

**UNIEVANGÉLICA**

**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ELIZETE MARIA DE OLIVEIRA BANDEIRA**

**LORRAN MOREIRA SILVA**

**ESTUDO, DOSAGEM E PRODUÇÃO DE CONCRETO LEVE  
DE ALTA RESISTÊNCIA**

**ANÁPOLIS / GO**

**2015**



**ELIZETE MARIA DE OLIVEIRA BANDEIRA**

**LORRAN MOREIRA SILVA**

**ESTUDO, DOSAGEM E PRODUÇÃO DE CONCRETO LEVE  
DE ALTA RESISTÊNCIA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA**

**ORIENTADOR: ADRIANO CARVALHO DE SOUZA**

**ANÁPOLIS / GO: 2015**

## FICHA CATALOGRÁFICA

BANDEIRA, ELIZETE MARIA DE OLIVEIRA; SILVA, LORRAN MOREIRA

Estudo, Dosagem e Produção de Concreto Leve de Alta Resistência [Goiás] 2015

65P, 297 mm (ENC/UNI, Bacharel, Engenharia Civil, 2015).

TCC - UniEvangélica

Curso de Engenharia Civil.

1. Concreto Leve

2. Alta resistência

3. Dosagem

4. Baixa massa específica

I. ENC/UNI

II. Título (Série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BANDEIRA, E. M.O.; SILVA, L. M.. Estudo, Dosagem e Produção de Concreto Leve de Alta Resistência. TCC, Curso de Engenharia Civil, UniEvangélica, Anápolis, GO, 65p. 2015.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DOS AUTORES: Elizete Maria de Oliveira Bandeira; Lorrان Moreira Silva

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: Estudo, Dosagem e Produção de Concreto Leve de Alta Resistência.

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil

ANO: 2015

É concedida à UniEvangélica a permissão para reproduzir cópias deste TCC e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. Os autores reservam outros direitos de publicação e nenhuma parte deste TCC pode ser reproduzida sem a autorização por escrito dos autores.

---

Elizete Maria de Oliveira Bandeira  
E-mail: elizeteoli@gmail.com

---

Lorrان Moreira Silva  
E-mail: lorrانmoreiraa@hotmail.com

**ELIZETE MARIA DE OLIVEIRA BANDEIRA  
LORRAN MOREIRA SILVA**

**ESTUDO, DOSAGEM E PRODUÇÃO DE CONCRETO LEVE  
DE ALTA RESISTÊNCIA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO CURSO DE  
ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL**

**APROVADO POR:**

---

**ADRIANO CARVALHO DE SOUZA, Mestre (UniEvangélica)  
(ORIENTADOR)**

---

**CÉSAR AUGUSTO PAIVA GONÇALVES, Mestre (UniEvangélica)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**ISA LORENA SILVA BARBOSA, Mestra (UniEvangélica)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

**DATA: ANÁPOLIS/GO, 11 de Dezembro de 2015.**

Dedicamos este trabalho aos nossos pais, que tantas vezes abriram mão de seus sonhos em favor dos nossos. E a toda nossa família, que estão sempre nos incentivando a prosseguir e torcendo pelo nosso sucesso.

## AGRADECIMENTOS

À Deus, ele é o principal responsável por eu chegar até aqui, sem ele não sou nada.

Agradeço especialmente a meu esposo, Adriano e a meus filhos, Evelyn, Guilherme e Matheus, que para ajudar, abdicaram de muitas e muitas horas de nosso lazer, muito obrigado.

Aos meus pais, Antônio e Walda pelos ensinamentos de vida e incentivos.

Aos meus irmãos por terem sido parceiros e amigos nesta caminhada.

Aos amigos e colegas universitários pelos imprescindíveis e necessários momentos de descontração, estímulo e colaboração mútua.

À empresa Rheoset (Grace), pelo fornecimento dos aditivos utilizados na produção dos concretos.

Ao Professor Mestre Adriano Carvalho de Souza, por ser preciso nas suas orientações.

À Professora Mestra Julliana Simas, pela colaboração e ensinamentos durante o curso.

Aos responsáveis técnicos pelos laboratórios de Materiais de Construção do Centro Universitário de Anápolis, por toda colaboração e tempo disponibilizado para nos dar apoio durante os experimentos.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, meu muito obrigado.

*Elizete Maria de Oliveira Bandeira*

## AGRADECIMENTOS

À inteligência suprema (Deus), pela vida e graças recebidas.

Aos meus pais, Iris e Elisangela, bases na formação dos meus valores, pelo apoio e amor incondicional, nunca deixaram me faltar nada. A vocês minha sincera gratidão!

À minha avó, Marinha, e aos meus tios e tias de Anápolis, que na ausência dos meus pais (em razão da distância) estiveram sempre me apoiando e auxiliando. E a toda minha família, que está sempre torcendo por mim.

A todos os meus amigos, pelo companheirismo e momentos de descontração, e pela paciência e compreensão nos momentos em que estive ausente.

Ao meu grupo de estudos, Elizete, Marciel, Mayara, Vanessa e Vanusa, o único grupo que participei em que todos os membros se empenham igualmente para concluir uma dada missão. Foi através desse espírito de luta e esforço da equipe que aprendi a ter determinação para conquistar o que almejo. Ah vocês são alunos inspiradores!

Aos técnicos do Laboratório de Construção Civil, Rafaela, Angela e Eber, por serem altamente qualificados, pacientes, prestativos e proativos.

À empresa Rheoset (Grace) pela colaboração no ágil fornecimento dos aditivos utilizados nesta pesquisa.

Ao corpo docente e funcionários do curso de Engenharia Civil da UniEVANGÉLICA, pela contribuição na forma de ensinamentos e de apoio. Em especial, aos dois inspiradores professores que me inseriram na área da tecnologia do concreto. O primeiro é o meu orientador, Me. Adriano Carvalho, que mesmo com um tempo restrito forneceu importantes sugestões na realização deste trabalho, tenho imenso respeito por você. O segundo é a Ma. Julliana Simas, palavras são insuficientes para agradecer o apoio e o incentivo recebido durante a iniciação científica e em todas as etapas de preparação para o Concrebol.

*Lorran Moreira Silva*



*“Eu acredito demais na sorte. E tenho constatado que,  
quanto mais duro eu trabalho, mais sorte eu tenho.”*

*Thomas Jefferson (1743-1826)*

## RESUMO

Avanços na tecnologia do concreto propiciaram o desenvolvimento de concretos especiais que vão além dos componentes básicos, dentre os quais tem-se o Concreto Leve de Alta Resistência (CLAR), cuja exequibilidade foi possível com o surgimento de aditivos redutores de água, adições minerais pozolânicas e agregados leves artificiais. Na produção do CLAR, tão importante quanto a seleção dos materiais componentes é o correto proporcionamento destes. Nesse contexto, este estudo tem como objetivo otimizar a dosagem dos materiais, no intuito de produzir concretos com potencialidade em atingir alta resistência e baixa massa específica. Inicialmente, fixou-se a resistência mínima e limites para a massa específica como parâmetros de dosagem. Subsequentemente, realizou-se uma seleção e posterior caracterização dos componentes. Por fim, foram elaborados cinco traços e moldado um corpo de prova para cada tipo de traço. Observou-se nos valores de massa específica, apresentados pelos diferentes traços, uma variação de  $1610 \text{ kg/m}^3$  a  $1653 \text{ kg/m}^3$ . Com exceção do traço 5, todos os demais traços apresentaram valores de resistência à compressão superior a 41 MPa e satisfizeram a condição que define um CLAR, com destaque para o traço 1 que teve o melhor empacotamento dos agregados e, conseqüentemente, a maior resistência à compressão. Conclui-se, a partir da avaliação comparativa entre os traços, que o agregado leve limita os valores de resistência à compressão dos concretos, em conformidade com a bibliografia, mas é possível obter ganhos de resistência ao determinar, sobretudo, o correto empacotamento dos agregados, a substituição parcial do agregado miúdo leve por areia natural, o menor diâmetro máximo dos agregados e o ponto ótimo de saturação do aditivo superplastificante para a menor relação água/aglomerante possível.

Palavras-chave: concreto leve, alta resistência, baixa massa específica, dosagem

## ABSTRACT

Advances in concrete technology led to the development of special concrete that go beyond the basic components, among which there is the Concrete Lightweight High Strength (HPLC), which became enforceable with the advent of reducing water additives, mineral additions pozzolanic and artificial lightweight aggregate. In the production of HPLC, as important as the selection of component materials is the correct proportioning of these. In this context, this study aims to optimize the dosage of materials in order to produce concrete with the potential to achieve high strength and low specific mass. Initially, it has set itself the minimum resistance and limits for the density as dosing parameters. Subsequently, a selection was performed and further characterization of the components. Finally, were developed five traits and molded one test body for each trait type. It was observed in the specific mass values presented by different traits a variation of  $1610 \text{ kg / m}^3$  to  $1653 \text{ kg / m}^3$ . With the exception of trait 5, all other traits showed resistance values to compression greater than 41 MPa and satisfied the condition that defines a HPLC, with emphasis on the trait 1 that had the best packaging of aggregates and consequently greater resistance to compression. It is concluded as from the comparative evaluation between the traits that the lightweight aggregate limits the concrete compressive strength values, in compliance with the literature, but can be obtained strength gains to determine, above all, the correct packaging of the aggregates, the partial replacement of the small lightweight aggregate for natural sand, the lowest maximum diameter of the aggregates, and the optimum point of saturation of the superplasticizer for the lower relation water / agglomerate possible.

Keywords: lightweight concrete, high strength, low specific mass, dosage

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - a) , b) e c) - Utilização do concreto leve na reforma do Estádio Maracanã.....	06
Figura 02 - Complexo empresarial Rochaverá Corporate Towers São Paulo, SP... ..	07
Figura 03 - Condomínio vertical One Shell Plaza Tower. Houston, EUA.....	07
Figura 04 - Ponte Stolma. Noruega .....	08
Figura 05 - Ilustração da aplicação do concreto leve no vão central da ponte Stolma.....	08
Figura 06 - Plataforma petrolífera South Arne (Dinamarca): a) Construção da Plataforma em doca seca; b) Inundação da doca; c) Transporte da plataforma; d) Plataforma apoiada no leito marítimo e em funcionamento.....	13
Figura 07 - Imagem de Microscopia Eletrônica de Varredura da estrutura interna de uma argila expandida.....	13
Figura 08 - Fatores influentes na definição da resistência à compressão do concreto .....	19
Figura 09 - a) Cimento utilizado. b) Dosagem do cimento para a preparação do Concreto	24
Figura 10 - a) sílica ativa. b) Dosagem de sílica para a preparação do concreto .....	24
Figura 11 - a) Areia natural b) Dosagem da areia para a preparação dos concretos .....	25
Figura 12 - a) Argila 1505 b) Dosagem da argila 1506 para a preparação dos concretos c) Argila 0500. d) Dosagem da argila 0500 para a preparação dos concretos.....	26
Figura 13 - a) Aditivo utilizado Tec Flow-8000- A. b) Dosagem do aditivo para a Preparação dos concretos. ....	27
Figura 14 - a) Aditivo utilizado Eco Tec 20.b) Dosagem do aditivo para a preparação dos concretos .....	27
Figura 15 - a) Aditivo utilizado Densil 10. b) Dosagem do aditivo para a preparação dos concretos.....	28
Figura 16 - a) Água potável tratada. b) Dosagem da água para a preparação dos concretos .....	28
Figura 17 - Distribuição granulométrica das misturas da Tabela 4 .....	30
Figura 18 - Proporcionamento dos materiais .....	34
Figura 19 - a), b) e c) - Etapas da mistura .....	35
Figura 20 - a), b) e c) - Preparação com desmoldante para o recebimento do concreto.....	35
Figura 21 - Cura inicial dos corpos de prova .....	36
Figura 22 - a) e b) - Armazenamento dos corpos de prova na câmara úmida.....	36
Figura 23 - Correlação entre a resistência à compressão e a massa específica.....	39

**LISTA DE TABELA**

Tabela 01 – Valores correspondentes de resistência à compressão e massa específica aparente.....	04
Tabela 02 – Características das argilas expandidas 1506 e 0500 Cinexpan.....	26
Tabela 03 – Composição do agregado leve .....	30
Tabela 04 – Composição do agregado leve adotado .....	31
Tabela 05 – Composição do agregado composto .....	31
Tabela 06 – Composição adotada do agregado .....	32
Tabela 07 – Proporcionamento dos Concretos Leves de Alta Resistência.....	33
Tabela 08 – Resistência à compressão aos 28 dias.....	37
Tabela 09 – Massa específica e fator de eficiência por traço.....	38
Tabela 10 – Módulos de deformação para cada traço .....	40

**LISTA DE QUADRO**

Quadro 01 - Classes de Consistência..... 18

**LISTA DE ABREVIATURAS**

a/agl – RELAÇÃO ÁGUA/ AGLOMERANTE  
ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS  
ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE  
AP - ADITIVO ACELERADOR DE PEGA  
AR - ADITIVO ACELERADOR DE RESISTÊNCIA  
CaOH<sub>2</sub> – HIDRÓXIDO DE CÁLCIO  
CaSO<sub>4</sub> - SULFATO DE CÁLCIO  
CD - CONCRETO COM MASSA ESPECÍFICA PESADA  
CL - CONCRETO COM MASSA ESPECÍFICA LEVE  
CLAD - CONCRETO LEVE DE ALTO DESEMPENHO  
CLAR - CONCRETO LEVE DE ALTA RESISTÊNCIA  
CLE - CONCRETO LEVE ESTRUTURAL  
CP I - CIMENTO PORTLAND COMUM  
CP II - CIMENTO PORTLAND COMPOSTO  
CP II I- CIMENTO PORTLAND DE ALTO FORNO  
CP IV- CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO  
CP V- ARI - CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL  
CP V- ARI RS- CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL  
RESISTENTE A SULFATOS.  
CSC – SILICATO DE CÁLCIO HIDRATADO  
Ec – MÓDULO DE DEFORMAÇÃO  
f<sub>ck</sub> – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO ( CILINDRO 100 X 200 mm)  
f<sub>ck</sub>- RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA DO CONCRETO À COMPRESSÃO  
f<sub>cmj</sub>- RESISTÊNCIA MÉDIA DO CONCRETO A J DIAS DE IDADE  
FE - FATOR DE EFICIÊNCIA  
GPa – GIGA PASCAL  
H – RELAÇÃO ÁGUA/ MATERIAIS SECOS  
IA - ADITIVO INCORPORADOR DE AR  
kg- KILOGRAMA  
MPa - MEGA PASCAL  
NBR – NORMA BRASILEIRA REGULAMENTADORA  
NM - NORMALIZAÇÃO NO MERCOSUL

PA - ADITIVO REDUTOR DE ÁGUA/PLASTIFICANTE ACELERADOR

PH – POTENCIAL HIDROGENIÔNICO

PN - ADITIVO REDUTOR DE ÁGUA/PLASTIFICANTE NEUTRO

PR - ADITIVO REDUTOR DE ÁGUA/PLASTIFICANTE RETARDADOR

RP- ADITIVO RETARDADOR DE PEGA

SANEAGO- SANEAMENTO DE GOIÁS

SiO<sub>2</sub> - DIÓXIDO DE SILÍCIO

SP- I R - ADITIVO DE ALTA REDUÇÃO DE ÁGUA/SUPERPLASTIFICANTE TIPO I-  
RETARDADOR

SP-I A - ADITIVO DE ALTA REDUÇÃO DE ÁGUA/SUPERPLASTIFICANTE TIPO I-  
ACELERADOR

SP-I A - ADITIVO DE ALTA REDUÇÃO DE ÁGUA/SUPERPLASTIFICANTE TIPO II  
ACELERADOR

SP-I N - ADITIVO DE ALTA REDUÇÃO DE ÁGUA/SUPERPLASTIFICANTE TIPO I-  
NEUTRO

SP-I N - ADITIVO DE ALTA REDUÇÃO DE ÁGUA/SUPERPLASTIFICANTE TIPO II  
NEUTRO

SP-I R - ADITIVO DE ALTA REDUÇÃO DE ÁGUA/SUPERPLASTIFICANTE TIPO II  
RETARDADOR



## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>CONCRETO LEVE DE ALTA RESISTÊNCIA</b> .....	<b>4</b>
2.1	DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO .....	4
2.2	APLICAÇÕES .....	5
2.3	MATERIAIS COMPONENTES .....	9
<b>2.3.1</b>	<b>Aglomerantes</b> .....	<b>9</b>
2.3.1.1	Cimento Portland .....	9
2.3.1.2	Sílica Ativa .....	10
<b>2.4.2</b>	<b>Agregados</b> .....	<b>10</b>
2.4.2.1	Areia natural .....	11
2.4.2.2	Argila Expandida .....	12
<b>2.4.3</b>	<b>Aditivos químicos</b> .....	<b>14</b>
2.4.3.1	Superplastificantes .....	15
2.4.3.2	Inibidor de hidratação .....	15
2.4.3.3	Desincorporador de ar .....	16
<b>2.4.4</b>	<b>Água</b> .....	<b>16</b>
2.5	DOSAGEM .....	17
2.6	PROPRIEDADES .....	17
<b>2.6.1</b>	<b>Consistência</b> .....	<b>17</b>
<b>2.6.2</b>	<b>Interação entre agregado e a pasta</b> .....	<b>18</b>
<b>2.6.3</b>	<b>Resistência à compressão</b> .....	<b>19</b>
<b>2.6.4</b>	<b>Durabilidade</b> .....	<b>21</b>
<b>2.6.5</b>	<b>Módulo de deformação</b> .....	<b>21</b>
<b>2.6.6</b>	<b>Propriedades térmicas, acústicas e resistência ao fogo</b> .....	<b>22</b>
<b>3.</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>23</b>
3.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS .....	23
<b>3.1.1</b>	<b>Aglomerantes</b> .....	<b>23</b>
3.1.1.1	Cimento Portland .....	23
3.1.1.2	Sílica Ativa .....	24
<b>3.1.2</b>	<b>Agregados</b> .....	<b>24</b>

3.1.2.1 Areia Natural .....	24
3.1.2.2 Argila Expandida.....	25
<b>3.1.3 Aditivos químicos .....</b>	<b>27</b>
3.1.3.1 Superplastificantes.....	27
3.1.3.2 Inibidor de hidratação .....	27
3.1.3.3 Desincorporador de ar .....	28
<b>3.1.4 Água de amassamento .....</b>	<b>28</b>
3.2 DOSAGEM EXPERIMENTAL .....	29
3.3 PROCESSAMENTO DO CONCRETO LEVE DE ALTA RESISTÊNCIA .....	34
<b>3.3.1 Mistura.....</b>	<b>34</b>
<b>3.3.2 Moldagem de corpo de prova.....</b>	<b>36</b>
<b>3.3.3 Adesamento.....</b>	<b>35</b>
<b>3.3.4 Cura.....</b>	<b>36</b>
<b>4. ANÁLISE E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>37</b>
4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL .....	37
4.2 MASSA ESPECÍFICA .....	38
4.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE .....	40
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>41</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>42</b>



## 1. INTRODUÇÃO

O concreto vem sendo utilizado há muitos anos, desde o império Romano, mas somente em 1849, com a descoberta do concreto armado, que seu uso se alavancou (CARVALHO, 2008). De acordo com Rossignolo (2009, p. 15), o desenvolvimento do concreto se dá ao fato de sua aplicação ser versátil, bem como os seus componentes serem produzidos de matérias primas locais, apropriando-se facilmente às situações atuais. Para Carvalho (2008), o concreto é atualmente o material mais utilizado no mundo, em função de diversos fatores, dentre eles, o principal, sua facilidade de conformação.

De acordo com dados da página eletrônica “Cimento.org” (O MUNDO DO CIMENTO, 2015), o consumo de cimento no Brasil cresceu mais que a média mundial no período de 2005 a 2013, representando uma evolução de 94%. Isso demonstra quantitativamente que a utilização do concreto vem aumentando acentuadamente nos últimos anos. Diante de tal crescimento estão associados vários fatores, dentre eles a procura de novas tecnologias do concreto para atender as demandas da construção civil. Rossignolo (2009) destaca que nas últimas décadas houve uma grande evolução da tecnologia desse material, devido ao aperfeiçoamento de técnicas e equipamentos para o estudo do concreto e o uso de novos materiais. Essas novas técnicas eclodiram em um desenvolvimento da utilização de concretos especiais, como o concreto leve.

Segundo Rossignolo (2009), os construtores pré-colombianos foram os primeiros a utilizar o concreto leve, ao misturarem pedra-pomes com um ligante à base de cinzas vulcânicas e cal na produção de elementos estruturais em 1100 A.C. Embora, os registros históricos mais reconhecidos serem obras construídas pelos romanos, em razão das técnicas mais avançadas.

Estes concretos leves eram produzidos somente com agregados leves naturais, até 1918, quando Hayde patenteou os agregados leves artificiais. No mesmo ano, iniciou a construção de embarcações empregando esses novos materiais a serem lançadas na Primeira Guerra Mundial, totalizando 14 ao final, com destaque para o USS Selma, que, mesmo apresentando massa específica, de  $1905 \text{ kg/m}^3$  obteve resistência à compressão aos 28 dias de 38,5 MPa, muito superior à resistência usual dos concretos convencionais da época.

Já durante a Segunda Guerra Mundial, o concreto leve teve o uso mais intensificado, contabilizando 488 embarcações (ROSSIGNOLO, 2009). Após avanços, hoje a utilização do concreto leve de alta resistência é ampla, e por isso vem ganhando espaço no mercado.

Em razão da reduzida massa específica, o concreto leve estrutural tem bom comportamento ao fogo e boas propriedades térmicas e acústicas, além de fornecer à estrutura uma significativa redução do peso próprio. Tais características tornam o uso do concreto leve de alta resistência viável em distintas aplicações. Alguns empreendimentos requerem um sistema construtivo peculiar, nestes casos, escolher o tipo de sistema construtivo mais apropriado representa economia de insumos e melhor desempenho final do conjunto onde ele foi inserido. Durante a construção da ponte flutuante Nordhorland na Noruega em 1994, por exemplo, ao optar pelo uso de concreto leve de alta resistência para aumentar a flutuabilidade da estrutura e reduzir o consumo total de concreto e armadura, refletiu-se na redução de custos.

Evoluções na tecnologia do concreto propiciaram o surgimento de: agregados leves com diferentes massas específicas; aditivos redutores de água e; adições minerais pozolânicas, capazes de reduzir o consumo de cimento e, paralelamente, melhorar o empacotamento de suas partículas. Esses avanços possibilitam produzir concretos mais leves, e obter ganhos significativos no desempenho e na resistência mecânica.

Constituir estes materiais promissores, por si só, não o tornam um concreto leve de alta resistência. Tão importante quanto as suas propriedades, é o correto proporcionamento de cada material. Para tanto, existem contribuições de diversas pesquisas renomadas nacionais e internacionais sobre dosagem e temas afins. Assim, o intuito deste estudo é otimizar, ainda mais, o proporcionamento dos materiais, e trazer contribuições por meio do conhecimento científico, para os grupos de estudos que se preparam para o concurso estudantil Concrebol, os profissionais da construção civil e a comunidade acadêmica em geral.

Objetiva-se neste estudo, produzir um concreto com potencialidade em atingir de maneira conjunta, alta resistência e baixa massa específica, mais especificamente entre 1600 kg/m<sup>3</sup> e 1660 kg/m<sup>3</sup>.

Com a finalidade de atender este objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) selecionar para a dosagem: os mais eficientes materiais, proporções e técnicas;
- b) estabelecer controle de qualidade durante os respectivos processos de mistura, moldagem do corpo de prova, adensamento e, cura;
- c) analisar as propriedades mecânicas dos concretos ensaiados, sobretudo, a resistência à compressão e correlacioná-la com a massa específica destes;
- d) fornecer, ao grupo de estudos de tecnologia do concreto da UniEVANGÉLICA, dados que contribuam para a participação no 12º Concurso Estudantil Concrebol.

No sentido de estabelecer uma sequência lógica das ideias, informações e dados coletados, ordenou-se este estudo em cinco capítulos:

O Capítulo 1 é apresentado uma introdução ao trabalho, destacando-se seu contexto histórico, justificativa e relevância, objetivos e organização.

O Capítulo 2 é feita uma fundamentação teórica baseada em produções científicas de outros pesquisadores e, em normas regulamentadoras nacionais e internacionais sobre o concreto leve de alta resistência.

O Capítulo 3 detalha o desenvolvimento experimental, iniciando com a caracterização dos materiais selecionados para compor o concreto em questão. Seguindo com a elaboração da dosagem, e por fim, com procedimentos para a produção do concreto leve de alta resistência.

O Capítulo 4 contém a apresentação, comparação e a discussão dos resultados obtidos por meio dos ensaios de resistência à compressão axial e de pesagem dos corpos de prova. São neste item que são analisadas as propriedades mecânicas (resistência à compressão e módulo de elasticidade) e a propriedade física (massa específica).

O Capítulo 5 reserva-se às considerações finais da pesquisa como um todo, bem como às sugestões para futuras pesquisas relacionadas ao tema deste estudo.

## 2. CONCRETO LEVE DE ALTA RESISTÊNCIA

### 2.1 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO

Maycá *et al.* (2009) define o concreto leve como um material com estrutura porosa que apresenta propriedades refratárias e de isolamento térmico, além de ser caracterizado por apresentar massas específicas inferiores ao concreto convencional.

Conforme a NBR 8953 (ABNT, 2009) os concretos devem ser classificados por sua massa específica em normal (C), leve (CL) ou pesado (CD). A NBR 12655 (ABNT, 2015) especifica que a massa específica de um concreto leve (CL) deve estar entre os limites de 800 kg/m<sup>3</sup> a 2.000 kg/m<sup>3</sup>.

A NBR NM 35 (ABNT, 1995) especifica ainda, que os concretos leves estruturais devem atender aos valores mínimos de resistência à compressão em relação à massa específica, conforme estabelecido na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores correspondentes de resistência à compressão e massa específica aparente

Resistência à compressão (MPa aos 28 dias)	Massa específica aparente (kg/m <sup>3</sup> )
≥ 28	≤ 1840
≥ 21	≤ 1760
≥ 17	≤ 1680

Fonte: NBR NM 35 (ABNT, 1995).

De acordo com Rossingnolo (2009), os concretos leves podem ser classificados em concreto com agregados leves, concreto celular e concreto sem finos.

Segundo Neville (1997), existem três localizações possíveis do ar em concretos: nas partículas de agregado, na pasta de cimento e entre as partículas do agregado graúdo quando não se usa o agregado miúdo. Para Rossingnolo (2009), os concretos leves estruturais (CLE) são obtidos com a substituição total ou parcial dos agregados normais por agregados leves. Complementa Neville (1997), que somente os agregados obtidos por expansão de argila, xisto ou ardósia podem ser usados em concretos leves estruturais.

O Concreto Leve de Alta Resistência (CLAR), dependendo do seu desempenho, pode ser denominado também como Concreto Leve de Alto Desempenho (CLAD). No entanto, existem diferenças entre os dois termos.

O American Concrete Institute – ACI (1998) define o concreto de alto desempenho como o concreto que atende uma combinação especial entre desempenho e requisitos de uniformidade. Para Tutikian *et al.* (2011), para um concreto apresentar desempenho especial é preciso conter, de forma simultânea, alta resistência, alta trabalhabilidade, e alta durabilidade, em relação ao concreto convencional. Para obter estes requisitos, Aïtcin (2000) especifica uma relação água/aglomerante menor ou igual a 0.40, e de modo a não afetar o bom desempenho da trabalhabilidade. No caso restrito ao CLAD, apenas acrescenta na consideração, a baixa massa específica do concreto.

Na visão de Holm e Bremner (1992), para um concreto ser definido como CLAR, além da baixa massa específica, deve apresentar resistência à compressão maior ou igual a 34,5 MPa. Ao passo que Slate *et al.* (1986), estabelece uma resistência mínima de 41 MPa.

De acordo com Jucá *et al.* (2001), quando se tratar de concreto de alto desempenho deve-se pensar primeiramente em durabilidade e posteriormente, em alta resistência, principalmente quando a estrutura está inserida em ambientes agressivos. Enquanto, o concreto leve de alta resistência prioriza como propriedade fundamental, a resistência mecânica.

Para atender as diretrizes presentes no regulamento do 12º Concrebol, será produzido um concreto uniforme, homogêneo, de baixa massa específica, e constituído de aditivos (possibilitará uma relação água/aglomerante inferior a 0.4) e de adições minerais pozolânicas, resultando em um concreto de baixa permeabilidade e de outras propriedades que potencializa a sua durabilidade. Desse modo, este concreto prevê o comportamento característico de um CLAD.

Todavia, sabe-se que o interesse deste estudo não é a conservação do desempenho do concreto leve durante a sua vida útil, assim como analisar ensaios de carbonatação, dentre outros ensaios verificados para um concreto de alto desempenho, mas sim, a alta resistência mecânica. Pelo exposto por Jucá *et al.* (2001), ao longo deste trabalho será utilizado a terminologia Concreto leve de Alta Resistência (CLAR).

## 2.2 APLICAÇÕES

Nas anotações de Mendes (2014), predomina-se o uso de concreto leve em pré-fabricados e em sistemas construtivos mistos, com partes da estrutura composta de estruturas metálicas, ou concreto armado ou protendido, de densidade normal, e parte composta de concreto leve, como ocorre na aplicação em lajes, por exemplo.



Um exemplo recente no Brasil foi a reforma realizada no Estádio Maracanã para receber os jogos da Copa do Mundo de 2014 (Figura 1), a) ilustra o sistema de lajes Steel Deck empregado no estádio, um tipo de estrutura mista com fôrma metálica e concreto leve. b) apresenta os degraus da arquibancada de concreto leve pré-moldado a serem suportados por uma estrutura metálica composta de perfis e vigas-jacaré. A adoção de concreto leve possibilitou a redução de prazos e do peso próprio da estrutura.

Figura 1- Utilização do concreto leve na reforma do Estádio Maracanã (2010-2013). a) sistema de lajes Steel Deck b) degraus da arquibancada de concreto leve pré-moldado e c) Estrutura montada



Respectivas fontes: (PINI, 2012; Secretária Estadual de Obras do RJ, 2012; Cinexpan, 2013).

O uso *in loco* do concreto leve estrutural em edifícios de múltiplos pavimentos é propício quando se necessita aliviar solicitações estruturais proveniente do peso próprio, ter isolamento térmico e/ou acústico. Quanto ao uso de peças de concreto leve pré-moldadas, além das situações anteriores, são ideais quando se deseja facilitar o transporte e a montagem das peças (ROSSIGNOLO, 2009).

A Figura 2 exemplifica com o complexo de escritórios construído em 2008, o uso de peças pré-moldadas de concreto leve. Foram utilizados 920 painéis com 35 MPa aos 28 dias para uma massa específica de 1900 kg/m<sup>3</sup> (ROSSIGNOLO e AGNESINI, 2011). A Figura 3 apresenta outro edifício de múltiplos pavimentos que utilizou concreto leve, o One Shell Plaza Tower construído em 1967 com aproximadamente 218 m de altura, neste por sua vez, toda a superestrutura - vigas, lajes, colunas e paredes - foi produzida *in loco* com concreto leve constituído de xisto expandido (MENDES, 2014). Segundo Rossignolo (2009), o concreto leve empregado neste edifício tem massa específica de 1840 kg/m<sup>3</sup> e fck entre 32 e 42 MPa.

Mesmo o concreto leve estrutural tendo histórico de utilização nos mais diversos setores da construção civil, para Rossignolo (2009, p. 91):

Sua viabilidade técnica e econômica é maior em estruturas nas quais grande parte das solicitações deve-se ao peso próprio, como pontes, coberturas e edificações de múltiplos pavimentos, em construções que envolvem transporte de componentes, caso dos sistemas construtivos pré-fabricados, e em estruturas flutuantes, como plataformas e tanques.

Figura 2 - Complexo empresarial Rochaverá Corporate Towers. São Paulo, SP



Fonte: Nelson Kon, 2012.

Figura 3 - Condomínio vertical One Shell Plaza Tower. Houston, EUA



Fonte: Khan, 2004.

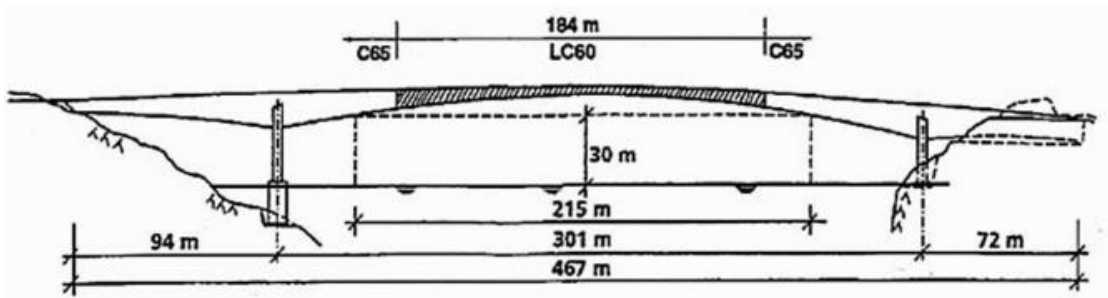
Conforme o ACI (2005), citado por Mendes (2014), o concreto leve proporciona às pontes: maior largura ou número de faixas com a mesma carga do concreto normal; redução nas forças inerciais sísmicas; melhor geometria do tabuleiro com lajes maiores em comparação com o concreto normal; maiores vãos, economizando o custo dos pilares, entre outros. Segundo Rossignolo (2009), nas pontes de grandes vãos em concreto armado, o peso da estrutura pode representar até 70% das solicitações estruturais. A ponte Stolma (Figura 4) construída em 1999 é um exemplo da utilização de concreto leve em pontes. Com  $F_{ck}$  de 70 MPa e massa específica de  $1940 \text{ kg/m}^3$ , a estrutura especial contempla um grande vão de 301 m.

Figura 4 – Ponte Stolma. Noruega



Fonte: [http://www.thefullwiki.org/List\\_of\\_longest\\_cantilever\\_bridges](http://www.thefullwiki.org/List_of_longest_cantilever_bridges) (2015)

Figura 5 – Ilustração da aplicação do concreto leve no vão central da ponte Stolma

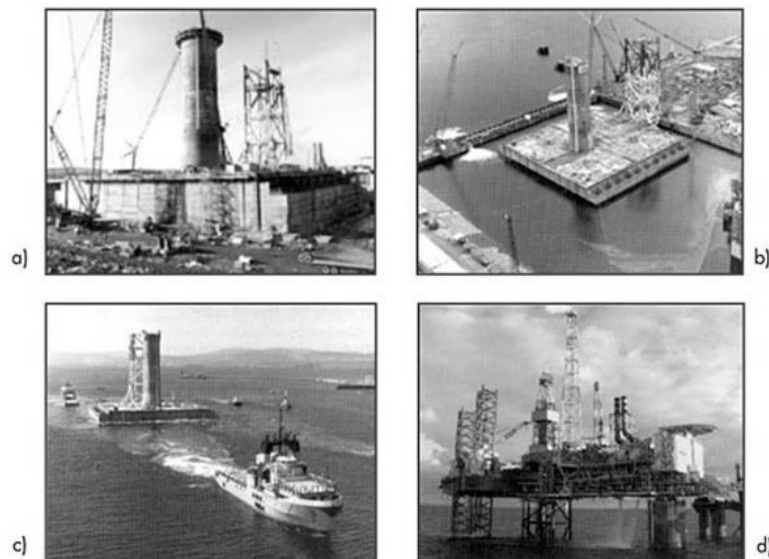


Fonte: FIB (2000), apud Rossignolo (2009)

A Figura 5 mostra que dos 301 m do vão central, 184 m, foram construídos utilizando concreto leve. Como de costume nas pontes da Noruega, os trechos restantes estão próximos aos pilares, e executados com concreto convencional.

O uso de concreto leve de alta resistência potencializa a fluabilidade e a durabilidade das plataformas marítimas. Assim, apresenta alto desempenho mesmo expostos em ambientes marítimos, que são altamente agressivos. Outra razão para a redução do peso das plataformas deve-se em função da maioria ser construída em estaleiros para posteriormente serem transportadas para o local de uso definitivo (HOLM e BREMNER, 1994). A plataforma petrolífera South Arne (Figura 6) é um exemplo clássico desta aplicação, foi construída em 1999, com concreto leve de  $1850 \text{ kg/m}^3$  e com  $F_{ck}$  de 62 MPa (ROSSIGNOLO, 2009).

Figura 6 – Plataforma petrolífera South Arne (Dinamarca): a) Construção da plataforma em doca seca; b) Inundação da doca; c) Transporte da plataforma; d) Plataforma apoiada no leito marítimo e em funcionamento.



Fonte: FIB (2000), adaptado por Rossignolo (2009)

## 2.3 MATERIAIS COMPONENTES

### 2.3.1 Aglomerantes

Aglomerantes são materiais pulverulentos que se hidratam em presença de água formando uma pasta resistente capaz de aglutinar agregados, dando origem as argamassas e concretos (RIBEIRO, 2011).

#### 2.3.1.1 Cimento Portland

A fabricação do cimento Portland é resultante da moagem de um produto denominado clínquer, obtido pela calcinação de uma mistura crua de calcário e argila, dosados e homogeneizados convenientemente. Após a queima é feita uma adição de gesso, a fim de impedir que as reações de hidratação entre o cimento e a água, quando da utilização do cimento, se processem instantaneamente. O clínquer é um produto que sai do forno em forma de nódulos escurecidos e que depois de resfriado e moído recebe a adição de gesso ( $\text{CaSO}_4$ -Sulfato de cálcio) (RIBEIRO, 2011).

Os cimentos se diferenciam, quanto as suas propriedades, não só pela composição química do clínquer, mas também por algumas adições tais como escória de alto-forno, pozolana, materiais carbonáticos e outras, que também vão definir determinadas características a serem consideradas quando do seu emprego.

Os Principais tipos de cimento Portland, normatizados pela ABNT, são os chamados:

- a) cimento Portland Comum - CP I;
- b) cimento Portland Composto - CP II (com adições de escória de alto-forno, pozolana e filer);
- c) cimento Portland de Alto Forno - CP III (com adição de escória de alto-forno, apresentando baixo calor de hidratação);
- d) cimento Portland Pozolânico - CP IV (com adição de pozolana, apresentando baixo calor de hidratação);
- e) cimento Portland de Alta Resistência Inicial – CP V (com maiores proporções de silicato tricálcico –  $\text{C}_3\text{S}$ , que lhe confere alta resistência inicial e alto calor de hidratação).

De acordo com a NBR 5733 (ABNT, 1991), o Cimento Portland de alta resistência inicial é um aglomerante hidráulico que atende às exigências de alta resistência inicial, obtido

pela moagem de clínquer Portland, constituído em sua maior parte de silicatos de cálcio hidráulicos, ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Durante a moagem é permitido adicionar a esta mistura materiais carbonáticos. O cimento Portland de alta resistência inicial é designado pela sigla CP V-ARI, a designação ARI representa o mínimo de resistência à compressão aos 7 dias de idade, ou seja, 34 MPa.

### 2.3.1.2 Sílica Ativa

A sílica ativa é um subproduto da fabricação de silício ou de ligas de ferro-silício. É constituída de partículas muito finas; é um tipo de gás transformado em pó pela oxidação com o ar e tem uma alta superfície específica (15.000 m<sup>2</sup>/kg a 25.000 m<sup>2</sup>/kg) (SIMPLÍCIO,1999).

As partículas da Sílica Ativa são esféricas, vitreas e possuem um diâmetro médio menor do que 1µm. Apresentando altíssima superfície específica e uma massa específica aparente baixa. O alto teor de SiO<sub>2</sub> (dióxido de silício) no formato amorfo (não cristalino), aliado a uma elevada finura, proporciona uma altíssima reatividade com os produtos decorrentes da hidratação do cimento, conferindo melhor desempenho em concretos (TECNOSIL, 2015).

Thomaz (2001) relata que o emprego de sílica ativa (“microsílica”) finamente pulverizada, com superfície específica da ordem de 25.000 m<sup>2</sup>/kg, atua beneficemente, resultando compostos estáveis, de elevada resistência mecânica.

A sílica ativa melhora a resistência a compressão em todas as idades, e também fornece significativamente maior resistência à penetração de cloretos. Quando adicionado Sílica ativa aos concretos com agregados leves estruturais, todas as propriedades de força são melhoradas: compressão, tração, de flexão, de cisalhamento etc. Em geral as melhorias de força em concretos leve estruturais chegam a um teto de força mais cedo comparado ao concreto convencional. (HOLM e BREMNER, 2000).

### 2.3.2 Agregados

A redução do efeito das variações volumétricas provocadas pela retração por secagem, aliado ao baixo custo dos agregados frente ao custo do cimento, os tornam usuais como material de enchimento inerte no concreto (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Apesar de serem considerados inertes, os agregados influenciam muitas propriedades do concreto no

estado fresco e endurecido, especialmente, a trabalhabilidade, as propriedades mecânicas, a estabilidade dimensional, a durabilidade (CASTRO, 2007), e a massa específica (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A otimização da composição granulométrica dos agregados fornece ao concreto ganhos econômicos e aumento na resistência mecânica. A mistura granular deve buscar a máxima compactidade, de forma a apresentar o menor volume de vazios possível, essa busca pelo empacotamento ideal se torna ainda mais importante na produção de concretos que visa resistências elevadas (CARNEIRO *et al.*, 2002).

A NBR 7211 (ABNT, 2009) define o agregado miúdo como aquele cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm, conforme o ensaio estabelecido na NBR NM 248 (ABNT, 2003). Ao passo que o agregado com grãos passantes na peneira com abertura de malha de 75 mm e retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm, conforme o ensaio estabelecido na NBR NM 248 (ABNT, 2003), é definido como agregado graúdo. Neste estudo será utilizado como agregado miúdo, areia natural fina e argila expandida 0500 (substituição da areia grossa), e como agregado graúdo, argila expandida 1506.

Segundo Rossignolo (2003), a substituição parcial do agregado miúdo leve por areia natural quartzosa não interfere no comportamento da curva tensão-deformação e visa otimizar a distribuição granulométrica do conjunto de agregado. Beneficiando com isso, algumas características e propriedades dos concretos, das quais se destacam o aumento da resistência mecânica, e a melhora da trabalhabilidade sem aumentar o consumo de cimento.

#### 2.3.2.1 Areia natural

A seleção da areia é determinada tanto pelo seu efeito no consumo de água como pelo seu empacotamento físico (MENDES, 2002). Quanto à forma e à procedência das partículas, pode ser usada areia artificial, com uma forma mais angular, em função do processamento por britagem de rocha, ou areia natural, com os grãos mais arredondados e lisos (MALLMANN, 2013). Gutiérrez e Cánovas *apud* Mendes (2002) recomendam o uso de areia natural de rio no intuito de proporcionar um menor consumo de água.

Independente da origem, a areia deve atender aos limites máximos apresentados na NBR 7211 (ABNT, 2009) referentes à presença de substâncias nocivas, das quais devem ser consideradas: impurezas orgânicas, material pulverulento, materiais carbonosos, torrões de argila e materiais friáveis.

No caso dos concretos de Alta Resistência com adição de sílica ativa, devido ao alto teor de finos, é recomendável a redução do consumo de areia e/ou o uso de areia com maior módulo de finura (ALMEIDA, 1990; DAL MOLIN, 1995 *apud* Mendes, 2002).

#### 2.3.2.2 Argila Expandida

Muitas propriedades dos concretos são alteradas com a substituição dos agregados convencionais por agregados leves, dentre as principais, Rossignolo (2003, p.11) destaca “a massa específica, a trabalhabilidade, a resistência mecânica, o módulo de elasticidade, as propriedades térmicas, a retração, a fluência e a espessura da zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento”.

Para Rossignolo (2009), quanto à origem, os agregados leves podem ser classificados em naturais, extraídos diretamente de jazidas e classificados de acordo com sua granulometria, tais como a pedra-pomes e as escórias vulcânicas, ou em artificiais, obtidos em processos industriais a partir de matérias primas naturais como argila, folhelo, vermiculita, ardósia e de subprodutos industriais como a cinza volante e a escória de alto forno. Sendo os agregados artificiais diferenciados quanto ao processo de fabricação, podendo ser obtidos através do processo de sinterização ou de forno rotativo. Maycá *et al.*(2009) diz que em comum, todos os agregados leves têm como característica principal a microestrutura celular ou altamente porosa que resulta em uma baixa massa específica.

A denominação argila expandida é atribuída em função da expansão que a matéria prima argila é exposta durante o processo de queima no forno rotativo. Segundo Neville (1997) *apud* Schwantes (2012), normalmente, os concretos produzidos com agregados de argila expandida propiciam maior resistência do que com qualquer outro agregado leve.

Atualmente, o Brasil contempla um fabricante de argila expandida, situado na cidade de Várzea Paulista a 60 km da cidade de São Paulo. De acordo com Rossignolo (2009), as argilas expandidas são beneficiadas em faixas granulométricas variadas para atender o mercado da construção civil, da indústria têxtil e de ornamentação. Os agregados comumente aplicados em concretos estruturais são os denominados comercialmente de Cinexpan 0500 (dimensões entre 0 e 5 mm), Cinexpan 1506 (dimensões entre 6 e 15 mm) e Cinexpan 2215 (dimensões entre 15 e 22 mm).

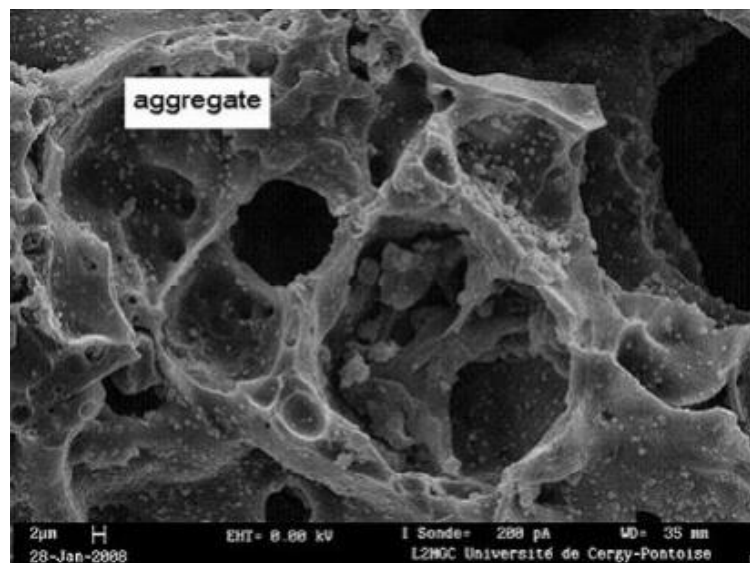
Rossignolo (2009, p.34) retrata como se apresenta os agregados produzidos pelo processo de forno rotativo, dos quais engloba a argila expandida:

Normalmente, apresentam granulometria variada, formato arredondado regular e âmago formado por uma massa esponjosa micro-celular, envolta por uma casca cerâmica vitrificada, resistente e com baixa permeabilidade, que confere ao agregado uma porosidade fechada.

A camada externa e a forma esférica desses grãos possibilitam obter concreto de boa trabalhabilidade, mesmo com baixas relações água/aglomerante. No entanto, a forma esférica torna a argila expandida mais vulnerável a segregação, quando comparada aos agregados produzidos por sinterização (CEB/FIP, 1977 *apud* Rossignolo, 2003).

Quanto à estrutura interna, Rossignolo (2009) afirma que quanto mais porosa for a estrutura do agregado, menor será a resistência do mesmo. Contudo, conforme o supracitado autor, existem técnicas que podem contrapor essa regra, por exemplo, agregados como a argila expandida que contém a redução da porosidade de forma estratégica, em algumas áreas específicas, além da distribuição uniforme de finos poros, certamente, apresentam resistência mecânica superior aqueles agregados de mesmo grau de porosidade, porém, com poros de grandes dimensões, distribuídos irregularmente, e sem capa externa de baixa permeabilidade. Um exemplo de distribuição de poros é apresentado na Figura 7 com a estrutura interna de uma argila expandida.

Figura 7 - Imagem de Microscopia Eletrônica de Varredura da Estrutura interna de uma argila expandida



(Fonte: Ke, *et al.*, 2010 *apud* MENDES, 2014)

Considerando que a diferença entre a resistência à compressão da matriz de cimento e do cimento é proporcional à divergência entre os valores do módulo de deformação da



matriz de cimento e do agregado, Rossignolo (2009, p.38) afirma que “o aumento do módulo de deformação do agregado leve aumenta também os valores da resistência à compressão e o do módulo do concreto”.

Recomenda Rossignolo (2009), para argilas expandidas com altos valores de absorção de água, a pré-saturação para não interferir na consistência do concreto, para inibir o surgimento de bolhas de ar em torno do agregado, e por fim, para reduzir a absorção de água após a mistura. Quanto ao estado endurecido, a alta quantidade de água absorvida pelo agregado aumenta a retração por secagem e a massa específica, que por consequência, reduz a resistência ao fogo. Em contrapartida, a absorção de água se mostra benéfica na cura interna do concreto, e nas propriedades da zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento.

Tutikian *et al.* (2011) aconselham selecionar agregados sem a presença de material pulverulento, para tanto, recomendam a lavagem dos agregados para a remoção do pó e para melhorar a aderência na ligação agregado-pasta. A prática deste procedimento fornece aumento de até 8% na resistência à compressão de um Concreto de Alta Resistência (ALMEIDA, 1994; FONSECA SILVA *et al.*, 1998 *apud* MENDES, 2002).

De acordo com Tutikian *et al.* (2011), na fração graúda de agregados, os de maior dimensão são menos resistentes por conter mais falhas na sua microestrutura, e são responsáveis por aumentar a espessura da zona de transição. Em pesquisa realizada por Rossignolo (2009), foi observado que a resistência ótima dos concretos produzidos com argila expandida de  $D_{máx} = 12,5$  mm apresentou-se 17% superior à resistência dos concretos com argila expandida de  $D_{máx} = 19$  mm. A dimensão máxima das argilas expandidas, assim como outras influências que tais agregados proporcionam à resistência mecânica do concreto, está exposta de forma mais detalhada no item 2.5.4.

### 2.3.3 Aditivos Químicos

Bauer (1994) define aditivo como todo produto não indispensável à composição e finalidade do concreto, que colocado na betoneira imediatamente antes ou durante a mistura do concreto, em quantidades geralmente pequenas e bem homogêneas, faz aparecer ou reforça certas características.

A NBR 11768 (ABNT, 2011) fixa condições exigíveis de materiais a serem utilizados como aditivo em concreto de cimento Portland, de acordo com os tipos: aditivo redutor de água/plastificante (PR, PA, PN); aditivo de alta redução de água/superplastificante tipo I (SP-I R, SP-I A, SP-I N); aditivo de alta redução de água/superplastificante tipo II (SP-

II R, SP-II A, SP-II N); aditivo incorporador de ar (IA); aditivo acelerador de pega (AP); aditivo acelerador de resistência (AR); aditivo retardador de pega (RP).

No estudo experimental será usado o tipo SP-I N- aditivo superplastificante neutro, tipo RP- retardador ou inibidor de hidratação neutro e o desincorporador de ar, que ainda não se encontra normatizado na NBR 11768 (ABNT, 2011).

#### 2.3.3.1 Superplastificantes

A NBR 11768 (ABNT, 2011) define aditivo superplastificante (tipo SP-I N) como produto que aumenta o índice de consistência do concreto mantida a quantidade de água de amassamento, ou que possibilita a redução de, no mínimo, 12% da quantidade de água de amassamento, para produzir um concreto com determinada consistência.

De acordo com dados fornecidos pelo fabricante RheoSet (2015), os superplastificantes são produtos de última geração baseados em polímeros de éteres carboxílicos modificados. O excelente efeito dispersante deste aditivo sobre as partículas de cimento possibilita a fabricação de concretos com relação água / cimento extremamente baixas, com elevada plasticidade e elevado tempo de manutenção da mesma, obtendo-se dessa maneira ganhos significativos das resistências mecânicas iniciais e finais dos concretos. É constituído por polímeros de éter carboxílico com largas cadeias laterais.

O processo de mistura se dá com o mecanismo de dispersão eletrostática, as cadeias laterais, enxertadas à estrutura polimérica principal, geram um efeito dispersante e estável nas partículas de cimento, chamado de repulsão estérica. Com este processo obtém-se um concreto fluido com uma grande redução da quantidade de água de amassamento simultaneamente à manutenção de elevada plasticidade ao longo do tempo.

Segundo Neville (2013), o superplastificante faz com que o cimento se disperse pela ação do ácido sulfônico absorvido à superfície das partículas de cimento, tornando-as carregadas negativamente e, portanto, mutuamente repelentes. Isso aumenta a trabalhabilidade para uma determinada relação água/cimento, sendo típico um aumento do abatimento de tronco de cone de 75 mm para 200 mm.

#### 2.3.3.2 Inibidor de hidratação

A NBR 11768 (ABNT, 2011), define os inibidores como retardador do tipo (RP), que aumenta os tempos de início e fim de pega do concreto. Estabelece requisito de

desempenho para concretos de cimento portland comum, como o tempo de pega mínimo de 90 minutos e fim de pega não mais que 360 minutos.

Barcelos (2011), diz que a ação do aditivo inibidor de hidratação, produz uma alteração no comportamento da pasta cimento, retardando a cristalização e o endurecimento da família de silicatos hidratados - CSH, principal produto do cimento portland hidratado, proporcionando um aumento considerável no tempo de início e fim de pega.

#### 2.3.3.3 Desincorporador de ar

O aditivo desincorporador de ar é especialmente indicado em concretos de baixa massa específica, pois ajuda na redução da segregação e da exsudação, aumentando a coesão do concreto, além de contribuir no ganho de resistência mecânica (RHEOSET, 2015).

Freitas (2008) descreve que o aditivo desincorporador de ar produz alteração na tensão superficial. O mecanismo mais importante de ação destes aditivos é por espalhamento sobre a superfície da espuma, ou pela penetração da mesma. Ao baixar a tensão superficial, a película de líquido não consegue manter o ar aprisionado, dessa forma a espuma se destrói.

#### 2.3.4 Água

O concreto endurece por reação de hidratação, a água ao lado do aglomerante é constituinte fundamental (TANGO, 2003). Seguindo este raciocínio, é importante manter o controle de qualidade para a água de amassamento. Para isso, a NBR 15900-1 (ABNT, 2009) especifica em função da origem, os teores máximos toleráveis de substâncias nocivas para a água, inclusive na forma de gelo.

Não existem diferenças de requisitos para a água de amassamento utilizada na produção de um concreto leve de alta resistência e de um concreto convencional. Conforme a NBR 15900-1 (ABNT, 2009), a água potável, que atende à Portaria nº 518 do Ministério da Saúde, pode ser utilizada sem restrição para a preparação de concreto. No entanto, os problemas majoritários referentes à água, não são originados nas propriedades, mas sim na relação água/aglomerante empregada no momento de produção do concreto.

## 2.4 DOSAGEM

Segundo Rossignolo e Agnesini (2011), citado por Mendes (2014), o concreto leve pode ser dosado utilizando os métodos tradicionais, desde que considere algumas variáveis complementares:

- a) a massa específica do produto final é geralmente pré-estabelecida;
- b) a variação da massa específica do agregado leve em função de sua dimensão;
- c) a absorção de água através dos poros superficiais do agregado leve;
- d) a influência das características particulares dos agregados leves nas propriedades do concreto.

Os métodos de dosagem para o CAR são, em sua maioria, caracterizados por baixas relações água/aglomerante, altos consumo de cimento, uso de adições e de vários aditivos, sobretudo, superplastificante (JUCÁ *et al.*, 2001). Além destas características, o CLAR apresenta como diferencial, a substituição total ou parcial dos agregados convencionais por agregados de baixa massa específica. Para Rossignolo (2003), é fundamental que nessa substituição seja determinada o teor ótimo de cada tipo de agregado, em relação a granulometria.

De acordo com a NBR 12655 (ABNT, 2015), o proporcionamento do concreto de resistência à compressão igual ou superior a 20 MPa, a ser aplicado na obra, deve ser fixado através de dosagem racional e experimental. Custódio (2015) define a dosagem experimental como aquela elaborada através de dados fornecidos de misturas experimentais com amostras dos materiais que serão aplicados em obra, sendo necessário, ensaio de caracterização dos materiais em laboratório e de determinação das propriedades dos concretos, obtidos por meio das misturas experimentais.

## 2.5 PROPRIEDADES

### 2.5.1 Consistência

A consistência do concreto se dá pela quantidade de água empregada por m<sup>3</sup>, e está relacionada a mobilidade e coesão entre seus componentes. A NBR 8953 (ABNT, 2009) classifica os concretos pela sua consistência no estado fresco, determinada a partir do ensaio realizado no estado fresco pela NBR NM 67 (ABNT, 1988), de acordo com a Tabela 2.

Com a tecnologia a favor da construção, é possível conseguir uma consistência mais fluida, com redução do fator (a/c), utilizando aditivos químicos que promovem a dispersão das partículas, e adições minerais. Podendo assim chegar à consistência de projeto, com a produção de concretos com trabalhabilidade adequada (quando no estado fresco) e alta resistência mecânica e durabilidade (quando no estado endurecido) (DANTAS, 2013).

Quadro 01 - Classes de Consistência

Classe	Abatimento (mm)	Aplicações Típicas
S10	$10 \leq A < 50$	Concreto extrusado, vibro prensado ou centrifugado
S50	$50 \leq A < 100$	Alguns tipos de pavimentos, de elementos de fundações e de elementos pré-moldados ou pré-fabricados
S100	$100 \leq A < 160$	Elementos estruturais correntes como lajes, vigas, pilares, tirantes, pisos, com lançamento convencional do concreto
S160	$160 \leq A < 220$	Elementos estruturais correntes como lajes, vigas, pilares, tirantes, pisos, paredes diafragma, com concreto lançado por bombeamento, estacas escavadas lançadas por meio de caçambas.
S220	$> 220$	Estruturas e elementos estruturais esbeltos ou com alta densidade de armaduras com concreto lançado por bombeamento, lajes de grandes dimensões, elementos pré-moldados ou pré-fabricados de concreto, estacas escavadas lançadas por meio de caçambas.
<p>NOTA 1 De comum acordo entre as partes podem ser criadas classes especiais de consistência explicitando a respectiva faixa de variação do abatimento.</p> <p>NOTA 2 Os exemplos desta tabela são ilustrativos e não abrangem todos os tipos de aplicações.</p>		

Fonte: NBR 8953 (ABNT, 2009).

### 2.5.2 Interação entre agregado e a pasta

Estudo realizado por Rossignolo (2009), mostra que a argila expandida promove a redução da espessura da zona de transição assim como da porosidade e do teor de hidróxido de cálcio ( $\text{CaOH}_2$ ), em função da diminuição da relação água/cimento da pasta nessa região pela absorção de água do agregado leve, efeito esse denominado de “filtragem” ou “densificação”.

A redução da espessura e a melhoria da qualidade da zona de transição pasta/agregado promovida pela argila expandida, assim como a maior similaridade entre os valores do módulo de deformação do agregado leve e da argamassa, contribuem para a utilização mais eficiente da resistência mecânica potencial da argamassa em concretos com

agregados leves e para o aumento do trecho linear da curva tensão/deformação, até cerca de 80% do carregamento último, enquanto nos concretos com agregados convencionais esse valor é de cerca de 60% (ROSSIGNOLO, 2009).

Nos estudos realizados por Khokhrin (1973) *apud* Rossignolo (2009) 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, observou-se que a zona de transição pasta-agregado apresentou resistência à compressão entre 9 MPa e 15 MPa, enquanto a pasta de cimento apresentou valores variando entre 6 MPa e 8 MPa.

Algumas pesquisas apresentam resultados demonstrando que as adições minerais são capazes de produzir uma significativa redução da espessura da zona de transição pasta-agregado, contribuindo, dessa forma, para a melhoria do desempenho das propriedades relacionadas à resistência mecânica e à durabilidade do concreto. Rossignolo (2009), diz que nos estudos desenvolvidos por Monteiro e Mehta (1986 e 1988), foi verificado que a espessura da zona de transição variou de 50  $\mu\text{m}$ , para concreto sem adições minerais, para valores inferiores a 10  $\mu\text{m}$  em concretos com sílica ativa.

### 2.5.3 Resistência à compressão

A NBR 5739 (ABNT, 2007) estabelece como os corpos de prova cilíndricos de concreto devem ser ensaiados à compressão. Os resultados obtidos neste ensaio fornecem, em diferentes idades, a resistência à compressão individual dos corpos de prova. Normalmente, é a propriedade mecânica mais importante na caracterização do concreto leve.

Para Mehta e Monteiro (1994), a resistência à compressão do concreto tem uma relação intrínseca com a qualidade da matriz de cimento, dos agregados, e da sua zona de transição. O modo em que a amostra e o carregamento são submetidos também influencia na resistência à compressão, conforme apresentado na Figura 8 pelos supracitados autores.

Figura 8 - Fatores influentes na definição da resistência à compressão do concreto



Fonte: (MEHTA E MONTEIRO, 1994)

O alto teor de cimento e o uso de aditivos e de adições, melhora a qualidade da pasta cimentícia, da mesma forma que a similaridade entre os valores do módulo de deformação do agregado leve e da matriz proporciona uma melhora na qualidade da zona de transição agregado-matriz. Assim, com a melhoria na qualidade da matriz e na interface de matriz agregado, somada à baixa resistência mecânica dos agregados leves se pode afirmar que no CLAR o agregado leve é o maior limitante da resistência mecânica (ROSSIGNOLO, 2003). Complementa Aitcin (2000), para cada agregado graúdo existe um valor para a resistência à compressão da pasta de cimento, denominado resistência ótima, acima do qual já não contribui de forma significativa para o aumento da resistência à compressão do CLAR.

São alternativas para aumentar as resistências mecânicas, mudar o tipo e a granulometria do agregado leve graúdo. A redução da dimensão do agregado leve aumenta a resistência à compressão, no entanto, aumenta também a massa específica, considerando que o valor da massa específica dos agregados leves é inversamente proporcional à dimensão (ROSSIGNOLO, 2009).

Geralmente, aos 7 (sete) dias o concreto leve de alta resistência já ultrapassa 80% da resistência à compressão observada aos 28 dias de idade (EUROLIGHTCON, 1998). Esse comportamento é atribuído por Rossignolo (2003) à baixa resistência mecânica do agregado leve. Os autores pesquisados por Mendes (2002) complementam atribuindo aos seguintes fatores:

- a) alto consumo de cimento no CAR - Responsável por aumentar o calor de hidratação, ainda mais perceptível nos cimentos do tipo CP V ARI;
- b) baixa relação água/aglomerante no CAR - Proporciona maior compactação entre as partículas, e redução da porosidade e da dimensão dos poros;
- c) uso de sílica ativa no CAR - Falta água para hidratação adicional conforme aumenta a idade do concreto.

A equação 1 é apresentada por Spitzner (1994) e Holm (2000) como um parâmetro para avaliar a eficiência da relação entre a resistência à compressão e a massa específica, chamada Fator de Eficiência (FE). Essa equação é importante na determinação de traços ótimos de um CLAR. Por exemplo, ao comparar dois concretos de mesma massa específica e de traços diferentes, um concreto pode ter uma resistência à compressão consideravelmente superior ao outro, por conseguinte, maior fator de eficiência.

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

$f_c$  = resistência à compressão (MPa);

$\gamma$  = massa específica aparente ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ ).

#### 2.5.4 Durabilidade

Estudos mostram que a durabilidade do concreto está associada a permeabilidade e a zona de transição entre a pasta e o agregado. A avaliação da durabilidade do concreto deve-se dar atenção especial a sua estrutura porosa, isto é, se a porosidade é constituída por poros conectados ou não. Assim, é essencial a distinção entre sistemas fechados ou abertos quando se pretende avaliar a relação entre a porosidade e a permeabilidade (ROSSIGNOLO, 2009).

De acordo com Rossignolo (2009), a sílica ativa, quando adicionada na pasta cimento, reduz a porosidade e a quantidade de hidróxido de cálcio, melhorando a qualidade da zona de transição pasta-agregado, com isso proporciona um aumento da proteção da armadura contra a ação dos agentes agressivos.

Um dos principais problemas associados à durabilidade do concreto armado exposto em ambiente marinho está relacionado com a corrosão da armadura pela ação de íons cloreto. Estudos apresentados por Rossignolo (2003) indicam valores semelhantes de difusão de íons cloreto em concretos produzidos com argila expandida e com agregados convencionais, demonstrando, assim, a baixa influência do agregado na resistência do concreto leve à penetração e difusão de íons cloretos.

#### 2.5.5 Módulo de deformação

O valor do módulo de deformação para concretos leves com valores de resistência à compressão entre 20 e 50 MPa mostra-se em torno de 20% a 50% menor ao observado nos concretos convencionais de mesma resistência à compressão (EUROLIGHTCON, 1998). A principal explicação para o concreto leve apresentar menor módulo de deformação, está no fato dos agregados leves apresentarem valores do módulo de deformação relativamente baixos em relação aos encontrados nos agregados tradicionais (ROSSIGNOLO, 2009).

De acordo com Zhang & GjØrv (1991) apud Rossignolo (2003), o desempenho da interface agregado-matriz junto à resistência e a quantidade de agregados graúdos leves influenciam diretamente o módulo de deformação do concreto leve.

Na análise desenvolvida por Carrasquillo *et al.* (1981), a curva tensão-deformação dos concretos produzidos com argila expandida nacional mostra-se uma linearidade no trecho ascendente até cerca de 80% da resistência final. Ao passo que, nos concretos convencionais



esse valor é cerca de 60%. Segundo Rossignolo (2011), este melhor comportamento do concreto leve no regime elástico, deve-se a maior compatibilidade entre os valores do módulo de deformação da pasta de cimento e dos agregados leves.

Guimarães (2002) afirma que a semelhança do valor do módulo de deformação da pasta de cimento e dos agregados fornece uma adequada distribuição de tensões entre matriz e agregados, e ainda atenua a fissuração da interface pasta agregado quando houver contração na pasta devido ao endurecimento.

### **2.5.6 Propriedades térmicas, acústicas e resistência ao fogo**

Para Morales *et al.* (2011), o fato do concreto ser um material composto por diferentes constituintes, faz com que ele se torne vulnerável ao fogo, uma vez que os materiais reagem de forma diferentes.

A condutividade térmica do concreto depende, principalmente, do seu conteúdo de umidade e densidade, mas também é influenciada pelo tamanho e distribuição dos poros, a composição química dos componentes sólidos, a sua estrutura interna (cristalina ou amorfa) e a temperatura de ensaio. Materiais cristalinos (por exemplo, quartzo), conduzem mais calor do que materiais amorfos como (argilas, cerâmicas etc. calcinado) (HOLM e BREMNER, 2000).

O ar aprisionado na estrutura celular dos agregados leves reduz a absorção e a transferência de calor em relação aos agregados convencionais. Com isso, a utilização do concreto leve na vedação das fachadas e na cobertura das edificações reduz a absorção e a transferência para o ambiente interno do calor proveniente da radiação solar (EUROLIGHTCON, 1998; HOLM; BREMNER, 2000 *apud* ROSSIGNOLO, 2009).

Estudo realizado por Sacht, Rossignolo e Santos (2009), avaliou a condutividade térmica de concretos com massa específica entre 1200 kg/m<sup>3</sup> e 2400 kg/m<sup>3</sup>, no qual obteve resultados variando de 0,54 W/m.°K e 1,8 W/m.°K.

Neville (1997) *apud* Swhwantes (2012) cita que o desempenho do concreto leve é em geral maior do que quando se usa concretos preparados com agregados convencionais, porque os concretos leves com a elevação da temperatura perdem uma menor fração da sua resistência inicial e apresentam menor tendência à fragmentação.

Quanto às propriedades acústicas, a argila expandida possui elevada capacidade de isolamento acústico, por possuir micro porosidade fechada, isso faz com que os ruídos e sons externos sejam absorvidos.

### **3. PROGRAMA EXPERIMENTAL**

A pesquisa experimental foi desenvolvida nas dependências do Laboratório de Materiais de Construção Civil do Centro Tecnológico da UniEVANGÉLICA, por meio de 3 etapas distintas. Na etapa inicial, foram estabelecidos limites para a massa específica e para a resistência à compressão, na idade de 28 dias.

Na segunda etapa, foram levantados dados referentes à caracterização dos materiais, fornecidos pelos fabricantes de cada material componente. Para os agregados, foi incluído o ensaio proposto pela NBR NM 248 (ABNT, 2003) com a finalidade de determinar a sua composição granulométrica (módulo de finura e diâmetro máximo). Subsequentemente, com base nas referências teóricas foi analisado o efeito que diferentes materiais exercem nas propriedades do concreto, para assim, definir proporções de materiais capazes de atender os limites esperados. Muitos parâmetros de dosagem foram determinados utilizando como referência, o programa de dosagem do Rossignolo (2003), ao passo que, outros parâmetros foram determinados de forma experimental. O presente estudo de dosagem resultou na elaboração de 05 (cinco) traços distintos.

Por fim, a pesquisa experimental foi direcionada para a produção do CLAR. Nesta etapa, além da produção, foram escolhidos o tipo de misturador e de adensamento e, preparados os moldes dos corpos de prova. 24 horas após a moldagem, os corpos de prova ficaram armazenados em câmara úmida até a idade de 28 dias, data em que foram pesados no estado endurecido e rompidos.

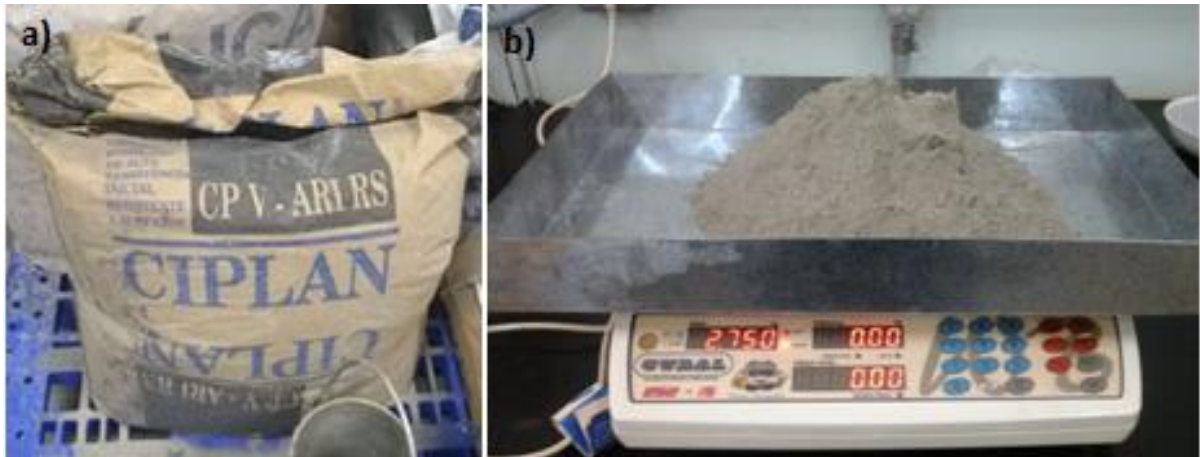
#### **3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS**

##### **3.1.1 Aglomerantes**

###### **3.1.1.1 Cimento Portland**

Foi utilizado o Cimento Ciplan CPV ARI- RS, que tem a peculiaridade de atingir altas resistências já nos primeiros dias da aplicação. Esse cimento tem massa específica de  $3.100 \text{ kg/m}^3$ .

Figura 9 – a) Cimento utilizado. b) Dosagem do cimento para a preparação do concreto

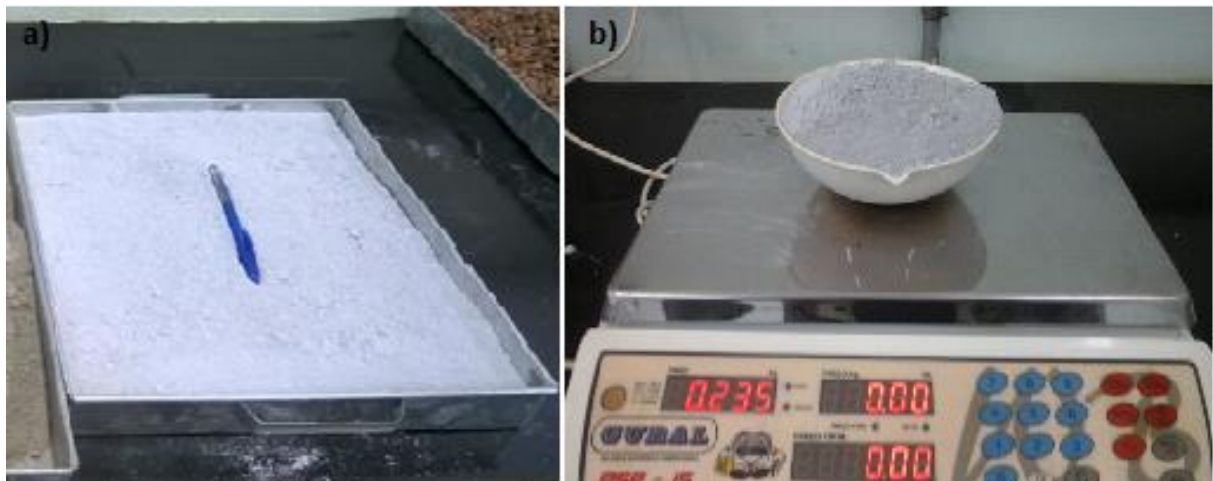


Fonte: Próprios autores, 2015.

### 3.1.1.2 Sílica Ativa

A sílica ativa utilizada foi do fabricante Tecnosil. Conforme informações do fabricante, a sílica possui as seguintes características físicas e químicas: Alto teor de  $\text{SiO}_2$  (Dióxido de silício) > 85%, superfície específica de 20.000  $\text{m}^2/\text{kg}$ ; formato das partículas esférico e massa específica de 2.220  $\text{Kg}/\text{m}^3$ .

Figura 10 – a) Sílica Ativa. b) Dosagem da sílica para a preparação do concreto



Fonte: Próprios autores, 2015.

### 3.1.2 Agregados

#### 3.1.2.1 Areia natural

Com o intuito de aumentar a resistência mecânica, e melhorar a trabalhabilidade, sem aumentar o consumo de cimento e a massa específica, foi substituído parcialmente o agregado leve miúdo por areia natural de rio.

Para a determinação da composição granulométrica da areia natural utilizada foi realizado o ensaio de uma amostra, conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003), e obtido a dimensão máxima característica ( $D_{m\acute{a}x}$ ) de 2,36 mm e módulo de finura 2,05. A porcentagem, em peso, retida acumulada da areia nas peneiras de série normal foi equivalente a porcentagem da zona 2 (tipo fina), estabelecida na NBR 7211 (ABNT, 1983).

Figura 11 – a) Areia natural b) Dosagem da areia para a preparação dos concretos



Fonte: Próprios autores, 2015.

#### 3.1.2.2 Argila Expandida

Foi utilizada no presente trabalho como agregado graúdo, a argila 1506 e, como parte do agregado miúdo, a argila 0500 da Cinexpan. Ambas são constituídas de uma crosta micro porosa rígida e de alta resistência, com o interior formado por uma massa cerâmica porosa, conforme fabricante.

Após o ensaio de granulometria, determinou-se a dimensão máxima característica e o módulo de finura da argila 1506 utilizada. O valor obtido para o diâmetro máximo foi de 9,5 mm e para o módulo de finura 5,98; exceto para a argila 1506 utilizada no traço 2, que apresentou diâmetro máximo de 19 mm e módulo de finura 6,75.

Para a argila expandida 0500 da Cinexpan, foi realizado o mesmo procedimento, obtendo um diâmetro máximo de 4,75 mm e módulo de finura 3,4. Estando dentro da faixa granulométrica classificada como agregado miúdo em substituição à areia grossa, conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009).

Segundo dados do fabricante, as argilas da Cinexpan apresentam as seguintes características:

Tabela 2 – Características das argilas expandidas 1506 e 0500 Cinexpan

CARACTERÍSTICAS	CLASSES GRANULOMÉTRICAS NOMINAIS	
	1506	0500
Resistência à compressão p/esmagamento (Mpa)	12	20
Massa volumétrica seca (Kg/m <sup>3</sup> )	600	850
Classes granulométricas (mm)	6 - 15	0 - 5
Condutibilidade térmica (kcal)/(hm°C))	0,11	-
Absorção de água por imersão ( % em volume 24 hs)	7	6
Compactabilidade (%)	< 10	< 10
Massa específica ( kg/dm <sup>3</sup> )	1,11	1,4
Resistência ao fogo	Incombustível: Classe MO	
Variações ponderáveis em ambientes seco/úmido	Material não higroscópico*	

\*material inerte químico-não reage com outros produtos

Figura 12 – a) Argila 1506 b) Dosagem da argila 1506 para a preparação dos concretos c) Argila 0500. d) Dosagem da argila 0500 para a preparação dos concretos



Fonte: Próprios autores, 2015.

### 3.1.3 Aditivos químicos

#### 3.1.3.1 Superplastificantes

Foi utilizado o TEC FLOW-8000- A, aditivo superplastificante para concreto a base de policarboxilatos, do fabricante Rheoset-Grace. É um líquido alaranjado com massa específica entre 1,080 a 1,120 g/cm<sup>3</sup>.

Figura 13 – a) Aditivo utilizado Tec Flow-8000 A.  
b) Dosagem do aditivo para a preparação dos concretos



Fonte: Próprios autores, 2015.

#### 3.1.3.2 Inibidor de hidratação

Utilizou-se o aditivo Inibidor ECOTEC 20 do fabricante Rheoset. Líquido de aspecto levemente amarelado, PH entre 11,00 a 13,00 e, massa específica entre 1,100 a 1,140 g/cm<sup>3</sup>.

Figura 14 – a) Aditivo utilizado Eco Tec 20.  
b) Dosagem do aditivo para a preparação dos concretos.



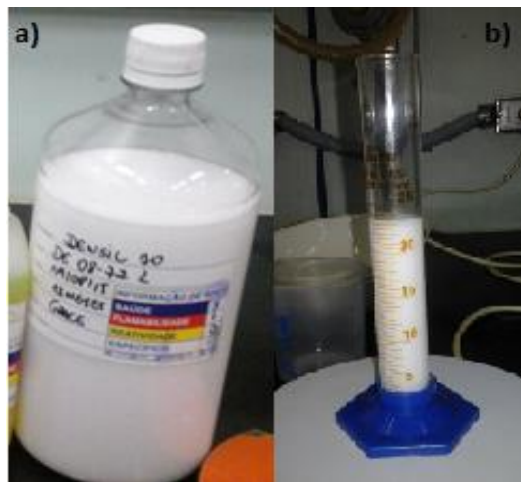
Fonte: Próprios Autores, 2015.



### 3.1.3.3 Desincorporador de ar

O desincorporador utilizado foi o Densil 10, do fabricante Rheoset. É um produto formulado com agentes antiespumantes especiais, que tem a capacidade de proporcionar um excepcional efeito de desincorporação de ar. É um líquido branco com massa específica de  $1000 \text{ kg/m}^3$ .

Figura 15 – a) Aditivo utilizado Densil 10. b) Dosagem do aditivo para a preparação dos concretos.

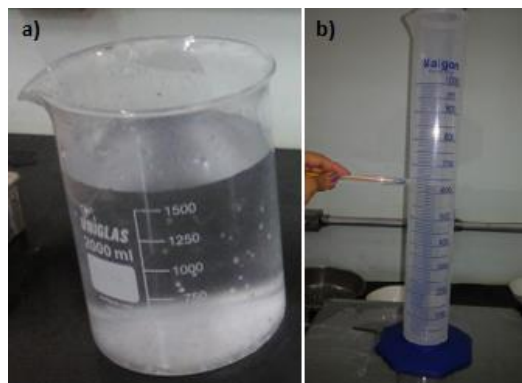


Fonte: Próprios Autores, 2015.

### 3.1.4 Água de amassamento

Para o amassamento foi utilizada água tratada fornecida pela Concessionária local: Saneamento de Goiás (SANEAGO), com massa específica de  $1000 \text{ kg/m}^3$ .

Figura 16 – a) Água potável tratada. b) Dosagem da água para a preparação dos concretos.



Fonte: Próprios Autores, 2015.

### 3.2 DOSAGEM EXPERIMENTAL

Desenvolveu-se um processo de dosagem predominantemente experimental. Alguns parâmetros de dosagem foram estabelecidos através de recomendações dos fabricantes, da NBR 12655 (ABNT, 2015), e dos pesquisadores Rossignolo (2003), Aïtcin (2000), Holm e Bremner (1992). Assim, a proporção dos materiais foi determinada por meio de experimentos ou recomendações, na seguinte sequência:

#### **a) Definição das propriedades mecânicas e características físicas desejadas para o concreto no estado endurecido**

Considerando os limites de massa específica apresentados no objetivo do estudo e a resistência mínima estabelecida por Holm e Bremner (1992) para um concreto ser denominado leve de alta resistência, foram fixados para todos os traços uma resistência de projeto igual a 34,5 MPa, para um intervalo de massa específica entre 1600 kg/cm<sup>3</sup> e 1660 kg/cm<sup>3</sup>.

Devido às condições de variabilidade presentes durante a concretagem, a NBR 12655 (ABNT, 2015) recomenda calcular a resistência de dosagem ( $F_{cmj}$ ), segundo a equação:

$$F_{cmj} = f_{ck} + 1,65 * sd \quad (2)$$

Em que:  $f_{cmj}$  = resistência média do concreto a j dias de idade, em MPa;

$f_{ck}$  = resistência característica do concreto à compressão, em MPa;

$sd$  = desvio-padrão da dosagem, em MPa.

Para a classe de resistência de projeto fixada acima, a condição de preparo do concreto deve ser a denominada como “A”, a qual apresenta um desvio-padrão de 4 MPa. Para uma idade de 28 dias, a resistência média prevista é de 41,1 MPa.

#### **b) Determinação da relação água aglomerante e do teor de superplastificante**

No intuito de analisar a compatibilidade entre aglomerantes e o aditivo superplastificante, foi realizado uma mistura experimental entre os materiais. Observou-se que o teor de solução de aditivo superplastificante igual a 1,75% da massa de cimento, foi suficiente para obter uma mistura com relação água aglomerante igual a 0.21, a menor relação



possível para tornar a mistura “trabalhável”. Assim, adotou-se a mesma relação a/agl e o mesmo teor de superplastificante para os traços finais, exceto o traço 5 que teve um teor de superplastificante igual a 1,65%, em função da maior relação a/alg. A água presente nos aditivos foi considerada, porém não foi descontada da água de amassamento.

### c) Determinação do teor ótimo de cada tipo de agregado

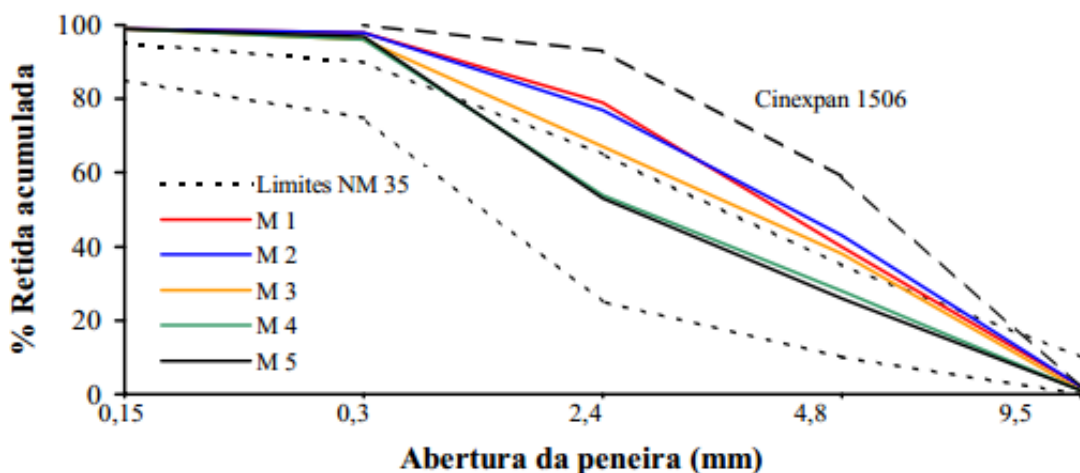
A determinação da proporção de cada tipo de agregado seguiu o estudo experimental realizado por Rossignolo (2003). Inicialmente, o pesquisador procurou ajustar a matriz de agregado leve, ao adicionar de 10 a 50% de argila expandida miúda, em relação à fração leve total, conforme apresentado na Tabela 3. Evitou-se ultrapassar os 50%, em massa, para não aumentar a massa específica dos concretos de forma significativa.

Tabela 3 – Composição do agregado leve

Agregado	Mistura (% em massa)				
	1	2	3	4	5
Cinexpan 0500	10	20	30	40	50
Cinexpan 1506	90	80	70	60	50

Fonte: ROSSIGNOLO, 2003.

Figura 17 – Distribuição granulométrica das misturas da Tabela 3



Fonte: ROSSIGNOLO, 2003.

A Figura 17 mostra que apenas as misturas 4 e 5 estão enquadradas dentro dos limites estabelecidos pela NBR NM 35 (ABNT, 1995). Dentre as misturas estudadas, 4 e 5 são as que contém os menores índices de vazios. A fim de analisar a influência da adição de

argila expandida 0500 na resistência à compressão do concreto, o presente estudo se baseou em 3 traços com diferentes proporções de agregados leves, conforme exposto na Tabela 4. A adição adotada de argila expandida 0500 em relação à massa total de agregado leve variou de 47% a 51,4%.

Tabela 4 - Composição do agregado leve adotado

Agregado	Mistura (% em massa)		
	1	2	3
Cinexpan 0500	50	51,4	47
Cinexpan 1506	50	48,6	53

Para ajustar a matriz dos agregados em conjunto, Rossignolo (2003) inseriu os teores de 10% a 40% de areia natural em relação à quantidade de agregado total, em massa, de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5 – Composição do agregado composto

Agregado	Mistura (% em massa)			
	1	2	3	4
Areia natural	10	20	30	40
Agregado leve	90	80	70	60

Fonte: ROSSIGNOLO, 2003.

Durante o processo de compactação foi verificado que apenas os concretos produzidos com as misturas 3 e 4 não apresentaram segregação dos agregados leves. Fato atribuído pelo supracitado autor à melhora da coesão dos concretos, proporcionados pelo acréscimo da quantidade de areia no agregado composto.

Considerando que a areia natural e os agregados leves do estudo contém composição granulométrica semelhante aos agregados apresentado por Rossignolo (2003), foram aproveitadas as análises do pesquisador para adotar o proporcionamento do agregado composto. No intuito de analisar a influência do teor de areia natural na resistência à compressão e na massa específica do concreto, o presente estudo se baseou em 3 traços com diferentes proporções de areia, variando de 26,7% a 28% em relação a quantidade de agregado total, em massa, conforme apresentado na Tabela 6. Foi adotado o teor ótimo máximo de 28% de areia para não aumentar a massa específica dos concretos de forma significativa.

Tabela 6 – Composição adotada do agregado composto

Agregado	Mistura (% em massa)		
	1	2	3
Areia natural	27,2	28	26,7
Cinexpan 0500	36,4	37	34,4
Cinexpan 1506	36,4	35	38,9

#### d) Determinação da relação agregados secos/cimento em massa em kg/kg

Considerando que o diâmetro máximo do agregado graúdo utilizado é igual a 9,5 mm, e que o tipo de adensamento adotado é o manual, tem-se o valor de  $H=11,5\%$ , conforme determina a tabela apresentada por Costa *et al.* (2015). Encontrado o valor de  $H$ , o método de dosagem IBRACON possibilita determinar a relação de agregados secos/ cimento com a seguinte equação:

$$m = (a/agl - H) / H \quad (3)$$

Em que:  $a/agl$  = relação água / aglomerante em massa em kg/kg;

$m$  = relação agregados secos / cimento em massa em kg/kg;

$H$  = relação água / materiais secos.

Para a relação  $a/agl=0,21$  o valor de  $m$  será igual a 0,826. Verificou-se nas misturas experimentais que concretos dosados com esse valor de agregado total e com a composição adotada na Tabela 6, apresentam massa específica superior à máxima permitida ( $1660 \text{ kg/m}^3$ ). Assim, para atender os parâmetros de dosagem a relação de agregados secos/cimento foi ajustado entre os traços, no intervalo de 1:0,9 a 1:1 (cimento:agregado total).

#### e) Determinação da proporção de sílica ativa, e do teor de solução de desincorporador de ar, e de inibidor de hidratação

Para Aïtcin (2000), os resultados mais eficientes de resistência são obtidos com teores de 8 a 10% de sílica ativa, por isso, adotou-se para os traços o teor de 8,4% em relação a massa de cimento, exceto para o traço 3 que foi utilizado o teor de 9,5%.

O fabricante do aditivo desincorporador de ar Densil 10 recomenda a dosagem de 0,1% a 1% de solução em relação a massa de cimento, adotou-se o teor de 0,8% para os 5 traços. Enquanto para o aditivo inibidor de hidratação Ecotec 26, o fabricante recomenda

analisar a tabela de dosagem em função do tempo de retardamento e da temperatura do concreto, disponível na ficha técnica do produto. Foi adotado para os 5 traços, o teor de 0,2% em relação a massa de cimento, o que corresponde a um retardamento de uma hora para a temperatura do concreto de  $25^{\circ} + -3^{\circ}$ .

#### f) Definição dos traços

Este estudo de dosagem originou o cálculo de cinco traços distintos, como representado na Tabela 7. É importante destacar que os traços 1 e 2 são semelhantes, diferenciados apenas na dimensão máxima da argila expandida 1506, o intuito é analisar a influência que a dimensão máxima do agregado graúdo leve exerce na resistência à compressão e na massa específica do concreto. A mesma semelhança ocorre nos traços 4 e 5, diferenciados apenas na relação a/agl, o intuito é analisar se um pequeno aumento na quantidade de água é benéfico ou prejudicial na resistência à compressão do CLAR.

O que difere os traços 1, 3 e 4, em massa, são basicamente as proporções de areia natural e de agregados leves. O traço 1 apresenta uma relação cimento/agregado seco de 1:0,948; o traço 3 1:1; e o traço 4 1:0,9. O intuito é comparar e analisar a influência de diferentes empacotamentos de agregados nos valores de resistência e de massa específica

Tabela 7 – Proporcionamento dos Concretos Leves de Alta Resistência

Traço	Consumo de materiais em kg/m <sup>3</sup> *								Relação a/agl (em massa)	D <sub>máx</sub> (mm) - Arg. 1506
	Cim.	Sílica Ativa	Areia	Argila 0500	Argila 1506	Superplast.	Desincorp. de ar	Inibidor de hidratação		
1	1	0,084	0,258	0,345	0,345	17,5	8	2	0,21	9,5
2	1	0,084	0,258	0,345	0,345	17,5	8	2	0,21	19
3	1	0,095	0,28	0,37	0,35	17,5	8	2	0,21	9,5
4	1	0,084	0,24	0,31	0,35	17,5	8	2	0,21	9,5
5	1	0,084	0,24	0,31	0,35	16	8	2	0,27	9,5

\*Exceto para os aditivos, os quais estão em ml/m<sup>3</sup>.

A Figura 18 apresenta o proporcionamento após a pesagem de todos os materiais componentes, dosagem correspondente à medida de um corpo de prova 10 x 20 cm.

Figura 18 – Proporcionamento dos materiais



Fonte: Próprios Autores, 2015.

### 3.3 PROCESSAMENTO DO CONCRETO LEVE DE ALTA RESISTÊNCIA

#### 3.3.1 Mistura

Inicialmente, foram moldados corpos de prova utilizando a betoneira como o tipo de misturador. No entanto, foi verificado alguns problemas ao utilizar a betoneira do laboratório, o equipamento tem capacidade para produzir  $0,4 \text{ m}^3$  de concreto, volume exageradamente superior ao necessário para produzir de 1 a 4 corpos de prova com dimensão  $10 \times 20 \text{ cm}$ , o ponto de saturação do superplastificante demorou mais de 1,5 hora para ocorrer, ao passo que na argamassadeira esse tempo é de 45 minutos, em adição a alta absorção de água do equipamento impossibilitou o uso da relação  $a/agl=0,21$ , sendo necessário um acréscimo na água de amassamento.

Assim, foi interrompida a produção de novos corpos de prova utilizando a betoneira e desconsiderado os corpos de prova moldados para este tipo de misturador. A produção de concreto prosseguiu com o uso da argamassadeira como alternativa. A argamassadeira presente no laboratório tem capacidade para até 5 litros e não suporta a mistura com o agregado graúdo, assim foi realizado a produção de apenas 1 corpo de prova por traço, e a mistura da argila expandida 1506 foi executada de forma manual, conforme representado na Figura 19.

Mesmo com as limitações, a mistura realizada pela argamassadeira forneceu maior controle de qualidade, possibilitando a baixa relação  $a/agl$ , o menor tempo de saturação do aditivo, e a maior uniformidade e homogeneidade da mistura, comparada à betoneira. Em

compensação, devido ao pequeno volume disponível na argamassadeira, não foi possível determinar a consistência dos traços de concreto pelo ensaio do abatimento de tronco de cone, o que já seria possível com a betoneira.

Figura 19 - a), b) e c) - Etapas da mistura



Fonte: Próprios autores, 2015.

A mistura dos materiais ocorreu na seguinte sequência:

- a) cimento + sílica ativa;
- b) 85% da água de amassamento e 100% do superplastificante - Foram misturados de forma graduada;
- c) areia + Argila expandida 0500 + aditivo desincorporador de ar + aditivo inibidor de hidratação;
- d) argila expandida 1506 + 15% da água.

### 3.3.4 Moldagem de corpo de prova

Foram moldados cinco corpos de prova, sendo um para cada tipo de traço. Para a moldagem dos corpos de prova, utilizou-se moldes de 10x20cm, estes foram colocados sobre uma chapa plana e lisa, e receberam uma leve camada de óleo de soja como desmoldante, após foi moldado em duas camadas cada corpo de prova, conforme estabelece a NBR 5738 (ABNT, 2015).

Figura 20 - Preparação com desmoldante para o recebimento do concreto



Fonte: Próprios Autores, 2015.

### 3.3.5 Adensamento

O adensamento foi realizado manualmente com haste metálica lisa de 600 mm por 16 mm. Conforme determina a NBR 5738 (ABNT, 2015), foi aplicado 12 golpes por camada, de um total de 2 camadas.

### 3.3.6 Cura

O processo de cura dos corpos de prova seguiu as especificações presentes na NBR 5738 (ABNT, 2015), respeitando o período de cura inicial (24 h), conforme apresentado na Figura 21. Após as primeiras 24 horas, os corpos-de-prova foram desmoldados e depositados na câmara úmida, ajustada a uma temperatura de 22,6° e umidade de 98%. Como representado na Figuras 22, os corpos de prova ficaram armazenados no local até a data de rompimento (28 dias).

Figura 21 - Cura inicial dos corpos de prova



Fonte: Próprios autores, 2015.

Figura 22 - a) e b) - Armazenamento dos corpos de prova na câmara úmida



Fonte: Próprios autores, 2015.

## 4. ANÁLISE E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

### 4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

A Tabela 8 apresenta o resultado dos ensaios de resistência à compressão axial dos corpos de prova na idade de 28 dias. Com exceção do traço 5, todos os traços apresentaram resistência à compressão superior ao valor mínimo estabelecido por Holm e Bremner (1992) (34,5 MPa), e por Slate *et al.* (1986) (41 MPa), para um concreto leve ser considerado um CLAR.

Tabela 8 – Resistência à compressão aos 28 dias.

Traço	Resistência à Compressão (MPa)
1	49,8
2	43,0
3	47,6
4	44,7
5	27,7

Foi observado no traço 1, um ganho de 15,8% no valor da resistência à compressão, comparado a resistência à compressão do traço 2. Atribui-se esse aumento a redução do diâmetro máximo de 15 mm no traço 2 para 9,5 mm no traço 1, tendo em vista que a resistência do concreto leve é inversamente proporcional a dimensão do agregado, sendo a dimensão máxima do agregado leve graúdo o único parâmetro de dosagem que diferencia os dois traços.

Os traços 4 e 5 também apresentam uma semelhante dosagem dos materiais. Todavia, tem como parâmetro de comparação a diferença na relação água/aglomerante. O corpo de prova produzido com o traço 4 ( $a/alg. = 0,21$ ) obteve uma resistência à compressão, 38%, superior à verificada para o traço 5 ( $a/agl. = 0,27$ ). Satisfazendo assim, o que estabelece a lei de Abrams, a resistência à compressão aumenta inversamente proporcional ao fator água/cimento.

Já era esperado a redução da resistência com o aumento do valor da relação  $a/agl.$  No entanto, era esperada uma redução menor. A justificativa para esse valor inesperado se deve ao excesso de aditivo superplastificante na dosagem do traço 5, a redução do teor de aditivo foi insuficiente para o aumento da água de amassamento, em consequência, o concreto produzido com esse traço apresentou no estado fresco uma considerável segregação dos



agregados leves graúdos. Assim, o corpo de prova referente ao traço 5 teve as propriedades no estado endurecido afetadas, sobretudo, a resistência à compressão. Cabe destacar que o tempo disponível para moldar um novo corpo de prova repetindo o traço 5 (com correções no teor de aditivo) e analisar o resultado da resistência à compressão na idade de 28 dias foi insuficiente.

O traço 4 teve maior consumo de cimento e menor quantidade de agregados miúdos, em massa, comparado aos traços 1 e 3. A falta de agregados miúdos em substituição ao cimento tornou o traço 4 o menos resistente entre os três. O traço 1, por sua vez, mesmo apresentado maior consumo de cimento e menor quantidade de agregados miúdos que o traço 3, obteve uma maior resistência, verifica-se nesse caso uma otimização da dosagem. Em massa o traço 1 e o 2 teve a mesma relação cimento/ agregados secos, mas em volume, o traço 2 teve uma maior composição de agregado leve graúdo.

#### 4.2 MASSA ESPECÍFICA

Na Tabela 9 é exposto o resultado da massa específica nos estados fresco e endurecido apresentado por cada traço, assim como o seu fator de eficiência. No estado endurecido, todos os traços tiveram massa específica entre  $1600 \text{ kg/m}^3$  e  $1660 \text{ kg/m}^3$ , satisfazendo assim a condição esperada no objetivo do trabalho. Com exceção do traço 5, todos os demais traços apresentaram uma pequena redução da massa específica na passagem do estado fresco para o estado endurecido, comportamento verificado também pelo Rossignolo (2003) nos seus estudos experimentais.

Tabela 9 – Massa específica e fator de eficiência por traço.

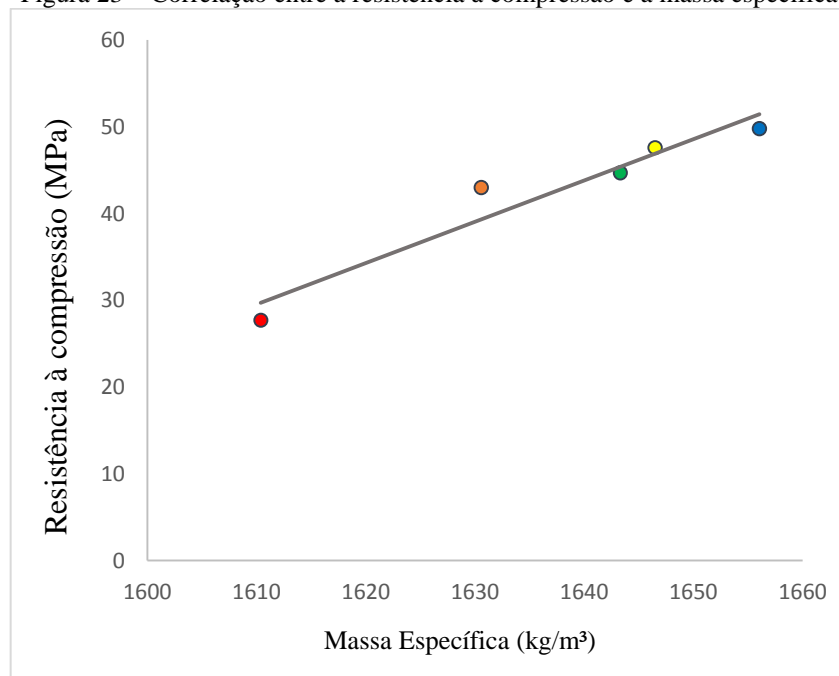
Traço	Massa específica ( $\text{kg/m}^3$ )		Fator de Eficiência ( $\text{MPa.dm}^3/\text{kg}$ )
	Estado Fresco	Estado endurecido	
1	1659	1656	30,1
2	1637	1631	26,4
3	1656	1646	28,9
4	1653	1643	27,2
5	1601	1610	17,2

Analisando a massa específica dos concretos leves deste estudo, observou-se uma redução entre 28% e 30% dos valores da massa específica apresentados pelo concreto convencional (aproximadamente  $2300 \text{ kg/m}^3$ ).

Em razão da pequena variação entre a maior e a menor massa específica dos traços, os valores de resistência à compressão representaram grande peso na equação que determina o fator de eficiência. Como esperado, o traço 1 teve o maior fator de eficiência. O valor da massa específica foi maior que o dos demais, mas com uma diferença muito pequena.

A Figura 23 faz uma correlação entre a resistência à compressão e a massa específica e também permite analisar os traços mais eficientes. A partir da correlação verificou-se que o traço 3 teve o valor da massa específica aproximado ao valor representado para o traço 4, porém, apresentou uma resistência à compressão, 6,1%, superior a resistência obtida com o traço 4. Dessa forma, o traço 3 apresentou um desempenho mais eficiente que o traço 4.

Figura 23 – Correlação entre a resistência à compressão e a massa específica.



Azul – Traço 1, Laranja – Traço 2, Amarelo – Traço 3, Verde – Traço 4, Vermelho – Traço 5. Fonte: Próprios autores

Comparando o traço 1 e o traço 2, além do aumento na resistência, para o traço 1 foi observado um aumento no valor da massa específica, por também ser inversamente proporcional a dimensão dos agregados. O traço 5, comparado ao traço 4, além da baixa resistência à compressão apresentou uma redução no valor da massa específica por conta da segregação do agregado leve gráudo no estado fresco, que ocasionou no estado endurecido muitos vazios na parte superior do corpo de prova.

### 4.3 MÓDULO DE DEFORMAÇÃO

Por meio dos valores de resistência à compressão e de massa específica obtidos nos ensaios, foi possível estimar os valores do módulo de deformação do concreto utilizando a equação apresentada pelo NS 3473 (1992), conforme apresentado na tabela 10.

$$E_c = 9,5 \cdot f_{cck}^{0,3} \cdot (\gamma / 2400)^{1,5} \quad (4)$$

Em que:  $E_c$  = módulo de deformação;

$\gamma$  = massa específica;

$f_{cck}$  = resistência à compressão (cilindro com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura).

Tabela 10 - Módulos de deformação para cada traço.

Traço	Resistência à Compressão (MPa)	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de deformação (GPa)
1	49,8	1656	17,59
2	43,0	1643	16,64
3	47,6	1646	17,20
4	44,7	1631	16,63
5	27,7	1610	14,14

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar de aumentar a massa específica do concreto, a redução da dimensão máxima característica do agregado leve graúdo (argila expandida) promoveu significativos ganhos na resistência à compressão. A relação água/aglomerante influenciou de forma similar, quanto menor a relação a/agl., para uma dada trabalhabilidade, maior será a resistência à compressão e a massa específica do concreto.

O aditivo superplastificante foi um grande aliado, ao propiciar acentuada redução de água, melhora na trabalhabilidade, entre outros benefícios. Ao mesmo tempo, a sua dosagem em excesso foi muito prejudicial à reologia do concreto, e conseqüentemente as resistências mecânicas, especialmente a resistência à compressão axial. Por isso, a importância em sempre realizar testes de compatibilização entre os aglomerantes, a quantidade de água de amassamento e o aditivo superplastificante, para determinar o ponto de saturação ideal.

Dentre os traços avaliados, o traço 1 obteve o melhor empacotamento dos grãos, resultando na produção do concreto com o melhor desempenho, ao apresentar a maior resistência à compressão com uma massa específica dentro do limite visado. Assim, adotou-se esse traço como referência na produção das esferas de concreto, a serem ensaiadas no Concurso Estudantil Concrebol, que é um dos objetivos específicos.

Para atender aos parâmetros de projeto impostos neste estudo, foi necessária a produção dos concretos leves em laboratório, com diversos controles e limitações. Nesse contexto, sugere-se para futuros trabalhos, a elaboração de dosagens e técnicas viáveis na produção do CLAR em concreteiras e em obras diversas.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768**. Aditivos para concreto de cimento Portland-Requisitos. EB 1763. Rio de Janeiro, 2011.
- \_\_\_\_\_. **NBR 5733**. Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7211**. Agregados para concreto – Especificações. Rio de Janeiro, 2009.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7211**. Agregados para concreto – Especificações. Rio de Janeiro, 1983.
- \_\_\_\_\_. **NBR 5738**. Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.
- \_\_\_\_\_. **NBR 5739**. Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.
- \_\_\_\_\_. **NBR 12655**. Concreto de cimento Portland – Preparo e Recebimento – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 35**. Agregados leves para concreto estrutural – Especificações. Rio de Janeiro, 1995.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 67**. Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 248**. Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- \_\_\_\_\_. **NBR 8953**. Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2009.
- \_\_\_\_\_. **NBR 15900-1**. Água para amassamento do concreto – Requisitos. Rio de Janeiro, 2009.
- AÏTCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. Ed. PINI, São Paulo, 2000, p. 667.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 363 R-92 (Reapproved 1997). **State of the art report on high strength concrete. ACI Manual of Concrete Practice**, part 1. Farmington Hills: ACI, 1998.
- BARCELOS, Airton de Souza; PELISSER, Fernando. Efeito de inibidores de hidratação na resistência de aderência à tração em argamassas de revestimento. Universidade do Estado Sul Catarinense, 2011.
- BAUER, Luiz Alfredo Falcão. **Materiais de Construção**. 5. ed. Rio de Janeiro, 2000.
- CARNEIRO, Arnaldo. M. P.; BARATA, Márcio S.; PICANÇO, Marcelo de S. Análise de propriedades de concreto produzido com composição de agregados otimizadas. In:

CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44., 2002. Belo Horizonte. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2002. Não paginado.

CARRASQUILLO, R. L.; NILSON, A. H.; SLATE, F. O. Properties of high strength concrete subject to short-term loads. **Journal of American Concrete Institute**, v. 78, n. 3, p. 171-178, 1981.

CARVALHO, João Dirceu Nogueira de. **Sobre as origens e desenvolvimento do concreto**. Revista Tecnológica, v. 17, p. 19-28, 2008. Disponível em: <<http://www.periodicos.uem.br/ojs/index.php/RevTecnol/article/view/8169/5163>>. Acesso em: 28 fev. 2015, 15:30.

CASTRO, Alessandra L. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**. 2007. 302p. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia dos Materiais)-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CUSTÓDIO, Mayara. **Dosagem de concreto**: Definições Fundamentais, 24 de fev. de 2015. nbPontifícia Universidade Católica de Goiás. 32 f. Notas de aula em formato portátil de documento.

CINEXPAN-Argila Expandida. **Ficha Técnica da Argila Expandida Referência 1506**. Disponível em: <http://www.cinexpan.com.br/pdf/ficha-tecnica-1506.pdf>. Acesso em 17 out. 2015, 13:00.

CINEXPAN-Argila Expandida. **Ficha Técnica da Argila Expandida Referência Laminado 2,5**. Disponível em: <http://www.cinexpan.com.br/pdf/ficha-tecnica-laminado-2,5.pdf>. Acesso em 17 out. 2015, 13:00.

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

FREITAS, Júlio Cesar de Oliveira. **Adição de Poliuretana em pastas de cimento para poços de petróleo como agente de correção de filtrado**. Natal-RN, 2008.

GUIMARÃES, Jaqueline Passamani Zubelli. **Estudo Experimental das Propriedades do Concreto de Alto Desempenho**. Rio de Janeiro, 2002.131p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O MUNDO DO CIMENTO. **Cimento no mundo**, Brasília, 2013. Disponível em:<<http://cimento.org/cimento-no-mundo/>>. Acesso em: 07 mar. 2015, 19:00.

HOLM, Thomas A. Specified density concrete – A transition. In: International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, 2. Kristiansand, Norway, 2000. **Proceedings**, p. 37-46.

HOLM, Thomas A.; BREMNER, Theodore W. **High Strength Lightweight Concrete: High Performance Concrete and Applications**. Cap.10. Edited S. Ahmad, S.P. Shah. 1992. 32 p.

HOLM, Thomas A.; BREMNER, Theodore W. High Strength Lightweight Aggregate Concrete. In: Shap S.P.; AHMAD S.H. **High Performance Concrete: properties and applications**. Great Britain, McGraw-Hill, 1994. p. 341-374.

HOLM, Thomas A.; BREMNER, Theodore W. **State-of-the-Art Report on High-Strength, High-Durability Structural Low-Density Concrete for Applications in Severe Marine Environments**. U.S. Army Corps of Engineers- Engineer Research in Development Center, ERDC/SL TR-00-3, 2000.

IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto. **57º Congresso Brasileiro do Concreto: Regulamento do 12º concurso Concrebol**. Disponível em: <<http://www.ibracon.org.br/eventos/57cbc/default.asp>>. Acesso em: 15 mar. 2015, 17:18.

JUCÁ, T. P.; TEIXEIRA, F. A.; PEREIRA, C. H. A. F.; OLIVEIRA, K. R. B.; SENA, A. M.; GUIMARÃES, L. E.; ANTONELLI, G. R.; GOMES, F. M.; GEYER, A. Estudo da Dosagem de Concreto de Alto Desempenho – Comparativo de custos. In: Congresso Brasileiro do concreto, 43, 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2001. Não paginado. Disponível em: <[http://www.padrao.eng.br/padrao/downloads/2001-IBRACON-comparativo\\_de\\_custos-concreto\\_de\\_alto\\_desempenho.pdf](http://www.padrao.eng.br/padrao/downloads/2001-IBRACON-comparativo_de_custos-concreto_de_alto_desempenho.pdf)>. Acesso em: 11 maio 2015.

MALLMANN, Patrícia F. **Concreto de Pós Reativos: Adição de Nanosílica**. 2013. 69 f.. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/78225/000896901.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 20 maio 2015.

MAYCÁ, J.; CREMONINI, R. A.; RECENA, F. A. P. Estudo da resistência à compressão de concretos leves produzidos com argila expandida nacional. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 51, 2009, Curitiba. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2009. Não paginado. Disponível em: <[http://www.allquimica.com.br/arquivos/websites/artigos/concreto\\_leve-mayca-recena-cremonini2009101315555.pdf](http://www.allquimica.com.br/arquivos/websites/artigos/concreto_leve-mayca-recena-cremonini2009101315555.pdf)>. Acesso em: 2 abr. 2015.

MENDES, Julia C. **Modelagem Computacional de Concreto Leve Utilizando o Programa CAST3M**. Juiz de Fora: UFJF, 2014. 80 p. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/mac/files/2009/05/TFC-JULIA-CASTRO-MENDES.pdf>>. Acesso em: 25 abr. 2015.

MENDES, Sandro E. Da Silveira. **Estudo experimental de concreto de alto desempenho utilizando agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba**. 163 f.. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. Melaragno. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 1ª Ed. São Paulo: Editora Pini, 1994. P. 573.

MORALES, Gilson; CAMPOS, Alessandro; FAGANELLO, Adriana M. Patriota. **A ação do fogo sobre os componentes do concreto**. SEMINA: Ciências exatas e tecnológicas, Londrina, v.32, n. 1, p. 47-55, 2011. Disponível em: <<http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/semexatas/article/viewFile/4057/8315>>. Acesso em 24 mai. 2015, 10:11.

- NEVILLE, A.M. **Propriedades do Concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997. 828p.
- NEVILLE, A.M. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. São Paulo: Bookman, 2013. 441p.
- NORWEGIAN COUNCIL FOR BUILDING STANDARTIZATION. **NS 3473 E 1992 – Concrete structures design rules**. Oslo, 1992. 78 p.
- RHEOSET. **Aditivos para concreto- Desincorporador de ar para concretos e argamassa**. Rio de Janeiro, 2015.
- RIBEIRO, Carmem Couto; PINTO, Joana Darc da Silva; STARLING, Tadeu. **Materiais de Construção Civil**. 3. ed. Belo Horizonte, 2011.
- ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto Leve Estrutural: Produção, propriedades, microestrutura e aplicações**, São Paulo: Pini, 2009.
- ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos: dosagem, produção, propriedades e microestrutura**. 2003. 220 f. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2003.
- ROSSIGNOLO, J. A. **Módulo de Deformação do Concreto Leve Estrutural de Alto Desempenho**. 2011. Revista Pesquisa e Tecnologia Minerva, São Carlos-SP, p. 99-106.
- ROSSIGNOLO, J. A. & AGNESINI, M. V. C., 2011. Concreto Leve Estrutural. In: **Concreto: Ciência e Tecnologia**. s.l.: IBRACON, pp. 1532-1572.
- SACHT, H.M.; ROSSIGNOLO, J. A.; SANTOS. W. N. **Avaliação da condutividade térmica de concretos leves com argila expandida**; Revista Matéria: v. 15, n. 1, pp. 031 – 039, 2010.
- SIMPLICIO, M. A S. (1999). **Concreto de alto desempenho suas vantagens e aplicações**. World Tec Net – Tecnologia do Concreto, Universidade Federal da Paraíba. In: **Concreto de Alto Desempenho – CD IBRACON**.
- SCHWANTES, Caetano Guilherme Gottlieb. **Concreto Estrutural Leve: Resistência à compressão e módulo de elasticidade usando argila expandida como agregado graúdo**. Porto Alegre, 2012.
- SLATE, F. O.; NILSON, A. H.; MARTÍNEZ, S. Mechanical Properties of High – Strength Lightweight Concrete. **ACI Materials Journal**, v. 83, n.4, p. 606-613, 1986.
- SPITZNER, J. High – Strength LWA Concrete. In: High – Strength Concrete. **RILEM Cap. II – Aggregates**. 1994.
- TANGO, Carlos E. de S. Divisão de Engenharia Civil do IPT. **Água de amassamento**. PINI, ed. 81, dez. 2003. Entrevista por e-mail concedida a Herbert Ranilson Santos.
- TECNOSIL. **Durabilidade é desafio de todos os agentes da cadeia do concreto. Garanta a vida útil do seu concreto, use sílica ativa**. São Paulo. Disponível em:



<http://www.tecnosilbr.com.br/wp-content/themes/tecnosilbr/download/catalogo-silica-ativa.pdf>. Acesso em maio 2015.

TECNOSIL. **Complexo Madeira**. Soluções Tecnosil. São Paulo, p.03-11, ago./set. 2014. Disponível em: <http://www.tecnosilbr.com.br/revistas/2014-ago-set/revista-complexo-madeira-2014-ago-set>.

TECNOSIL. **Pegada Ecológica: Um assunto que merece toda a nossa atenção**. Soluções Tecnosil. São Paulo, p.07-11, ago./set. 2015. Disponível em: <http://www.tecnosilbr.com.br/revistas/2015-ago-set/revista-solucoes-tecnosil-2015-ago-set-pegada-ecologica.pdf>. Acesso maio 2015.

TUTIKIAN, Bernardo F.; ISAIA, Geraldo Cechella; HELENE, Paulo. Concreto de alto e ultra alto desempenho. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: Ciência e tecnologia**. 1ª Ed. São Paulo: IBRACON 2011. Cap. 36, p. 1283-1325.

THOMAZ, Ercio. **Tecnologia, gerenciamento e qualidade na construção**. São Paulo, Editora Pini, 2001.

ZHANG, M. H.; GJØRV, O. E. Mechanical properties of high-strength lightweight concrete. *ACI Materials Journal*, v.88, n.3, p.240-247, 1991.