

CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO COM AGREGADO LEVE

Prof. Dr. João Adriano Rossignolo

Departamento de Engenharia Civil - Universidade Estadual de Maringá (DEC-UEM), Maringá PR.
Grupo de Desenvolvimento e Análise do Concreto Estrutural – GDACE (jarossignolo@uem.br)

Prof. Dr. Vladimir Antonio Paulon

Faculdade de Engenharia Civil – FEC. UNICAMP. Campinas SP.

Prof. Dr. Marcos Vinício Costa Agnesini

Dep. de Arquitetura e Urbanismo da Escola de Engenharia de São Carlos - USP. São Carlos SP.
(agnesini@sc.usp.br)

RESUMO

O concreto leve de alto desempenho (CLAD) é hoje um material de construção consagrado em todo o mundo nos mais diversos tipos de construções, como plataformas marítimas flutuantes, pontes e edifícios pré-fabricados. Além da redução da massa específica, o CLAD apresenta outras vantagens, como maior isolamento térmico e acústico, maior resistência ao fogo e alta resistência ao gelo e degelo. A intenção principal desse artigo é apresentar o atual estágio de desenvolvimento desse material em diversos países, através da análise de obras e pesquisas recentes, assim como da normalização existente para projeto e produção.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos algumas pesquisas foram realizadas com o intuito de otimizar ainda mais algumas propriedades dos concretos de alto desempenho (CAD). Dentre elas, uma linha de estudo se destaca, a união das características otimizadas do CAD com a baixa massa específica dos concretos leves estruturais (CLE), obtendo-se assim o chamado concreto leve de alto desempenho (CLAD). Pesquisas recentes têm demonstrado a possibilidade de produzir concretos com massa específica abaixo de 2000 kg/m³ e resistência à compressão acima de 80 MPa (ZHANG e GJØRV, 1991a; HOLM e BREMNER, 1994; AGNESINI e GOMES NETO, 1998; HAQUE e AL-KHAIAT, 1999; ROSSIGNOLO et al., 2000; ROSSIGNOLO e AGNESINI, 2002; ROSSIGNOLO et al., 2003). O CLAD é hoje um material de construção consagrado em todo o mundo nos mais diversos tipos de construções, como plataformas marítimas flutuantes, pontes e edifícios pré-fabricados.

Atualmente, o CLAD é definido através de um parâmetro que relaciona resistência à compressão e massa específica seca do material. Essa relação, apresentada na equação 1, é denominada de *fator de eficiência* (HOLM e BREMNER, 1994). Segundo essa relação, é considerado como concreto leve de alto desempenho um concreto com fator de eficiência acima de 25 MPa.dm³/kg.

$$\text{Fator de eficiência} = f_c / g \quad (\text{MPa.dm}^3/\text{kg}) \quad (1)$$

Onde: f_c = resistência à compressão (MPa)

g = massa específica seca do concreto (kg/dm³)

Em função da atual importância do CLAD na construção civil, esse trabalho tem como intenção principal apresentar o atual estágio de desenvolvimento desse material em diversos países, através da análise de obras e pesquisas recentes, assim como da normalização existente para projeto e produção.

2. DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO

Mesmo havendo registros da utilização de agregados leves (pedra pomes) nas construções dos Gregos e Romanos, há mais do 2000 anos, como por exemplo a cúpula do *Pantheon*, em Roma, de 44 m de diâmetro, as primeiras aplicações estruturais dos concretos leves ocorreram no início do século passado. A primeira utilização de concretos de alta resistência com agregados leves artificiais ocorreu durante a Primeira Guerra Mundial, quando a *American Emergency Fleet Building Corporation* construiu embarcações com concreto leve com resistência à compressão de 35 MPa e massa específica em torno de 1700 kg/m^3 , utilizando folhelho expandido, enquanto os valores usuais de resistência à compressão dos concretos com massa específica normal na época era de 15 MPa. Um exemplo dessas embarcações é o navio Norte-Americano *USS Selma*, construído em 1919 com concreto com resistência à compressão de 35 MPa e massa específica de 1600 kg/m^3 (fator de eficiência de $22 \text{ MPa.dm}^3/\text{kg}$).

Durante a Segunda Guerra Mundial foram construídos 105 navios com concreto leve, permitindo uma grande economia de chapas de aço. Após a Segunda Guerra Mundial houve um considerável aumento dos estudos e aplicações do CLE para execução de estruturas de edifícios, tabuleiros de pontes e elementos pré-moldados.

A partir da década de 50, diversos edifícios de múltiplos andares foram construídos com concreto leve, tais como *Australia Squer Tower* (Austrália) em 1967 (Figura 1a), *Park Regis* (Austrália) em 1968 (Figura 1b), *Standart Bank* (África do Sul) em 1970 (Figura 1c) e o *BMW Building* (Alemanha) em 1972 (Figura 1d).

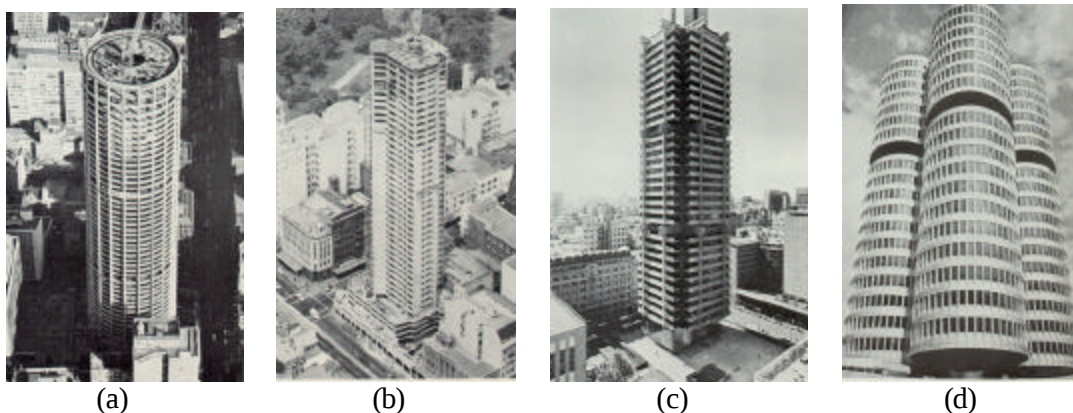


Figura 1. Edifícios de múltiplos andares executados com CLAD.

Mesmo com o aumento da utilização do CLAD na construção civil após a década 50, até 1980 a grande maioria dos estudos e utilizações ocorriam com concretos de alta resistência com massa específica normal. Neste período poucos estudos sobre CLAD foram realizados, entretanto, estes estudos já apresentavam concretos leves com resistência à compressão acima de 60 MPa e com massa específica em torno de 2000 kg/m^3 , demonstrando assim o grande potencial desse material.

A partir de 1980, com o rápido desenvolvimento da tecnologia dos concretos, tornou-se mais fácil a obtenção de concretos com altas resistências mecânicas e alta durabilidade. Esse desenvolvimento de tecnologia e de novos materiais componentes também foram aplicados

aos concretos leves estruturais, aumentando ainda mais o potencial de utilização desse material na construção civil.

3. PROPRIEDADES DO CONCRETO LEVE DE ALTO DESEMPENHO

3.1. Agregados Leves para CLAD

Nos concretos com agregados leves a resistência mecânica normalmente é governada pela resistência do agregado leve, uma vez que a resistência do agregado é geralmente menor que a resistência da matriz de cimento e da interface agregado/matriz. Além disso, a forma e a textura dos agregados leves influenciam indiretamente na resistência mecânica do concreto, em função da quantidade de água necessária para a obtenção da trabalhabilidade desejada. No caso dos agregados leves artificiais, a textura e a forma das partículas dependem do processo de fabricação.

Em função de sua estrutura porosa, os agregados leves apresentam grande potencial de absorção de água, que afeta diretamente a trabalhabilidade do concreto no estado fresco (relação a/c efetiva), assim como algumas propriedades no estado endurecido, como resistência mecânica e massa específica.

3.2. Resistência mecânica e massa específica do CLAD

A resistência à compressão e a massa específica são as propriedades mais importantes na caracterização dos concretos leves estruturais e estão diretamente relacionadas com o tipo de agregado utilizado. Além do tipo do agregado, essas propriedades estão relacionadas também com a granulometria, uma vez que a massa específica dos agregados leves é inversamente proporcional à sua dimensão. A relação entre a massa específica e a resistência à compressão dos concretos com agregados leves apresenta grande variabilidade de valores em função do tipo de agregado utilizado. As Figuras 2 e 3 apresentam as relações entre resistência à compressão e dimensão máxima característica do agregado e resistência à compressão e massa específica, respectivamente.

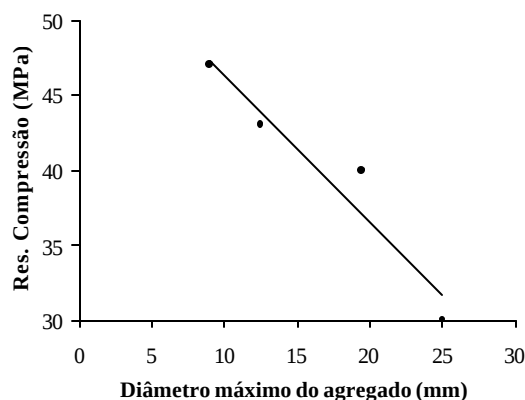


Figura 2. Relação entre resistência à compressão do concreto e dimensão máxima característica do agregado leve (EVANGELISTA et al.,1996)

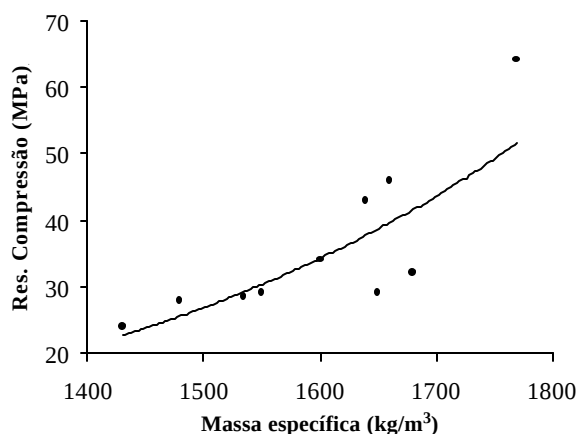


Figura 3. Relação entre resistência à compressão e massa específica do concreto com argila expandida (EVANGELISTA et al.,1996).

É importante salientar que nos concretos leves estruturais existe um limitante de resistência à compressão, que varia em função da dosagem e do tipo de agregado leve, a partir da qual o aumento do consumo de cimento não ocasiona aumento de resistência mecânica, sendo assim considerado o limitante de viabilidade econômica desse material.

3.3. Módulo de deformação

Assim como a maioria das propriedades dos concretos leves, o módulo de deformação está diretamente relacionado com o tipo e com a quantidade de agregado leve utilizado. Normalmente os valores do módulo de deformação do concreto leve são significativamente inferiores aos obtidos para concretos com massa específica normal. O valor do módulo de deformação do concreto leve varia entre um terço e dois terços do valor do módulo obtido no concreto com massa específica normal, para um mesmo nível de resistência à compressão.

A redução do valor do módulo de deformação no concreto leve, em relação ao concreto com massa específica normal, é consequência direta da porosidade do agregado leve e tem grande importância na distribuição das tensões internas do concreto. A Tabela 1 apresenta algumas expressões que relacionam o módulo de deformação do concreto leve com sua respectiva resistência à compressão e massa específica.

Tabela 1. Equações para avaliação do módulo de deformação dos concretos leves

Referência	Equação	Observações
NS 3473 (1992)	$E_c = 9500 \cdot f_{ck}^{0,3} \cdot (\rho / 2400)^{1,5}$ [MPa]	Módulo secante ($74 \geq f_c \geq 20$)
ACI 318 (1992)	$E_c = 0,043 \cdot \rho^{1,5} \cdot f_c^{0,5}$ [MPa]	Módulo secante
BS 8110 Part.2 (1985)	$E_c = 1,7 \cdot (\rho / 1000)^2 \cdot f_{ck}^{0,3}$ [GPa]	-
ZHANG e GJ ØRV (1991a)	$E_c = 1190 \cdot f_{ck}^{0,67}$ [MPa]	Módulo secante

* E_c = módulo de deformação; ρ = massa específica (kg/m³); f_c = res. compressão (150 x 300mm - cilindro); f_{ck} = res. compressão (100 x 200mm - cilindro); f_{ck} = res. compressão (cubo - 100 mm³).

De forma geral, o comportamento da curva tensão x deformação é semelhante, tanto para os concretos leves como para os com massa específica normal, entretanto, o trecho ascendente da curva é mais linear para os concretos leves. A maior linearidade do trecho ascendente da

curva pode ser atribuído à diminuição da fissuração interna do concreto leve durante o carregamento, devido ao baixo módulo de deformação do agregado leve.

3.4. Permeabilidade

Os concretos leves estruturais apresentam permeabilidade à líquidos e gases semelhante aos concretos com massa específica normal, para o mesmo nível de resistência à compressão. Esses resultados podem ser atribuídos à diminuição das fissuras internas do concreto leve pela maior homogeneidade nos valores dos módulos do agregado e da argamassa e da melhoria de qualidade da zona de transição agregado/matriz (ZHANG e GJØRV, 1991b).

A distribuição uniforme das tensões internas dos concretos leves reduz a formação das fissuras microscópicas, resultando em uma curva tensão x deformação linear até pelo menos 80% do carregamento último. Isso significa que a permeabilidade do concreto leve começa a aumentar a cerca de 80% do carregamento último, ao invés de 60% como normalmente ocorre no concreto com massa específica normal (BREMNER, 1998).

3.5. Retração

Normalmente, os concretos leves apresentam valores de retração maiores do que os obtidos para os concretos com massa específica normal, para o mesmo nível de resistência à compressão, uma vez que o agregado leve oferece baixa restrição à retração da pasta de cimento em função dos baixos valores do módulo de deformação, em comparação aos agregados com massa específica normal (HOLM e BREMNER, 1994; ROSSIGNOLO e AGNESINI, 2001).

3.6. Zona interfacial entre o agregado leve e a matriz de cimento

A espessura da interface entre o agregado leve e a matriz de cimento normalmente é menor que a observada nos concretos com massa específica normal. Este fato ocorre devido ao efeito de “filtragem” do agregado leve, onde somente a água da pasta de cimento entra no agregado, reduzindo assim a relação água/cimento da matriz de cimento próxima à superfície do agregado leve (interface) (ROSSIGNOLO, 2003). Esse fato diminui a permeabilidade e aumenta a resistência mecânica da matriz de cimento entorno do agregado leve. O aumento da resistência da pasta ao redor do agregado leve é um dos fatores responsáveis pela melhor distribuição interna das tensões com conseqüente redução de fissuração interna. A Figura 4 ilustra a interface entre o agregado leve e a matriz de cimento.

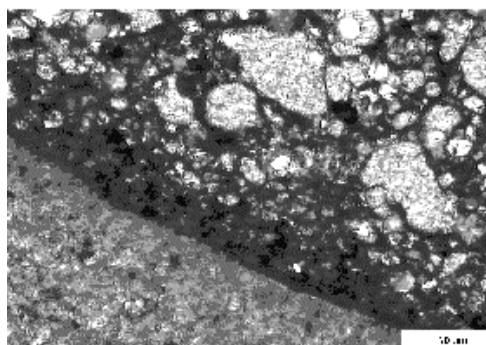


Figura 4. Interface entre o agregado leve e a matriz de cimento.
Micrografia de microscopia ótica de transmissão (200x) (Fonte: ROSSIGNOLO, 2003)

4. PRINCIPAIS APLICAÇÕES DO CLAD

O CLAD apresenta grande potencial econômico de utilização nas situações em que o peso próprio tem grande importância nas cargas permanentes da estrutura, como pontes, e quando haja necessidade de transporte da estrutura, como estruturas pré-fabricadas e plataformas marítimas. A maioria das aplicações de concreto leve em todo o mundo continua a ser na produção de elementos pré-fabricados, considerando-se os menores custos de manuseio, transporte e montagem. O painel pré-fabricado é uma das aplicações mais utilizadas e mais econômicas dos concretos leves, com desempenho superior aos concretos normais (Figura 5).



Figura 5. Peças pré-fabricadas em concreto leve.

Além de altas resistências mecânicas e alta durabilidade, o uso dos concretos leves de alto desempenho apresenta vantagens especiais nas construções pré-fabricadas, em relação ao concreto com massa específica normal, tais como: redução dos custos de transporte; redução do tempo de montagem da estrutura de 25 a 50%; redução da armadura; redução da estrutura de fundação; e fácil perfuração e fixação.

Em pontes moldadas *in-loco* de grande comprimento, com a redução dos custos com fôrmas e escoramento, a redução de custo final da obra pode chegar a 10% com a utilização do CLAD. Com a utilização da tecnologia da pré-fabricação, este valor pode chegar a 20% do valor final da obra. O maior potencial fluando do CLAD, em relação ao concreto com massa específica normal, é uma das principais razões para o uso desse material em plataformas e tanques marítimos flutuantes. Esse tipo de obra é mais comum em países como Noruega, Dinamarca e Japão.

Outra aplicação vantajosa do CLAD é em regiões com solo de baixa resistência. Estruturas de concreto leve com massa específica em torno de 1500 kg/m^3 , apresentam redução do custo da fundação da ordem de 30%, comparadas as estruturas de concreto com massa específica normal. Além da redução de peso, o concreto leve apresenta outras vantagens indiretas, tais como: melhor resistência ao fogo; maior isolamento térmico e acústico; e alta resistência ao gelo e degelo.

5. NORMALIZAÇÃO DE CONCRETO LEVE ESTRUTURAL VIGENTE EM ALGUNS PAÍSES

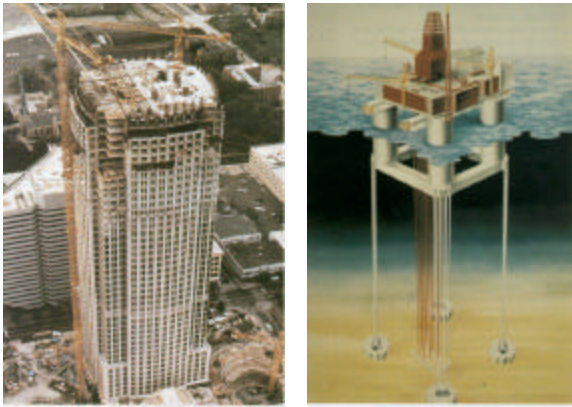
PAÍS	ESPECIFICAÇÃO
Noruega	▪ NS 3420. Specification texts for building and construction, 2nd edition 1992. ▪ NS 3473. Concrete structures. Design rules, 5th edition 1998. ▪ NS 22. Norwegian Concrete Association Publication Nº 22. Lightweight Aggregate Concrete. Specifications and Guidelines. 1999.
EUA	▪ ACI 211.2-91. Standard Practice for selecting proportions for Structural Lightweight Concrete, 1991. ▪ ACI 213R-87. Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete, 1987. ▪ ACI 213R-87Rev. Proposed revisions, 1995. ▪ ACI 318-95. Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, 1995. ▪ ACI 304.5R-91. Batching, Mixing, and Job Control of Lightweight Concrete, 1991. ▪ ACI SP-136. Structural Lightweight Aggregate Concrete Performance, 1992. ▪ ASTM C 330-89. Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete.
Inglaterra	▪ BS 3797. British Standard Specifications for Lightweight Aggregates for Masonry units and Structural Concrete. ▪ BS 8110. British Standard BS 8110:1985 Structural use of concrete.
Japão	▪ JASS 5. Reinforced Concrete Work, 1997. ▪ JSCE Chapter 19. Lightweight Aggregate Concrete 1986, revised 1996. ▪ JIS A 5002. Lightweight Aggregates for Structural Concrete 1978, revised 1999.
Alemanha	▪ DIN 1045. Stahlbetonbestimmungen, 1988. ▪ DIN 4219. Leichtbeton und Stahlleichtbeton mit geschlossenem Gefüge 1979, Teil 1,2. ▪ DIN 4226. Zuschlag für Beton 1983, Teil 1,2,3. ▪ DIN 4227 T 4. Spannbeton; Bauteile aus Spannleichtbeton, 1986.
Itália	▪ UNI 7548.1. Lightweight concrete by expanded clay or shale. Def. and classifications. ▪ UNI 7549.1. Lightweight aggregates. Definitions, classifications and grading.
Brasil	▪ NM 35 – ABNT. Agregados leves para concreto estrutural – Especificações, 1995.

6. PESQUISAS RECENTES SOBRE CLAD

País	Pesquisa com CLAD	Agregado	Resistência à compressão 28 dias (MPa)	Massa específica (kg/m ³)	Referência ¹
Noruega	Aplicação em ponte “flutuante”	Argila Expandida	64	1930	JAKOBSEN, 2000
	Propriedades mecânicas	Argila Expandida	25 – 80	1480 – 1890	STEMLAND e THORENFELDT, 2000
		Argila Expandida	34 – 40	1750	THORENFELDT e STEMLAND, 2000
	Permeabilidade	Argila expandida	-	1640 – 1730	HAMMER e HANSEN, 2000
	Estudo de cura	Argila Expandida e Folhelho Expandido	54 – 68	1780 – 1880	SMEPLASS, 2000 (a)
		Argila Expandida	-	1900	CARLSEM, 2000
	Produção	Argila Expandida	-	-	SEMPASS, 2000 (b)
Alemanha	Utilização em estruturas mistas	Argila Expandida	30 – 67	1250 – 1650	FAUST, LEFFER e MENSINGER, 2000
		-	-	-	KÖNING, NÓVEK e POMMERENING, 2000
		Argila Expandida	57	1600	FISHER, DHEN e KÖNIG, 2000
	Propr. mecânicas	Argila Expandida Folhelho Expandido	15 – 90	-	FAUST, 2000 (a) (b) (c)
		Argila Expandida	60	1700	HEGGER, GÖRTZ e MOLTER, 2000
		Argila Expandida Folhelho Expandido	35 – 90	-	DEHN, 2000
	Utilização de fibras	-	42 – 50	1600	SCHNELLENBACH, PFEFFER e WEGEL, 2000
	Utilização de agregados leves reciclados	Reciclado de Demolição	18 – 45	1640 – 1760	REINHARDT e KÜMMEL, 2000
Japão	Fadiga	Perlita	-	-	KOJIMA, TAKAGI e OKAMATO, 2000
	Utilização de fibras	Perlita	38 – 41	1850 – 1950	IKEDA e FUJIKI, 2000
	Propr. mecânicas	-	30 – 80	1380 – 1880	GUO et al., 2000
Holanda	Propr. mecânicas	Argila Expandida	40 – 80	-	BRENGEL e BRAAN, 2000
	Utilização em estruturas mistas	Argila Expandida	-	-	GALJAARD e WALRAVEN, 2000
		-	-	-	BENNENK e VLIEG, 2000
	Pré-fabricados	Argila Expandida	60 – 73	1800 – 2000	POOTE BRENGEL, 2000
	Durabilidade	Argila Expandida	60	-	BRENGEL e TAHERI, 2000
Portugal	Durabilidade	Argila Expandida	30 – 74	1440 – 1780	VIERIA e GONÇANVES, 2000
Nova Zelândia	Pré-fabricados	-	30 – 50	-	ALLINGTON et al., 2000
Dinamarca	Pré-fabricados	-	-	-	GOLTERMANN, 2000
França	Propr. mecânicas em altas temperaturas	Argila Expandida	45 – 60	-	NOUMOWÉ, AGGOUN e CABRILLAC, 2000
Estados Unidos	Propr. mecânicas	-	20 – 70	1200 - 2200	HOLM e RIES, 2000

¹ Trabalhos apresentados no SECOND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON STRUCTURAL LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE. *Anais*. Kristiansand, Noruega, de 18 a 22 de Julho de 2000.

7. EXEMPLOS DE CONSTRUÇÕES COM CLAD

DESCRIÇÃO	ILUSTRAÇÃO
PONTE FLUTUANTE DE NORDHORDLAND - NORUEGA, 1994. - As 10 plataformas flutuantes de apoio do tabuleiro da ponte foram executados com concreto leve, com valores médios de resistência à compressão e massa específica de 70 MPa e 1900 kg/m³, respectivamente. - Comprimento da ponte: 1.246 m.	
MUSEU DE GUGGENHEIN - ESPANHA, 1997. - As lajes do museu foram executadas com 4.400 m³ de concreto leve, com valores médios de resistência à compressão e massa específica de 25 MPa e 1600 kg/m³, respectivamente.	
TANQUE FLUTUANTE SOUTH ARNE - NORUEGA, 1999. - Na execução do tanque para armazenamento de petróleo foram utilizados 36.500 m³ de concreto leve, com valores médios de resistência à compressão e massa específica variando de 45 a 60 MPa e 1850 a 2250 kg/m³, respectivamente. - A capacidade de armazenamento do tanque é de 550.000 barris.	
EDIFÍCIO NATIONS BANK (1) - EUA, 1992. - Toda a estrutura do edifício foi executada com concreto leve, com valores médios de resistência à compressão e massa específica de 47 MPa e 1890 kg/m³, respectivamente. O concreto leve foi bombeado a uma altura máxima de 252 m (altura do edifício). PLATAFORMA FLUTUANTE HEIDRUN (2) - NORUEGA, 1995. - Foram utilizados 63.800 m³ de concreto leve, com valores médios de resistência à compressão e massa específica de 78 MPa e 1940 kg/m³, respectivamente.	 (1) (2)

8. REFERÊNCIAS

- AGNESINI, M.V.C.; GOMES NETO, D.P. (1998). Microconcretos leves com argila expandida: influência da adição de sílica ativa no fator de eficiência e dosagem de pré-fabricados de pequena espessura: estudo de caso. Anais: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 40. IBRACON. Rio de Janeiro - Brasil.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - ACI (1992). Building Code requirements for reinforced concrete ACI 318-89 and commentary ACI 318R-89, 347 p.
- BREMNER, T.W. (1998). Concreto de agregado leve. *Revista técnica*, nº 37, pp. 45-47.
- BRITISH STANDARD INSTITUTION (1985). BS 8110 part 2.
- EVANGELISTA, A.C.J.; SHEHATA, L.C.D.; ALMEIDA, I.R. (1996). Características mecânicas de concretos leves de alta resistência com argila expandida, produzidos no Brasil. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES. Florianópolis SC, Brasil, pp. 170-189.
- HAQUE, M.N.; AL-KHAIAT, H. (1999). Strength and durability of lightweight concrete in hot marine exposure conditions. *Mater Struc*, 32, pp. 533-538.
- HOLM, T.A.; BREMNER, T.W. (1994). High Strength Lightweight Aggregate Concrete. In: High performance concrete: properties and applications. Ed. SHAH, S.P. and AHAMAD. S.H. Great Britain, McGraw-Hill, pp. 341-374.
- NORWEGIAN COUNCIL FOR BUILDING STANDARTIZATION. Concrete structures design rules – NS3473E, Oslo, 78 p.
- ROSSIGNOLO, J.A. (2003). Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos – Dosagem, produção, propriedades e microestrutura. 210p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade de São Paulo, São Carlos.
- ROSSIGNOLO, J.A.; AGNESINI, M.V.C.; MORAIS, J.A. (2003). Properties of High-Performance IWAC for Precast Structures with Brazilian Lightweight Aggregates. *Cement and Concrete Composites*, v. 25, n. 1, p. 77-82, 2003.
- ROSSIGNOLO, J.A.; AGNESINI, M.V.C. (2002). Mechanical properties of polymer-modified lightweight aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 32, n. 3, p. 329-334.
- ROSSIGNOLO, J.A.; AGNESINI, M.V.C. (2001). Retração por secagem dos concretos leves de alto desempenho modificados com polímero. In: 43º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2001, Foz do Iguaçu - PR. Anais, p. 01-11.
- ROSSIGNOLO, J.A.; AGNESINI, M.V.C.; MORAIS, J.A. (2000). High performance lightweight aggregate concrete for precast structures: properties in the fresh and hardened state. In: SECOND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON STRUCTURAL LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE Kristiansand, Noruega.
- ZHANG, M.H.; GJØRV, O.E. (1991a). Mechanical properties of high-strength lightweight concrete. *ACI Materials Journal*, v. 88, n. 3, pp. 240-247.
- ZHANG, M.H.; GJØRV, O.E. (1991b). Permeability of high-strength lightweight concrete. *ACI Materials Journal*, v. 88, n. 5, p. 463-469.