condutividade térmica de concretos leves com argila expandida. *Revista Materia*, v. 15, n. 1, p. 031-039, 2010.

SCOBAR, R. L. **Concreto leve estrutural: substituição do agregado graúdo convencional**

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Concrecon pelo fornecimento da sílica ativa e do aditivo superplastificante utilizados neste trabalho.

por argila expandida. 45p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2016.

SILVA, H. H. A. B. **Caracterização mineralógica e filiação da vermiculita da Mina Cerrado III - Sanclerlândia-GO**. 2006. p. 1-127. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Mineralogia e Petrologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

SOUSA, I. P. S. **Obtenção de nanossílica funcionalizada visando o uso como aditivo em misturas cimentícias**. 2017. 72 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.

STOCCO, W.; RODRIGUES, D.; CASTRO, A.P.A.S. Concreto leve com uso de EPS. *Cobenge 2009*. n. 81, p. 1129-1134, 2009.

SUTCU, M. Influence of expanded vermiculite on physical properties and thermal conductivity of clay bricks. *Ceramics International*, v. 41, n. 2, p. 2819-2827, 2015.

TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. Dosagem dos Concretos de Cimento Portland. *Concreto: Ciência e Tecnologia*. São Paulo. Ibracon, 2011, cap 12.

UGARTE J. F. O, SAMPAIO J. A, FRANÇA S. C. A. Vermiculita. In: **Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações**. Rio de Janeiro: CETEM, 2008. Cap 38. p.866-887.

VASKE, N. R.; CAMPAGNOLO, J. L.; DAL MOLIN, D. C. C. Relationship between the compressive strength of silica fume mortar applied to the substratum and the one obtained in standardized cylindrical test specimens. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 3, n. 3, p. 322-345, 2010.

AUTORES

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6654-4586>

MARINA COSTA DE SOUZA (MCS), Eng. | Centro Universitário Euro-Americano | Departamento de Engenharia Civil (UNIEURO) | Brasília, DF - Brasil | Correspondência para: SQN 307, BL I, AP 202 - Asa Norte, Brasília-DF, CEP: 70746-090 | e-mail: marinacosta015@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0102-762X>

AMÁLIA DE SOUSA DAVI, (ASD) Eng. | Centro Universitário Euro-Americano (UNIEURO) | Departamento de Engenharia Civil | Brasília, DF - Brasil | Correspondência para: QD 30, LT 22 -

Jardim Brasília, Águas Lindas de Goiás-GO, CEP: 72915-111 | e-mail: amalia_davi@hotmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0426-4615>

YURI SOTERO BOMFIM FRAGA, (YSBF) M.Sc. | Centro Universitário Euro-Americano (UNIEURO) | Departamento de Engenharia Civil | Brasília, DF - Brasil | Correspondência para: EQN 410/411, bloco A, apartamento 29 - Asa Norte, Brasília-DF, CEP: 70865-405 | e-mail: yurisotero.engcivil@gmail.com)

HOW TO CITE THIS ARTICLE

SOUZA, Marina Costa de; DAVI, Amália de Sousa; FRAGA, Yuri Sotero Bomfim. Efeito da Sílica Ativa nas Propriedades do Concreto Leve com Argila Expandida. *MIX Sustentável*, v. 8, n. 1, p. 29-40, jan. 2022. ISSN 24473073. Disponível em: <<http://www.nexos.ufsc.br/index.php/mixsustentavel>> DOI: <http://dx.doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2022.v8.n1.29-40>.

Submitted: 29/12/2020

Approved: 25/05/2021

Published: 01/12/2021

Editora Responsável: Lisiane Ilha Librelotto

Registro da contribuição de autoria:

Taxonomia CRediT (<http://credit.niso.org/>)

MCF, ASD, YSBF: análise formal, aquisição de financiamento, investigação, metodologia, visualização, escrita -rascunho original.

MCF, YSBF: conceituação, escrita - revisão e edição.

YSBF: administração de projetos, supervisão

Declaração de conflito: nada foi declarado.