

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

VITÓRIA RIBEIRO DOS SANTOS

**ESTUDO TEÓRICO SOBRE CONCRETOS COM AGREGADOS
LEVES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO

2021

VITÓRIA RIBEIRO DOS SANTOS

ESTUDO TEÓRICO SOBRE CONCRETOS COM AGREGADOS LEVES

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado à Disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, para obtenção do título de bacharel em engenharia civil.

Orientadora: Profa. Dra. Fabiana Goia Rosa de Oliveira

CAMPO MOURÃO

2021



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Campo Mourão
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Departamento Acadêmico de Construção Civil
Coordenação de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso

ESTUDO TEÓRICO SOBRE CONCRETOS COM AGREGADOS LEVES

por

Vitória Ribeiro dos Santos

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 19h00min do dia 05 de maio de 2021 como requisito parcial para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes

(UTFPR)

Prof. Dr. Ronaldo Rigobello

(UTFPR)

**Prof^a. Dr^a. Fabiana Goia Rosa de
Oliveira**

(UTFPR)

Orientador

Responsável pelo TCC: **Prof. Me. Valdomiro Lubachevski Kurta**

Coordenador do Curso de Engenharia Civil:

Prof. Dr(a). Paula Cristina de Souza

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

AGRADECIMENTOS

Estamos vivendo tempos difíceis, mas não posso deixar de agradecer, principalmente pela minha vida e por todas as pessoas que me ajudaram a trilhar os meus caminhos.

Primeiramente à Deus, por seu amor infinito, que é meu refúgio e minha fortaleza, que me encoraja a viver e a ser melhor, me ajuda a manter a esperança mesmo em momentos difíceis. Sem minha fé em Jesus eu seria nada.

Agradeço aos meus pais, Pedrinha e Salvador, que sempre fizeram de tudo para que eu pudesse realizar os meus sonhos, principalmente a minha graduação. Obrigada por nunca medirem esforços para me ver feliz e, principalmente, por acreditarem tanto no meu potencial.

Aos meus irmãos, Diego, Gabriel e Pedro Henrique, que sempre estão presentes em tudo na minha vida e são meus maiores companheiros. Agradeço também à toda minha família, todos que sempre me incentivaram e estiveram ao meu lado, sou grata por todos os momentos felizes e ensinamentos, em especial aos meus sobrinhos: Isabella e Lucas, minhas cunhadas: Bruna e Karina, minha madrinha Valdete e meu primo João Vitor.

À minha melhor amiga, Rafaela, que está presente na minha vida há 15 anos, sendo minha confidente, companheira, conselheira e sempre me apoiando, e ao meu melhor amigo, Matheus, que sempre me incentivou, antes mesmo de iniciar a graduação, sou grata por sempre acreditar em mim e por nossa amizade.

À minha amiga Ana Lara, que tive a graça de conhecer durante a graduação, que sempre esteve disposta a me ajudar em todos os momentos, sou grata por todos os ensinamentos e pela dedicação à nossa amizade. Também agradeço a todos os meus amigos, que se fazem presentes mesmo com a distância, sou grata por todos os momentos felizes, todas as histórias e toda ajuda, seja nos estudos, nos momentos de lazer, ou até mesmo nos momentos de desespero em época de provas, em especial à Ana Beatriz, Camila, Diogo, Jocileila, Marco, Priscila e Tawane.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão – PR, e a todos os professores que contribuíram para a minha formação, sou grata por todos os ensinamentos e vivência ao longo desses 5 anos de faculdade.

À minha orientadora, Prof. Dra. Fabiana Goia Rosa de Oliveira, que me recebeu como sua orientanda, entendeu minhas limitações e sempre esteve disposta

a me ajudar, e, que além de ser uma profissional incrível, também se mostrou uma pessoa iluminada. Sou muito grata por toda paciência e aprendizado.

Certamente alguns nomes foram esquecidos, mas jamais esquecerei o apoio que recebi nessa etapa da minha vida. Sem vocês eu não chegaria até aqui.

A todos os meus mais sinceros agradecimentos.

Muito obrigada!

RESUMO

SANTOS, Vitória R. **Estudo teórico sobre concretos com agregados leves**. 2021. 58f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2021.

Com o aprimoramento de técnicas e equipamentos para o estudo e a utilização de novos materiais, houve uma grande evolução na tecnologia do concreto. Com isso, as inovações na tecnologia dos concretos levaram à utilização de concretos especiais, como os concretos leves. Os estudos sobre concretos com agregados leves crescem cada vez mais, assim como sua utilização pelo mundo. Sendo assim, a aplicação desse material é vista até mesmo em edificações pré-fabricadas, pontes e plataformas marítimas. Além disso, como principal característica dos agregados leves, tem-se a elevada porosidade, que, conseqüentemente, resulta em baixa massa específica. A ampla utilização dos concretos leves se deve aos benefícios promovidos com a diminuição da massa específica e por ocasionar alterações significativas em outras importantes propriedades do material, como: trabalhabilidade, resistência mecânica e durabilidade. Considerando que um dos grandes desafios do ramo da construção civil é o peso próprio das estruturas, o concreto leve, com a diminuição do peso específico, influencia positivamente na produtividade dos processos construtivos e no orçamento final. Entretanto, o setor da construção civil mostra-se relativamente atrasado para a elaboração de projetos e execução de obras com concretos leves.

Palavras chave: concreto leve, agregados leves, concreto com agregados leves.

ABSTRACT

With the improvement of techniques and equipment for the study and the use of new materials, there has been a great evolution in the technology of concrete. As a result, innovations in the technology of concretes led to the use of special concretes, such as lightweight concrete. Studies on lightweight aggregates concrete are growing increasingly, as well as their use around the world. Therefore, an application of this material is seen even in prefabricated buildings, bridges and offshore platforms. In addition, as a main characteristic of the lightweight aggregates, there is high porosity, which, consequently, results in low specific mass. The widespread use of lightweight concrete is due to the benefits promoted with the reduction of specific mass and for causing important changes in other important properties of the material, such as: workability, mechanical strength and durability. Aware that one of the major challenges in the construction industry is the weight of the structures, lightweight concrete, with a decrease in specific weight, positively influences the productivity of construction processes and the final budget. However, the construction sector is relatively late for project design and execution of works with lightweight concrete.

Key words: lightweight concrete, lightweight aggregate, lightweight aggregate concrete.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 - Espectro dos agregados leves e dos correspondentes concretos. 15

Figura 2 - Requisitos de granulometria de agregados graúdos leves segundo a ASTM C 330-09	15
Figura 3 - Requisitos de granulometria de agregados leves segundo a BS 3797:1990 (cancelada)	16
Figura 4 - Requisitos de granulometria de agregados miúdos leves segundo a BS 3797:1990 (cancelada).....	16
Figura 5 - Micrografia (MEV) dos agregados produzidos pelos processos de sinterização (a) e forno rotativo (b).	18
Figura 6 - Micrografia ilustrando o acúmulo de bolhas de ar ao redor do agregado leve decorrente da elevada absorção de água após a mistura dos materiais.	21
Figura 7 - Características de alguns agregados leves comerciais.	21
Figura 8 - Concreto leve com agregados leves, concreto leve celular e concreto leve sem finos.....	22
Figura 9 - Valores de referência da massa específica dos concretos leves estruturais	23
Figura 10 - Valores correspondentes de resistência à compressão e massa específica para concreto leve estrutural.....	24
Figura 11 - Variações da massa específica seca de concretos produzidos com vários agregados.	24
Figura 12 - Relação entre resistência à compressão e massa específica do concreto leve com argila expandida brasileira.	26
Figura 13 - Ilustração da força gravitacional no concreto durante a análise do abatimento do tronco de cone.....	32
Figura 14 - Plataforma petrolífera South Arne.....	36
Figura 15 - Ilustração da Plataforma Petrolífera Heidrun TLP em operação (Noruega).	37
Figura 16 - Plataforma petrolífera Troll GBS (Noruega) com 472 metros de altura: a) Construção da plataforma em doca seca; b) Transporte da plataforma; c) Plataforma apoiada no leito marítimo e em funcionamento; d) Ilustração da plataforma em funcionamento.....	38
Figura 17 - Ponte Stovset, na Noruega.....	39
Figura 18 - Ponte Benicia-Martinez, nos Estados Unidos.	40
Figura 19 - Ponte flutuante Nordhordland, na Noruega: a) Transporte de um “caixão” flutuante, b) trecho do tabuleiro apoiado nos “caixões”; c) Ponte concluída.	40

Figura 20 - Assembly Hall: a) Vista aérea da construção da cobertura; b) Ginásio concluído; c) Ilustração das dimensões internas.....	41
Figura 21 - Terminal do TWA no Aeroporto John F. Kennedy (Nova York, Estados Unidos): a) Vista lateral do terminal; b) Vista aérea da cobertura concluída.....	42
Figura 22 - Aeroporto Internacional de Dulles (Washington, Estados Unidos): a) Cobertura em fase de construção; b) Cobertura concluída.....	42
Figura 23 - Edifícios construídos com concreto leve: a) Library Tower, b) Edifício Nationsbank, e c) Museu Guggenheim-Bilbao.	43
Figura 24 - Edifício Lake Point (Chicago, Estados Unidos) com 75 pavimentos: a) e b) Execução dos pavimentos tipos – o concreto leve foi aplicado nas lajes (moldadas in loco) com 20 cm de espessura; c) Edificação concluída (1968).	46
Figura 25 - Edifícios Raymond-Hillard (Chicago – Estados Unidos). Os quatro edifícios utilizaram concreto leve nas paredes estruturais, nos pilares e nas lajes.	46
Figura 26 - Edifício Shell Plaza 1 (Houston, Estados Unidos): a) Execução integral da estrutura moldada in loco utilizando concreto leve; b) Edificação concluída (1969).	47
Figura 27 - Edifício da Administração da Usina Elétrica do Nordeste da Alemanha (Hamburgo, Alemanha). Executado com estrutura suspensa, em concreto leve, sobre tirantes engastados em arco executado em concreto convencional. a) Execução dos arcos e da estrutura suspensa; b) e c) Edificação concluída (1969).....	47
Figura 28 - Fábrica de Rhodia em Santo André, São Paulo.	48
Figura 29 - Fabrica da Mangels em São Bernardo, São Paulo.	49
Figura 30 - Escola na Vila Sônia, em São Paulo (capital).	49
Figura 31 - Garagem padrão da Prefeitura Municipal de São Paulo (capital).	50
Figura 32 - Ginásio do Clube Atlético Santista na fase de construção.....	50
Figura 33 - Rodoviária Municipal de São Carlos.	51

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplos de construções marítimas produzidas em concreto leve.....	37
Tabela 2 - Pontes produzidas com concreto leve.	39
Tabela 3 - Estruturas de cobertura executadas em concreto leve.	41
Tabela 4 - Aplicações do concreto leve estrutural em edificações a partir de 1960.	44
Tabela 5 - Continuação das aplicações do concreto leve estrutural em edificações a partir de 1960.	45

LISTAS DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BS	<i>British Standard Institution</i>
EPS	Poliestireno Expandido
NBR	Norma Brasileira
NM	<i>Norma Mercosur</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVOS	10
2.1	Objetivos gerais	10
2.2	Objetivos específicos	10
3	JUSTIFICATIVA.....	11
4	DESENVOLVIMENTO TEÓRICO SOBRE CONCRETO LEVE.....	12
4.1	Agregados do concreto.....	12
4.1.1	Definição.....	12
4.1.2	Classificação geral	12
4.2	Agregados leves	13
4.2.1	Especificações para agregados leves	15
4.2.2	Fabricação dos agregados leves.....	16
4.2.3	Forma e textura superficial	18
4.2.4	Estrutura interna, resistência mecânica e módulo de deformação	19
4.2.5	Absorção de água e porosidade.....	20
4.2.6	Impurezas.....	22
4.3	Concreto leve	22
4.3.1	Propriedades do concreto leve no estado endurecido.....	24
4.3.2	Dosagem de concretos com agregados leves.....	29
4.3.3	Produção do concreto leve	30
4.3.4	Zona de transição nos concretos com agregados leves.....	34
4.3.5	Aplicação dos concretos leves	35
4.3.6	Aplicações no Brasil	48
4.3.7	Impacto ambiental	51
4.3.8	Pesquisas recentes	52

5	CONCLUSÃO	55
	REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

O concreto é o segundo material mais consumido no planeta, perdendo apenas para a água. É estimado que, anualmente, são consumidos 11 bilhões de toneladas no mundo (PEDROSO, 2009). Com isso, é um material muito difundido pelo mundo e gera constantes pesquisas em busca de aprimoramentos e inovações.

Nas últimas décadas houve uma grande evolução na tecnologia do concreto, resultado do aprimoramento de técnicas e equipamentos para o estudo, assim como a utilização de novos materiais, como, por exemplo, os aditivos redutores de água e os estudos microestruturais. Sendo assim, as inovações na tecnologia dos concretos resultaram em um incremento da utilização de concretos especiais, como os concretos leves.

Os estudos sobre concretos com agregados leves crescem cada vez mais, tendo em vista que sua utilização é cada vez mais difundida em todo o mundo, com aplicações em diversas áreas da construção civil, como edificações pré-fabricadas, pontes e plataformas marítimas. Segundo Rossignolo (2009), a ampla utilização desse material se deve aos benefícios promovidos pela diminuição da massa específica do concreto e também por ocasionar alterações significativas em outras importantes propriedades do material, com destaque para trabalhabilidade, resistência mecânica e durabilidade.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

Explorar conhecimentos acerca do uso de agregados leves, assim como o estudo sobre a produção e as propriedades físicas e mecânicas do concreto com agregados leves, além da aplicação na construção civil.

2.2 Objetivos específicos

- Aprofundar o conhecimento sobre agregados leves e suas propriedades;
- Identificar as propriedades físicas e mecânicas dos concretos com agregados leves;
- Sistematizar informações sobre a produção, uso e aplicações de concretos com agregados leves na construção civil.

3 JUSTIFICATIVA

A área da construção civil está em constante desenvolvimento, com uma busca contínua de mais e melhores métodos construtivos para otimizar os serviços e obter mais avanços tecnológicos para a área.

O concreto leve é uma alternativa para a construção civil, considerando que um dos grandes desafios do ramo é o peso próprio das estruturas, que são projetadas para suportar todos os esforços e ações externas e, além disso, o seu peso próprio que possui um valor significativo para os cálculos estruturais, exigindo mais das fundações e gastando mais materiais. Conseqüentemente, com o peso de um material reduzido, a produtividade dos processos construtivos é influenciada positivamente.

Além disso, de acordo com Rossignolo (2009), a substituição dos agregados convencionais por agregados leves também pode ocasionar alterações significativas em outras importantes propriedades do concreto, destacando-se a trabalhabilidade, resistência mecânica, módulo de deformação, durabilidade, condutividade térmica e espessura da zona da transição entre o agregado e a pasta de cimento. Sendo assim, conhecimento dessas modificações é fundamental para a correta aplicação desse material.

Neste contexto, o presente trabalho visa contribuir para o estudo sobre concretos com agregados leves.

4 DESENVOLVIMENTO TEÓRICO SOBRE CONCRETOS LEVES

4.1 Agregados do concreto

4.1.1 Definição

A qualidade dos agregados é muito importante, tendo em vista que o mesmo representa pelo menos $\frac{3}{4}$ do volume do concreto. Os agregados podem limitar a resistência do concreto e suas propriedades afetam a durabilidade e o desempenho estrutural do concreto (NEVILLE, 2016).

De acordo com a ABNT NBR 7211:2009, agregados são materiais pétreos, obtidos por fragmentação artificial ou já fragmentados naturalmente, com propriedades adequadas e possui dimensões nominais máxima inferior a 152 mm e mínima superior ou igual a 0,075 mm.

A função dos agregados, geralmente, é atuar nas argamassas e concretos como elemento inerte. Conforme Kloss (1996), elemento inerte é aquele que não sofre transformação química nas argamassas e concretos. Os agregados devem ser resistentes, duráveis e sem ação química nociva sobre o aglomerante. Além disso, não devem levar para o concreto elementos estranhos, que podem prejudicar as reações dos aglomerantes ou que dificultem a aderência da pasta com os grãos de pedra.

4.1.2 Classificação geral

De acordo com Neville (2016), as dimensões dos agregados utilizados em concreto variam desde dezenas de milímetros até partículas com seção transversal menor do que um décimo de milímetro. Com isso, a dimensão máxima utilizada varia e, também, em qualquer mistura são incorporadas partículas de diferentes dimensões. Para produzir concretos de boa qualidade, os agregados são separados em, pelo menos, dois grupos de dimensões. A principal separação é definida entre os agregados miúdos, usualmente denominados como areia, apresentam dimensões inferiores a 4 mm, e os agregados graúdos, que são os materiais com dimensão mínima de 5 mm.

De acordo com Kloss (1996), os agregados podem ser classificados das seguintes formas:

- a) Classificação dos agregados quanto à granulometria:
 - Agregados miúdos;
 - Agregados graúdos.
- b) Classificação dos agregados quanto à origem de fragmentação:
 - Artificiais: Quando os agregados precisam ser fragmentados ou triturados com auxílio de britadores ou outro meio artificial. Exemplos: brita, pedrisco, argila expandida e styropor;
 - Naturais: Quando são fragmentados pela ação do vento, chuvas, etc. O processo ocorre de forma natural. Exemplos: areia e pedregulho.
- c) Classificação dos agregados quanto à origem do material em si:
 - Naturais: Quando são provindos de rochas naturais. Exemplos: areia, pedregulho, brita granítica e brita basáltica;
 - Artificiais: Quando, para obter-se o agregado, é necessário passar substâncias naturais ou artificiais por vários tratamentos, misturas, fusões, etc. Exemplos: argila expandida, vermiculita e styropor.
- d) Classificação dos agregados quanto à massa unitária:
 - Agregados leves: São agregados com baixo peso. Atualmente, eles são muito empregados na construção de pré-moldados. Além da redução significativa do peso, possuem excelentes qualidades de isolamento térmico e acústico. Exemplos: Pedra-pomes, isopor, styropor, argila-expandida e vermiculita;
 - Agregados normais: São os agregados utilizados em obras atualmente. Exemplos: brita granítica e brita basáltica;
 - Agregados pesados: São agregados utilizados para fabricar concretos para estruturas especiais. As rochas utilizadas para produzir esses agregados são: barita, limonita, magnetita, entre outras.

4.2 Agregados leves

As alterações mais significativas com a substituição do agregado convencional pelo leve, são a trabalhabilidade, resistência mecânica, modulo de deformação,

durabilidade, condutividade térmica, resistência a altas temperaturas e espessura da zona de transição (MAISKIENE et. al, 2011 e IBRAHIM et. al., 2013; apud ANGELIN, 2014).

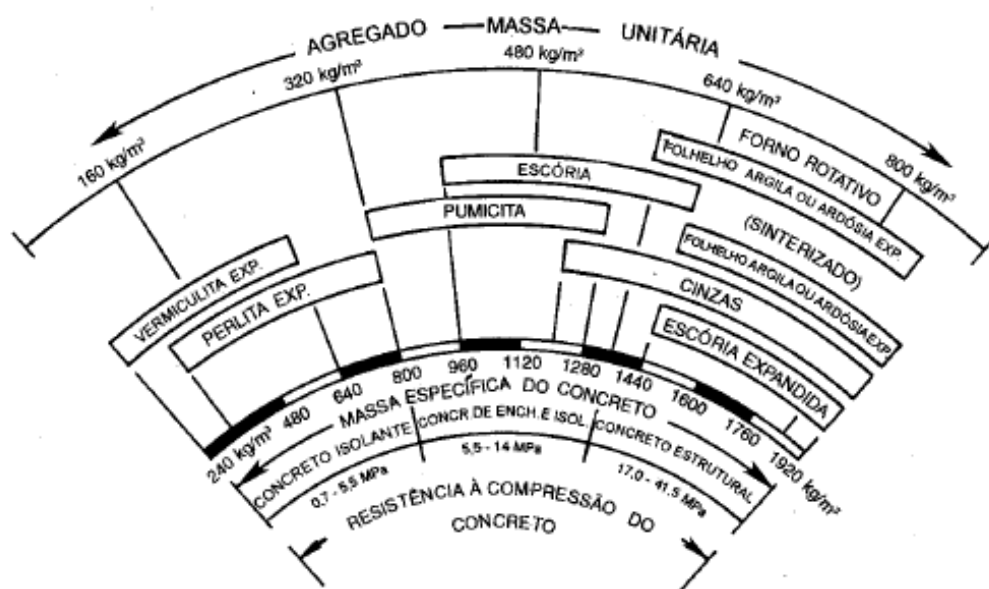
Com isso, como principal característica dos agregados leves tem-se a elevada porosidade, que, conseqüentemente, resulta em baixa massa específica. De acordo com Freire (2003), os agregados leves são materiais que, em virtude de sua estrutura celular, possuem densidade inferior aos agregados normais. Alguns agregados leves são de origem natural, ao mesmo tempo em que outros são produzidos a partir de materiais naturais ou de resíduos industriais (NEVILLE, 2016).

Os agregados leves naturais são obtidos por meio da extração direta em jazidas, seguida de classificação granulométrica. Os principais agregados dessa categoria são: diatomita, pedra-pomes, escória, cinzas vulcânicas e tufos. Com exceção da diatomita, todos são de origem vulcânica. Embora esses agregados produzam concretos de resistência moderada de boa qualidade, não são muito utilizados por serem encontrados somente em algumas partes do mundo (NEVILLE, 2016).

Os agregados artificiais são obtidos por tratamento térmico de uma variedade de materiais e são classificados com base na matéria prima utilizada no processo de fabricação. Entre os agregados artificiais, há os que resultam da aplicação de calor para a expansão de argilas, poliestireno, ardósias, folhelo, perlitas e vermiculitas e os originados de um processo especial de resfriamento, pelo qual se obtém uma expansão, como a escória de alto-forno (MORAVIA, 2007).

Na Figura 1, observa-se um espectro dos agregados leves e dos correspondentes concretos.

Figura 1 - Espectro dos agregados leves e dos correspondentes concretos.



Fonte: MEHTA E MONTEIRO (1994) apud MORAVIA (2007)

4.2.1 Especificações para agregados leves

As exigências em relação aos agregados leves são dadas pela ASTM C 330-09 (Padrão norte-americano de especificações e normas) e BS EN 13055-1:2002 (Padrão europeu de especificações e normas), sendo a última citada não prescritiva.

Na figura 2, apresenta-se os requisitos de granulometria da ASTM C 330-09 para agregados graúdos leves.

Figura 2 - Requisitos de granulometria de agregados graúdos leves segundo a ASTM C 330-09

Abertura da peneira (mm)	Porcentagem passante, em massa, nas peneiras			
	Dimensão nominal do agregado graduado			
	25 a 4,75	19 a 4,75	12,5 a 4,75	9,5 a 2,36
25,0	95-100	100	—	—
19,0	—	90-100	100	—
12,5	25-60	—	90-100	100
9,5	—	10-50	40-80	80-100
4,75	0-10	0-15	0-20	5-40
2,36	—	—	0-10	0-20

FONTE: NEVILLE (2016)

Na figura 3, observa-se os requisitos de granulometria de agregados leves de acordo com a BS 3797:1990, que foi substituída pela BS EN 13055-1:2002.

Figura 3 - Requisitos de granulometria de agregados leves segundo a BS 3797:1990 (cancelada)

Abertura da peneira (mm)	Porcentagem passante, em massa, nas peneiras		
	Dimensão nominal do agregado graduado		
	20 a 5 mm	14 a 5 mm	10 a 2,36 mm
20,0	95–100	100	—
14,0	—	95–100	100
10,0	30–60	50–95	85–100
6,3	—	—	—
5,0	0–10	0–15	15–50
2,36	—	—	0–15

Fonte: NEVILLE (2016)

Na figura 4, mostra-se os requisitos de granulometria de agregados leves miúdos de acordo com a BS 3797:1990.

Figura 4 - Requisitos de granulometria de agregados miúdos leves segundo a BS 3797:1990 (cancelada)

Abertura da peneira (mm)	Porcentagem passante, em massa, nas peneiras	
	Gradação L1	Gradação L2
10,0 mm	100	100
5,0 mm	90–100	90–100
2,36 mm	55–100	60–100
1,18 mm	35–90	40–80
600 μm	20–60	30–60
300 μm	10–30	25–40
150 μm	5–19	20–35

Fonte: NEVILLE (2016)

4.2.2 Fabricação dos agregados leves

Para a fabricação dos agregados leves artificiais, os processos de fabricação mais utilizados são a sinterização e o forno rotativo. Para o processo de sinterização, a matéria-prima deve ser misturada com uma proporção adequada de combustível, que pode ser carvão finamente moído ou coque. Em seguida, submete-se o material

a altas temperaturas com o auxílio de uma grelha móvel, e, conseqüentemente, ocorre a expansão em função da formação de gases (GOMES NETO, 1998).

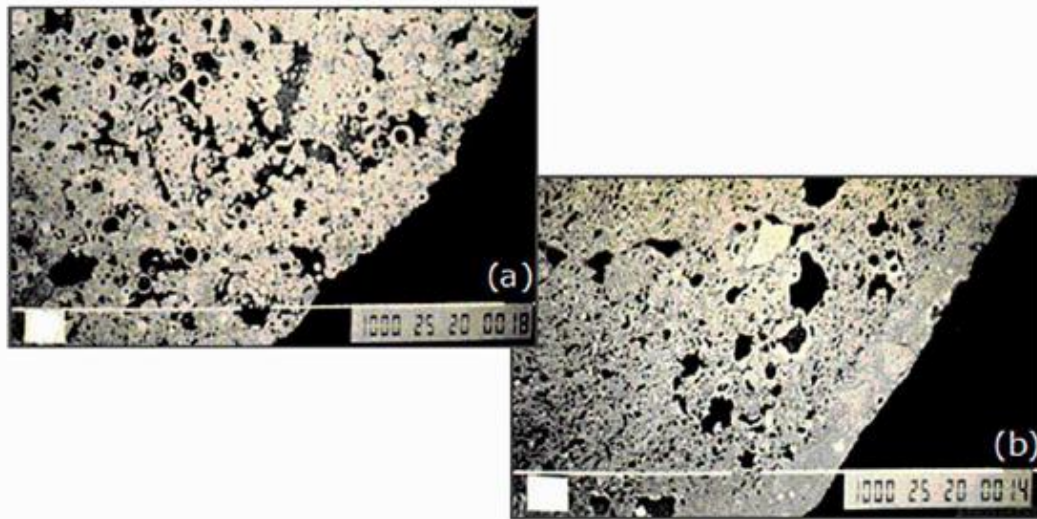
Segundo Rossignolo (2009), o agregado obtido pelo processo de sinterização apresenta os poros abertos, sem recobrimento e com altos valores de absorção de água. Além disso, o produto final é um clínquer muito irregular, que exige britagem para atender a todas as graduações granulométricas necessárias para a produção dos concretos. De acordo com o autor, os valores da massa específica desse tipo de agregado variam entre 650 kg/m^3 e 900 kg/m^3 .

Para o processo de fabricação em forno rotativo, aproveita-se as características que determinados materiais têm de se expandirem quando submetidos a temperaturas elevadas, como algumas argilas, com temperaturas entre $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ e $1350 \text{ }^\circ\text{C}$. Nessa faixa de temperatura, uma parte dos constituintes do material se funde gerando uma massa viscosa, ao mesmo tempo que a outra parte se decompõe quimicamente liberando gases que são incorporados por essa massa, expandindo-a em até sete vezes seu volume inicial. Essa estrutura porosa se mantém após o resfriamento (MORAIVE *et al.*, 2006 apud ROSSIGNOLO, 2009). Esse processo de fabricação também promove a formação de uma camada vitrificada externa na partícula com baixa porosidade.

Por fim, os agregados que são produzidos pelo processo de forno rotativo geralmente apresentam granulometria variada e formato arredondado regular. O produto final desse processo também se denomina como “encapado”, em razão de possuir uma camada externa de material vítreo que resulta em uma menor absorção de água (ROSSIGNOLO, 2009).

Na Figura 5, apresenta-se a diferença na estrutura interna e na porosidade da superfície dos agregados produzidos pelos processos de sinterização e forno rotativo, respectivamente.

Figura 5 - Micrografia (MEV) dos agregados produzidos pelos processos de sinterização (a) e forno rotativo (b).



Fonte: ROSSIGNOLO (2009)

4.2.3 Forma e textura superficial

Segundo Rossignolo (2003), a forma e a textura superficial dos agregados leves influenciam diretamente propriedades do concreto, visto que estão relacionadas com a quantidade de água necessária para obter a trabalhabilidade desejada.

De acordo com Zhang e GjØrv (1990), a textura e a forma das partículas dos agregados leves artificiais dependem do processo de fabricação. Os agregados que são produzidos pelo processo de sinterização, apresentam alta rugosidade, formas angulares e superfície porosa. Com isso, esses materiais proporcionam boa aderência a pasta de cimento, justificado pela rugosidade da superfície, contudo, também apresentam altos valores de absorção de água, em função da alta porosidade externa. Sendo assim, esses agregados aumentam a quantidade de água da mistura para obtenção da trabalhabilidade desejada.

Além disso, outra desvantagem da utilização de agregados leves produzidos por sinterização, é a penetração da pasta de cimento nos poros externos, que pode variar de 30 a 100 kg de cimento por m³ de concreto, o que influencia diretamente no aumento do consumo de cimento e a massa específica do concreto (ROSSIGNOLO, 2003).

Em contra partida, os agregados como as argilas expandidas, produzidas em fornos rotativos, geralmente apresentam formas esféricas e uma fina camada externa

com baixa porosidade, o que permite a obtenção de boa trabalhabilidade com baixas relações de água/cimento. No entanto, por possuírem um formato esférico, esse tipo de material apresenta mais facilidade de segregação do que o produzido por sinterização (CEB/FIP, 1977 apud ROSSIGNOLO, 2009).

Segundo Rossignolo (2003), na maioria dos processos de fabricação de agregados leves, o diâmetro das partículas varia entre 1 e 25 mm e os agregados apresentam valores de massa específica inversamente proporcionais ao diâmetro.

4.2.4 Estrutura interna, resistência mecânica e módulo de deformação

A utilização de agregados com baixos valores de massa específica é a razão da redução da massa específica dos concretos leves. Como as matérias-primas dos agregados leves e dos agregados convencionais apresentam valores de massa específica da mesma ordem de grandeza, é necessário a inclusão de uma estrutura porosa no agregado para a redução deste índice físico, alterando assim a estrutura interna do agregado (CEB/FIP, 1977 apud ROSSIGNOLO, 2003).

Segundo Holm e Bremner (1994), a estrutura interna dos agregados leves tem um efeito importante em sua resistência mecânica e módulo de deformação. Para a mesma matéria-prima e processo de fabricação, agregados com estrutura mais porosa são menos resistentes do que os agregados com estrutura pouco porosa. Em relação a resistência mecânica dos agregados leves, o tamanho e a distribuição dos poros também são decisivos. Sendo assim, com um mesmo grau de porosidade, é necessário que tenha uma distribuição uniforme de pequenos poros, ao contrário de poucos poros de grande diâmetro. Em algumas áreas específicas a redução da porosidade influencia a resistência mecânica do agregado. Como exemplo tem-se a argila expandida, em que a camada externa de baixa porosidade aumenta a resistência mecânica desse agregado.

Ainda de acordo com Holm e Bremner (1994), os agregados leves com baixa resistência mecânica tem pouca participação na transmissão das tensões internas no concreto. Com isso, conforme a diferença entre os valores do módulo de deformação do agregado e da pasta de cimento for maior, a diferença entre a resistência à compressão da pasta de cimento e do concreto também será maior. Sendo assim, o aumento do módulo de deformação do agregado leve aumenta, conseqüentemente, os valores da resistência à compressão e do módulo do concreto.

4.2.5 Absorção de água e porosidade

As características de absorção de água e porosidade dos agregados leves influenciam as propriedades dos concretos no estado fresco e o processo de hidratação do cimento. A velocidade e a quantidade de água absorvida pelos agregados leves dependem, segundo Rossignolo (2009), dos seguintes fatores:

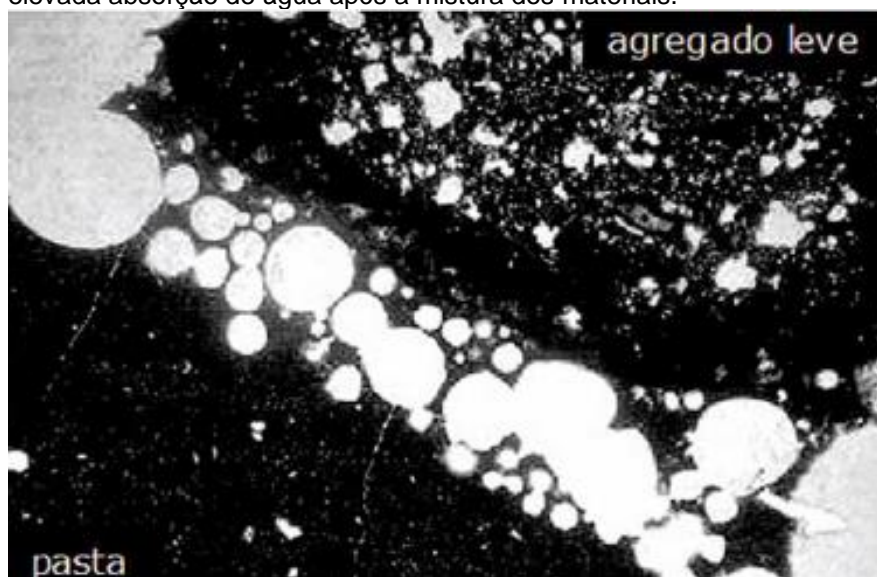
- a) Porosidade total;
- b) Conectividade entre os poros;
- c) Características da superfície do agregado;
- d) Umidade do agregado antes da mistura.

Além disso, outros fatores que podem influenciar a absorção de água dos agregados são os aditivos, a temperatura, e no caso de concreto bombeado, a pressão de bombeamento. A absorção de água dos agregados é proporcional à consistência do concreto e pode aumentar com o uso de superplastificantes. Com isso, a utilização de agentes retardadores pode aumentar, do mesmo modo, a absorção de água dos agregados, visto que aumenta o tempo entre a mistura e o início do endurecimento do concreto. Nos casos em que se utiliza o concreto bombeado, o agregado absorve uma quantidade adicional de água em função das altas pressões utilizadas (CEB/FIP, 1977 apud ROSSIGNOLO, 2009).

Portanto, para agregados leves com altos valores de absorção de água recomenda-se a pré-saturação para evitar prejuízo da trabalhabilidade do concreto no estado fresco e evitar a formação de bolhas de ar ao redor do agregado.

Na figura 6 observa-se a formação de bolhas de ar ao redor do agregado.

Figura 6 - Micrografia ilustrando o acúmulo de bolhas de ar ao redor do agregado leve decorrente da elevada absorção de água após a mistura dos materiais.



Fonte: HELLAND (1995) apud ROSSIGNOLO (2009)

Na figura 7, apresenta-se características de alguns agregados leves comerciais, dentre elas a absorção de água, em massa, dos agregados após 24 horas de imersão.

Figura 7 - Características de alguns agregados leves comerciais.

<i>Nome comercial</i>	<i>País</i>	<i>Matéria-prima</i>	<i>Fabricação</i>	<i>Massa específica (kg/dm³)</i>	<i>Massa unitária (kg/dm³)</i>	<i>Dimensão (mm)</i>	<i>Absorção de água 24h (%)*</i>
Lyttag	Inglaterra e Holanda	Cinzas volantes	Sinterização	1,3 - 2,1	0,6 - 1,1	0,5 - 19	15 - 20
Solite	EUA	Folhelho	Forno rotativo	1,4	0,8	4 - 16	15
Norlite	EUA	Folhelho	Forno rotativo	0,8 - 1,9	0,4 - 1,2	5 - 19	10 - 25
Liapor	Alemanha e R. Tcheca	Argila	Forno rotativo	0,6 - 1,8	0,3 - 0,9	2 - 19	11 - 17
Leca	Áustria e Noruega	Argila	Forno rotativo	0,6 - 1,8	0,3 - 0,9	0,5 - 16	11 - 30
Arlita	Espanha	Argila	Forno rotativo	1,4	0,8	1 - 10	13,0
Cinexpan 0500	Brasil	Argila	Forno rotativo	1,5	0,9	0,5 - 5	7,0
Cinexpan 1506	Brasil	Argila	Forno rotativo	1,1	0,6	6 - 15	7,5

Fonte: ROSSIGNOLO (2003)

4.2.6 Impurezas

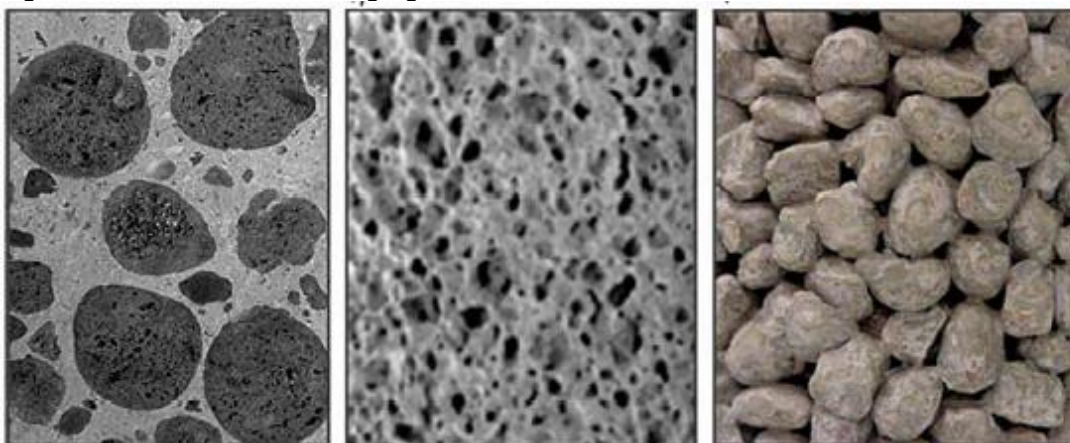
De acordo com Rossignolo (2003), em geral, os agregados leves artificiais, produzidos com argila expandida são quimicamente inertes e livres de impurezas. No entanto, no caso da argila obtida de jazidas onde se alternam camadas de argila com outras de calcário, os grãos poderão conter partículas de cal e tendem a criar eflorescência na presença de água.

4.3 Concreto leve

Concreto leve é a mistura de cimento, agregado leve e água, em proporções definidas. São caracterizados pela redução da massa específica em relação aos concretos convencionais, o que resulta da substituição de parte dos materiais sólidos por ar. Conseqüentemente, o concreto leve possui baixo peso específico. Podem ser classificados em concreto com agregados leves, concreto celular e concreto sem finos (ROSSIGNOLO, 2009). Neste trabalho é abordado o concreto com agregados leves, por ser o que usualmente apresenta aplicação estrutural, razão pela qual também é conhecido como concreto leve estrutural.

Na Figura 8 apresenta-se os três tipos de concreto leve.

Figura 8 - Concreto leve com agregados leves, concreto leve celular e concreto leve sem finos.



Fonte: ROSSIGNOLO (2009)

Neville (2016), apresenta uma nova classificação para os concretos leves, que é conforme sua utilização, sendo subdividida em três categorias. A primeira é o

concreto leve estrutural, que possui massa específica entre 1350 e 1900 kg/m³, sendo utilizado para fins estruturais e possui resistência mínima de 17 MPa. O concreto de baixa massa específica possui essa propriedade com valores entre 300 e 800 kg/m³ e seu uso se restringe a fins não estruturais, sendo seu principal uso para isolamento térmico. Por fim, há o concreto de resistência moderada, com resistência à compressão medida em corpos de prova cilíndricos entre 7 e 17 MPa. Suas propriedades de isolamento térmico são intermediárias em relação aos dois outros concretos.

Na figura 9, apresenta-se os valores de referência de massa específica dos concretos leves estruturais.

Figura 9 - Valores de referência da massa específica dos concretos leves estruturais

Referência	Massa específica aparente (kg/m ³)
NM 35 (1995)	1680 < γ < 1840
ACI 213R-03 (2003)	1120 < γ < 1920
EUROCODE 2 (2007)	900 ≤ γ ≤ 2000
NS 3473 E (1998)	1200 < γ < 2200
CEB-FIP (1977)	γ < 2000
RILEM (1975)	γ < 2000

Fonte: ROSSIGNOLO (2009)

Segundo Rossignolo (2009), o ACI 213R-03 (2003) especifica que o concreto leve estrutural, além de apresentar o valor da massa específica nos limites mostrados na figura 9, também deve apresentar resistência a compressão aos 28 dias acima de 17 MPa.

De acordo com o mesmo autor, a NM35 (1995) apresenta valores mínimos de resistência à compressão em função dos valores de massa específica aparente. Para obter valores intermediários de resistência à compressão e de massa específica aparente pode ser feita interpolação. Ademais, o documento normativo 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/m³ para agregados miúdos e de 880 kg/m³ para agregados graúdos. Na figura 10, observa-se os valores conforme a NM 35 (1995).

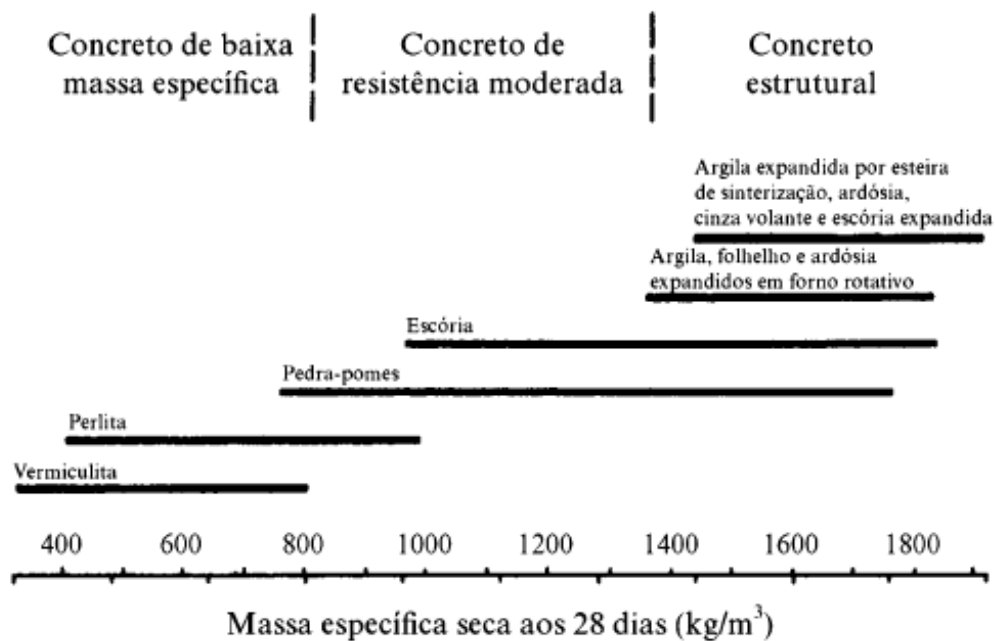
Figura 10 - Valores correspondentes de resistência à compressão e massa específica para concreto leve estrutural.

Resistência à compressão aos 28 dias (MPa) (Valores mínimos)	Massa específica aparente (kg/m ³) (Valores máximos)
28	1840
21	1760
17	1680

Fonte: NM 35 (1995) apud ROSSIGNOLO (2009)

Existem muitos materiais que podem ser utilizados como agregados leves para a fabricação de concreto, o que varia o comportamento do concreto com determinados materiais. Pode-se analisar na Figura 11 as variações típicas da massa específica seca de concreto produzido com os agregados leves mais convencionais e seus resultados.

Figura 11 - Variações da massa específica seca de concretos produzidos com vários agregados.



Fonte: NEVILLE (2016)

4.3.1 Propriedades do concreto leve no estado endurecido

De acordo com Rossignolo (2009), as propriedades do concreto de cimento Portland estão diretamente relacionadas com o desempenho de suas fases

constituintes assim como da ligação entre elas, características essenciais aos materiais heterogêneos. Geralmente os agregados representam mais de 50% do volume dos concretos convencionais, conseqüentemente, sua substituição por agregados leves ocasiona alterações consideráveis nas propriedades do concreto que são definidas pelas características desses novos agregados.

4.3.1.1 Massa específica

A massa específica do concreto, quando produzido com agregados naturais originados de rochas duras é pouco variável. Isso se explica pôr a massa específica da maioria das rochas variar muito pouco (NEVILLE, 2016).

Segundo Rossignolo (2009), a dimensão e a granulometria dos agregados têm mais influência nos valores da massa específica e da resistência à compressão nos concretos leves estruturais, se comparados aos concretos convencionais. Isso ocorre porque os valores da massa específica e da resistência à compressão dos agregados leves são inversamente proporcionais a sua dimensão.

4.3.1.2 Resistência à compressão e tração

O fator de eficiência pode ser utilizado para classificar o concreto leve estrutural. É definido pela Equação (1), dado pela relação entre a resistência à compressão e massa específica, sendo estes os parâmetros mais utilizados para caracterizar concretos leves estruturais, estando diretamente relacionados com o tipo e a granulometria do agregado leve utilizado (ROSSIGNOLO, 2009).

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

f_c = resistência à compressão (MPa);

γ = massa específica aparente (kg/dm³).

É considerado concreto leve de alto desempenho um concreto com fator de eficiência acima de 25 MPa.dm³/kg. Sendo assim, considera-se concreto leve de alto desempenho um concreto com resistência à compressão de 30 MPa, desde que sua

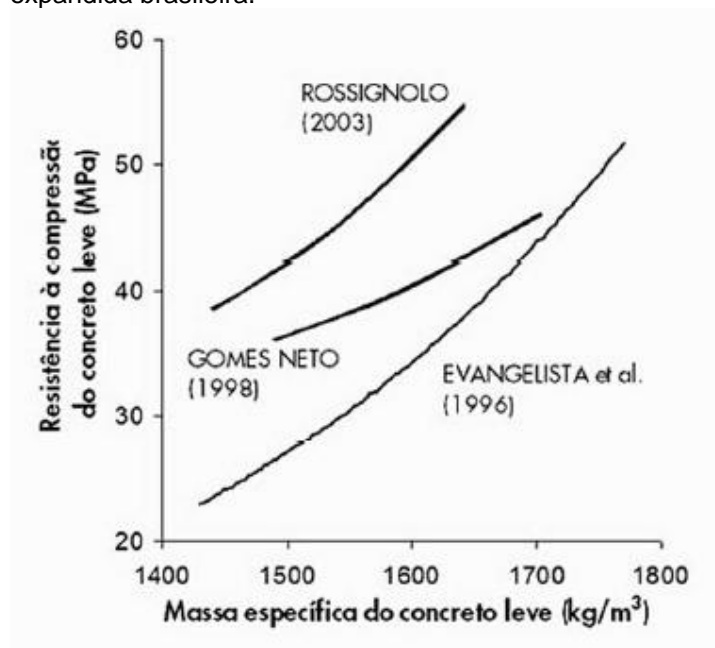
massa específica seja inferior a 1200 kg/m^3 (SPITZNER, 1994 e ARMELIN et al., 1994 apud ROSSIGNOLO 2009).

A sílica ativa melhora o desenvolvimento de resistência do concreto com agregados leves, assim como outros materiais cimentícios podem ser adicionados para obter melhor resistência (NEVILLE, 2016). Em relação aos valores finais de resistência à compressão e estabilização, comparados ao concreto convencional, tem-se:

Quanto à evolução dos valores de resistência à compressão, os concretos leves apresentam estabilização dos valores finais de resistência à compressão mais rapidamente que os concretos convencionais. Após os 28 dias de idade, os concretos leves apresentam baixa elevação dos valores de resistência à compressão, em comparação com os concretos convencionais (EuroLightCon, 1998; Rossignolo; Agnesini, 2002; Rossignolo *et al.*, 2003).

Na Figura 12 pode-se analisar a relação entre a massa específica do concreto leve com argila expandida e a resistência à compressão.

Figura 12 - Relação entre resistência à compressão e massa específica do concreto leve com argila expandida brasileira.



Fonte: ROSSIGNOLO (2009)

Para a mesma resistência, comparando-se o concreto convencional e concreto leve, o consumo de cimento do concreto com agregados leves é maior do que em um

concreto normal. Para resistências elevadas, a diferença pode superar 50%. Além disso, em relação aos valores da resistência à tração dos elementos com agregados leves, Neville (2016) afirma:

Os valores da resistência à tração dos concretos leves, tanto na compressão diametral como na flexão, são inferiores aos observados nos concretos com massa específica normal, para o mesmo nível de resistência à compressão. Esse fato deve ser atribuído ao elevado volume de vazios dos agregados leves, que pode chegar a 50% do volume total no caso das argilas expandidas (NEVILLE, 2016).

4.3.1.3 Módulo de deformação e curva tensão-deformação

Os agregados leves apresentam valores do módulo de deformação relativamente baixos e, conseqüentemente, os concretos leves apresentam valores de módulo de deformação inferiores aos observados para os concretos convencionais. Conforme Rossignolo (2009), normalmente, para valores de resistência à compressão variando entre 20 MPa e 50 MPa, o valor do módulo de deformação do concreto leve varia entre 50% e 80% do valor do módulo de deformação do concreto com massa específica normal.

Sendo assim, como na maioria das propriedades dos concretos leves, o módulo de deformação é diretamente relacionado com o tipo e com a quantidade de agregado leve que será utilizado na mistura. O melhor comportamento do concreto no regime elástico depende da proximidade entre os valores do módulo de deformação do agregado e da pasta de cimento (ROSSIGNOLO, 2009).

4.3.1.4 Propriedades térmicas

Em relação aos agregados convencionais, há uma redução da absorção e transferência de calor, causadas pelo ar aprisionado na estrutura celular dos agregados leves. Conseqüentemente, quando utilizado concreto leve na vedação das fachadas e na cobertura das edificações, ocorre a redução da absorção e da transferência para o ambiente interno do calor proveniente da radiação solar (EUROLIGHTCON, 1998; HOLM; BREMNER, 2000).

4.3.1.5 Durabilidade

Para avaliar a durabilidade do concreto, deve-se analisar se a porosidade é constituída por poros conectados ou não. Sendo assim, é necessário a distinção entre sistemas fechados ou abertos quando se pretende avaliar a relação entre a porosidade e a permeabilidade (ROSSIGNOLO, 2009).

Segundo Neville (2016), não há efeitos adversos graves que afetem a durabilidade com a adição de agregados leves no concreto, exceto quando o agregado saturado estiver sujeito a ação de gelo e degelo.

4.3.1.6 Permeabilidade

De acordo com Zhang e GjØrv (1991), a durabilidade do concreto depende da permeabilidade do material. O autor cita que mesmo que os agregados leves sejam porosos, a permeabilidade de água do concreto leve comparada ao concreto convencional é igual ou até mesmo inferior.

Segundo Rossignolo (2009), isso se dá pelos seguintes fatores:

- Redução nos valores da relação água/aglomerante dos concretos leves em relação aos concretos convencionais, para se obter os mesmos valores de resistência à compressão;
- Diminuição das fissuras internas do concreto pela redução da diferença entre os valores dos módulos de deformação do agregado e da pasta de cimento;
- Melhoria da qualidade da zona de transição pasta-agregado.

Sendo assim, Rossignolo (2009) afirma que a melhora da qualidade da zona de transição pasta-agregado contribui na redução da permeabilidade dos concretos leves se comparado aos concretos convencionais. Usualmente, quando solicitado mecanicamente, a origem das primeiras microfissuras do concreto ocorre na zona de transição pasta-agregado. Com isso, essa região apresenta maior permeabilidade do que a pasta, assim como altos teores de hidróxido de sódio e de etringita.

Segundo Bremner (1998), a distribuição das tensões internas dos concretos leves reduz a formação das fissuras microscópicas, o que resulta em uma curva tensão-deformação linear de, pelo menos, 80% do carregamento último. Isso significa que a permeabilidade do concreto leve começa a aumentar com cerca de 80% do

carregamento último, sendo superior se comparado ao concreto convencional que apresenta o aumento com 60%.

4.3.2 Dosagem de concretos com agregados leves

A relação entre a resistência à compressão e a relação água/cimento se aplica aos concretos com agregados leves da mesma forma que no concreto normal, sendo possível adotar o procedimento usual de dosagem quando esses agregados são utilizados. Contudo, se torna muito difícil determinar a quantidade de água total da mistura que foi absorvida pelo agregado e a quantidade de água que ocupa o interior do concreto, isto é, quanto se torna parte da pasta de cimento. Essa dificuldade é explicada, além do alto valor da absorção de água dos agregados leves, o fato da absorção apresentar taxa bastante variável, e, para alguns agregados pode continuar por vários dias (NEVILLE, 2016).

Com isso, quatro fatores adicionais devem ser considerados:

- a) A necessidade de projetar um concreto com massa específica particular;
- b) A absorção de água dos agregados leves;
- c) A variação da massa específica do agregado leve em função de sua dimensão;
- d) A influência das características dos agregados leves nas propriedades dos concretos.

No documento ACI 211.2-98 apresenta-se dois métodos de dosagem para concretos leves. O primeiro, chamado de “método da massa”, é indicado para concretos com agregados miúdos com massa específica normal e agregados graúdos leves. Além disso, o segundo método, chamado de “método volumétrico”, é recomendado para concretos com agregados leves graúdos e miúdos.

Os documentos normativos internacionais, conforme Rossignolo (2009) cita, indicam a utilização de consumos de cimento acima de 300 kg/m³ para assegurar os níveis mínimos de trabalhabilidade, de proteção à armadura e de ancoragem da armadura ao concreto com agregados leves.

A definição da relação água/cimento efetiva é de extrema importância para a dosagem dos concretos leves, pois, como dito anteriormente, há a absorção de água dos agregados. No caso do concreto convencional, a quantidade de água disponível para hidratação do cimento é definida no momento da mistura dos materiais. Para os agregados leves, deve ser considerada a água que será absorvida pelos agregados

leves após o preparo do concreto. Para evitar esse fenômeno, os agregados devem ser pré-saturados. Contudo, esse processo pode aumentar relativamente os custos de produção do concreto. O procedimento mais comum é o acréscimo da quantidade de água que será absorvida pelo agregado na mistura, com o intuito de manter a relação água/cimento constante (ROSSIGNOLO e AGNESINI, 2000).

4.3.3 Produção do concreto leve

Com exceção do agregado leve, os materiais e os métodos de produção do concreto leve são similares aos utilizados no concreto convencional.

4.3.3.1 Mistura e teor de umidade dos agregados

Rossignolo (2003) cita que na mistura dos materiais em equipamentos com eixo inclinado, há a segregação dos agregados leves graúdos, os quais tendem a sair do misturador. Entretanto, após um tempo de mistura o problema desaparece. De acordo com o autor, no misturador vertical esse problema não ocorre.

No momento da mistura dos materiais se deve tomar cuidados para evitar que a absorção de água dos agregados leves prejudique propriedades dos concretos, principalmente no estado fresco (HOLM e BREMNER, 2000 apud ROSSIGNOLO, 2003).

Em casos que o concreto é produzido com agregado leve de absorção de água inferior à 10% em massa, após 24 horas de imersão, na maioria dos casos, é possível empregar o mesmo método de mistura para concretos convencionais, não sendo necessário fazer a saturação prévia do agregado. Alguns tipos de agregados leves apresentam alta absorção de água nos primeiros minutos, mesmo com valores de absorção de água abaixo de 10% após 24 horas de imersão, entretanto em seguida há estabilização. Nesses casos, os materiais sólidos devem ser adicionados primeiro e em sequência a água e os agregados leves. (HOLM e BREMNER, 2000 apud ROSSIGNOLO, 2009). Caso o agregado leve apresente absorção de água acima de 10% em massa, após 24 horas de imersão, é recomendado a pré-saturação do material para a trabalhabilidade do concreto não ser comprometida. (HOLM e BREMNER, 2000; ZHANG e GJØRV, 1991; apud ROSSIGNOLO, 2009).

Segundo Rossignolo e Agnesini (2000), para concretos com argila expandida brasileira que apresentem valores de absorção de água abaixo de 10% em massa após 24 horas de imersão, obteve-se melhores resultados de manutenção da trabalhabilidade após a mistura, quando adicionado os materiais sólidos juntamente com a água no misturador e em seguida de uma pré-mistura, adicionado os agregados leves.

4.3.3.2 Trabalhabilidade

Moravia (2007) define trabalhabilidade como a facilidade do manuseio do concreto durante a mistura, transporte, lançamento nas formas e adensamento sem segregação. A trabalhabilidade do concreto de agregado leve necessita de mais atenção pela textura porosa e baixa densidade do agregado.

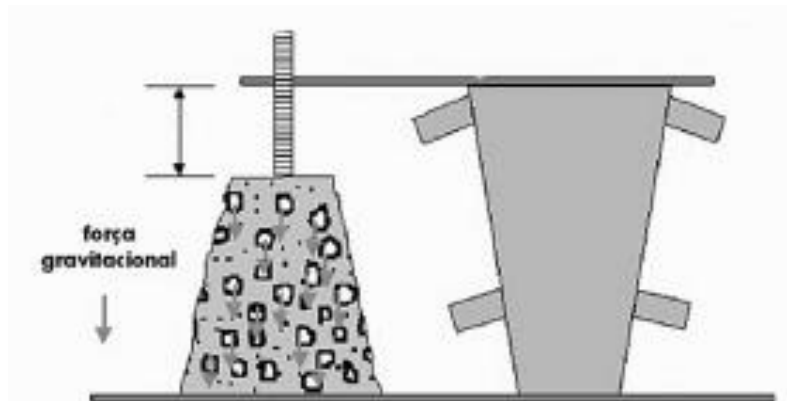
Segundo Mehta e Monteiro (1994), a vibração excessiva, altos valores de índice de consistência e a baixa coesão, são fatores responsáveis pelo surgimento da segregação e exsudação nos concretos leves, o que afeta diretamente na manipulação do material, e pode ocasionar alteração de desempenho de algumas propriedades no estado endurecido. Todavia, podem ser evitados ou minimizados se tomados alguns cuidados no processo de dosagem, como granulometria adequada dos agregados, substituição total ou parcial do agregado miúdo por areia natural e utilização de adições minerais.

Usualmente, a faixa de variação dos valores de abatimento dos concretos leves é menor que a utilizada para os concretos convencionais, com influência da absorção de água dos agregados na trabalhabilidade do concreto após a mistura.

Sendo assim, é necessário considerar o valor da massa específica do agregado leve no processo de determinação dos valores de abatimento para o concreto. Quando feito a determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone conforme a ABNT NBR 16889:2020, os concretos leves apresentam valores de abatimento inferiores aos obtidos para concretos convencionais, devido à menor deformação do concreto leve pela ação da gravidade. Dessa forma, por exemplo, concretos leves com abatimento de 80 mm podem apresentar trabalhabilidade similar à dos concretos convencionais com abatimento de 100 mm (ROSSIGNOLO, 2009).

Na figura 13, apresenta-se a força gravitacional no concreto durante a análise do abatimento do tronco de cone.

Figura 13 - Ilustração da força gravitacional no concreto durante a análise do abatimento do tronco de cone.



Fonte: Rossignolo (2009)

Além disso, de acordo com Rossignolo e Agnesini (2000), o espalhamento do tronco de cone conforme ABNT NBR 15823-2:2017, também é uma forma de análise adequada para avaliar a trabalhabilidade dos concretos leves. Por esse método de inserir energia para avaliar a deformação do concreto, com o movimento repetido da plataforma, os valores obtidos para os concretos leves se assemelham mais aos obtidos para os concretos convencionais.

4.3.3.3 Transporte, lançamento e adensamento

Segundo Rossignolo (2009), para o transporte dos concretos leves, é necessário considerar sua tendência a segregação, fenômeno denominado “flutuação”, por apresentarem baixos valores de massa específica nos agregados. Isso pode ser evitado ou reduzido, com a dosagem de concretos com coesão e consistência adequada, o controle da relação água/cimento, do teor dos agregados miúdos e com a utilização de adições minerais, como a sílica ativa.

Para bombear o concreto leve, a umidade e a granulometria dos agregados leves são muito importantes. Com isso, pré-umedecer o agregado leve é importante para prevenir a perda brusca de trabalhabilidade no estado fresco, que pode ocasionar entupimento dos dutos durante o lançamento. É recomendado que o agregado miúdo tenha altos teores de partículas com diâmetro inferior a 0,3 mm

(EUROLIGHTCON, 2000; apud ROSSIGNOLO, 2003). Para Neville (2016), a saturação pode ser feita através da molhagem prévia dos agregados graúdos e miúdos por um período de dois a três dias ou por meio de uma rápida saturação a vácuo. Para o autor, mesmo que a água absorvida não faça parte da água livre da mistura, ela afeta as proporções em massa do traço.

Em seguida, para o adensamento do concreto leve, é possível adotar as técnicas usuais, porém esses concretos exigem uma energia maior de vibração do que os concretos tradicionais. No caso específico dos vibradores de imersão, o raio de ação destes é adotado como metade dos utilizados nos concretos tradicionais. Como a energia de vibração que é utilizada nos concretos leves deve ser maior do que a energia utilizada para os concretos convencionais, os concretos leves devem apresentar coesão adequada para evitar segregação (CEB/FIP, 1997; HOLM e BREMNER, 2000 apud ROSSIGNOLO, 2003).

Sendo assim, é recomendado a utilização de vibradores com baixa frequência de vibração para auxiliar no controle da segregação dos agregados leves. O correto adensamento dos concretos leves também é importante para evitar a formação de vazios ao redor do agregado.

4.3.3.4 Cura do concreto com agregados leve

De acordo com Rossignolo e Agnesini (2001), os mesmos procedimentos de cura dos concretos convencionais podem ser adotados nos concretos com agregados leves, mas é necessário cuidados especiais com o controle da temperatura do concreto. O calor liberado durante o processo de hidratação do cimento ocasiona uma elevação maior na temperatura dos concretos leves, em função da baixa condutividade térmica dos agregados leves. A fim de evitar a formação de fissuras térmicas, em ambientes com baixas temperaturas, é recomendado adiar a retirada das formas ou cobrir o concreto com mantas isolantes. Quando utilizado o processo de cura térmica, deve ser adotado um período maior de cura ou uma velocidade de elevação de temperatura menor (EuroLightCon, 1998).

Todavia, Rossignolo (2009) afirma que o agregado leve beneficia o processo de hidratação do cimento por reter uma parcela de água durante o processo de mistura dos materiais. Com isso, a água retida é transferida para a pasta de cimento ao longo do período de hidratação, garantindo a presença de parte da água

necessária para as reações químicas desse processo, com pouca influência das condições ambientais externas.

4.3.4 Zona de transição nos concretos com agregados leves

Segundo Monteiro (1993), antes de trabalhos e estudos com a finalidade de controlar a microestrutura da matriz de cimento para melhorar propriedades do concreto, são necessários estudos que abordem a melhoria da microestrutura da zona de transição que existe entre o agregado e a matriz de cimento, visto que propriedades importantes do concreto como durabilidade e resistência mecânica são influenciadas pelas características dessa zona de transição.

Com isso, um fator importante que influencia a estrutura e a espessura da zona de transição agregado-matriz é o tipo de agregado. Estudos recentes sobre a microestrutura de concretos com agregados leves demonstraram que a interação entre este tipo de agregado e a matriz de cimento é diferente da ocorrida nos concretos com agregados tradicionais (WASSERMAN e BENTUR, 1996, 1997, 1998; CHEIN e SCHNEIDER, 1998; VIEIRA, 2000 apud ROSSIGNOLO, 2003).

Sendo assim, natureza da interação entre o agregado leve e a pasta de cimento depende essencialmente do teor de umidade e da porosidade aberta da região externa do agregado. Quando os agregados leves forem previamente saturados ou apresentarem uma camada externa densa, sem porosidade permeável, a natureza da zona de transição será próxima a observada nos concretos com agregados convencionais.

A resistência da pasta de cimento depende das forças de atração de Van der Waals, isto significa que a resistência será maior quanto mais compacta for a pasta e quanto menos cristalinos forem os produtos de hidratação. Desse modo, a zona de transição apresenta resistência mais baixa do que a da matriz de cimento, assim sendo a região do concreto mais vulnerável à microfissuração, e, conseqüentemente, influencia negativamente algumas propriedades deste material, como a permeabilidade e a resistência mecânica (ROSSIGNOLO, 2003).

Com isso, estudos realizados por Khokhrin (1973) sobre a interface entre o agregado leve e a pasta de cimento, utilizando técnicas de análise da resistência à compressão em regiões particulares do concreto leve, ocorreu que a zona de transição pasta-agregado apresentou resistência à compressão entre 9 MPa e 15

MPa, em contra partida, a pasta de cimento apresentou resistência à compressão entre 6 MPa e 8 MPa.

No entanto, de acordo com Rossignolo (2009), para agregados leves que apresentam porosidade aberta na face externa e com baixo teor de umidade, ocorre a redução da espessura da zona de transição, devido a diminuição da relação água/cimento da pasta nessa região, ocasionada pela absorção de água do agregado. Segundo o autor, a diminuição da espessura da zona de transição pasta-agregado pode ser atribuída, também, à redução do efeito parede nos agregados leves, usualmente mais rugosos e porosos que os agregados convencionais.

A interface entre o agregado leve e a pasta de cimento apresenta baixa porosidade e é caracterizada pela alta ancoragem mecânica entre o agregado leve e a pasta de cimento, que é justificada pela rugosidade da superfície do agregado (ZHANG e GJØRV, 1990 e WASSERMAN e BENTUR, 1996; apud ROSSIGNOLO, 2009).

4.3.5 Aplicação dos concretos leves

Segundo Rossignolo (2009), o fim da validade da patente obtida por Hayde para a produção de agregados leves, em 1946, e a reconstrução do pós-guerra ajudaram a disseminar a tecnologia dos concretos leves pelo mundo em aplicações com o intuito de reduzir a massa específica do concreto, tais como:

- Edificações de múltiplos pavimentos: em locais com solo com baixa capacidade de suporte e com a finalidade de reduzir as solicitações estruturais ocasionadas pelo peso próprio;
- Construções pré-fabricadas: com a finalidade de beneficiar o transporte e a montagem das peças;
- Estruturas especiais, como pontes e coberturas de grandes vãos e estruturas flutuantes.

É importante ressaltar que essas estruturas estão expostas aos mais variados ambientes, alguns deles extremamente agressivos, o que mostra a grande versatilidade e durabilidade deste material.

Nos estudos realizados por CEB/FIB (1977), Holm e Bremner (2000), as estruturas moldadas in loco com concreto leve mostraram-se, em média, de 5% a

10% mais baratas do que as executadas com concreto convencional, à medida que em pontes com grande comprimento, também moldadas in loco, a redução de custos atingiu até 15% do valor da obra. Com a utilização da tecnologia da pré-fabricação, foi possível observar que os valores da redução de custos apresentados podem dobrar, devido às seguintes particularidades:

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

4.3.5.1 Estruturas flutuantes

Os últimos 40 anos marcaram um expressivo aumento da aplicação dos concretos leves estruturais em ambientes marítimos, como tanques e plataformas petrolíferas. Entre esses tipos de construções, as estruturas marítimas flutuantes se destacaram, sendo construídas em doca seca e transportadas para o local de implantação posteriormente, onde podem permanecer flutuando ou apoiadas no leito marítimo. Como exemplo tem-se a plataforma South Arne, construída em 1999 na Dinamarca. O concreto leve apresenta melhoria das características de flutuação desse tipo de estrutura durante o transporte e a utilização, se comparado aos concretos convencionais. Na figura 14 apresenta-se a plataforma South Arne.

Figura 14 - Plataforma petrolífera South Arne.



Fonte: ROSSIGNOLO (2003)

Na tabela 1, observa-se exemplos de construções marítimas produzidas em concreto leve.

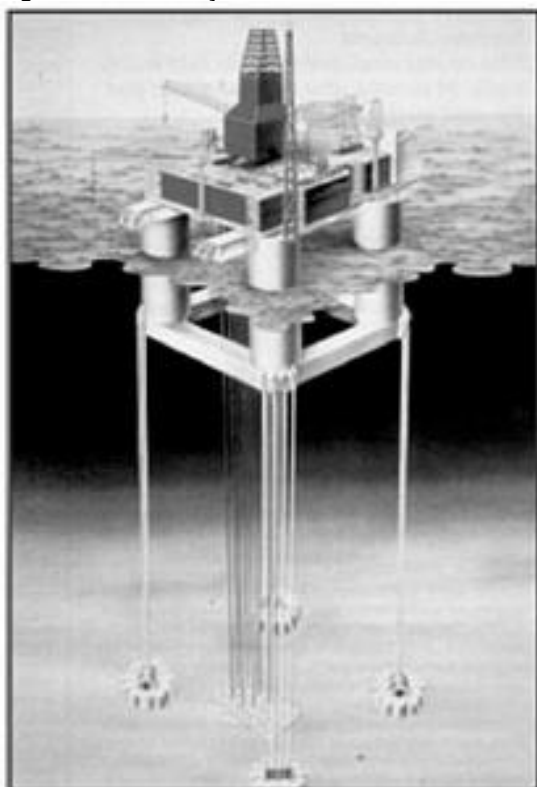
Tabela 1 - Exemplos de construções marítimas produzidas em concreto leve.

Função/Denominação	Local	Ano	Massa específica (kg/m³)	F_{ck} (MPa)
Doca flutuante	Itália	1972	1870	54
Plataforma petrolífera – CIDS	EUA	1984	1840	45
Experimental	Noruega	1984	1915	70
Doca Flutuante - Snorre	Noruega	1991	1950	65
Plataf. Petrolífera – Heidrum TLP	Noruega	1995	1950	70
Plataf. Petrolífera – Troll GBS	Noruega	1995	1950	65
Plataf. Petrolífera – Troll West	Noruega	1995	2250	75
Tanque – BP	Escócia	1996	1875	50
Plataf. Petrolífera – South Arne	Dinamarca	1999	1850	62
Plataf. Petrolífera - Hibernia	Canadá	2003	2000	79
Doca flutuante - Bremerton	EUA	2009	-	-

Fonte: ROSSIGNOLO (2009)

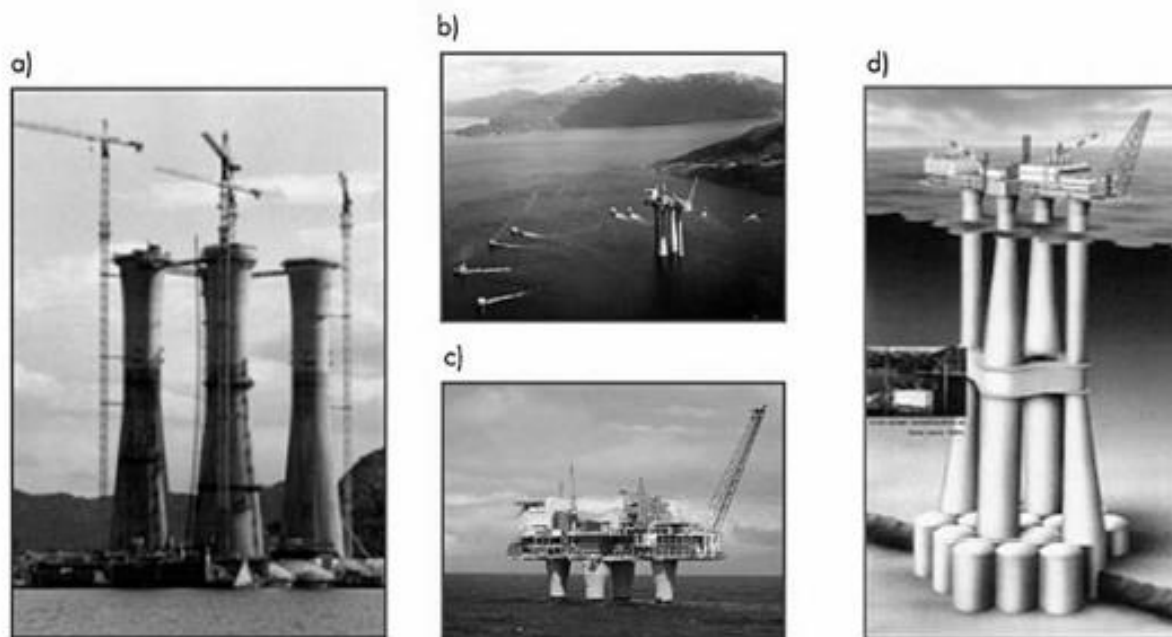
Com isso, nas Figuras 15 e 16 são mostradas algumas das construções marítimas citadas acima.

Figura 15 - Ilustração da Plataforma Petrolífera Heidrun TLP em operação (Noruega).



Fonte: FIB (2000) apud ROSSIGNOLO (2009)

Figura 16 - Plataforma petrolífera Troll GBS (Noruega) com 472 metros de altura: a) Construção da plataforma em doca seca; b) Transporte da plataforma; c) Plataforma apoiada no leito marítimo e em funcionamento; d) Ilustração da plataforma em funcionamento.



Fonte: ROSSIGNOLO (2009)

4.3.5.2 Pontes

Nos últimos anos, a construção integral ou parcial e a recuperação de pontes com a utilização de concretos leves indicam importantes aplicações deste tipo de concreto. De acordo com Rossignolo (2009), normalmente o peso da estrutura das pontes de grandes vãos em concreto armado representam até 70% das solicitações estruturais. Nesses casos, a utilização do concreto leve para execução do tabuleiro possibilita a redução das dimensões dos elementos estruturais e viabiliza o aumento dos vãos entre pilares. Segundo Daly (2000), a aplicação do concreto leve estrutural na execução de pontes promove uma redução do custo total da obra entre 2% e 7%.

Na tabela 2, observa-se exemplos de pontes produzidas com concreto leve.

Tabela 2 - Pontes produzidas com concreto leve.

Denominação	Local	Ano	Maior vão (m)	Massa específica (kg/m ³)	Fck (MPa)
Friarton	Escócia	1978	174	1750	38
Koningspleij	Holanda	1986	133	2020	37
Bergsfysund	Noruega	1992	185	1900	55
New Eidsvall Sund	Noruega	1992	40	1880	67
Stovset	Noruega	1993	220	1900	58
Nordhorland	Noruega	1994	172	1900	55
Grenland	Noruega	1996	305	1890	60
Stolma	Noruega	1999	301	1940	70
Rugsund	Noruega	2000	190	-	60
Virginia Dare	EUA	2004	-	1840	30
Benicia-Martinez	EUA	2007	200	-	45

Fonte: ROSSIGNOLO (2009)

Deste modo, nas figuras 17, 18 e 19 apresenta-se algumas das pontes produzidas com concreto leve citadas na tabela anterior.

Figura 17 - Ponte Stovset, na Noruega.



Fonte: FIB (2000) apud ROSSIGNOLO (2009)

Figura 18 - Ponte Benicia-Martinez, nos Estados Unidos.



Fonte: ASPIRE (2007) apud ROSSIGNOLO (2009)

Figura 19 - Ponte flutuante Nordhordland, na Noruega: a) Transporte de um “caixão” flutuante, b) trecho do tabuleiro apoiado nos “caixões”; c) Ponte concluída.



Fonte: JAKOBSEN (2000) apud ROSSIGNOLO (2009)

4.3.5.3 Coberturas

O peso próprio da estrutura pode representar grande parcela das solicitações estruturais, assim como em pontes e coberturas de grandes vãos executadas em concreto armado. Nesses casos, a utilização do concreto leve para execução da estrutura da cobertura também proporciona a redução das dimensões dos elementos estruturais e viabiliza o aumento dos vãos entre pilares.

Na tabela 3, observa-se exemplos de coberturas produzidas em concreto leve.

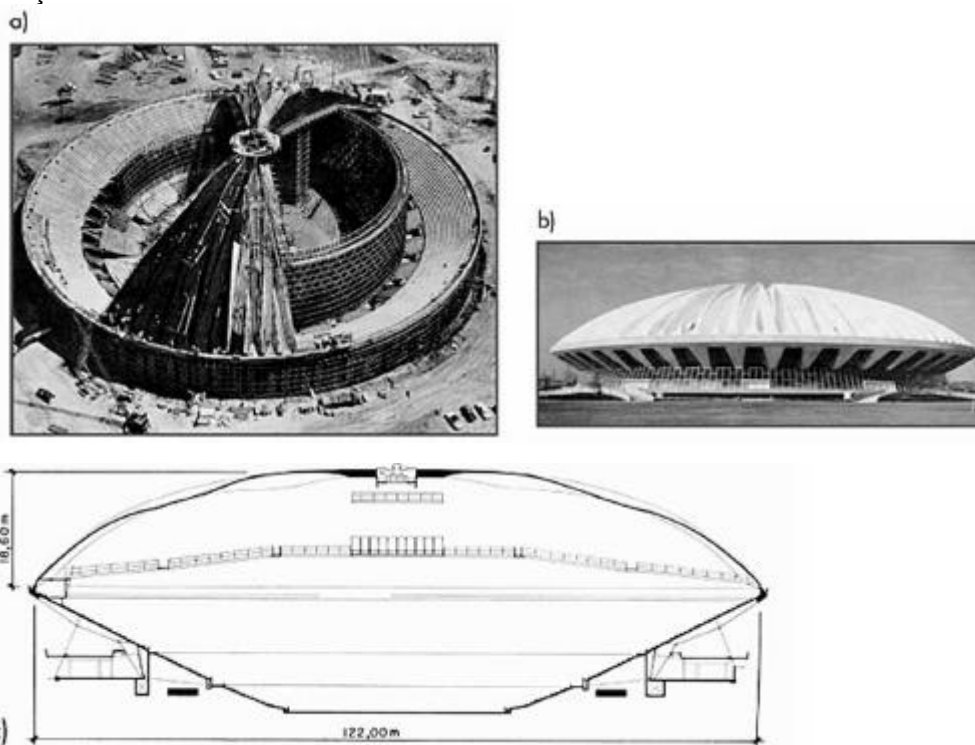
Tabela 3 - Estruturas de cobertura executadas em concreto leve.

Denominação	Ano	Maior vão (m)	Massa específica (kg/m ³)	F _{ck} (MPa)
Terminal da TWA – Aeroporto John F. Kennedy (Nova York, EUA)	1960	-	1850	35
Aeroporto Internacional de Dulles (Washington, EUA)	1962	51	1760	28
Assembly Hall (Illinois, EUA)	1962	122	1680	28
Oakland Coliseum (Oakland, EUA)	1967	128	1760	28 – 35
Hangar (Frankfurt, Alemanha)	1970	130	1650	37
Pavilhão de Portugal – Expo – 98 (Lisboa, Portugal)	1998	65	1850	25

Fonte: ROSSIGNOLO (2009)

Assim, as figuras 20, 21 e 22 ilustram algumas das edificações citadas acima.

Figura 20 - Assembly Hall: a) Vista aérea da construção da cobertura; b) Ginásio concluído; c) Ilustração das dimensões internas.



Fonte: CEMBUREAU (1974) apud ROSSIGNOLO (2009)

Figura 21 - Terminal do TWA no Aeroporto John F. Kennedy (Nova York, Estados Unidos): a) Vista lateral do terminal; b) Vista aérea da cobertura concluída.

a)



b)



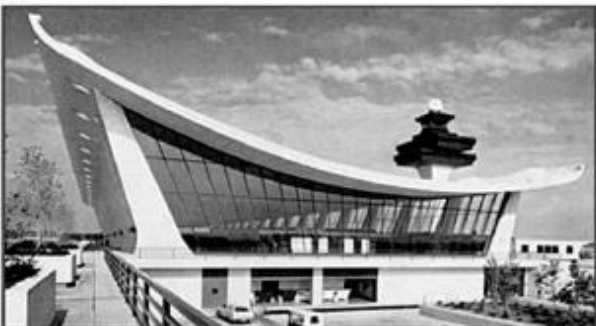
Fonte: CEMBUREAU (1974) apud ROSSIGNOLO (2009)

Figura 22 - Aeroporto Internacional de Dulles (Washington, Estados Unidos): a) Cobertura em fase de construção; b) Cobertura concluída.

a)



b)



Fonte: CEMBUREAU (1974) apud ROSSIGNOLO (2009)

4.3.5.4 Edificações

Na construção de edifícios de múltiplos andares, segundo Rossignolo (2009), além de reduzir as cargas da fundação, os concretos leves apresentam melhoria de desempenho térmico e de resistência ao fogo se comparado ao concreto convencional. O autor cita como exemplos recentes de edificações que utilizaram o concreto leve na estrutura o Library Tower, construído em 1990 com 310 m de altura, o edifício Nationsbank, construído em 1994 com 250 m de altura e que utilizou concreto leve bombeado em toda a estrutura e o Museu Guggenheim de Bilbao, construído em 1997 onde foram utilizados mais de 4400 m³ de concreto leve na execução das lajes.

Na figura 23 apresenta-se os edifícios construídos com concreto leve citados no parágrafo anterior.

Figura 23 - Edifícios construídos com concreto leve: a) Library Tower, b) Edifício Nationsbank, e c) Museu Guggenheim-Bilbao.



Fonte: ROSSIGNOLO (2003)

Nas tabelas 4 e 5, observa-se a aplicação de concretos leves em edificações.

Tabela 4 - Aplicações do concreto leve estrutural em edificações a partir de 1960.

Denominação/ Local	Ano	Altura (m)	Massa esp. (kg/m ³)	Consumo cimento (Kg/m ³)	F _{ck} (MPa)	Volume CLE (m ³)	Local de aplicação
Marina City Towers <i>Chicago – EUA</i>	1962	180	1680	310	25	19000	Lajes
Raymond-Hillard <i>Chicago – EUA</i>	1966	60	1680	280-400	25-39	23000	Pilares, lajes e paredes portantes
Australia Square <i>Sidney – Austrália</i>	1967	184	1750-1870	340-415	24-35	31000	Estrutura (moldada in loco e pré-fabricada)
Seguradora GULF <i>Jacksonville – EUA</i>	1967	124	1920	475	35	-	Pilares e vigas externas pré- fabricadas
Lake Point <i>Chicago - EUA</i>	1968	195	1730	330	22,5	26000	Lajes
Hotel Hilton <i>Texas - EUA</i>	1968	90	1660	420	28-35	9500	Módulos pré-fabricados
KOBE <i>Kofuku - Japão</i>	1969	109	1750	318	30	7000	-
Shell Plaza 1 <i>Houston – EUA</i>	1969	218	1840	365-415	32-42	68800	Estrutura (moldada in loco)
Adm. U. Elétrica <i>Hamburgo – Alemanha</i>	1969	-	1520	350	32	-	Estrutura suspensa
Standard Bank <i>Johanesburgo – África do Sul</i>	1970	139	1950	310	31	6000	Lajes pré-fabricadas

Fonte: ROSSIGNOLO (2009)

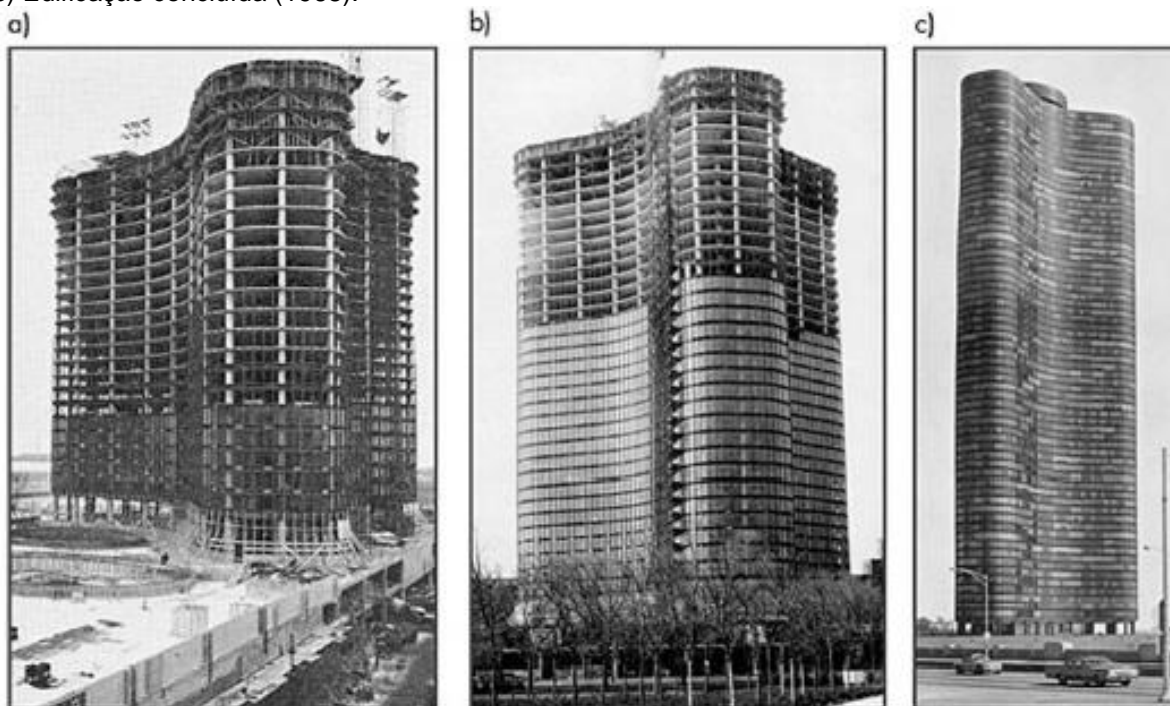
Tabela 5 - Continuação das aplicações do concreto leve estrutural em edificações a partir de 1960.

Denominação/ Local	Ano	Altura (m)	Massa esp. (kg/m³)	Consumo cimento (Kg/m³)	Fck (MPa)	Volume CLE (m³)	Local de aplicação
BMW <i>Munique – Suíça</i>	1972	100	1660	350	41	3400	Lajes pré-fabricadas
Picasso Tower <i>Madri – Espanha</i>	1989	157	1855	320	30	10000	Lajes (bombeado)
Library Tower <i>Los Angeles - EUA</i>	1990	310	-	-	28	-	Lajes
Tokyo M. G. <i>Tóquio – Japão</i>	1991	243	1850	-	21	15200	Lajes (bombeado)
Nationsbank <i>Charlotte – EUA</i>	1994	252	1890	385	47	23000	Lajes (bombeado)
Museu Guggenheim <i>Bilbao – Espanha</i>	1997	-	1600	-	25	4400	Lajes (bombeado)
First National Bank <i>Omaha – EUA</i>	2002	193	1850	-	50	8500	Lajes (bombeado)
Chateau on the Lake <i>Branson – EUA</i>	2002	-	1760	-	31-44	-	Estrutura pré-fabricada
Market Square Plaza <i>Harrisburg – EUA</i>	2005	60	-	-	-	-	Lajes (bombeado)
Proenix Crime Lab <i>Phoenix – EUA</i>	2007	-	1890	-	48	-	Lajes (autodensável)

Fonte: ROSSIGNOLO (2009)

Com isso, nas figuras 24, 25, 26 e 27 apresenta-se algumas das edificações citadas anteriormente nas tabelas 4 e 5.

Figura 24 - Edifício Lake Point (Chicago, Estados Unidos) com 75 pavimentos: a) e b) Execução dos pavimentos tipos – o concreto leve foi aplicado nas lajes (moldadas in loco) com 20 cm de espessura; c) Edificação concluída (1968).



Fonte: CEMBUREAU (1974) apud ROSSIGNOLO (2009)

Figura 25 - Edifícios Raymond-Hillard (Chicago – Estados Unidos). Os quatro edifícios utilizaram concreto leve nas paredes estruturais, nos pilares e nas lajes.



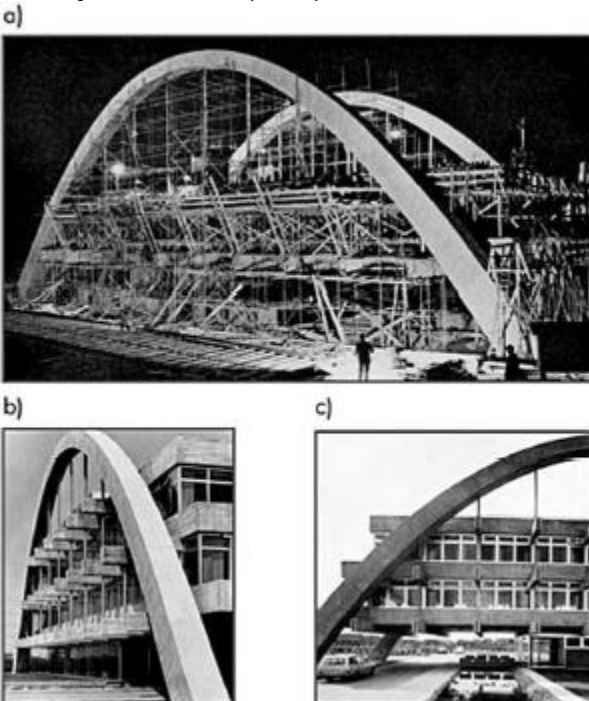
Fonte: CEMBUREAU (1974) apud ROSSIGNOLO (2009)

Figura 26 - Edifício Shell Plaza 1 (Houston, Estados Unidos): a) Execução integral da estrutura moldada in loco utilizando concreto leve; b) Edificação concluída (1969).



Fonte: CEMBUREAU (1974) apud ROSSIGNOLO (2009)

Figura 27 - Edifício da Administração da Usina Elétrica do Nordeste da Alemanha (Hamburgo, Alemanha). Executado com estrutura suspensa, em concreto leve, sobre tirantes engastados em arco executado em concreto convencional. a) Execução dos arcos e da estrutura suspensa; b) e c) Edificação concluída (1969).



Fonte: CEMBUREAU (1974) apud ROSSIGNOLO (2009)

4.3.6 Aplicações no Brasil

No Brasil a utilização dos concretos com agregados leves ainda não é difundida, tendo em vista o seu potencial de utilização, estando concentrada no Estado de São Paulo e em estados vizinhos, considerando que a localização da fábrica de argila expandida Cinexpan é em Várzea Paulista, no estado de São Paulo. De acordo com Rossignolo (2009), desde 1968, quando se iniciou a produção de argila expandida no Brasil, a maioria das aplicações dos concretos leves estruturais no setor da construção civil nacional ocorre em elementos estruturais pré-fabricados e nas estruturas de edificações de múltiplos pavimentos moldados in loco, em especial nas lajes.

As primeiras aplicações do concreto com argila expandida ocorreram em elementos pré-fabricados estruturais executados pela Cinasa, no Estado de São Paulo. Nas figuras 28, 29, 30 e 31 observa-se algumas das edificações executadas entre 1968 e 1973, utilizando concretos com valores de massa específica e de resistência à compressão (aos 28 dias) variando, respectivamente, entre 1800 kg/m³ e 2000 kg/m³ e entre 16 MPa e 26 MPa.

Figura 28 - Fábrica de Rhodia em Santo André, São Paulo.



Fonte: ROSSIGNOLO (2009)

Figura 29 - Fabrica da Mangels em São Bernardo, São Paulo.

a)

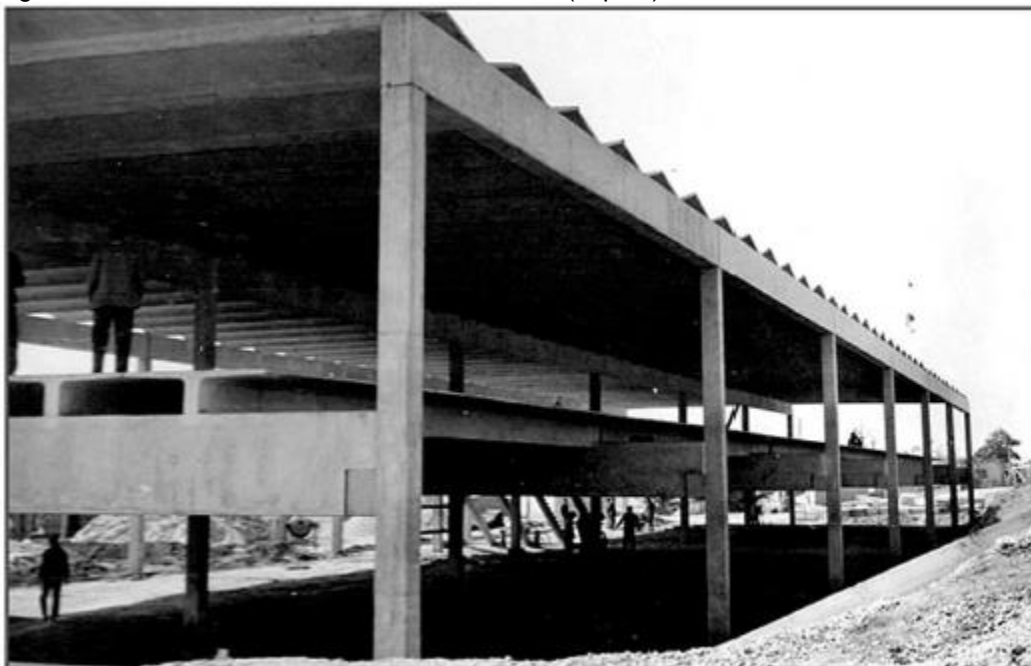


b)



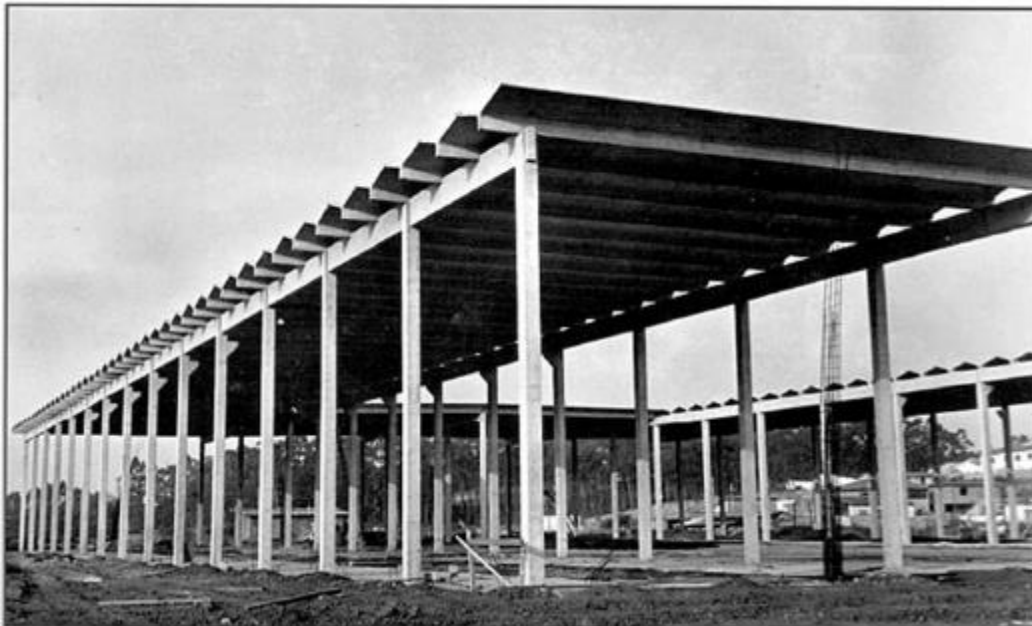
Fonte: ROSSIGNOLO (2009)

Figura 30 - Escola na Vila Sônia, em São Paulo (capital).



Fonte: ROSSIGNOLO (2009)

Figura 31 - Garagem padrão da Prefeitura Municipal de São Paulo (capital).

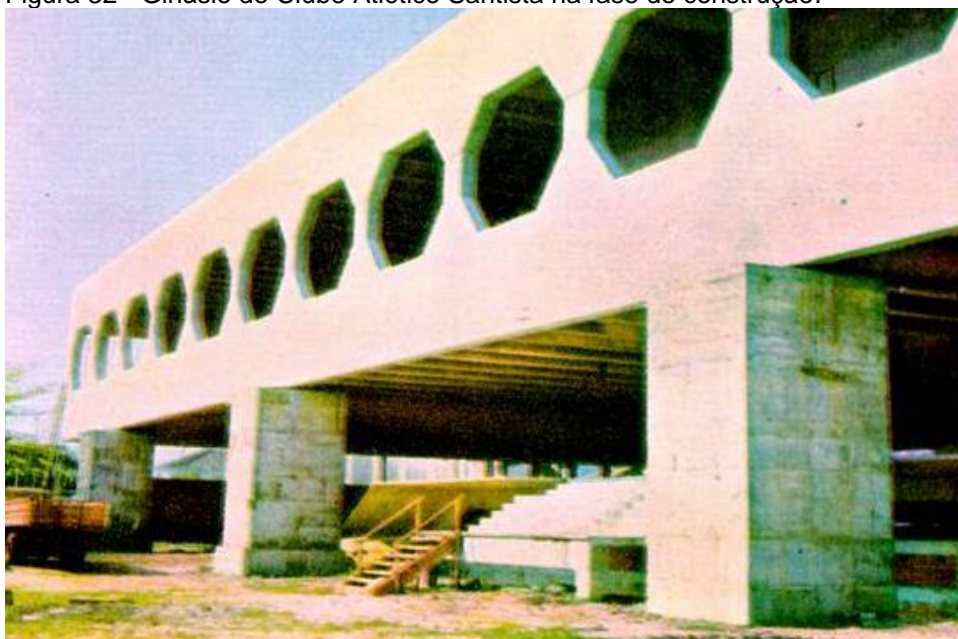


Fonte: ROSSIGNOLO (2009)

Além desses exemplos de aplicações do concreto leve no Brasil executados pela Cinasa, dentre as primeiras aplicações do concreto com argila expandida, tem-se o Ginásio do Clube Atlético Santista, concluído em 1971, localizado em Santos.

Na figura 32, observa-se o Ginásio do Cube do Atlético Santista, citado anteriormente.

Figura 32 - Ginásio do Clube Atlético Santista na fase de construção.



Fonte: OLAO RODRIGUES (1971)

Na construção citada no parágrafo anterior, foi utilizado concreto leve com resistência à compressão de 18 MPa e massa específica de 1800 kg/m³ nas duas vigas principais, com 75 metros de comprimento (dois vãos de 25 metros e dois balanços de 12,5 metros) e nas vigas de piso e da cobertura com 34 metros de vão.

Outro exemplo de aplicação no Brasil é a cobertura da Rodoviária Municipal de São Carlos, São Paulo, inaugurada em 1982, executada com vigas-calhas em concreto com argila expandida, com 15 metros de vão. Pode-se observar a edificação na figura 33.

Figura 33 - Rodoviária Municipal de São Carlos.



Fonte: ROSSIGNOLO (2009)

4.3.7 Impacto ambiental

A quantificação do impacto ambiental de um material, especialmente de construção, requer um estudo que compreenda a produção do material, processo de construção, consequências no projeto estrutural, aspectos de manutenção e reciclagem. Quando considerado os fatores citados anteriormente, o concreto leve se mostra um material de baixo impacto ambiental se comparado a outros materiais de construção (EUROLIGHTCON, 1998),

Segundo Rossignolo (2003), o concreto tradicional apresenta maior valor de relação tensão-energia, isto é, tem o menor consumo de energia para sua produção, em relação à tensão de trabalho. Com isso, em razão do alto consumo de energia

dos fornos que produzem os agregados leves, o concreto leve apresenta um consumo de energia cerca de 1,6 vezes maior do que o necessário para produção do concreto tradicional, para a mesma tensão de trabalho. Contudo, a redução da armadura e da energia utilizada no transporte e no processo construtivo com a utilização de concreto leve, compensam os gastos extras de energia utilizado na produção dos agregados.

4.3.8 Pesquisas recentes

Na última década os estudos sobre concretos com diferentes tipos de agregados leves aumentaram. Em especial, entre os agregados leves mais utilizados, destaca-se a argila expandida, que foi muito utilizada por ter uma produção nacional, além de apresentar características como a leveza, baixa densidade, isolamento térmico e acústico e alta durabilidade.

Diante disso, Scoabar (2016) pesquisou sobre a substituição do agregado graúdo convencional por argila expandida. Com isso, realizou ensaios com um concreto convencional e outro concreto feito com a substituição de 30% do agregado graúdo por argila expandida, ambos com o mesmo traço. Neste estudo, o autor concluiu que o concreto leve apresentou um fator de eficiência 22% maior do que o concreto convencional, devido a significativa redução da massa específica. Em contrapartida, o concreto com agregados leves apresentou uma resistência mecânica 23% menor quando comparado ao concreto convencional.

Ademais, Angelin (2014) estudou sobre os desempenhos físicos, térmicos, mecânicos e microestruturais do concreto leve estrutural. A autora realizou experimentos com duas graduações distintas de argila expandida e, com a finalidade de promover à manutenção das propriedades mecânicas, adicionou aditivo superplastificante e sílica ativa. Com isso, Angelin (2014) desenvolveu cinco traços distintos, que apresentaram reologia adequada, sem apresentar fenômenos de segregação e exsudação. Entre os resultados obtidos, a resistência à compressão apresentou, em média, 40 MPa, valor acima do mínimo prescrito pela ABNT NBR 6118:2007 para concretos estruturais, além da resistência à tração e módulo de elasticidade, as quais serviram como fundamentação na qualificação dos concretos leves estruturais, considerado às exigências técnicas nacionais e internacionais para sua classificação e uso.

Gomes *et al.* (2015) pesquisaram sobre a obtenção de concreto leve utilizando agregados reciclados. O estudo utilizou dois tipos de agregados reciclados, um oriundo de blocos vazados de concreto com EPS e outro de blocos cerâmicos, com o propósito de entender a variabilidade dos materiais caracterizando as composições desses agregados e verificar a viabilidade de aplicação deles na obtenção de concretos leves. Ambos agregados reciclados foram utilizados como agregados graúdos e apresentaram massa específica abaixo de $2,00 \text{ g/cm}^3$, caracterizados como concretos leves. Entretanto, as resistências à compressão aos 28 dias ficaram entre 9 e 13 MPa e indicaram uso em elementos sem função estrutural, como painéis e blocos.

Ozório (2016) estudou sobre a dosagens e características mecânicas de concretos leves com pérolas de EPS. O trabalho teve como objetivo analisar o comportamento do concreto leve com EPS para posterior utilização em estruturas pré-moldadas constituídas, por exemplo, por painéis de paredes e lajes sujeitas a ações mecânicas. Neste estudo, as pérolas de EPS substituíram o agregado graúdo na produção do concreto e utilizou-se aditivo superplastificante. Ao final da pesquisa, após análise de 45 misturas, observaram-se ganhos de desempenho mecânico com a adição de sílica ativa, adição de fibras de aço, ajuste na granulometria do agregado miúdo e redução do teor de EPS nas misturas, obtendo-se resistência à compressão na ordem de 16 MPa e massa aparente de 1370 kg/m^3 , com fator de equivalência (FE) correspondente ou superior ao de um concreto convencional de 20 MPa e 2400 kg/m^3 .

Natalli (2017) pesquisou sobre o desempenho do concreto leve em seções mistas. Para o estudo, a autora utilizou argila expandida como agregado leve e analisou a aderência e o efeito de confinamento em seções mistas compostas por perfis tubulares de parede fina, preenchidos com três diferentes tipos de concreto: leve sem adição (utilizado como referência), leve com adição de expansor e leve com agente incorporador de ar. Dentre os resultados, constatou-se que a variação dimensional gerada pelo concreto leve com expansor durante o seu período de endurecimento induziu um efeito de confinamento nas paredes do tubo de aço, o que proporcionou uma melhora da adesão na interface e bom desempenho dos protótipos de aço quando submetidos a cargas axiais. Quanto aos núcleos de concreto dosados com incorporador de ar, verificou-se que o seu menor módulo de elasticidade e suas

irregularidades superficiais contribuíram para a manifestação da aderência mecânica, por atrito e para um elevado grau de confinamento.

5 CONCLUSÃO

A partir dos dados teóricos e ensaios observados anteriormente, conclui-se que o uso de agregados leves para a fabricação de concretos é viável e possui diversas utilizações na construção civil.

Para o desenvolvimento técnico quanto ao uso de agregados leves na fabricação de concretos, faz-se necessário que pesquisadores e instituições busquem estudar e analisar as propriedades do material. Com isso, ao explorar as características dos concretos com agregados leves, nota-se a versatilidade na aplicação, como em contrapisos para evitar sobrecargas, além das propriedades do material apresentarem vantagens, tais como: melhora no desempenho térmico e acústico, material mais durável e a redução do peso da estrutura da obra.

Como sugestão de pesquisas futuras, pode-se realizar ensaios experimentais com diferentes agregados leves e a substituição parcial dos agregados tradicionais, com o intuito de avaliar as propriedades físicas e mecânicas e avaliar a viabilidade e vantagens desses materiais. Além disso, também é possível avaliar a rentabilidade dos concretos com agregados leves e meios de produção no Brasil.

Conclui-se que o setor da construção civil, em técnicas, ferramentas e normativas, mostra-se relativamente atrasado para a elaboração de projetos e execução de obras com concretos leves. Sendo assim, cabe às instituições de ensino, à indústria, assim como aos órgãos públicos, fomentarem e incentivarem a pesquisa e aplicação deste material.

REFERÊNCIAS

ALVES, Amanda Altrão. **USO DO BAMBU NA CONSTRUÇÃO CIVIL: aplicações estruturais e arquitetônicas para um desenvolvimento sustentável**. 2019. 48 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2019.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI. **Guide for structural lightweight aggregate concrete**. ACI – 213R-03. ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, 27p., 2003.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI. **Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete**. ACI – 211.2-98. 20p, 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM C330 / C330M-09, **Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009, www.astm.org.

ANGELIN, Andressa Fernanda. **Concreto leve estrutural - Desempenhos físicos, térmicos, mecânicos e microestruturais**. 2014. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823-2: **Concreto autodesável – Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual – Método do cone de Abrams**. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação**. 2009

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NM 35 – **Agregados leves para concreto estrutural – especificações**. Rio de Janeiro, 1995.

BREMNER, T. W. Concreto de agregado leve. Revista técnica, n. 37, p. 45-47, 1998.
BRITISH STANDARD INSTITUTION. BS 3797 – **Specification for lightweight aggregates for masonry units and structural concrete**, 1990.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. BS EN 13055-1 – **Lightweight aggregates – Part 1: Lightweight aggregates for concrete, mortar and grout**, 2002.

DALY, A.F. **Use of lightweight aggregate concrete in bridges** In: INTERNACIONAL SYMPOSIUM ON STRUCTURAL LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE, 2. Kristiansand, Norway, 2000. Proceedings, p. 345-354.

EuroLightCon, 1998 – EUROLIGHTCON - **Economic Design and Construction with Lightweight Aggregate Concrete**. *LWAC Material Properties, State-of-the-Art*. Project BE96-3942/R2, Noruega, 111 p . 1998.

FREIRE, W. J; BERALDO A. L. **Tecnologias e materiais alternativos de construção**. Editora da UNICAMP, 2003.

GOMES NETO, David de Paiva; AGNESINI, Marcos Vinício da Costa. **Dosagem de microconcretos leves de alto desempenho para produção de pré-fabricados de pequena espessura: estudo de caso**. 1998. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

GOMES, Paulo César Correia; ALENCAR, Tatiana Frassy Falcão de; SILVA, Natália Vieira da; MORAES, Karoline Alves de Melo; ANGULO, Sérgio Cirelli. **Obtenção de concreto leve utilizando agregados reciclados**. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 15, n. 3, p. 31-46, set. 2015.

HOLM. T. A.; BREMNER T. W. **High performance concrete: properties and applications**. Inglaterra, McGraw-Hill, 1994.

HOLM, T. A.; BREMNER, T.W. **State-of-the-art report on high-strength, high-durability structural low-density concrete for applications in severe marine environments**. US Army Corps of Engineers – Engineer Research in Development Center, ERDC/SL TR-00-3, 2000.

KHOKHRIN, N.K. **The durability os lightweight concrete structural members**. Kuibyshev, USSR, 1973.

KLOSS, C. L. **Materiais para Construção Civil- 2ª Edição**. CEFET-PR, 1996.
MEHTA, K.; MONTEIRO, J.M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. PINI. São Paulo, 1994.

MONTEIRO, Paulo Jose Melaragno. **Caracterização da microestrutura do concreto: fases e interfaces; aspectos de durabilidade e de microfissuração**. 1993. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

MORAVIA, 2007 – MORAVIA, Weber Guadagnin. **Influência de parâmetros microestruturais na durabilidade de concretos leves produzidos com argila expandida**. 2007. 187 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

NATALLI, Juliana Fadini. **Desempenho do Concreto Leve em Seções Mistas**. 2017. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto-5ª Edição**. Bookman Editora, 2016.

OZÓRIO, Bianca Pereira Moreira. **Concreto leve com pérolas de EPS: estudo de dosagens e de características mecânicas**. 2016. 156 f. Tese (Doutorado) - Curso

de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

RODRIGUES, Olao. **Almanaque Santos 1971**. São Paulo, Editora: W. Roth e Cia Ltda 1971.

ROSSIGNOLO, João Adriano. **Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos – dosagem, produção, propriedades e microestrutura**. 2003. 220 f. Tese (Doutorado). Interunidades EESC/IFSC/IQSC da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2003.

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

ROSSIGNOLO, J. A.; AGNESINI, M. V. C. Effect of curing condition on properties of polymermodified lightweight concrete In: Figueiras J. *et al.* (Ed.) *Composites in Construction*. Lisse, Holanda, A. A. Balkema Publishers, v. 1, p.67-71, 2001.

ROSSIGNOLO, J. A.; AGNESINI, M. V. C. **Propriedades no estado fresco dos microconcretos leves de alto desempenho modificados com polímero: estudo de caso**. In: IV CONGRESSO DE ENGENHARIA CIVIL. Anais... Juiz de Fora, v. 1. p.511-22, 2000.

ROSSIGNOLO, J. A.; PAULON, V.A.; AGNESINI, M. V. C. Concreto leve de elevado desempenho. **Revista Engenharia e Construção**, n. 56, p. 24-30, 2001.

SCOBAR, Renan Luna. **Concreto leve estrutural: substituição do agregado graúdo convencional por argila expandida**. 2016. 47 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2016.

VIEIRA, M. G. **Betões de elevado desempenho com agregados leves - Durabilidade e microestrutura**. Dissertação (mestrado). Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2000.

ZHANG, M.H.; GJØRV, O. E. **Microstructure of the interfacial zone between lightweight concrete and cement paste**. *Cement and Concrete Research*, v. 20, p.610-618, 1990.