



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS
18 a 20 de maio, 2016 - Everest Rio Hotel

Obtenção De Concreto Leve Estrutural Pela Substituição Do Seixo Rolado Por Argila Expandida

André Soares Mendes¹, Daniel Iglesias de Carvalho², Henrique Tochtrop³, Lucas Carvalho Quintanilha⁴, Samuel de Carvalho Gomes⁵, Welkens Gomes de Oliveira⁶

¹ CEULP ULBRA/IFTO/ Departamento de Engenharia Civil/ andremendes@ceulp.edu.br

² CEULP ULBRA/ UFT/ Departamento de Engenharia Civil/ daniel.iglesias.carvalho@gmail.com

³CEULP ULBRA / Departamento de Engenharia Civil/ henriquetoch@gmail.com

⁴UFT/ Centro de Engenharia Civil/ lucasquintanilha@uft.edu.br

⁵UFT / Centro de Engenharia Civil/ samuelgomes-eng@hotmail.com

⁶UFT/ Centro de Engenharia Civil/ woliver@uft.edu.br

Resumo

As vantagens da utilização de concretos estruturais leves são muitas e conhecidas, a exemplo da redução do peso próprio da estrutura, o que permite a obtenção de menores seções transversais nos elementos estruturais e, conseqüentemente, a redução dos esforços nas fundações, gerando economia na execução do projeto, proporcionando aumento dos vãos livres, bem como diminuição dos gastos com fôrmas, entre outros benefícios. No entanto, a utilização de agregados alternativos que proporcionem redução da massa específica ao conjunto, também influencia em outras propriedades do concreto estrutural em seu estado fresco ou enrijecido, como trabalhabilidade e espessura da zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento, por exemplo. Nesse sentido, a presente pesquisa tem o objetivo de contribuir com o desenvolvimento do concreto com agregados leves ao analisar o comportamento mecânico do concreto leve estrutural obtido pela substituição do seixo rolado por argila expandida. Para tanto, utilizou-se de forma adaptada um método experimental de empacotamento do agregado graúdo, desenvolvido pelos autores, com duas faixas granulométricas – de 19 mm a 9,5 mm – de modo que o empacotamento granular apresente a menor quantidade de vazios possível e maior resistência mecânica.

Palavras-chave

Concreto estrutural leve, Argila expandida, Empacotamento.

Introdução

Devido às crescentes solicitações estruturais e econômicas, as edificações modernas requerem o uso racional do concreto. O concreto leve estrutural (CLE) se mostra um material eficiente para a redução do peso próprio da estrutura e, como consequência, tornam-se possíveis diversos usos que, segundo CATOIA (2012), se destacam por razões de viabilidade técnica e econômica. Esse tipo de concreto especial é aplicado em estruturas onde grande parte das solicitações é consequência do peso próprio, como pontes, edificações de múltiplos andares e plataformas marítimas flutuantes, podendo gerar, inclusive, economia no uso de concreto das fundações, além de tornar mais fácil o transporte e montagem de peças pré-moldadas de concreto. As exigências atuais do mercado da construção civil, demandando obras com desenhos cada vez mais ousados e/ou tamanhos maiores, aliadas ao controle de custos gradativamente mais restritivo, impõem à Engenharia Civil a responsabilidade de encontrar soluções tecnológicas que atendam a tais necessidades, o que tem levado o setor a otimizar processos e reduzir custos. Um desses casos é a utilização de materiais alternativos, para



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS
18 a 20 de maio, 2016 - Everest Rio Hotel

executar concreto estrutural leve. O concreto estrutural tradicional responde por uma grande parcela do peso próprio de qualquer estrutura, o que impacta diretamente no custo da fundação. Como afirmam ROSSIGNOLO e OLIVEIRA (2007):

“A redução da massa específica do concreto, com a manutenção da resistência mecânica, propicia a redução do peso próprio da estrutura e, conseqüentemente, das cargas na fundação, reduzindo, assim, o custo final da obra, especialmente com a utilização da tecnologia da pré-fabricação.”

Conforme MEHTA e MONTEIRO (1994), o CLE é um concreto estrutural em todos os sentidos, exceto que, por razões de economia do custo total, é produzido com agregados leves celulares, resultando, portanto, em um peso específico de aproximadamente dois terços do peso específico do concreto feito com agregados naturais típicos. Desde que o objetivo primordial é o baixo peso e não a resistência, as especificações limitam o peso específico máximo permissível a esse tipo de concreto. Uma vez que o agregado leve costuma ser altamente poroso, ele também tende a reduzir bastante a resistência mecânica do conjunto. Quanto a esse fator, as especificações estabelecem uma resistência à compressão mínima aos 28 dias, para assegurar a qualidade estrutural do concreto. O Guia de Concreto Estrutural feito com Agregado Leve do ACI 213R-87 define concreto estrutural com agregado leve como concretos cujas resistências à compressão apresentem valores maiores que 17 MPa e peso específico aos 28 dias, seco ao ar, abaixo de $2,20 \text{ kg/dm}^3$. De acordo com o método ASTM C 330, os agregados leves miúdos e graúdos não devem ter peso específico no estado solto seco maior do que $1,12 \text{ kg/dm}^3$ e $0,88 \text{ kg/dm}^3$, respectivamente.

Concreto Leve

Justificativa do uso do concreto leve estrutural

Como supracitado, o uso do CLE traz vantagens técnicas e econômicas em relação ao concreto com agregados naturais, como a aplicação em peças estruturais de concreto pré-moldado. CATOIA (2012) listou os benefícios alcançados pelo uso do Concreto Leve Estrutural:

- Redução de 20% a 50% dos custos de transporte, por unidade de volume de concreto;
- Possibilidade de produzir peças com dimensões maiores, utilizando os mesmos equipamentos da fábrica de do canteiro;
- Redução entre 25% a 50% do tempo de montagem das estruturas.

Apesar do custo unitário elevado, o emprego do CLE na estrutura de uma construção pode gerar uma economia de 2% a 7% no custo total da obra (DALY, 2000 *apud* ROSSIGNOLO, 2003). Segundo ROSSIGNOLO (2003), nas pontes de grandes vãos em concreto armado, o peso próprio da estrutura pode representar até 70% das solicitações estruturais, de modo que a adoção de concreto leve possibilita o dimensionamento de seções menores e com menor área de aço.



No Brasil, o uso do concreto leve ainda se limita à fabricação de artefatos pré-moldados, além da normatização para esse tipo de concreto especial ser escassa. Ainda há diversas possibilidades de aplicações a serem exploradas, como a utilização em lajes de vãos maiores, substituindo as lajes nervuradas por lajes maciças ou até melhorando o desempenho de lajes nervuradas – como destaca CATOIA (2012). O desenvolvimento de pesquisas no sentido de melhorar o desempenho de concretos leves se cresce em importância à medida que as novas tendências em estruturas de concreto armado exigem cada vez mais, esbarrando nos fatores limitantes dos materiais utilizados.

Parâmetros

ROSSIGNOLO (2003) define a obtenção de concreto leve como a substituição total ou parcial dos agregados usuais por agregados leves. A massa específica do concreto leve deve ser menor que, em média, $2,00 \text{ kg/dm}^3$, mas as normas mais rigorosas estabelecem massa específica menor que $1,85 \text{ kg/dm}^3$ (ACI 213R-87, 1997). A Tabela 1 apresenta alguns valores limites de massa específica preconizados por normas e referências para concreto estrutural leve.

Tabela 1 – Documentos normativos internacionais para massa específica de um CLE

<i>Referência</i>	<i>Massa específica (kg/m^3)</i>
RILEM (1975)	$\gamma < 2,00$
CEB-FIP (1977)	$\gamma < 2,00$
NS 3473 E (1992)	$1,20 < \gamma < 2,20$
ACI 213R-87 (1997)	$1,40 < \gamma < 1,85$
CEN prEN 206-25 (1999)	$0,80 < \gamma < 2,00$

De acordo com ACI 213R-87 (1997), além da limitação da massa específica, o concreto leve deve apresentar resistência característica à compressão axial acima de 17,2 MPa. A NM 35 (ABNT, 1995) apresenta valores mínimos de resistência à compressão em virtude dos valores de massa específica aparente (ver Tabela 2). Valores intermediários de resistência à compressão e de massa específica aparente correspondentes podem ser obtidos por interpolação. Ademais, essa norma especifica que os agregados leves utilizados na produção dos concretos estruturais devem apresentar valores de massa unitária no estado seco e solto abaixo de 1120 kg/m^3 , para agregados miúdos, e de 880 kg/m^3 , para agregados graúdos.



Tabela 2 – Valores correspondentes de resistência à compressão e massa específica para concreto leve estrutural

<i>Resistência à compressão aos 28 dias (MPa) (Valores mínimos)</i>	<i>Massa específica aparente (kg/dm³) (Valores máximos)</i>
28	1840
21	1760
17	1680

Com a finalidade de comparar e analisar resultados de ensaios de concreto leve estrutural (CLE) é importante estabelecer, enquanto parâmetro, o chamado fator de eficiência – vide Equação 1 – definido por SPITZNER (1994) e HOLM (2000) como um indicador que relaciona a resistência à compressão axial e a massa específica de um material.

$$\text{Fator de eficiência} = \frac{f_c \text{ (MPa.dm}^3\text{.kg}^{-1}\text{)}}{r \text{ (Equação 1)}} \quad (1)$$

f_c = resistência a compressão em MPa
 r = Massa Específica (kg/dm³)

De acordo com SPITZNER (1994) e ARMELIN *et al.* (1994), é considerado como concreto leve de alto desempenho (CAD) um concreto com fator de eficiência acima de 25 MPa.dm³/kg. Este valor limite foi obtido tendo como referência um concreto com agregados tradicionais, com resistência à compressão de 60 MPa e massa específica de 2,40 kg/m³, classificado por SPITZNER (1994) como de alta resistência.

Material

Os materiais utilizados para a formulação de um concreto leve de alto desempenho devem ser definidos cautelosamente, de acordo com as propriedades que se deseja alcançar, como: alta resistência, durabilidade, trabalhabilidade e leveza. A fim de se obter altas resistências, este trabalho utilizou um traço base pré-determinado, calculado para o concreto tradicional pelo método do volume absoluto ABCP. De acordo com MEHTA e MONTEIRO (1994) os componentes do CLAR (concreto leve estrutural de alta resistência) podem ser iguais aos utilizados na produção de concretos convencionais e, em muitos casos, também em concretos especiais, porém com a adição do agregado leve. No caso desta pesquisa, o agregado leve escolhido foi a argila expandida. Assim, os materiais utilizados para o desenvolvimento deste concreto foram: cimento tipo CP-V, areia natural de rio, seixo rolado (traço de referência) e argila expandida (traço de substituição).

Argila Expandida

A argila expandida é o único agregado leve produzido no Brasil (ROSSIGNOLO, 2009). Esse agregado é produzido atualmente pela empresa Cinexpan Indústria e Comércio Ltda, na cidade de Várzea Paulista, localizada a 60 km da cidade de São Paulo. Atualmente, cerca de 60% da produção de argila expandida destina-se ao setor da construção civil nacional. Os outros 40% são absorvidos pelos setores de lavanderia (20%), paisagismo, refratários e demais aplicações, como substratos. A Tabela 3 compara algumas propriedades térmicas do concreto leve em relação ao concreto convencional segundo Holm e Ferrara, 2000 (*apud* ROSSIGNOLO, 2003). A Figura 1 mostra a argila utilizada neste estudo.

Figura 1 – Argila Expandida



Tabela 3 – Propriedades térmicas dos concretos leves

<i>Propriedades</i>	<i>Concreto com agregados leves</i>	<i>Concreto com agregados convencionais</i>
Massa específica (kg/m ³)	1850	2400
Resistência à compressão (MPa)	20 - 50	20 - 70
Calor específico (cal/g. C)	0,23	0,22
Condutividade térmica (W/m.K)	0,58 – 0,86	1,4 – 2,9
Difusão térmica (m ² /h)	0,0015	0,0025 – 0,0079
Expansão térmica (10 ⁻⁶ /C)	9	11



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS
18 a 20 de maio, 2016 - Everest Rio Hotel

De acordo com BERRA E FERRARA (1990) (*apud* AÏTCIN,2000), as propriedades térmicas do concreto leve (dilatação térmica, condutividade térmica e difusão térmica) aliadas ao baixo módulo de elasticidade, resultam em uma maior resistência à tensões térmicas que o concreto de massa normal.

Metodologia

A fim de se determinar a viabilidade da substituição do seixo rolado por argila expandida para obtenção do concreto leve estrutural, este trabalho se valeu de dois traços: um traço de referência, aqui chamado T-R, em que o agregado graúdo adotado foi seixo britado e um traço ora denominado T-1, cujo agregado graúdo foi argila expandida com duas frações granulométricas: de 19 mm e 9,5 mm. O objetivo da pesquisa era o de produzir um material que possa ser classificado como CLE a partir de um concreto convencional de traço pré-determinado, apenas substituindo-se o agregado graúdo convencional pelo leve. A Tabela 4 descreve o TR utilizado nesta pesquisa, dosado pelo método do volume absoluto ABCP.

Tabela 4 – Traço de Referência

<i>Materiais</i>	<i>Relação em massa</i>	<i>Quantidade (kg/m³)</i>
Cimento	1	451,54
Agregado Miúdo	1,22	563,07
Agregado Graúdo	2,46	1113
Água	0,454	205

Foram moldados corpos de prova cilíndricos com dimensões 100x200 mm, para os ensaios de compressão axial, e corpos de prova com dimensões 150x300 mm para ensaios de tração medida por compressão diametral. Todos os corpos de prova foram moldados de acordo com a NBR 5738/2014 e, após a pega, colocados em repouso sobre uma superfície plana em um ambiente aberto à temperatura ambiente. Após 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados, pesados e mergulhados em água para passar pelo processo de cura, que nesse experimento durou 7 dias até a realização dos ensaios. Os ensaios mecânicos foram realizados nas idades de 1, 3 e 7 dias de idade conforme figura 2, pois de acordo com Holm e Bremner (1994) (*apud* ROSSIGNOLO, 2009) os concretos leves, de maneira geral, apresentam aos 7 dias de idade 80% da resistência à compressão observada aos 28 dias.

Figura 2 – Ensaio de Compressão Axial



No ensaio de compressão axial não foi utilizado nenhum método de retificação ou capeamento nas faces dos corpos de prova, para a obtenção de uma superfície o mais lisa possível.

Resultados

Massa Específica

Com a substituição do seixo pela argila expandida, houve uma redução da massa específica do concreto, conforme esperado, como mostra a Tabela 5.

Tabela 5 – Massa específica em função da Argila Expandida

<i>Traço</i>	<i>Massa Específica (kg/dm³)</i>
T-R	2,37
T-1	1,63

O T-1 atingiu as especificações para ser considerado concreto leve, de acordo com a NS 3473 E (1992), que classifica como leves os concretos com massa específica abaixo de 2,2 kg/dm³; em relação a RILEM (1975) o T-1 é também considerado leve, pois apresenta massa específica menor que 2,0 kg/dm³; e segundo o ACI 213R-87, o T-1 é leve, pois apresenta massa específica inferior à 1,85 kg/dm³. Esses resultados estão resumidamente apresentados na Tabela 6.



Tabela 6 – Comparativo da massa específica obtida com os documentos normativos internacionais

<i>Referência</i>	<i>Massa específica (kg/dm³)</i>	<i>Traço que se encaixam nas referências</i>
RILEM (1975)	<2,00	T-1
ACI 213R-87 (1997)	1,40 - 1,85	T-1
NS 3473 E (1992)	1,20 - 2,20	T-1

Ensaio de resistência

Compressão Axial

Como já era esperado, com a substituição do agregado convencional pela argila expandida houve uma redução na resistência à compressão do concreto. Os resultados obtidos de resistência à compressão axial podem ser observados nas Tabelas 7, 8 e 9.

Tabela 7 – Resistência à compressão axial com 1 dia

<i>Traço</i>	<i>Corpos de Prova</i>			<i>Média (MPa)</i>	<i>Desvio Padrão (MPa)</i>	<i>Coefficiente de Variação %</i>
	CP 1	CP 2	CP 3			
T-R	14,5	21,5	15	17,02	3,89	22,91
T-1	10,3	9,9	10,2	10,15	0,19	1,94

Tabela 8 – Resistência à compressão axial aos 3 dias

<i>Traço</i>	<i>Corpos de Prova</i>			<i>Média (MPa)</i>	<i>Desvio Padrão (MPa)</i>	<i>Coefficiente de Variação %</i>
	CP 1	CP 2	CP 3			
T-R	23,3	24,5	21,5	23,11	1,53	6,63
T-1	17,3	16,9	15,2	16,46	1,09	6,65

Tabela 9 – Resistência à compressão axial aos 7 dias

<i>Traço</i>	<i>Corpos de Prova</i>			<i>Média (MPa)</i>	<i>Desvio Padrão (MPa)</i>	<i>Coefficiente de Variação %</i>
	CP 1	CP 2	CP 3			
T-R	32,9	33,1	32,8	32,9	0,13	0,41
T-1	19,8	15,4	16,8	17,35	2,26	13,04

Ainda em relação à resistência à compressão axial, o T-1 pode ser considerado estrutural, pois apresentou resistência à compressão aos 7 dias de 17,35 MPa, sendo este valor superior ao mínimo normativo que é de 17,2MPa. Mesmo sabendo que os concretos leves chegam a 80% da sua resistência final aos 7 dias, é importante lembrar que aos 28 dias a resistência aqui apresentada alcançará valor ainda maior, distanciando o resultado obtido para o traço T-1 do valor mínimo para classificação como concreto leve estrutural.



Resistência à Tração Medida por Compressão Diametral

Assim como a resistência à compressão axial, a resistência à tração medida por compressão diametral também tende a diminuir com a adição de agregados leves. Os resultados obtidos por este ensaio estão dispostos na Tabela 10.

Tabela 10 – Resistência à tração por compressão diametral.

<i>Traço</i>	<i>Resistência à Compressão Axial aos 7 dias (MPa)</i>	<i>Resistência à Tração por Compressão Diametral (MPa)</i>
T-R	32,9	3,65
T-1	17,35	1,90

Fator de Eficiência

O fator de eficiência do concreto (FE) consiste na razão entre a resistência à compressão e a massa específica aparente. Não existe um parâmetro para o concreto leve estrutural, somente para o concreto leve de alto desempenho, valor esse que – de acordo com Spitzner (1994) e Armelin *et al.* (1994) – deve ser superior à 25MPa.dm³/kg. Os valores de obtidos para o FE neste trabalho podem ser observados na Tabela 11.

Tabela 11 – Fator de Eficiência.

<i>Traço</i>	<i>Resistência à Compressão Axial aos 7 dias (MPa)</i>	<i>Massa Específica (kg/dm³)</i>	<i>Fator de Eficiência (MPa.dm³/kg)</i>
T-R	32,9	2,37	13,88
T-1	17,35	1,63	10,64

Analisando os dados apresentados, nem o T-R nem o T-1 apresentaram um fator de eficiência maior que 25MPa.dm³/kg, o que significa que eles não podem ser considerados concretos leves estruturais de alta resistência. No entanto, houve aumento de 32% no fator de eficiência do concreto T-1, fato que demonstra que houve ganhos significativos com a redução da massa específica do traço com agregados leves em relação ao traço convencional.

Conclusões

Quanto à massa específica, o resultado obtido na substituição do seixo rolado pela argila expandida satisfazem os critérios RILEM (1975), ACI 213R-87 (1997) e NS 3473 (1992). De acordo com o ACI 213R-87, o concreto leve estrutural deve apresentar resistência à compressão axial aos 28 dias superior a 17,2MPa e, segundo as normativas estabelecidas pelo ACI 213R-87, RILEM (1975) e NS 3473, a massa específica para concretos leves estruturais



deve ser igual ou inferior, respectivamente a $1,85\text{kg/dm}^3$, $2,0\text{ kg/dm}^3$ e $2,20\text{ kg/dm}^3$. Os resultados obtidos neste estudo estão dispostos na Tabela 12.

Tabela 12 – Resultados de resistência à compressão axial e massa específica.

<i>Traço</i>	<i>Resistência à Compressão Axial aos 7 dias (MPa)</i>	<i>Massa Específica (kg/dm³)</i>
T-R	32,9	2,37
T-1	17,35	1,63

Portanto, levando em consideração as especificações supracitadas e os resultados obtidos, o traço T-1 pode ser considerado concreto leve estrutural, pois apresentou resistência à compressão axial superior a mínima exigida e massa específica inferior a $2,20\text{ kg/dm}^3$.

Referências

- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NM 35 – Agregados Leves para Concreto Estrutural – Especificações. Rio de Janeiro, 1995.
- AÏTCIN, P.C. Concreto de Alto Desempenho. Associação Brasileira de Cimento Portland. PINI. 2000.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). Advances in concrete technology - proceeding second canmet/ aci international symposium. ACI SP 154-95. Las Vegas, Nevada, USA, 1995.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete. ACI 213R-87. ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, 27p., 1997.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard Specification for Portland Cement. ASTM C150. West Conshohocken, PA, 2012.
- CATOIA, T. Concreto Ultraleve estrutural com pérolas de EPS: Caracterização do material e estudo de sua aplicação em lajes. Tese de doutorado em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 2012.
- HOLM, T.A. Specified density concrete – A transition. In: Internacional Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, 2. Kristiansand, Norway, 2000. Proceedings, p.37-46.
- MEHTA, Kumar P., MONTEIRO, PAULO J.M. Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais. Editora Pini, 1ª Edição. São Paulo, 1994.
- ROSSIGNOLO, J. A. Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestrutura e aplicações. Editora Pini, 1ª Edição. São Paulo, 2009.
- SPITZNER, J. High-Strength LWA Concrete. High-Strength Concrete. RILEM Cap.II – Aggregates. 1994.