



ANDRESSA FERNANDA ANGELIN

**Concreto leve estrutural - Desempenhos físicos, térmicos,
mecânicos e microestruturais**

**Limeira
2014**



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA**

ANDRESSA FERNANDA ANGELIN

**Concreto leve estrutural - Desempenhos físicos, térmicos,
mecânicos e microestruturais**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado da Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas, como requisito para a obtenção do título de Mestra em Tecnologia, área de concentração em Tecnologia e Inovação.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Luísa Andréia Gachet Barbosa

Co-orientadora: Prof.^a Dr.^a Rosa Cristina Cecche Lintz

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELA ALUNA ANDRESSA FERNANDA ANGELIN, E ORIENTADA PELA PROF.^a DR.^a LUÍSA ANDRÉIA GACHET BARBOSA

Assinatura da orientadora

**Limeira
2014**

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Faculdade de Tecnologia
Vanessa Evelyn Costa - CRB 8/8295

- An43c Angelin, Andressa Fernanda, 1989-
 Concreto leve estrutural - Desempenhos físicos, térmicos, mecânicos e microestruturais / Andressa Fernanda Angelin. – Limeira, SP : [s.n.], 2014.
- Orientador: Luísa Andréia Gachet Barbosa.
 Coorientador: Rosa Cristina Cecche Lintz.
 Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia.
1. Materiais de construção. 2. Concreto leve. 3. Propriedades mecânicas. 4. Condutividade térmica. 5. Microestrutura. I. Barbosa, Luísa Andréia Gachet. II. Lintz, Rosa Cristina Cecche. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Tecnologia. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Structural lightweight concrete - Performances physical, thermal, mechanical and microstructural

Palavras-chave em inglês:

Building materials

Lightweight concrete

Mechanical properties

Thermal conductivity

Microstructure

Área de concentração: Tecnologia e Inovação

Titulação: Mestra em Tecnologia

Banca examinadora:

Luísa Andréia Gachet Barbosa [Orientador]

Carlos Roberto dos Santos

Leandro Mouta Trautwein

Data de defesa: 21-02-2014

Programa de Pós-Graduação: Tecnologia

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TECNOLOGIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

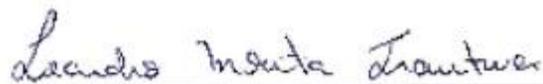
Concreto leve estrutural - Desempenhos físicos, térmicos, mecânicos e microestruturais

Andressa Fernanda Angelin

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Profa. Dra. Luísa Andréia Cachei Barbosa
UNICAMP/FI
Presidenta



Prof. Dr. Leandro Mouta Trautwein
UNICAMP/FEC



Prof. Dr. Carlos Roberto dos Santos
CETESB

RESUMO

A busca por materiais alternativos, de baixa massa específica, que possua redução na transferência de propagação de calor, associado à facilidade de manuseio e aplicação em concretos estruturais e estruturas de vedação, representa grande desafio na formulação e conhecimento do desempenho dos concretos leves. O concreto leve possui tecnologia pouco difundida em nível nacional e surge no cenário atual como um material inovador e alternativo ao concreto convencional. Frente ao exposto, este trabalho estudou concretos leves estruturais elaborados com duas graduações distintas de argila expandida e, com a finalidade de promover à manutenção das propriedades mecânicas, adicionou-se aditivo superplastificante e sílica ativa. Desenvolveu-se cinco traços distintos, que apresentaram reologia adequada, sem apresentar fenômenos de segregação e exsudação. Estudou-se algumas propriedades físicas, como índice e perda de consistência, absorção de água e massa específica do estado fresco e endurecido, os quais apresentaram uma média de 2000 kg/m³, classificando os concretos, de acordo com o ACI 213R-03 (2003), como leves. As principais propriedades mecânicas analisadas foram, resistência à compressão, apresentando, em média, 40 MPa, valor acima do mínimo prescrito pela ABNT NBR 6118:2007, para concretos estruturais, além da resistência à tração e módulo de elasticidade, as quais serviram como fundamentação na qualificação dos concretos leves estruturais, visando às exigências técnicas nacionais e internacionais para sua classificação e uso. Também foram realizados ensaios de condutividade térmica, por meio do método da placa quente protegida (“Hot Plate”), os quais apresentaram bons resultados, mostrando-se adequados no quesito desempenho térmico, de acordo com a revisão bibliográfica, bem como, com a norma nacional de desempenho térmico (ABNT NBR 15220:2005). Foram obtidas informações microestruturais sobre a zona de transição entre os agregados, convencionais e leves, e sua matriz de cimento. Foram realizadas comparações entre a massa específica seca e a resistência à compressão, assim como, comparações entre a massa específica seca e o módulo de elasticidade, sendo que tais resultados comprovam a possibilidade da utilização do concreto leve em elementos estruturais. Sugere-se, então, utilizar este concreto em painéis de vedação, pois associa-se a baixa massa específica, o conforto térmico e a resistência mecânica.

Palavras-chave: Materiais de construção; Concreto leve; Propriedades mecânicas; Condutividade térmica; Microestrutura.

ABSTRACT

The search for alternative materials, low density, having reduced transfer of heat propagation, combined with ease of handling and application in structural concrete and seal structures, constituting a major challenge in the design and understanding of the performance of lightweight concrete. The lightweight concrete technology has little known at the national level and in the current scenario emerges as an innovative and alternative material to conventional concrete. Based on these, this paper studied structural lightweight concrete made with two different grades of expanded clay, and with the purpose of promoting the maintenance of the mechanical properties was added superplasticizer and silica fume. Developed five distinct traits, which showed adequate rheology, without presenting phenomena of segregation and oozing. We studied some physical properties, such as loss of consistency index, water absorption and density of fresh and hardened, which had an average 2000 kg/m^3 , classifying the concrete according to ACI 213R-03 (2003), as light. The main mechanical properties were analyzed, compressive strength, with an average of 40 MPa, above the minimum prescribed by ABNT NBR 6118:2007, structural concrete, beyond the tensile strength and modulus of elasticity, which served as the basis the qualification of structural lightweight concrete, aimed at national and international technical requirements for classification and use. Thermal conductivity tests were also carried out by means of the hot plate protected ("Hot Plate") method, which showed excellent results, proving to be adequate thermal performance in the category, according to the literature review, as well as with the national standard for thermal performance (ABNT NBR 15220:2005). Microstructural information on the transition zone between aggregates, conventional and light, and its cement matrix were obtained. Comparisons between dry density and compressive strength as well as comparisons between the dry density and modulus of elasticity were performed, and these results show the possibility of using lightweight concrete in structural elements. Then it is suggested to use this concrete fence panels, as is associated with low density, thermal comfort and strength.

Keywords: Building materials; Lightweight concrete; Mechanical properties; Thermal conductivity; Microstructure.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	xv
AGRADECIMENTOS	xvii
LISTA DE FIGURAS	xix
LISTA DE TABELAS	xxiii
LISTA DE ABREVIATURAS	xxv
LISTA DE SIGLAS	xxvii
CAPÍTULO 1 Introdução	1
CAPÍTULO 2 Concreto Leve Estrutural	5
2.1. Definições	5
2.2. Panorama histórico	7
2.3. Agregado Leve	10
2.3.1. Fabricação dos agregados leves	11
2.3.2. Forma e textura	13
2.3.3. Estrutura interna e sua influência	14
2.3.4. Porosidade e absorção de água	15
2.3.5. Argila expandida nacional	16
2.4. Produção do concreto leve estrutural	18
2.4.1 Dosagem e relação a/c	18
2.4.2. Mistura e teor de umidade	20
2.4.3. Trabalhabilidade	20
2.4.4. Transporte, lançamento e adensamento	21

2.4.5. Cura	22
2.5. Propriedades e aplicações do concreto leve estrutural	22
2.5.1. Massa específica e Resistência à Compressão	22
2.5.2. Resistência Ótima	24
2.5.3. Resistência à Tração	27
2.5.4. Módulo de deformação e curva tensão-deformação	27
2.5.5. Retração por secagem	29
2.5.6. Propriedades Térmicas	29
2.5.7. Durabilidade	30
2.5.8. Aplicações do Concreto Leve Estrutural	31
CAPÍTULO 3 Conforto Térmico	33
3.1. Análise por meio da placa quente protegida (“Hot Plate”)	38
CAPÍTULO 4 Microestrutura	43
4.1. Zona de transição nos concretos com agregados leves	45
4.2. Análise por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	47
CAPÍTULO 5 Desenvolvimento Experimental	51
5.1. Materiais	53
5.1.1. Cimento Portland	53
5.1.2. Sílica ativa	53
5.1.3. Agregado graúdo	54
5.1.4. Argila expandida	55
5.1.5. Areia natural	59
5.1.6. Aditivo superplastificante (SPA)	61
5.2. Dosagem dos concretos	61
5.3. Produção dos concretos	63

5.3.1. Mistura dos materiais	63
5.3.1.1. Concreto de referência	63
5.3.1.2. Concretos leves	64
5.3.2. Adensamento	65
5.3.3. Ensaio dos concretos no estado fresco	65
5.3.3.1. Perda de consistência	66
5.3.3.2. Massa específica no estado fresco e teor de ar incorporado	66
5.3.4. Procedimento de cura	66
5.3.5. Ensaio dos concretos no estado endurecido	67
5.3.5.1. Massa específica, índice de vazios e absorção de água por imersão	67
5.3.5.2. Resistência à compressão e à tração	68
5.3.5.3. Módulo de deformação	68
5.3.5.4. Condutividade térmica	69
5.3.5.5. Análise microestrutural	70
CAPÍTULO 6 Apresentação e discussão dos resultados	71
6.1. Caracterização das propriedades dos concretos leves	72
6.1.1. Propriedades no estado fresco	72
6.1.1.1. Índice de consistência	72
6.1.1.2. Massa específica e teor de ar incorporado	73
6.1.1.3. Perda de consistência	73
6.1.2. Propriedades no estado endurecido	74
6.1.2.1. Resistência à compressão e massa específica	74
6.1.2.2. Resistência à tração	77
6.1.2.3. Módulo de deformação	79
6.1.2.4. Absorção de água por imersão e índice de vazios	80

6.2. Avaliação da condutividade térmica dos concretos leves	82
6.3. Estudo da microestrutura dos concretos	84
6.3.1. Análise da microestrutura da matriz de cimento	84
CAPÍTULO 7 Conclusões	87
CAPÍTULO 8 Referências Bibliográficas	91

DEDICATÓRIA

*“Tudo o que temos de decidir é o que fazer
com o tempo que nos é dado.”*

J.R.R. Tolkien, O Senhor dos Anéis.

*“Senhor, dê-me serenidade para aceitar
as coisas que não posso modificar,
coragem para modificar as que posso e
sabedoria para reconhecer a diferença
entre elas.”*

John Green, A Culpa é das Estrelas.

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai Fernando, à minha mãe Celina, à minha irmã Anaisa, meus familiares e amigos, pelo incentivo, apoio, compreensão e carinho ao longo desses anos de estudo.

À Faculdade de Tecnologia (FT/UNICAMP) pela oportunidade e suporte técnico para a realização desta pesquisa de mestrado.

À Prof.^a Dr.^a Luísa Andréia Gachet Barbosa e à Prof.^a Dr.^a Rosa Cristina Cecche Lintz, pela valiosa orientação, amizade e incentivo ao longo desses anos, que foram fundamentais à realização desta pesquisa.

Aos técnicos do Laboratório de Construção Civil da FT, Emerson Verzegnassi e Reginaldo Ferreira e aos bolsistas, pelo apoio e auxílio técnico.

Ao Prof. Dr. João Adriano Rossignolo (USP) e à Prof.^a Dr.^a Ana Elisabete P. G. A. Jacintho (PUCCamp), pelas contribuições e críticas a esta pesquisa.

Ao Instituto de Física (IF/UNICAMP), por intermédio do Prof. Dr. Luís Fernando de Ávila, por possibilitar a realização dos ensaios de microscopia, e, à Faculdade de Engenharia Civil (FEC/UNICAMP), por intermédio do Prof. Dr. Leandro Mouta Trautwein, pela contribuição aos ensaios de módulo de elasticidade.

Às empresas CINEXPAN S.A., SILICON Indústria e Comércio de Produtos Químicos Ltda e BASF S.A., pelo fornecimento dos materiais utilizados nesta pesquisa.

À CAPES pela bolsa de mestrado concedida.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Concreto leve: a) com agregado leve; b) celular; e c) sem finos	6
Figura 2.2: Coliseu de Roma	8
Figura 2.3: Panteão de Roma	8
Figura 2.4: Porto de Cosa	8
Figura 2.5: Embarcação USS Selma	9
Figura 2.6: Edifício Southwestern Bell Telephone Company, em Kansas, Estados Unidos	9
Figura 2.7: Micrografia (MEV) dos agregados produzidos pelo processo de: a) sinterização e b) forno rotativo	12
Figura 2.8: Micrografia (MEV) ilustrando a entrada de pasta de cimento (C) nos poros dos agregados leves produzidos a partir do processo de sinterização	14
Figura 2.9: Micrografia (MEV) ilustrando o acúmulo de bolhas de ar ao redor do agregado	15
Figura 2.10: Argila expandida brasileira: a) CINEXPAN 0500; b) CINEXPAN 1506; e c) CINEXPAN 2215	16
Figura 2.11: Relação entre resistência à compressão e valor de massa específica do concreto leve com argila expandida brasileira	23
Figura 2.12: Ilustração da ruptura à compressão nos concretos com argila expandida brasileira (à esquerda) e com agregado de basalto (à direita)	24
Figura 2.13: Comportamento da resistência à compressão do concreto com agregados leves em relação a sua pasta de argamassa	25
Figura 2.14: Relação entre a resistência à compressão da argamassa de concretos com argila expandida e com brita basáltica	25
Figura 2.15: Comportamento da resistência à compressão do concreto leve em função da dimensão máxima característica do agregado leve	26
Figura 2.16: Relação entre o fator de eficiência e a massa específica do concreto leve	27

Figura 2.17: Diagrama tensão-deformação de concretos com argila expandida brasileira	28
Figura 2.18: Diagrama tensão-deformação, com deformação controlada, de concretos com argila expandida brasileira	29
Figura 3.1: Montagem do conjunto	39
Figura 3.2: Máquina de ensaio “Hot Plate” Guarded Hot Plate, marca Holometrix, modelo GHP 300	40
Figura 4.1: Micrografia (MEV) da zona de transição do concreto com agregado basáltico	44
Figura 4.2: Micrografia (MEV) da zona de transição dos concretos: a) com agregado basáltico e, b) com agregado leve	46
Figura 4.3: Esquema indicando a amostra posicionada no equipamento	49
Figura 4.4: Máquina de ensaio JSM-5410 Scanning Microscope	49
Figura 5.1: Fluxograma do programa experimental	52
Figura 5.2: Curva granulométrica do agregado graúdo	55
Figura 5.3: Ensaio de massa unitária do agregado graúdo	55
Figura 5.4: Ensaio de granulometria do agregado graúdo	55
Figura 5.5: Agregados leves nacionais: a) CINEXPAN 0500 e, b) CINEXPAN 1506	56
Figura 5.6: Curva granulométrica do agregado leve	58
Figura 5.7: Comparação granulométrica entre a CINEXPAN 1506 (à esquerda) e o agregado graúdo (à direita), utilizados nesta pesquisa	58
Figura 5.8: Curva granulométrica da areia quartzosa	60
Figura 5.9: Ensaio de granulometria da areia	60
Figura 5.10: Ensaio de massa específica da areia	60
Figura 5.11: Ensaio de massa unitária da areia	60
Figura 5.12: Umedecimento da argila expandida	64

Figura 5.13: Materiais separados para a produção dos concretos	64
Figura 5.14: Introdução dos materiais na betoneira de eixo inclinado	64
Figura 5.15: Adensamento mecânico dos corpos-de-prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura	65
Figura 5.16: Adensamento das placas de concreto de 300,5 x 300,5 mm de largura e 45 mm de altura	65
Figura 5.17: Corpos-de-prova em cura úmida	67
Figura 6.1: Concreto com coesão	73
Figura 6.2: Ensaio de índice de consistência	73
Figura 6.3: Perda de consistência dos concretos leves estruturais	74
Figura 6.4: Relação entre resistência à compressão aos 28 dias e massa específica dos concretos leves	76
Figura 6.5: Ensaio de resistência à compressão	76
Figura 6.6: Relação entre resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão aos 28 dias dos concretos leves	78
Figura 6.7: Realização do ensaio de resistência à tração	78
Figura 6.8: Corpos-de-prova após a ruptura por tração diametral	78
Figura 6.9: Relação entre resistência à compressão e módulo de deformação dos concretos leves aos 28 dias	80
Figura 6.10: Ensaio de módulo de elasticidade	80
Figura 6.11: Relação entre a absorção de água por imersão e o consumo de cimento dos concretos leves aos 28 dias	81
Figura 6.12: Peças de concreto para a realização do ensaio de condutividade térmica	82
Figura 6.13: Relação entre a condutividade térmica e a massa específica dos concretos aos 28 dias	83
Figura 6.14: Equipamento utilizado para o ensaio de condutividade térmica	83

Figura 6.15: Micrografia (MEV) do perfil de análise do concreto com argila expandida 85

Figura 6.16: Micrografia (MEV) do perfil de análise do concreto com basalto 85

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Valores mínimos de resistência à compressão em função da massa específica aparente para concreto leve estrutural	7
Tabela 2.2: Análise química da argila expandida brasileira	17
Tabela 2.3: Composição granulométrica da argila expandida brasileira	17
Tabela 2.4: Absorção de água da argila expandida brasileira	18
Tabela 2.5: Propriedades e características da argila expandida brasileira	18
Tabela 2.6: Propriedades térmicas dos concretos leves	30
Tabela 3.1: Valores da condutividade térmica de acordo com a ABNT NBR 15220:2005	36
Tabela 5.1: Propriedades físicas e químicas do CPV ARI	53
Tabela 5.2: Análise química da sílica ativa	54
Tabela 5.3: Composição granulométrica do agregado graúdo	54
Tabela 5.4: Análise química do agregado leve	56
Tabela 5.5: Características dos agregados leves	57
Tabela 5.6: Composição granulométrica dos agregados leves	57
Tabela 5.7: Absorção de água dos concretos leves	59
Tabela 5.8: Granulometria da areia natural	59
Tabela 5.9: Características físicas e químicas do aditivo superplastificante	61
Tabela 5.10: Dosagem dos concretos	63
Tabela 5.11: Ensaio normatizados dos concretos no estado endurecido	67
Tabela 6.1: Propriedades dos concretos leves no estado fresco	72
Tabela 6.2: Resistência à compressão e massa específica dos concretos leves	75

Tabela 6.3: Valores da resistência à tração dos concretos leves	77
Tabela 6.4: Valores do módulo de deformação dos concretos leves	79
Tabela 6.5: Absorção de água por imersão e índice de vazios dos concretos leves	80
Tabela 6.6: Condutividade térmica, massa específica e resistência térmica dos concretos leves produzidos nesta pesquisa	83

LISTA DE ABREVIATURAS

μm = Micrômetro
 $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ = Expansão térmica
 A = Área
 Al_2O_3 = Óxido de alumínio
 C = Condutividade térmica
 $\text{cal/g.}^{\circ}\text{C}$ = Calor específico
 CaO = Cal
 C-H = Ligações de hidrogênio
 cps = Viscosidade
 CPV ARI = Cimento Portland de alta resistência inicial
 $D_{\text{máx}}$ = Dimensão máxima
 e = Espessura do corpo-de-prova
 f_{cj} = Resistência à compressão
 FE = Fator de Eficiência
 Fe_2O_3 = Óxido de ferro (III)
 GPa = Giga pascal
 K_2O = Óxido de potássio
 kg/dm^3 = Kilo por decímetro cúbico
 kg/m^3 = Kilo por metro cúbico
 m/m = Retração por secagem
 m^2/h = Difusão térmica
 $\text{m}^2\text{K/W}$ = Resistência térmica
 ME = Massa específica
 MgO = Óxido de magnésio
 min = Minutos
 mm = Milímetros
 MPa = Mega pascal
 $\text{MPa.dm}^3/\text{kg}$ = Fator de eficiência
 MPa/s = Mega pascal por segundo
 MU = Massa unitária
 Na_2O = Óxido de sódio
 $^{\circ}\text{C}$ = Graus Celsius
 q = Fluxo de calor
 R = Resistência térmica
 SiO_2 = Dióxido de silício
 $\text{W/m}^{\circ}\text{K}$ = Condutividade térmica
 ΔT = Diferença de temperatura

LISTA DE SIGLAS

ABNT = Associação Brasileira de Norma Técnica
ACI = American Concrete Institute
ANTAC = Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
CAPES = Coordenação de aperfeiçoamento de pessoal de nível superior
CEB = Comité Euro-International du Béton
EuroLightCon = Economic Design and Construction with Lightweight Aggregate Concrete
FEC = Faculdade de Engenharia Civil
FIB = Fédération Internationale de la Précontrainte
FT = Faculdade de Tecnologia
IF = Instituto de Física
INMETRO = Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IPT = Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
LECA = Lightweight Expanded Clay Aggregates
MEV = Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR = Norma Brasileira registrada
PUCCamp = Pontifícia Universidade Católica de Campinas
UNICAMP = Universidade Estadual de Campinas
USP = Universidade de São Paulo

1 INTRODUÇÃO

Desde o seu surgimento até o início da década de 1980, o concreto convencional permaneceu sendo uma mistura de agregados (miúdos e graúdos), cimento e água, sem maiores inovações que alterassem de forma significativa seu desempenho em algumas das suas principais propriedades, como a massa específica, resistência mecânica à compressão e à tração, módulo de elasticidade e conforto térmico, propriedades diretamente ligadas à durabilidade do concreto. (Pereira, 2008; Borja, 2011; Angelin *et al.*, 2013a).

Porém nos últimos anos a tecnologia do concreto passou por grandes desenvolvimentos que, segundo diversos pesquisadores, como Rossignolo, 2009, Díaz *et al.* (2010), Bektas *et al.* (2012) e Ibrahim *et al.* (2013), ocorreram devido à evolução de algumas técnicas e utilização de novos equipamentos para estudo dos concretos, assim como o uso de materiais novos e alternativos aos convencionais, como a argila expandida. Dentre os novos materiais, destacam-se os aditivos redutores de água e as adições minerais, como a sílica ativa, que propiciaram melhorias relevantes nas propriedades relacionadas à durabilidade dos concretos (Neville *et al.*, 2013).

A partir do desenvolvimento destes novos materiais e técnicas de estudos, resultou em um profundo estudo da utilização dos concretos especiais, principalmente dos concretos com agregados leves, caracterizados pelos seus excelentes desempenhos quanto à massa específica e ao conforto térmico, aliados a manutenção da resistência mecânica.

Por apresentar tais resultados e características, os concretos leves têm sido utilizados desde o começo deste século, tanto para fins estruturais como para estruturas de vedação. A partir do ano de 1980, devido ao exponencial crescimento de uso deste material, foram realizadas rigorosas pesquisas (Santos *et al.*, 1986; Zhang *et al.*, 1990; Vieira, 2000; Rossignolo, 2003; Moravia, 2007; Malaiskiene *et al.*, 2011; Hubertová *et al.*, 2013; Angelin *et al.*, 2013b; Golewski *et al.*, 2014), as quais demonstraram um progresso quanto

ao entendimento das características físicas e químicas do material leve, bem como, quanto as suas propriedades no estado fresco e endurecido do concreto que incorpora este material.

Por apresentar baixos valores quanto à massa específica, o uso do concreto leve reduz significativamente o peso próprio dos elementos cimentícios, influenciando diretamente na economia na estrutura de fundação. Her-Yung (2009), Borja (2011) e Ma *et al.* (2013) reforçam, ainda, que o uso de concretos leves estruturais acarreta numa maior produtividade, por apresentar menor peso próprio que os concretos convencionais, facilitando, portanto, o transporte dos materiais e peças durante a etapa de execução da obra, conseqüentemente, indicando redução no custo final da construção.

Estudos recentes, como os desenvolvidos por Bogas *et al.* (2012), Utama *et al.* (2012), Liu *et al.* (2013) e Wang *et al.* (2013), comprovam que a resistência mecânica dos concretos leves pode sofrer manutenção por meio da utilização de agregados com menores dimensões, aliando-se, ainda, a verificação do teor ótimo entre o proporcionamento de diferentes granulometrias de argila expandida. Borja (2011), Ho *et al.* (2012) e Golewski *et al.* (2014), também averiguaram que a associação de agregados leves e com o uso de adições minerais, como a sílica ativa, diminui a zona de transição entre agregado e pasta de cimento, aumentando os valores da resistência mecânica à compressão e o módulo de elasticidade.

No tocante, ao conforto térmico, uma das grandes vantagens que o concreto leve produzido com argila expandida possui sobre o concreto convencional quando utilizado nas vedações e coberturas é a redução da absorção e a transferência do calor proveniente da radiação solar (Eurolight, 1998; Holm, Bremmer, 2000). Segundo Granja e Labaki (2004), Sacht, (2008), Díaz *et al.* (2010) e Andiç-Çakir *et al.* (2012), foi observado que fechamentos mais leves tendem a adiantar sensivelmente o pico de carga térmica para dentro do cômodo em relação a fechamentos de massa mais elevada, ou seja, vedações de concreto tradicional e de argila expandida apresentam comportamento distinto em relação à onda térmica, a partir da diferença de massa específica que cada um apresenta.

Uma vedação construída com materiais inadequados pode funcionar como um painel radiante em horários indesejáveis. A transmitância térmica é um importante

parâmetro para a escolha de qual vedação e cobertura se deseja fazer uso. Devem ser feitas análises que considerem a variação periódica dos parâmetros climáticos externos e a capacidade de armazenamento térmico de coberturas e vedações, fazendo uso dessa energia armazenada nos horários oportunos.

Estudos realizados, por meio do método do Fio Quente Paralelo, por Sacht, Rossignolo e Santos (2007), concluíram que a condutividade térmica varia de 0,54 W/m²K (concreto com massa específica de 1200 kg/m³) e 1,8 W/m²K (concreto com massa específica de 2400 kg/m³). A nova norma nacional de desempenho térmico, ABNT NBR 15220:2005, prescreve a realização de ensaios de condutividade térmica por meio do método da placa quente protegida.

Com a intenção de contribuir para o desenvolvimento de concretos especiais, esta pesquisa apresenta uma análise térmica, por meio da obtenção dos valores de condutividade dos concretos, por intermédio do método da placa quente protegida (“Hot Plate”), de acordo com as prescrições da norma brasileira que rege este ensaio, para posterior avaliação quanto ao conforto térmico exercidos pelos concretos leves estruturais desenvolvidos nesta pesquisa.

Expõem, ainda, uma análise das principais propriedades físicas, como índice de consistência e absorção de água, bem como, propriedades mecânicas de resistência à compressão, à tração e módulo de elasticidade, além de um estudo microestrutural da zona de transição dos concretos leves estruturais.

OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como objetivo produzir um concreto com propriedades físicas e mecânicas especiais, em função da utilização conjunta de adições minerais de sílica ativa e superplastificante acelerador, juntamente com a associação de agregados leves nacional CINEXPAN 0500 e CINEXPAN 1506, que apresentam diferentes granulometrias.

Os objetivos específicos desta pesquisa podem ser sintetizados nos seguintes pontos, descritos abaixo:

- caracterização das propriedades físicas e químicas dos materiais de partida;
- dosagem dos concretos leves estruturais, após análise das características apresentadas pelos materiais;
- realização de ensaios físicos e mecânicos dos concretos leves estruturais, nos estados fresco e endurecido, utilizando-se das prescrições estabelecidas pelas respectivas normas;
- estudo do conforto térmico dos concretos leves estruturais, a partir da obtenção dos valores de condutividade térmica apresentados;
- ensaio microestrutural , com a finalidade de obter imagens da zona de transição interfacial entre a matriz de cimento e o agregado dos concretos produzidos;
- análises e conclusões dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos concretos leves estruturais, em comparação ao mesmo tipo de concreto com agregados convencionais.

Por meio deste estudo, pretende-se disponibilizar, ao setor de construção civil, um concreto leve estrutural com reologia adequada, sem apresentar fenômenos de segregação e exsudação, com suficiente resistência mecânica à compressão, com a finalidade de atender as prescrições da ABNT NBR 6118:2007, de tal forma que esse concreto possa ser aplicado em elementos estruturais, além de contribuir para a divulgação e melhor entendimento dos concretos estruturais com agregados leves nacionais.

2

CONCRETO LEVE ESTRUTURAL

Usualmente os concretos leves são diferenciados dos convencionais devido à redução significativa da massa específica, entretanto essa não é a única característica que justifica a atenção especial aos concretos leves. Algumas alterações nas propriedades do concreto, a partir da utilização dos agregados leves, são significativas, como trabalhabilidade, resistência mecânica e módulo de deformação, além da redução da condutividade térmica e da espessura da zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento.

Assim, este capítulo apresenta algumas das principais definições, propriedades físicas e químicas, aplicações e panorama histórico do concreto leve estrutural para o melhor entendimento da temática abordada nesta pesquisa.

2.1. DEFINIÇÕES

O concreto leve estrutural vem sendo aplicado em diversos setores da construção civil, como edificações pré-fabricadas. Os principais benefícios trazidos com a utilização desse material são a diminuição da massa específica do concreto, redução de esforços estruturais, economia de formas e redução de custos com transporte e montagem (Rossignolo, 2009).

Segundo Maycá *et al.* (2008), os concretos leves podem ser classificados em:

- a) *Concreto com agregado leve*: com substituição total ou parcial dos agregados convencionais por agregados leves. São os únicos concretos produzidos que podem atingir resistências aceitáveis para fins estruturais.
- b) *Concreto celular ou aerado*: resulta da ação de produtos acrescentados à pasta do concreto que reagem produzindo bolhas de ar. Embora aceita e usual, esta técnica é

questionada por muitos autores (Rossignolo, 2009; Borja, 2011; Ibrahim *et al.*, 2013), já que o material resultante encontra-se na pasta e não propriamente no concreto.

- c) *Concreto sem finos*: produzido apenas com aglomerante e agregado graúdo, sendo sua resistência está diretamente relacionada à resistência do agregado e ao consumo de cimento. Este concreto pode produzir materiais como painéis divisórios, estrutura de drenagem e sub-base de quadras de esporte.

Pode ser acrescentado a essa classificação um quarto tipo de concreto leve, o leve misto, que é o resultado de uma combinação de agregados leves, aditivos incorporadores de ar e redução dos finos no traço.

A Figura 2.1 ilustra o concreto com agregado leve, concreto celular e concreto sem finos, que são as possíveis classificações do concreto leve.

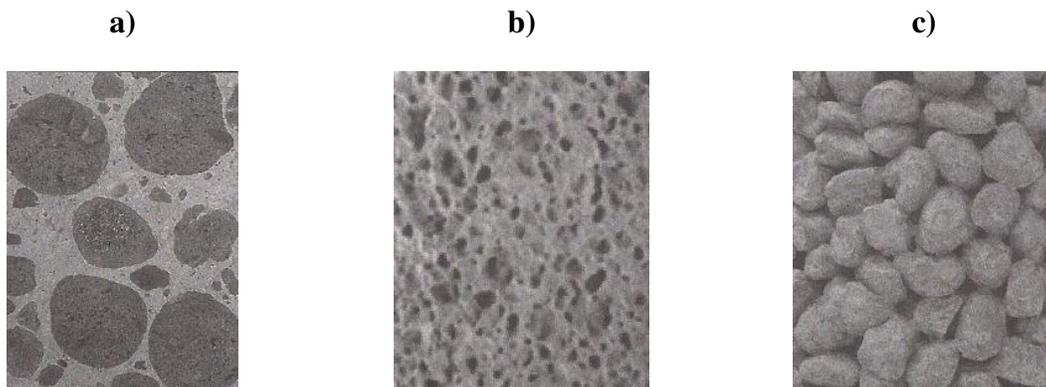


Figura 2.1: Concreto leve: a) com agregado leve; b) celular; e c) sem finos.

Fonte: Rossignolo (2009).

A propriedade que mais diferencia o concreto leve do convencional é a redução da massa específica, abaixo de 2000 kg/m^3 . Segundo o ACI 213R-03 (2003), o concreto leve estrutural deve apresentar resistência à compressão aos 28 dias acima de 17 MPa, devido à substituição de parte de materiais sólidos por ar. Já a norma brasileira, ABNT NBR 6118:2007, prescreve que a resistência mínima de um concreto estrutural deve ser 20 MPa.

A ABNT NBR 35:1995 apresenta os valores mínimos de resistência à compressão em função da massa específica aparente, apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Valores mínimos de resistência à compressão em função da massa específica aparente para concreto leve estrutural.

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

Fonte: ABNT NBR 35:1995.

Esta norma ainda especifica que os agregados leves utilizados na produção dos concretos estruturais devem apresentar valores de massa unitária no estado seco e solto abaixo de 1120 kg/m^3 , para agregados miúdos, e de 880 kg/m^3 , para agregados graúdos.

O fator de eficiência pode ser definido como o valor que relaciona a resistência à compressão e de massa específica aparente do concreto. É considerado concreto leve de alto desempenho um concreto com fator de eficiência acima de $25 \text{ MPa}\cdot\text{dm}^3/\text{kg}$, tendo como referência um concreto convencional com resistência à compressão de 60 MPa e massa específica de 2400 kg/m^3 , classificado como de alta resistência (Armelin *et al.*, 1994; Rossignolo, 2009; Hubertová *et al.*, 2013).

2.2. PANORAMA HISTÓRICO

O início da utilização dos concretos com agregados leves data de aproximadamente 1100 a.C, no México, onde construtores pré-colombianos utilizaram pedra pomes misturadas com um ligante à base de cinzas vulcânicas e cal para a construção de elementos estruturais (Mehta *et al.*, 2008; Rossignolo, 2009).

As aplicações históricas mais conhecidas dos concretos com agregados leves foram construídas pelos romanos, entre a República Romana e o Império Bizantino, destacando-se o Coliseu de Roma (Figura 2.2), a cobertura do Panteão (Figura 2.3) e o Porto de Cosa

(Figura 2.4), utilizando concretos que combinavam aglomerante à base de cal e rochas vulcânicas.



Figura 2.2: Coliseu de Roma.

Fonte: Disponível em: <http://virtualiaomanifesto.blogspot.com.br>. Acesso em: 16/12/2013.



Figura 2.3: Panteão de Roma.

Fonte: Disponível em: <http://gladio.blogspot.com.br/2011/12/sobre-o-inicio-da-perseguiacao.html>. Acesso em: 18/12/2013.



Figura 2.4: Porto de Cosa.

Fonte: Disponível em: http://pixar.wikia.com/Porto_Corsa. Acesso em: 16/12/2013.

Stephen J. Hayde, engenheiro norte-americano, foi o inventor do processo para obter os agregados expandidos. O efeito foi observado por Hayde quando a etapa de aquecimento nos fornos começou a ocorrer mais rápido que o normal, transformando os tijolos de sua produção em elementos expandidos, deformados e leves. Em 1918, depois de quase uma década de experimentação, Hayde patenteou o processo de obtenção de agregados leves pelo aquecimento em forno rotativo de pequenas partículas de xisto, de argila e ardósia, conhecidas como Haydite (ACI 213R-03, 2003).

O início da utilização de concretos de cimento Portland com agregados leves, como se conhece hoje, ocorreu durante a Primeira Guerra Mundial, quando a American Emergency Fleet Building Corporation construiu embarcações com concreto leve, utilizando xisto expandido, com resistência à compressão de 35 MPa e massa específica em

torno de 1700 kg/m^3 , enquanto o valor usual de resistência à compressão dos concretos tradicionais, na época, era de 15 MPa.

Um exemplo dessas embarcações é o navio norte-americano USS Selma (Figura 2.5), construído em 1919. Utilizando concreto leve com resistência à compressão de 35 MPa e massa específica de 1600 kg/m^3 , valores considerados extraordinário para os materiais e a tecnologia disponível naquela época. Análises realizadas na década de 80 nessa embarcação demonstraram que o concreto leve utilizado apresentou desempenho satisfatório de durabilidade, além da manutenção da resistência mecânica.

Durante a Segunda Guerra Mundial, foram construídos 488 navios com concreto leve, permitindo uma grande economia de chapas de aço. Após a Segunda Guerra Mundial, houve um considerável aumento dos estudos e aplicações do concreto leve para execução de estruturas de edifícios, tabuleiros de pontes e construções pré-fabricadas.

O uso do concreto estrutural leve em edifícios múltiplos ocorreu em 1929, na cidade do Kansas nos Estados Unidos, o Edifício Southwestern Bell Telephone Company (Figura 2.6) foi inicialmente construído com 14 pavimentos com concreto estrutural convencional, porém projetado para receber mais 8 pavimentos, no entanto os projetistas verificaram que se fosse utilizado o concreto leve, seria possível executar mais 6 pavimentos adicionais, além dos 8 já previstos (Rossignolo, 2009).

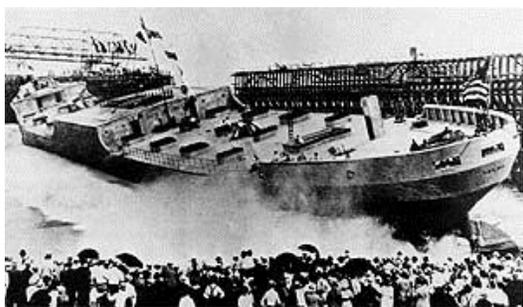


Figura 2.5: Embarcação USS Selma.
Fonte: Rossignolo (2009).



Figura 2.6: Edifício Southwestern Bell Telephone Company, em Kansas, Estados Unidos.

Fonte: Disponível em:
<http://en.wikipedia.org/wiki/Southern_Bell_Telephone_Company_Building>. Acesso em: 16/12/2013.

Na década de 1950 outros edifícios de múltiplos pavimentos foram executados com concreto leve, tais como Australia Square Tower (Austrália) em 1967, Park Regis (Austrália) em 1968, Standart Bank (África do Sul) em 1970 e o BMW Building (Alemanha) em 1972. Foi também, a partir dos anos 1950 que se iniciou a aplicação dos concretos leves em construções pré-fabricadas, uma das mais vantajosas aplicações desse tipo de concreto.

Com a expiração da patente de Hayde em 1946, o uso do concreto estrutural leve ficou limitado nos Estados Unidos e Canadá, surgindo então na Dinamarca a primeira fábrica de agregados leves em argila expandida, conhecida como LECA (Lightweight Expanded Clay Aggregates).

A partir da década de 1970, a tecnologia do concreto foi se aprimorando e novos materiais foram sendo desenvolvidos, como os aditivos redutores de água e adições pozolânicas, obtendo-se concretos com altas resistências mecânicas e de elevada durabilidade (Rossignolo; Oliveira, 2006). Essas novas tecnologias também foram aplicadas ao concreto leve e, na década de 90, Zhang e Gjörv (1991a) superaram a barreira dos 100 MPa de resistência à compressão aos 28 dias para concretos leves com argila expandida, com massa específica em torno de 1750 kg/m^3 .

No Brasil, os estudos e a utilização dos concretos leves tiveram início em 1970, com a implantação de uma unidade de produção de agregados leves (argila expandida) pelo Grupo Rabello, a CINASITA S.A. (atual CINEXPAN S.A.), com a finalidade de fornecer agregados leves para a CINASA – Construção Industrializada Nacional – também do Grupo Rabello, para a produção de elementos pré-fabricados leves. Entretanto desde o início da produção de agregados leves no Brasil, o concreto leve nacional foi motivo de poucos estudos e encontra utilização modesta na construção civil.

2.3. AGREGADO LEVE

Segundo Malaiskiene *et al.* (2011) e Ibrahim *et al.* (2013), as alterações mais significativas, com a substituição do agregado convencional pelo leve, são a

trabalhabilidade, resistência mecânica, módulo de deformação, durabilidade, condutividade térmica, resistência a altas temperaturas e espessura da zona de transição.

Os agregados leves podem ser classificados em naturais, obtidos por meio da extração direta em jazidas e classificadas quanto à sua granulometria, tendo pouca aplicação em concretos estruturais em função da variabilidade de suas propriedades e disponibilidades; e, artificiais, obtidos em processos industriais e classificados com base na matéria-prima e processo de fabricação (Maycá *et al.*, 2008).

2.3.1. Fabricação dos agregados leves

Sinterização e forno rotativo são os dois processos mais utilizados para a fabricação dos agregados leves artificiais. No processo de sinterização, a matéria-prima é misturada com adequada proporção de combustível, podendo ser coque ou carvão finamente moído, sendo submetido posteriormente a altas temperaturas, utilizando grelha móvel, com consequente expansão, em função da formação de gases. Geralmente o agregado obtido pelo processo de sinterização apresenta poros abertos, sem recobrimento, altos valores de absorção de água, arestas “vivas”, sendo o produto final um clínquer irregular. Normalmente, os valores da massa específica desse agregado variam entre 650 kg/m^3 e 900 kg/m^3 (Rossignolo, 2009; Broja, 2011).

Segundo Moravia (2007), o processo de produção em forno rotativo (ou nodulação) caracteriza-se pelo fato de determinados materiais se expandirem quando submetidos a temperaturas elevadas (entre 1000°C e 1350°C), como algumas argilas. Nessa faixa de temperatura, parte do material se funde gerando uma massa viscosa, enquanto a outra parte se decompõe quimicamente liberando gases que são incorporados por essa massa, expandindo-a em até sete vezes seu volume inicial, sendo a estrutura porosa mantida após seu resfriamento. Esse processo de fabricação promove a formação de uma camada vitrificada externa na partícula com baixa porosidade, que diminui significativamente a absorção de água, apresenta granulometria variada e formato arredondado regular.

A Figura 2.7 ilustra a diferença na estrutura interna e porosidade dos agregados produzidos por sinterização e forno rotativo, respectivamente.

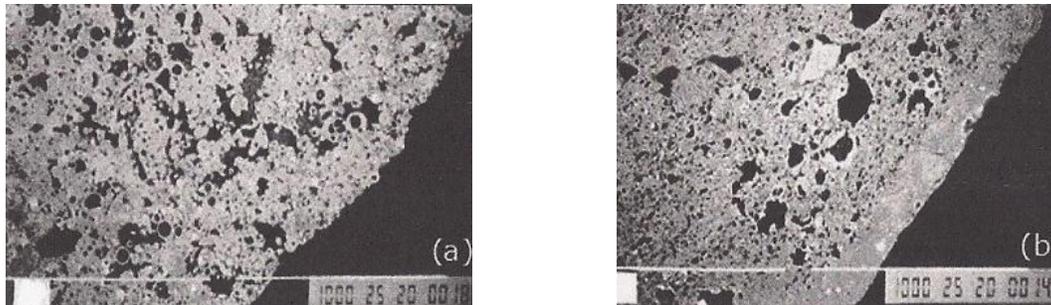


Figura 2.7: Micrografia (MEV) dos agregados produzidos pelo processo de: a) sinterização e b) forno rotativo. **Fonte:** Zhang; GjØrv (1991b).

O processo de fabricação da argila expandida em forno rotativo, descrito por Santos *et al.* (1986) e Rossignolo (2009), pode ser resumido em oito etapas, explanadas a seguir:

- 1. Homogeneização:** matéria-prima lançada em depósito para homogeneização;
- 2. Desintegração:** material lançado em um desintegrador a fim de reduzir os torrões a um diâmetro máximo de 5 cm;
- 3. Mistura e nova homogeneização:** o material é transportado até um misturador com a finalidade de deixar a argila com a trabalhabilidade adequada para extrusão. Podendo ser feita ainda a correção de água e adição de aditivos para melhorar a plasticidade da argila ou para aumentar sua expansão durante a queima;
- 4. Laminação:** nessa etapa o material passa por dois cilindros rotativos que elimina os torrões maiores que 5 mm, deixando a mistura pronta para extrusão;
- 5. Pelotização:** é realizada por extrusão contínua em que o material é forçado contra uma placa perfurada por orifícios circulares. O diâmetro desses orifícios influi diretamente no diâmetro dos agregados após a queima. O material que sai pelos orifícios é cortado por uma lâmina rotativa, formando, assim, as pelotas que são lançadas ao forno;
- 6. Secagem e queima:** a parte mais importante do processo que ocorre dentro do forno rotativo. A disposição das aletas internas para condução do material, a inclinação do forno, o tempo de permanência dentro do forno, assim como outros detalhes específicos, dependem das características da argila e devem ser estudados visando à maior economia do

processo e do desempenho do produto. Na primeira fase, ocorre a secagem das pelotas. Na zona de combustão, o forno atinge a temperatura prevista para expansão das pelotas, geralmente entre 1000°C e 1350°C. Geralmente o combustível é óleo ou gás;

7. Resfriamento: cilindro utilizado na saída do forno, no qual é soprado ar por ventiladores. O ar quente é reaproveitado no interior do forno;

8. Classificação e estocagem final: os agregados são classificados quanto a sua granulometria e armazenados para comercialização.

2.3.2. Forma e textura

Algumas propriedades do concreto, como a resistência mecânica, são influenciadas pela forma e textura dos agregados leves, que dependem diretamente do processo de fabricação.

Os agregados produzidos pelo processo de sinterização apresentam alta rugosidade, formas angulares e superfície porosa, o que proporciona boa aderência à pasta de cimento, porém, apresenta também altos valores de absorção de água em função da alta porosidade externa. Em decorrência da forma angular, esses agregados aumentam a quantidade de água da mistura para a obtenção da trabalhabilidade desejada (Zhang; GjØrv, 1990; Maycá *et al.*, 2008; Borja, 2011).

Com a existência de poros externos, há a possibilidade de penetração da pasta de cimento, o que pode aumentar o consumo de cimento e a massa específica do concreto (Figura 2.8).

Rossignolo (2009) descreve que aos agregados leves produzidos por meio de fornos rotativos, apresentam forma esférica e uma fina camada externa com baixa porosidade, o que possibilita a obtenção de boa trabalhabilidade com baixas relações a/c, entretanto, em função do seu formato esférico, o fenômeno de segregação se apresenta com maior facilidade em comparação com o agregado produzido por sinterização.

Na maioria dos processos de fabricação dos agregados leves, o diâmetro das partículas varia entre 1 mm e 25 mm, sendo a massa específica inversamente proporcional ao diâmetro.

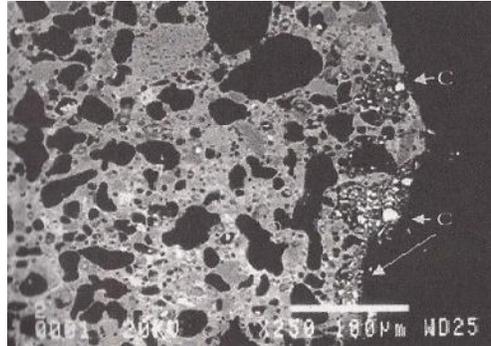


Figura 2.8: Micrografia (MEV) ilustrando a entrada de pasta de cimento (C) nos poros dos agregados leves produzidos a partir do processo de sinterização. **Fonte:** Zhang; Gjörv (1992).

2.3.3. Estrutura interna e sua influência

Segundo o CEB/FIP (1977), os agregados utilizados no concreto leve estrutural apresentam baixos valores de massa específica, conseqüentemente a massa específica desses concretos será reduzida. Como as matérias-primas dos agregados leves e dos convencionais apresentam valores de massa específica da mesma ordem de grandeza, utiliza-se a inclusão de uma estrutura porosa no agregado para a redução desse índice físico, alterando-se, assim, a estrutura interna do agregado.

A resistência mecânica e o módulo de deformação são diretamente influenciados pela estrutura interna dos agregados presentes no concreto, ou seja, agregados com estrutura porosa são menos resistentes que os com estrutura pouco porosa, sendo o tamanho e distribuição dos poros também decisivos. A redução da porosidade também influencia a resistência mecânica do agregado, por exemplo, a argila expandida apresenta uma camada externa pouco porosa, o que aumenta sua resistência mecânica.

Os agregados leves com baixa resistência mecânica têm pouca influencia na transmissão das tensões internas do concreto, ou seja, quanto maior for a diferença entre os valores de módulo de deformação do agregado e da pasta de cimento, maior será a

diferença entre a resistência à compressão da pasta de cimento e do concreto. O aumento do módulo de deformação do agregado leve, que varia entre 10 GPa e 18 GPa, aumenta também os valores da resistência à compressão e do módulo do concreto (Bremner, 1998; Borja, 2011; Angelin *et al.*, 2012).

2.3.4. Porosidade e absorção de água

A porosidade e a absorção de água afetam significativamente as propriedades do concreto tanto em estado fresco, como no processo de hidratação do cimento. Os principais fatores que influenciam a absorção de água são a porosidade total do agregado, a conectividade entre os poros, características da superfície e umidade do agregado antes da mistura.

Os fatores externos significativos são os aditivos, temperatura, e, em casos pertinentes, a pressão de bombeamento. A absorção de água dos agregados leves é proporcional à consistência do concreto, aumentando com o uso de superplastificantes ou agentes redutores (Rossignolo; Agnesini, 2005).

Rossignolo (2009) recomenda para agregados leves a pré-saturação para evitar prejuízo da trabalhabilidade do concreto, evitar a formação de bolhas ao redor do agregado e reduzir a absorção de água após a mistura (Figura 2.9).

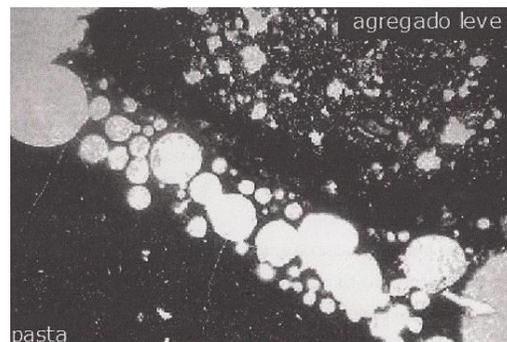


Figura 2.9: Micrografia (MEV) ilustrando o acúmulo de bolhas de ar ao redor do agregado leve. **Fonte:** Helland; Maage (1995).

Apesar de aumentar a retração por secagem, aumento da massa específica e redução da resistência ao fogo devido à alta quantidade de água absorvida pelo agregado leve, também há os aspectos positivos, como a melhoria nas propriedades da zona de transição entre agregado e pasta de cimento e benefícios na “cura interna” do concreto (Holm; Bremner, 1994; Borja 2011; Hubertová *et al.*, 2013).

2.3.5. Argila expandida nacional

A argila expandida é produzida no Brasil pela empresa CINEXPAN Indústria e Comércio Ltda, na cidade de Várzea Paulista, localizada a 50 km da cidade de São Paulo, sendo sua matéria-prima extraída no município de Jundiaí e processada em fornos rotativos.

Segundo a CINEXPAN, a produção de argila expandida, atualmente, é em sua maior parte destinada a indústria da construção civil (cerca de 60%), sendo o restante, absorvidos pelos setores de lavanderia, paisagismo, refratários e demais aplicações.

As principais características químicas na composição da argila expandida são predominância dos elementos de sílica, alumínio e ferro.

Os agregados usualmente empregados em concretos estruturais são denominados comercialmente como Cinexpan 0500, Cinexpan 1506, e Cinexpan 2215, ilustrados na Figura 2.10.

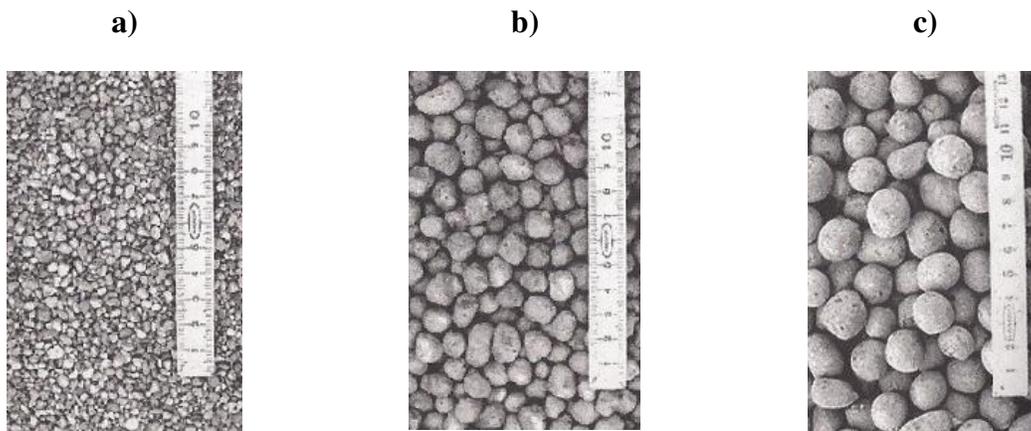


Figura 2.10: Argila expandida brasileira: a) CINEXPAN 0500; b) CINEXPAN 1506; e c) CINEXPAN 2215. **Fonte:** Rossignolo (2009).

A Tabela 2.2 apresenta os resultados da análise química do agregado leve. Observa-se predominância dos elementos sílica e alumínio.

Tabela 2.2: Análise química da argila expandida brasileira.

Composto	%
SiO ₂	62,3
Al ₂ O ₃	17,7
Fe ₂ O ₃	10,3
MgO	2,8
K ₂ O	4,1
TiO ₂	1,0
PF	0,7

Fonte: Rossignolo (2009).

As Tabelas 2.3 e 2.4 apresentam, respectivamente, os resultados da análise de sua composição granulométrica e absorção de água. Os valores apresentados são apenas indicativos, podendo variar de acordo com cada lote produzido.

Tabela 2.3: Composição granulométrica da argila expandida brasileira.

Abertura da peneira (mm)	CINEXPAN 0500	CINEXPAN 1506	CINEXPAN 2215
	% retida acumulada	% retida acumulada	% retida acumulada
19,0	0	0	8
12,5	0	31	96
9,5	0	75	97
6,3	0	93	97
4,8	10	99	98
2,4	42	99	98
1,2	61	99	98
0,6	80	99	99
0,3	92	99	99
Resíduo	100	100	100
Dim. Máx. Caract.	4,8 mm	12,5 mm	19,0 mm

Fonte: ABNT NBR 248:2003.

Tabela 2.4: Absorção de água da argila expandida brasileira.

Tempo	Absorção de água (%) (em massa)		
	CINEXPAN 0500	CINEXPAN 1506	CINEXPAN 2215
30 min	1,8	2,7	4,0
1 hora	2,7	3,5	5,0
1 dia	6,0	7,0	10,3

Fonte: Rossignolo (2009).

A Tabela 2.5 apresenta os resultados da análise das propriedades de massa específica, massa unitária no estado seco e solto e módulo de deformação de três tipos de argila expandida brasileira empregadas nos concretos leves.

Tabela 2.5: Propriedades e características da argila expandida brasileira.

Propriedades	CINEXPAN 0500	CINEXPAN 1506	CINEXPAN 2215
Massa específica (kg/dm ³)	1,51	1,11	0,64
Massa unitária no estado seco e solto (kg/dm ³)	0,86	0,59	0,47
Módulo de deformação (GPa)	18,2	9,9	3,3

Fonte: Rossignolo (2009).

2.4. PRODUÇÃO DO CONCRETO LEVE ESTRUTURAL

2.4.1 Dosagem e relação a/c

Apesar do método de dosagem dos concretos convencionais ser aplicado para concretos leves, alguns fatores devem ser considerados, como projetar um concreto com massa específica particular, absorção dos agregados leves, variação da massa específica do agregado em função da sua dimensão e influência das características dos agregados leves (Pereira, 2008).

Segundo o ACI 211.2-98 (2004), existem dois métodos de dosagem para concretos leves, são eles:

- Método da massa: indicado para concretos com agregados miúdos com massa específica normal e agregados leves graúdos;
- Método volumétrico: recomendado para concretos com agregados leves miúdos e graúdos.

Recomenda-se que, para a fabricação dos concretos com agregados leves, o consumo de cimento seja acima de 300 kg/m^3 para assegurar trabalhabilidade, proteção à armadura e de ancoragem da armadura.

Para dosagens otimizadas de concretos leves com agregado graúdo leve e agregado miúdo convencional, deverá ocorrer o ajuste granulométrico, utilizando agregado miúdo com dimensão máxima igual à do agregado graúdo, possibilitando o aumento de coesão, redução da segregação e aumento da resistência à compressão, por outro lado, ocasiona o aumento da massa específica do concreto, em relação aos concretos com agregado miúdo leve.

O uso de aditivos e adições minerais podem ser utilizados na fabricação dos concretos estruturais leves, no entanto, deve-se considerar a absorção de água pelos agregados leves não saturados previamente, reduzindo a ação do aditivo. Para minimizar esse efeito, recomenda-se introduzir o aditivo após a mistura dos materiais, antes da aplicação do concreto.

A relação água/cimento nos concretos convencionais é definida no momento da mistura dos materiais. Nos concretos leves deve-se levar em consideração a água absorvida pelos agregados leves, após a preparação do concreto, no entanto esse fenômeno pode ser eliminado com a pré-saturação dos agregados. O procedimento mais comum é acrescentar a quantidade de água que será absorvida pelo agregado à mistura, mantendo a relação água/cimento constante (Rossignolo; Agnesini, 2000). É possível estimar a quantidade de água que será absorvida pelos agregados leves por meio de sua imersão em água, segundo o EuroLightCon (1998).

2.4.2. Mistura e teor de umidade

O agregado leve graúdo apresenta a característica de segregação no início da mistura, porém é atenuado após algum tempo de mistura, quando em equipamentos com eixo inclinado.

Quando o concreto for produzido com agregado leve de baixa absorção, abaixo de 10% após 24 horas de imersão, pode ser empregado o mesmo método aplicado para concretos convencionais, sendo o agregado utilizado sem saturação prévia, podendo, mesmo assim, absorver certa quantidade de água nos primeiros minutos de mistura, seguido de estabilização. Devem ser adicionados os materiais sólidos primeiramente, seguido da água e por último os agregados leves.

Se o agregado leve apresentar absorção acima de 10% após 24 horas de imersão, recomenda-se a pré-saturação do material para não comprometer a trabalhabilidade do concreto.

Nos concretos com argila expandida nacional, que apresente absorção abaixo de 10% após 24 horas de imersão, observou-se melhor trabalhabilidade adicionando os materiais sólidos juntos com a água no misturador, após uma pré-mistura, incluindo os agregados leves (Holm e Bremner, 2000; Rossignolo e Agnesini, 2000; Rossignolo, 2009; Borja, 2011).

2.4.3. Trabalhabilidade

Tendo a absorção de água dos agregados grande influência na manutenção da trabalhabilidade, a faixa dos valores de abatimento dos concretos leves é, normalmente, menor que a empregada nos concretos convencionais, devido à menor deformação do concreto contendo agregado leve pela ação da gravidade, ou seja, concretos leves com abatimento de 80 mm apresentam trabalhabilidade similar aos concretos convencionais com abatimento de 100 mm. Durante o processo de determinação do abatimento, deve ser considerado o valor da massa específica do agregado leve. (Rossignolo, 2009).

Segundo Moravia (2007) e Hubertová *et al.* (2013), em concretos leves o alto abatimento e a vibração excessiva podem proporcionar sedimentação da argamassa, mais pesada que o agregado leve, ficando em falta na superfície, onde é mais necessária para o acabamento de peças com grandes áreas como lajes e pavimentos. Esse fenômeno é conhecido como segregação do agregado graúdo e é o inverso do que ocorre com o agregado convencional, onde a segregação resulta num excesso de argamassa na superfície.

A granulometria do agregado e o fator água/cimento exercem influência na trabalhabilidade e devem ser considerados em conjunto, pois, quanto menor for a granulometria do agregado maior será a quantidade de água necessária para envolver os grãos do mesmo, formando uma película d'água.

Além do abatimento de tronco de cone (ABNT NBR 67:1998), o espalhamento de tronco de cone (ABNT NBR 68:1998) se apresenta como uma forma adequada de análise da trabalhabilidade do concreto leve, sendo os valores obtidos mais próximos dos obtidos para os concretos convencionais.

2.4.4. Transporte, lançamento e adensamento

Em função dos baixos valores da massa específica, deve ser considerado no transporte o fenômeno de segregação, que pode ser reduzido ou evitado com a dosagem de concretos com coesão e consistência adequados, controlando-se a relação a/c , o teor dos agregados miúdos e adições minerais.

Para o bombeamento do concreto leve, a umidade e granulometria dos agregados assumem grande importância, pois a pressão hidrostática contribui para a entrada de água nos agregados, sendo importante a pré-saturação dos agregados leves.

Durante o lançamento, em decorrência dos menores valores da massa específica dos concretos leves, os esforços transmitidos às formas são inferiores aos observados nos concretos convencionais (Rossignolo, 2009).

Podem ser adotadas técnicas usuais de adensamento para os concretos leves. Holm e Bremner (2000) recomendam, para evitar a formação de vazios, a utilização de vibradores

de baixa frequência e raios de ação com metade dos valores usados nos concretos convencionais.

2.4.5. Cura

Segundo o EuroLightCon (1998), no processo de cura dos concretos leves deve haver o controle da temperatura, pois durante a hidratação do cimento há uma maior elevação da temperatura do que nos concretos convencionais, em função da baixa condutividade térmica dos agregados leves. Para evitar a formação de fissuras, recomenda-se protelar a retirada das formas ou cobrir o concreto com mantas isolantes. No caso da cura térmica, deve ser adotado um período maior de cura ou velocidade de elevação da temperatura menor.

Por reter parte de água durante a mistura, o agregado leve beneficia a hidratação da pasta de cimento, denominada “cura interna”, necessária para as reações químicas, tornando os concretos leves menos sensíveis às variações do processo de cura nas idades iniciais (Rossignolo, 2009; Borja, 2011; Angelin *et al.*, 2012).

2.5. PROPRIEDADES E APLICAÇÕES DO CONCRETO LEVE ESTRUTURAL

As propriedades dos concretos estão relacionadas com o desempenho de seus constituintes e a ligação entre eles. Sendo os agregados 50% da mistura do concreto, a substituição dos mesmos por agregados leves propicia alterações significativas das propriedades do concreto (Rossignolo, 2009).

2.5.1. Massa específica e Resistência à Compressão

Esses dois parâmetros são os mais utilizados para caracterizar os concretos leves estruturais e são diretamente relacionados com o tipo e a granulometria do agregado leve utilizado.

No Brasil, na década de 90, 73 MPa foi o maior valor registrado de resistência à compressão com concretos contendo argila expandida com massa específica de 1720 kg/m^3 , 1200 kg/m^3 de consumo de cimento e agregado com dimensão máxima de 6,3 mm, encontrado por Gomes Neto (1998).

A argila expandida brasileira vem se mostrando economicamente viável para valores de resistência à compressão abaixo de 50 MPa, com massa específica entre 1400 kg/m^3 e 1800 kg/m^3 (Figura 2.11).

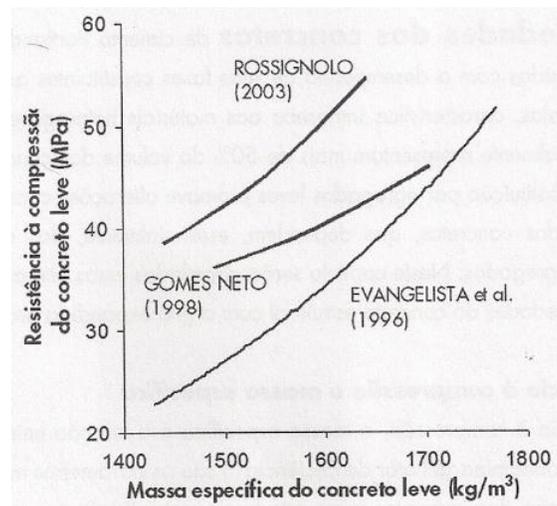


Figura 2.11: Relação entre resistência à compressão e valor de massa específica do concreto leve com argila expandida brasileira. **Fonte:** Rossignolo (2009).

Os concretos leves apresentam estabilização dos valores finais de resistência à compressão mais rapidamente, e, baixa elevação após 28 dias de idade quando comparados aos convencionais.

Segundo Rossignolo *et al.* (2003), os concretos com agregados convencionais, como a brita basáltica, possuem módulo de deformação do agregado maior que o da argamassa, sendo assim, sua ruptura se inicia na zona de transição, o que resulta em uma linha de fratura ao redor do agregado (fase mais resistente), sendo o limitante do valor de resistência à compressão a argamassa e a zona de transição pasta-agregado. Quanto aos concretos com agregados leves, a resistência mecânica é mais eficiente na argamassa devido à similaridade entre os valores do módulo de deformação do agregado e da argamassa e da melhor

qualidade da zona de transição pasta-agregado. A ruptura no concreto leve não ocorre devido à diferença entre as deformações dos agregados e da pasta de cimento, mas devido ao colapso da argamassa, e a linha fratura atravessa os agregados, como ocorre no concreto de alta resistência (Figura 2.12).



Figura 2.12: Ilustração da ruptura à compressão nos concretos com argila expandida brasileira (à esquerda) e com agregado de basalto (à direita).

2.5.2. Resistência Ótima

Rossignolo (2009) descreve que “resistência ótima” é a relação entre a resistência do concreto leve e da argamassa que pode ser descrita em duas fases (Figura 2.13). A condição correspondente à primeira fase é similar ao comportamento do concreto com agregado convencionais, em que a resistência do concreto é determinada principalmente pela resistência da argamassa. Na segunda fase, o módulo de deformação do agregado leve é menor que o da argamassa e, com isso, a resistência do concreto leve é controlada pela resistência do agregado. Essas duas tendências distintas do comportamento da resistência à compressão do concreto, em relação à resistência da argamassa, indicam a mudança no tipo de distribuição interna das tensões, e o valor da resistência à compressão do concreto leve no ponto em que ocorre essa mudança pode ser denominado “resistência ótima”.

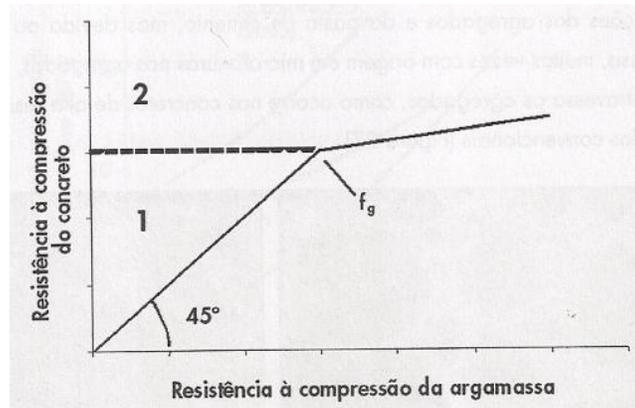


Figura 2.13: Comportamento da resistência à compressão do concreto com agregados leves em relação a sua pasta de argamassa. **Fonte:** Rossignolo; Pereira (2005).

O agregado leve representa um material determinante na resistência à compressão do concreto, de forma que após atingir a “resistência ótima”, o aumento da resistência à compressão da argamassa já não contribui mais para o aumento da resistência à compressão do concreto, como ilustra a Figura 2.14.

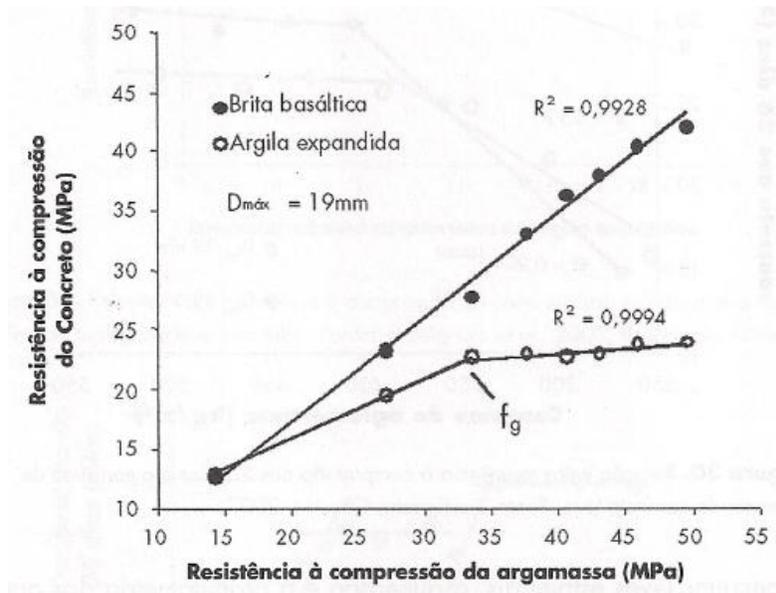


Figura 2.14: Relação entre a resistência à compressão da argamassa de concretos com argila expandida e com brita basáltica. **Fonte:** Rossignolo; Pereira (2005).

Esse conceito contribui significativamente para aperfeiçoar a dosagem de concretos leves, pois concretos projetados para atingir valores de resistência à compressão acima desse valor apresentam elevados valores de consumo de cimento.

A partir do valor de “resistência ótima”, o aumento de consumo de aglomerantes do concreto leve não promove a mesma melhoria no desempenho da resistência à compressão observada na região que antecede esse ponto. Por isso se faz necessário um estudo prévio para a escolha do agregado a ser utilizado, determinando-se a dimensão ideal do agregado.

A dimensão e a granulometria dos agregados nos concretos leves influenciam os valores de massa específica e resistência à compressão, comparados aos concretos convencionais. Isso porque os valores de massa específica e resistência à compressão das argilas expandidas brasileira são proporcionais inversamente proporcionais a sua dimensão, como mostra a Figura 2.15.

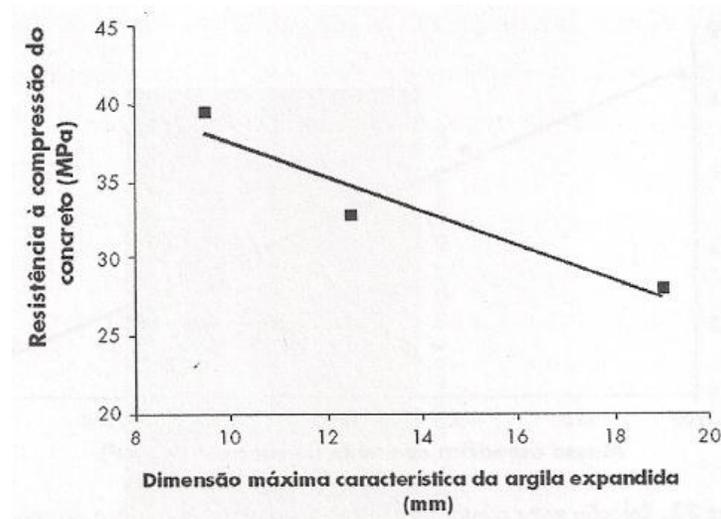


Figura 2.15: Comportamento da resistência à compressão do concreto leve em função da dimensão máxima característica do agregado leve.

Fonte: Rossignolo *et al.*, 2003; Rossignolo; Oliveira (2007).

O Fator de Eficiência (FE) é a relação entre resistência à compressão e massa específica, é um parâmetro importante, especialmente para projetos em que o peso da estrutura tem bastante influência nas cargas permanentes, sendo que os concretos leves apresentam esse valor maior que os convencionais (Rossignolo; Oliveira, 2007).

A Figura 2.16 ilustra o efeito da redução do valor da massa específica do concreto nos valores do FE, com a substituição do agregado convencional por argila expandida.

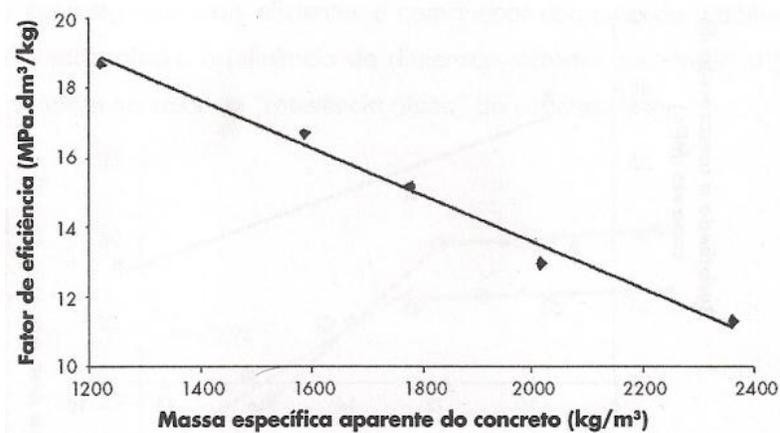


Figura 2.16: Relação entre o fator de eficiência e a massa específica do concreto leve.
Fonte: Sacht; Rossignolo; Santos (2007).

2.5.3. Resistência à Tração

Foi observado por Rossignolo e Oliveira (2007), que a resistência à tração nos concretos leves se apresenta com menor valor em comparação ao concreto convencional, isso se deve devido aos vazios existentes nos agregados leves, chegando a 50% do volume total no caso da argila expandida. Concretos produzidos com argila expandida brasileira apresentam valores de resistência à tração por compressão diametral variando entre 6% e 9% da resistência à compressão, como observado, também, por Angelin *et al.* (2013a).

2.5.4. Módulo de deformação e curva tensão-deformação

Essa propriedade esta diretamente ligada com o tipo e a quantidade de agregado leve utilizado. Quanto mais próximos forem os valores o módulo de deformação do agregado e da pasta de cimento, melhor será o comportamento do concreto em regime elástico.

O valor do módulo de deformação do concreto leve, geralmente, varia entre 50% e 80% do valor do módulo encontrados para os concretos convencionais, ou seja, os

concretos leves apresentam valores de módulo de deformação inferiores aos observados nos convencionais.

Conforme o trabalho apresentado por Rossignolo (2005), o desenvolvimento da curva tensão-deformação dos concretos com argila expandida nacional indica comportamento linear (elástico) até cerca de 80% do carregamento último (Figura 2.17), e nos concretos com agregado convencionais esse valor é de 60%.

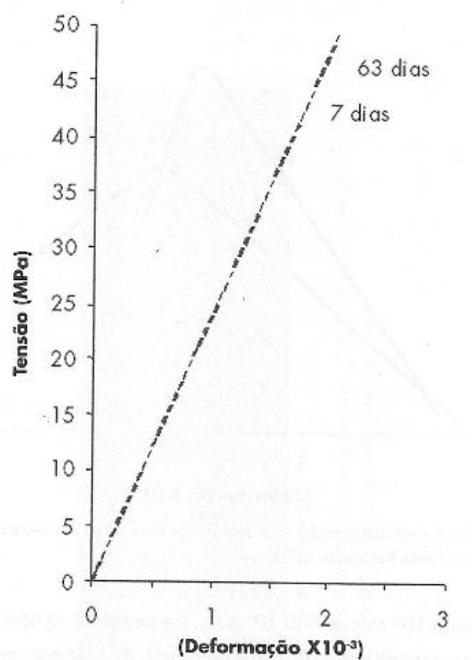


Figura 2.17: Diagrama tensão-deformação de concretos com argila expandida brasileira.
Fonte: Rossignolo (2005).

Rossignolo (2003) e Borja (2011) observaram que na curva tensão-deformação, com deformação controlada, que a parte ascendente da curva tensão-deformação dos concretos leves com argila expandida torna-se linear à medida que a resistência do concreto aumenta; já a parte descendente da curva, após ruptura, torna-se mais íngreme (Figura 2.18).

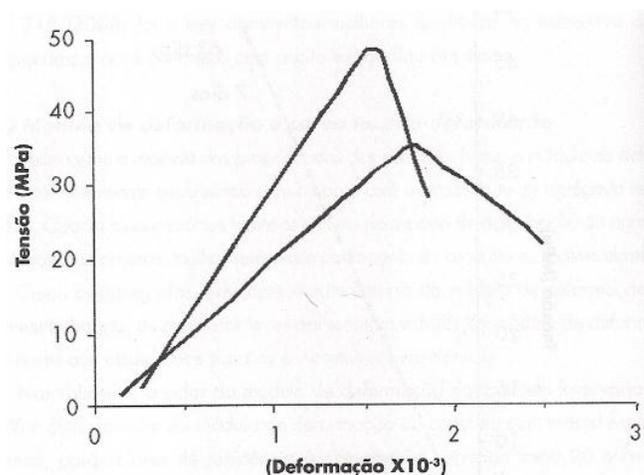


Figura 2.18: Diagrama tensão-deformação, com deformação controlada, de concretos com argila expandida brasileira. **Fonte:** Rossignolo (2003).

2.5.5. Retração por secagem

A retração do concreto pode ser dividida em duas etapas, a ocorrida antes da pega (retração plástica), e a ocorrida após a pega (retração por secagem), que está diretamente relacionada ao tipo e quantidade do agregado leve, relação a/c, consumo de cimento, cura e resistência mecânica do concreto (Neville *et al.*, 2013).

Devido à baixa restrição à movimentação causada pela pasta de cimento, os concretos com agregados leves apresentam valores de retração por secagem maior que os observados nos concretos convencionais. Concretos leves apresentam valores de retração por secagem entre $500 \cdot 10^{-6}$ m/m e $1000 \cdot 10^{-6}$ m/m (Hoff, 1991).

No Brasil, Rossignolo e Agnesini (2001) observaram valores de retração por secagem nos concretos com argila expandida nacional aos 448 dias variando entre $600 \cdot 10^{-6}$ m/m e $800 \cdot 10^{-6}$ m/m, estudando também a influencia de procedimentos de cura e adição de polímeros modificadores.

2.5.6. Propriedades Térmicas

Devido às propriedades térmicas do concreto leve, como menor condutividade, menor coeficiente de expansão térmica, maior estabilidade dos agregados leves quando

expostos a altas temperaturas e principalmente ao ar aprisionado na estrutura dos agregados leves, há a redução da absorção e transferência de calor quando comparados aos agregados convencionais, o que possibilita a utilização dos concretos leves para vedação de fachadas e cobertura de edificações, reduzindo a absorção e transferência para o ambiente interno de calor (Pereira, 2008; Sacht, 2008).

A Tabela 2.6 apresenta valores de algumas propriedades térmicas, comparando concretos com agregados leves com os que contem agregados convencionais.

Tabela 2.6: Propriedades térmicas dos concretos leves.

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

Fonte: Holm; Bremner (2000).

2.5.7. Durabilidade

Segundo Rossignolo (2009), Hubertová *et al.* (2013) e Ibrahim *et al.* (2013), o agregado leve apresenta-se mais poroso que o convencional, o que aumenta a permeabilidade do concreto aos fluidos, diminuindo sua resistência aos agentes agressivos. Porém, o uso desse material não necessariamente reduz a durabilidade do concreto.

A avaliação da durabilidade do concreto leve depende diretamente da estrutura porosa de seu agregado, por isso, deve-se avaliar se a porosidade é constituída por poros conectados ou não, distinguindo-os em sistemas fechados ou abertos, avaliando a sua porosidade e permeabilidade.

A conectividade entre os poros é essencial para que ocorra transporte de agentes agressivos, porém um material pode ser poroso e, no entanto, ser estanque. Ou seja, o uso

de agregados porosos não resulta em concretos com maior permeabilidade e menor durabilidade.

Estudos comparativos demonstraram que concretos com agregados leves apresentaram valores de permeabilidade aos fluidos iguais ou inferiores aos observados em concretos convencionais. Esse fato pode ser atribuído devido à redução nos valores da relação água/aglomerante dos concretos leves, diminuição das fissuras internas e melhoria da qualidade da zona de transição pasta-agregado (Chandra; Berntsson, 2002).

2.5.8. Aplicações do Concreto Leve Estrutural

O concreto leve estrutural apresenta aplicações em diversos setores da construção civil, porém a sua viabilidade técnica e econômica é maior em estruturas envolvendo peso próprio, como em pontes e edificações de múltiplos pavimentos, transportes de componentes, sistemas construtivos pré-fabricados, estruturas flutuantes e tanques (Rossignolo, 2009).

Segundo estudo desenvolvido por Holm e Bremner (2000), as estruturas moldadas in loco com concreto leve são de 5 a 10% mais baratas do que as executadas com concreto convencional, sendo a redução em pontes de 15% do valor da obra.

Por meio da tecnologia da pré-fabricação, a redução dos custos pode dobrar, devido ao transporte por unidade de volume, produção de peças com dimensões maiores e redução do tempo de montagem das estruturas.

As pontes e as coberturas normalmente exigem grandes vãos de concreto armado, sendo 70% o peso das solicitações estruturais. Como auxílio, o concreto leve, possibilita a redução das dimensões estruturais e aumento dos vãos dos pilares, promovendo uma redução do custo total da obra em até 7%, segundo Daly (2000).

Nos últimos 40 anos, o concreto leve vem sendo aplicado em ambientes marítimos, como em plataformas petrolíferas. Esse tipo de construção envolve a construção primeiramente em doca seca e posterior transporte para o local de implantação, permanecendo flutuantes ou apoiadas em leito marítimo.

3

CONFORTO TÉRMICO

O conforto térmico vem sendo analisado internacionalmente há mais de 150 anos, primeiramente em minas de carvão na Inglaterra. Outras áreas, de diferentes aplicações, que também foram investigadas, foram: rendimento nos trabalhos físicos e intelectuais, sobrevivência humana em condições de exposição curta ou prolongada a climas agressivos, obtenção de parâmetros para projeto e desempenho de sistemas de ventilação e climatização natural ou artificial de ambientes. A partir das últimas décadas do século XX, a preocupação para a análise do conforto térmico vem aumentando com frequência (Sacht, 2008).

A partir da década de 90 os trabalhos da ANTAC (Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído) começaram a se destacar, por meio da organização de eventos na área de conforto ambiental, os quais contribuíram significativamente para a área.

O conforto térmico pode ser considerado um estado de espírito, o qual reflete a satisfação com o ambiente térmico que envolve o ser humano. Se o balanço de todas as trocas de calor a que se está submetido o corpo humano for nulo e a temperatura da pele e suor estiverem dentro de certos limites, pode-se afirmar que o homem sente conforto térmico. A sensação térmica depende de fatores fisiológicos e psicológicos, variando de pessoa por pessoa, porém pode ser melhorada e qualificada (Sacht, 2008).

Segundo Pietrobon *et al.* (2001), o conforto pode ser definido em função da relação que o homem estabelece com o ambiente e também de acordo com o que o ambiente construído fornece ao indivíduo sob aspecto bio-ambiental. As bases da interação entre homem e ambiente construído residem no campo da psicofisiologia, a qual se refere às sensações humanas a partir de estímulos físicos.

O conforto térmico mostra-se como um dos principais requisitos para que os ambientes apresentem o melhor nível de habitabilidade e sua importância está ligada não só à sensação de conforto dos seus usuários, mas também ao seu desempenho no trabalho e na saúde. É fundamental para a determinação do conforto térmico elementos como o clima (temperatura, umidade relativa, movimento do ar e radiação), a vestimenta, além de condições subjetivas, como aclimatação, forma e volume do corpo, cor, metabolismo, entre outros. Tais efeitos quando somados produzem uma sensação térmica agradável denominada zona de conforto.

Os parâmetros que definem o conforto térmico, segundo Frota e Schiffer (2009), estão relacionados aos processos de troca de calor entre edificações e o ambiente externo, entre eles se destacam as propriedades higrotérmicas e inércia dos materiais e componentes, insolação, ventilação, condições climáticas da região e as atividades previstas. Todos os parâmetros devem ser inseridos no processo de projeto, nem sempre de forma sistemática, devido à complexibilidade dos fenômenos envolvidos.

Por meio de tais parâmetros e índices deve-se procurar o bem-estar dos usuários das edificações, a fim de atender os requisitos do conforto psicológico, sem esquecer outros aspectos importantes, como os funcionais, construtivos e estéticos, além da salubridade. Atualmente o conceito de conforto térmico vem sendo trabalhado de forma integrada, por meio de um conjunto de condições e situação que antes eram tratadas de forma segmentada por especialistas.

O interesse quanto ao condicionamento térmico natural não deve ser somente por razões de conforto, mas também de eficiência energética, pois grande parte do consumo total de energia elétrica residencial deve-se aos equipamentos de climatização, seja para aquecimento ou para refrigeração dos ambientes. Enquanto que para a classe média e alta a falta de habitabilidade das edificações significa aumento de consumo energético com climatização artificial, para a classe menos favorecida a inadequação térmica significa desconforto (Sacht, 2008).

As trocas de energia, ou seja, luz e calor, entre os meios externos e internos, têm como principal fator o “envelope construtivo”, ou seja, as vedações. Dentre os fatores que

intervêm na análise destas peças, esta a radiação solar, diante a qual os materiais se comportam de maneira distinta. O envelope construtivo se divide em dois tipos: a) fechamentos opacos, incapazes de transmitir radiação solar para o meio interno e, b) fechamentos transparentes, que possuem a capacidade de transmissão de radiação solar para o ambiente interno (Lamberts, 2005).

Outra característica relevante a ser observada nos fechamentos é a inércia térmica, que esta relacionada ao amortecimento e ao atraso da onda de calor, devido ao aquecimento ou ao resfriamento dos materiais. A inércia térmica depende de características térmicas da envolvente e dos componentes construtivos, sendo função da densidade, da condutividade térmica e da capacidade calorífica das vedações.

Uma vedação construída com materiais inadequados pode funcionar como um painel radiante em horários indesejáveis. A transmitância térmica é um importante parâmetro para a escolha de qual vedação e cobertura se deseja fazer uso. Devem ser feitas análises que considerem a variação periódica dos parâmetros climáticos externos e a capacidade de armazenamento térmico de coberturas e vedações, fazendo uso dessa energia armazenada nos horários oportunos.

No estudo apresentado por Granja e Labaki (2004) foi observado que fechamentos mais leves tendem a adiantar sensivelmente o pico de carga térmica para dentro do cômodo em relação a fechamentos de massa mais elevada. Vedações de concreto tradicional e de argila expandida apresentaram comportamento distinto em relação à onda térmica, a partir da diferença de massa específica de cada um. Observou-se também que para a concepção dos sistemas de vedações deve-se levar em conta o período de utilização da edificação, e que o adiantamento dos picos de onda térmica, causado por um fechamento mais leve, pode ser justificável sob o ponto de vista do período de uso do cômodo, sendo que o mesmo raciocínio pode ser empregado para justificar o uso do maior atraso térmico das paredes de maior massa.

O uso de normas tem sido efetivo no cenário internacional por meio do estabelecimento de medidas de eficiência energética em edificações. Os Estados Unidos tem desenvolvido requerimentos energéticos para construções, como o Model Energy Code

e o Energy-Efficient Design of Lowrise Residential Buildings. Tais requerimentos podem ser utilizados junto com outros códigos para incentivar o surgimento de métodos inovadores quanto ao desempenho térmico de edificações.

No ano de 2002, a União Europeia estabeleceu uma diretriz orientadora, tendo como objetivo promover a melhoria do desempenho energético de edificações dentro da comunidade, levando em consideração as condições climáticas externas locais, assim como as exigências climáticas internas e o custo-benefício (Maciel, 2006).

Há alguns anos atrás o Brasil equiparava-se em relação à normalização da energia em edifícios a outros países, como Bangladesh, Costa Rica e Venezuela, nos quais não se constata a normatização na área. Porém em 2005 se aprovou no país a norma NBR 15220 – Desempenho térmico de edificações e em 2008 a NBR 15575 – Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho, que representaram um grande avanço na área de conforto térmico.

A condutividade térmica é uma das propriedades físicas mais importantes do ponto de vista de cálculo térmico de um determinado material. Os valores deste parâmetro são fornecidos de acordo com a ABNT NBR 15220:2005, sendo determinados em intervalos de massa específica (Tabela 3.1).

Tabela 3.1: Valores da condutividade térmica de acordo com a ABNT NBR 15220:2005.

Massa específica (kg/m ³)	Condutividade térmica (W/Mk)
2200 – 2400	1,75
1600 – 1800	1,05
1400 – 1600	0,85
1200 – 1400	0,70
1000 – 1200	0,46

De acordo com Sacht (2008), Díaz *et al.* (2010) e Andiç-Çakir *et al.* (2012), a condutividade térmica é a propriedade do material que determina o fluxo de calor por condução que passa, na unidade de tempo, através de uma espessura unitária e de uma unidade de área do material, através de um gradiente de temperatura. Considera-se que as

temperaturas de ambos os lados, bem como a distribuição de temperatura em todo o material seja uniforme e constante com o tempo.

Refere-se à capacidade que um material tem em transferir calor, estando relacionada ao fluxo de calor por condução. Trata-se de um fator muito importante no cenário da construção civil, já que é possível estimar o fluxo de calor através de uma parede a partir da obtenção do valor deste parâmetro.

Essa propriedade está diretamente ligada à densidade, à natureza química e umidade do material. A condutividade térmica também varia com a temperatura, porém no caso das temperaturas que ocorrem na construção pode ser considerado como uma característica de cada material (Frota e Schiffer, 2009).

Frente ao exposto, a construção civil cada vez mais vem se preocupando com o estudo desta e demais propriedades térmicas dos materiais utilizados na elaboração dos concretos. Normas de desempenho térmico buscam aprimorar a qualidade requerida nas peças cimentícias, a partir do estabelecimento de recomendações para avaliação de tais propriedades (Lamberts, 2005; Frota e Schiffer, 2009; Díaz *et al.*, 2010 e Andiç-Çakir *et al.*, 2012).

De acordo com Ferreira (2003), Maciel (2006), Frota e Schiffer (2009) e Díaz *et al.* (2010), a maneira mais eficiente para a determinação da condutividade térmica é pelo método da placa quente, o qual envolve a medição do gradiente de temperatura médio estabelecido sobre o corpo-de-prova, a partir de certo fluxo de calor e em condições de regime permanente.

A partir da obtenção do valor da condutividade térmica da peça cimentícia, é possível caracterizar outras propriedades térmicas do material, como a resistência térmica. Tais valores permitem a classificação dos concretos de acordo com as prescrições estabelecidas pela ABNT NBR 15220:2005, que ainda relaciona os valores obtidos no ensaio térmico com a propriedade de massa específica, sendo esta relação de extrema importância no estudo de concretos leves estruturais.

3.1. Análise por meio da placa quente protegida (“Hot Plate”)

A ABNT NBR 15220:2005 – Parte 4 estabelece o método absoluto para determinação, em regime permanente, da resistência térmica e de condutividade térmica de materiais sólidos, utilizando-se da aparelhagem denominada placa quente protegida, tendo a placa uma largura total ou diâmetros acima de 200 mm e uma largura do anel de guarda entre 1/4 e 1/6 do diâmetro ou da largura total.

Esta metodologia se aplica para a medição de materiais sólidos ou granulares, compactados ou não, que compreendam faixas de resistência térmica (Equação 1) acima de $0,02 \text{ m}^2\text{K/W}$ e condutividade térmica (Equação 2) abaixo de 2 W/(m.K) .

$$R = e/C \quad \text{(Equação 1)}$$

$$C = (q/A)/(\Delta T/e) \quad \text{(Equação 2)}$$

Onde: q é o fluxo de calor por condução através de um corpo-de-prova de espessura (e), A é a área sujeita a uma diferença de temperatura (ΔT) entre as faces, calculada pela expressão:

$$q = (C.A/e). \Delta T \quad \text{(Equação 3)}$$

A determinação da condutividade térmica por este método envolve a medição do gradiente de temperatura médio estabelecido sobre o corpo-de-prova, a partir de certo fluxo de calor e em condições de regime permanente. A condução unidimensional é conseguida a partir do uso de um anel de guarda (Figura 3.1), de modo a restringir as perdas laterais de calor e tendo-se o comportamento térmico de uma placa infinita.

O anel de guarda lateral é, também, utilizado com a finalidade de reduzir as perdas de calor laterais, sendo controlado de forma a se manter a uma temperatura igual à temperatura média dos corpos-de-prova.

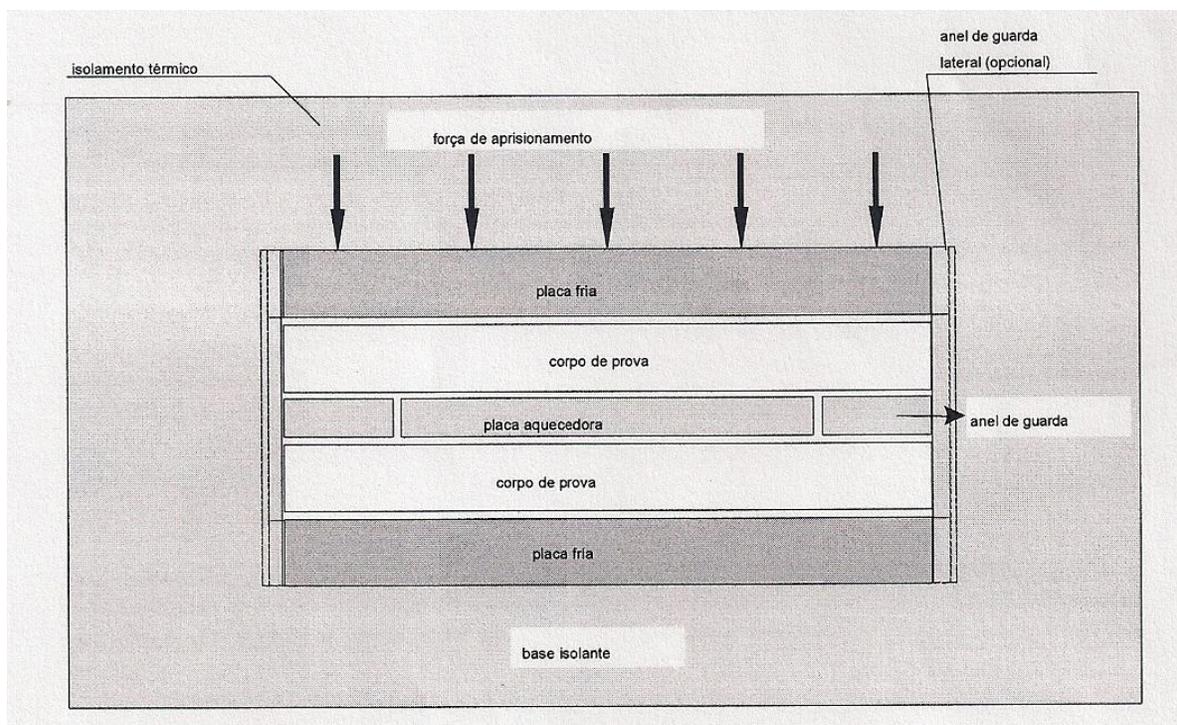


Figura 3.1: Montagem do conjunto.

Fonte: ABNT NBR 15220:2005.

A placa quente é formada por duas seções de aquecimento independentes, sendo a central denominada de seção de medição e a externa de anel de guarda. Este é separado da seção de medição por um espaço de 1,5 mm a 2,0 mm.

Conforme ilustrado na Figura 3.1, dois corpos-de-prova idênticos, com superfícies planas e paralelas, são dispostos horizontalmente em cada lado da placa quente central e colocados entre as duas placas frias isotérmicas. Para melhorar o contato térmico entre essas superfícies, placas de borracha deformável são introduzidas entre os corpos-de-prova e as placas do equipamento.

Para minimizar as perdas de calor, o conjunto é envolvido por isolante e colocado em uma caixa, que pode ser selada quando se fizerem medições com as temperaturas das placas frias próximas ou abaixo da temperatura de ponto de orvalho do ar ambiente.

Com as placas frias controladas a uma temperatura apropriada, fornece-se uma potência elétrica constante, estabilizada, na seção de medição da placa quente, de modo a

estabelecer, em regime permanente, uma diferença de temperatura adequada através dos corpos-de-prova.

Um equilíbrio de temperatura entre a seção de medição e o anel de guarda é conseguido por meio de um controle automático da potência do anel. Somente a potência dissipada na seção de medição é usada na determinação das propriedades térmicas dos corpos-de-prova. A diferença média de temperatura através dos corpos-de-prova é determinada usando-se os termopares montados nas suas superfícies.

A Figura 3.2 ilustra o equipamento “Hot Plate” Guarded Hot Plate, marca Holometrix, modelo GHP 300, utilizado nesta pesquisa.



Figura 3.2: Máquina de ensaio “Hot Plate” Guarded Hot Plate, marca Holometrix, modelo GHP 300.

Os corpos-de-prova a serem ensaiados devem ser representativos do material a ser caracterizado e devem ser ensaiados em temperaturas próximas às suas condições de uso. A espessura deve ser representativa, ou seja, devem ser várias vezes maiores do que o diâmetro dos poros ou das partículas do material componente. As dimensões devem ser na medida do possível, iguais às das placas aquecedoras e frias, além de não apresentar desvio da planicidade das superfícies superior a 0,2 mm sobre toda a largura dos corpos-de-prova.

Segundo a ABNT NBR 15220:2005, as medições de condutividade térmica podem ser realizadas por dois métodos distintos. Este trabalho foi desenvolvido utilizando uma placa de material compressível nas interfaces entre os corpos-de-prova e as placas de medição, de modo a se obter um contato térmico uniforme, conforme apresentado no Capítulo 5 e resultados no Capítulo 6.

4

MICROESTRUTURA

Além do trabalho sistemático para conhecer e controlar a microestrutura da pasta de cimento, visando à melhoria de algumas propriedades do concreto, Borja (2011) afirma que é importante que sejam realizados estudos que abordem a melhoria da qualidade da zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento.

Segundo Paulon (2005), Rossignolo (2009), Heikal *et al.* (2013) e Mohammed *et al.* (2013), existe uma forte relação entre a espessura e a qualidade da zona de transição e as propriedades mecânicas e a durabilidade dos concretos. A zona de transição influencia fortemente as propriedades relacionadas à resistência mecânica, o módulo de deformação, o mecanismo de propagação de fissuras e a permeabilidade de agentes agressivos nos concretos, demonstrando assim, a grande importância do estudo da zona de transição pasta-agregado.

Os principais desenvolvimentos da microestrutura da zona de transição do concreto podem ser resumidos da seguinte forma (Mehta *et al.*, 2008):

- a) Inicialmente, no concreto fresco, filmes de água envolvem os agregados pelo “efeito parede”, originando uma relação água/cimento superior na região próxima ao agregado, em comparação àquela existente na pasta de cimento;
- b) Em seguida, íons produzidos pela dissolução de vários componentes do cimento se combinam para formar, principalmente, etringita, hidróxido de cálcio e silicato de cálcio hidratado;
- c) Devido à maior relação água/cimento, os produtos cristalinos na vizinhança dos agregados são caracterizados por cristais maiores e, assim, formam uma estrutura porosa e mais rica em hidróxido de cálcio e etringita do que a observada na pasta de cimento.

A resistência da pasta de cimento depende, essencialmente, das forças de atração de Van der Waals, ou seja, a resistência será maior quanto mais compacta for a pasta e quanto menos cristalinos forem os produtos de hidratação. Dessa forma, a zona de transição apresenta resistência mecânica mais baixa do que a da pasta de cimento, sendo, assim, a região do concreto mais vulnerável à microfissuração, que influencia negativamente algumas propriedades desse material, como a permeabilidade e a resistência mecânica.

A vulnerabilidade da zona de transição à microfissuração existe tanto nos períodos iniciais da hidratação (quando o concreto é submetido a tensões de tração induzidas pela retração por secagem e por variações térmicas) quanto no estado endurecido do concreto (pela ação das solicitações externas), devido a deformações diferenciais entre a pasta de cimento e o agregado, que facilmente excedem a resistência-limite da zona de transição, causando, assim, as microfissuras. Como os cristais de hidróxido de cálcio tendem a se formar rapidamente, em uma direção paralela às camadas (Rossignolo, 2009; Duan *et al.* (2013); Golewski *et al.* (2014)).

Dessa forma, pode-se resumir que os fatores que mais influenciam na baixa resistência mecânica da zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento são os grandes cristais de hidróxido de cálcio orientados preferencialmente, o elevado volume de poros e a presença de microfissuras dos concretos (Figura 4.1) (Mehta *et al.*, 2008).

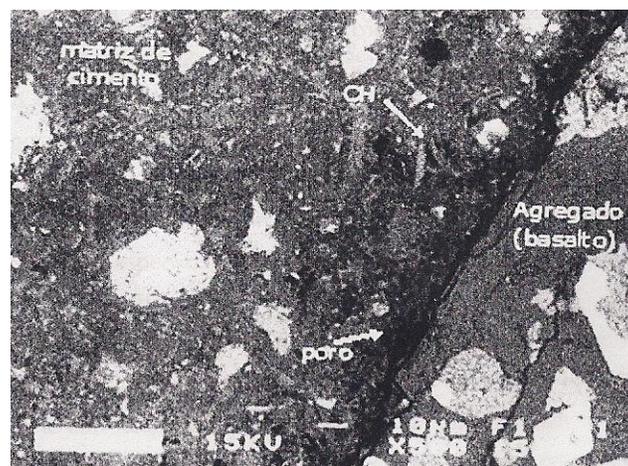


Figura 4.1: Micrografia (MEV) da zona de transição do concreto com agregado basáltico.
Fonte: Rossignolo; Agnesini (2005).

A estrutura da zona de transição pode ser modificada de diversas formas. Dentre essas, a mais utilizada e efetiva mostra-se por meio da incorporação de adições minerais, como a sílica ativa, contribuindo assim para um melhor desempenho das propriedades relacionadas à resistência mecânica e durabilidade do concreto, como demonstrado por Monteiro (1993); Paulon (2005); Rossignolo (2009), Borja (2011) e Jalal *et al.* (2012).

Segundo Rossignolo (2009), a redução da espessura da zona de transição por meio da utilização de adições minerais pode ser explicada por diversos fatores, como menor permeabilidade do concreto fresco, causando assim menor acúmulo de água de exsudação na superfície do agregado; presença de vários núcleos de cristalização que contribuem para a formação de cristais menores de hidróxido de cálcio e com menor tendência de cristalização em orientações preferenciais; e a gradual densificação do sistema dos produtos de hidratação por meio de ações pozolânicas lentas entre o hidróxido de cálcio e a adição mineral.

Outro fator importante na estrutura e na espessura da zona de transição pasta-agregado é o tipo de agregado utilizado na fabricação do concreto. Alguns estudos recentes sobre a microestrutura de concretos com agregados leves, como o de Borja (2011), Heikal *et al.* (2013), Mohammed *et al.* (2013), Duan *et al.* (2013) e Golewski *et al.* (2014), demonstraram que a interação entre esse tipo de agregado e a pasta de cimento é diferente da ocorrida nos concretos com agregados convencionais.

4.1. Zona de transição nos concretos com agregados leves

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

Entretanto, para agregados leves com porosidade aberta na face externa e com baixo teor de umidade, ocorre a redução da espessura da zona de transição, em função da

diminuição da relação água/cimento da pasta nessa região, ocasionada pela absorção de água do agregado. Esse efeito é denominado, por alguns pesquisadores, como “filtragem” ou “densificação”. A diminuição da espessura da zona de transição pasta-agregado pode ser atribuída, também, à redução do efeito parede nos agregados leves, normalmente mais rugosos e porosos que os convencionais (Zhang; GjØrv, 1990; Vieira, 2000; Rossignolo, 2009; Jalal *et al.*, 2012; Mohammed *et al.* (2013); Golewski *et al.* (2014).

Em se tratando de concretos leves, a zona de interface entre a matriz de cimento e o agregado tem comportamento bem diferente da estrutura apresentada pelo concreto convencional. Segundo Borja (2011), o contorno entre a matriz e o agregado leve apresenta forma e espessura distintos, medindo aproximadamente 10 µm de espessura, dependendo da região e do local ao longo da superfície do agregado graúdo; já no concreto convencional, esta espessura varia de 10 µm a 50 µm. A Figura 4.2 ilustra a micrografia da zona de transição dos concretos sem e com argila expandida nacional.

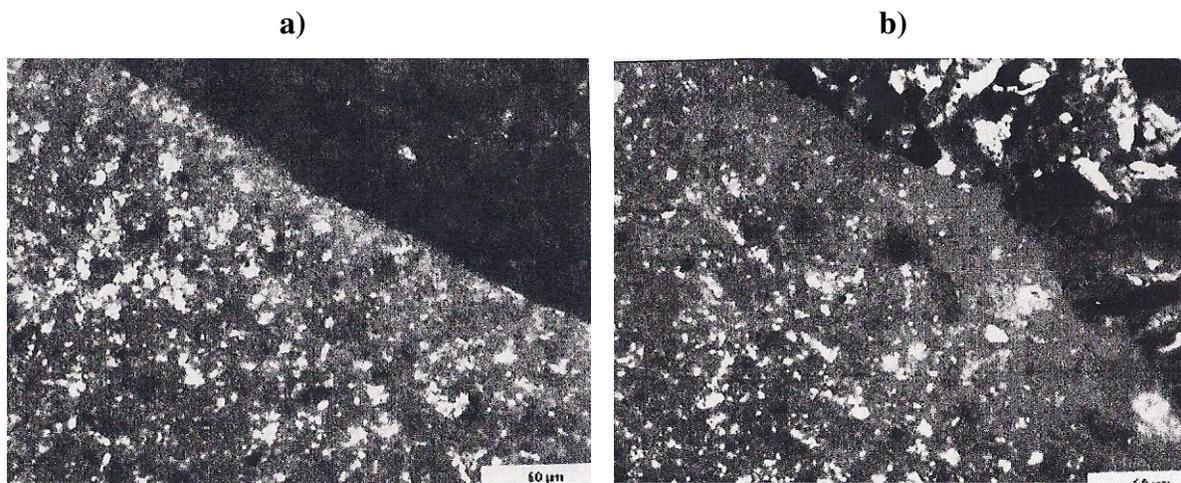


Figura 4.2: Micrografia (MEV) da zona de transição dos concretos: a) com agregado basáltico e, b) com agregado leve. **Fonte:** Rossignolo (2003).

Breton *et al.* (1993) em seus estudos sobre a contribuição dos mecanismos de formação na zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento observaram que a zona de transição é rica em C-H e que não possuem uma distribuição contínua ao longo da superfície do agregado. Rossignolo (2009), Borja (2011) e Heikal *et al.* (2013) observaram ainda que estes cristais não tem uma orientação definida podendo ser paralela,

perpendicular ou aleatória à parede do agregado, e que provavelmente devido a esse fato, o “efeito parede” não ocorra na superfície do agregado leve.

A utilização de sílica ativa, devido a sua atividade pozolânica, na composição dos concretos leves estruturais, além de evitar o fenômeno de segregação, também auxiliaram na redução da espessura da zona de transição, fato também observado por Heikal *et al.* (2013), Mohammed *et al.* (2013) e Duan *et al.* (2013), que ressaltam, ainda, que as adições minerais proporcionam um arranjo mais denso de algumas partículas microcristalinas presentes nos concretos, além da hidratação das folhas de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).

Estudos realizados por Wasserman e Bentur (1996), Maycá *et al.* (2008), Jalal *et al.*, 2012 e Golewski *et al.* (2014), indicaram que a redução da espessura da zona de transição pasta-agregado melhora o desempenho das propriedades relacionadas à resistência mecânica e à durabilidade dos concretos leves, demonstrando, assim, a grande importância do estudo da zona de transição dos concretos leves, principalmente por meio de análises por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

4.2. Análise por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A técnica de análise da microscopia de concretos por meio da MEV vem sendo utilizada por diversos pesquisadores (Breton *et al.* (1993); Paulon (2005); Rossignolo (2009); Borja (2011); Jalal *et al.* (2012); Mohammed *et al.* (2013)), desde a década de 90, devido aos excelentes resultados obtidos por meio das imagens geradas, auxiliando em melhores diagnósticos da zona de transição entre a pasta cimentícia e o agregado leve.

Por meio desta técnica, Díaz *et al.* (2010), Borja (2011), Jalal *et al.*, 2012 e Golewski *et al.* (2014), observaram que a espessura da zona de transição nos concretos com agregados leves mostra-se inferior aos observados nos concretos com agregados convencionais, relacionando este efeito, principalmente, com a maior absorção de água dos agregados leves, reduzindo, assim, a quantidade de água na superfície desse tipo de agregado.

Existe uma forte relação entre a espessura e qualidade da zona de transição agregado-matriz, segundo as pesquisas desenvolvidas por Rossignolo (2009). A partir da técnica por MEV, observou-se que a zona de transição influencia diretamente as propriedades relacionadas à resistência mecânica e o módulo de elasticidade, consequentemente alterando o mecanismo de propagação de fissuras e a permeabilidade dos concretos.

Jalal *et al.* (2012), Heikal *et al.* (2013), Mohammed *et al.* (2013) e Duan *et al.* (2013), constataram que com adições minerais nos concretos, há a redução da espessura da zona de transição, ressaltando, ainda, por meio de imagens obtidas por Microscopia de Varredura Eletrônica (MEV), o fato de ocorrer um arrançamento mais denso das partículas microcristalinas presentes nos concretos.

Sendo assim, o uso da técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) se faz importante e necessário e, seu princípio de funcionamento ocorre quando uma pequena região da amostra é atingida por um feixe de elétrons, são originados diferentes sinais, como elétrons secundários e elétrons retroespalhados, dentre outros. Essas respostas podem ser detectadas independentemente e, depois de transformadas em sinais elétricos, permite a aquisição de imagens de superfície, composição de fases e análise composicional (Rossignolo, 2009).

Elétrons secundários são partículas de baixa energia resultantes de uma colisão inelástica de elétrons primários do feixe emitido com elétrons da amostra. Seu registro possibilita a caracterização da topografia da amostra, com identificação do tamanho e textura superficial.

Os elétrons retroespalhados, por sua vez, são partículas de alta energia espalhados pela amostra. Neste caso, a imagem é formada pelo contraste devido aos números atômicos das diferentes fases que compõem a amostra (Rossignolo, 2003; Borja, 2011). A Figura 4.3 representa um esquema indicando a amostra posicionada no equipamento, enquanto a Figura 4.4 ilustra o equipamento JSM-5410 Scanning Microscope utilizado nesta pesquisa.

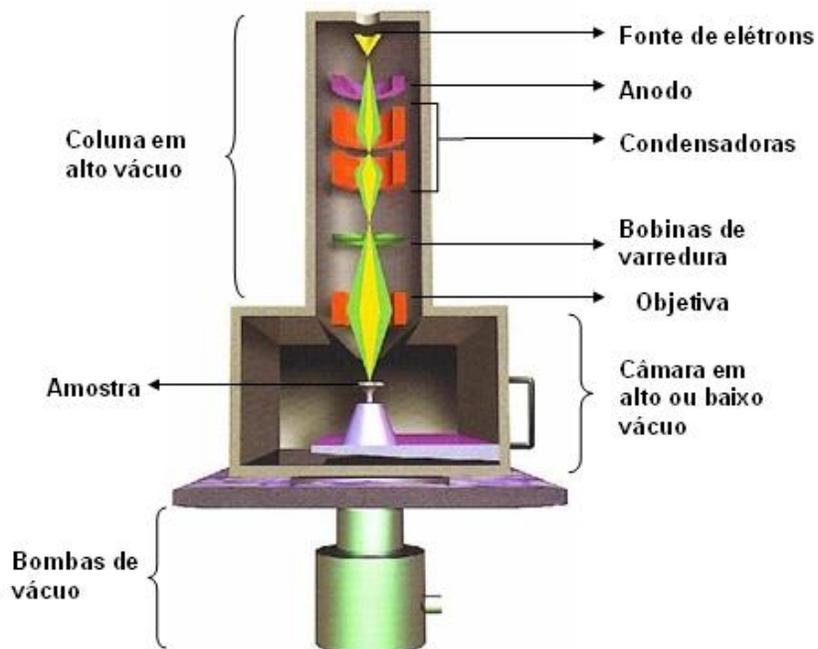


Figura 4.3: Esquema indicando a amostra posicionada no equipamento.
Fonte: Disponível em: < <http://fap01.if.usp.br/~lff/mev.html>>. Acesso em 18/12/2013.



Figura 4.4: Máquina de ensaio JSM-5410 Scanning Microscope.

5

DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

O programa experimental para os concretos produzidos nesta pesquisa foi composto por três principais etapas, que foram: a) caracterização dos materiais, b) produção dos concretos e, c) realização dos ensaios. Além da caracterização dos concretos no estado fresco, foram moldados, para cada traço desenvolvido nesta pesquisa, 23 corpos-de-prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, posteriormente ensaiados aos 7 e 28 dias. Foram utilizados 8 corpos-de-prova para o ensaio de resistência à compressão axial (ABNT 5739:2007), 6 corpos-de-prova para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral (ABNT NBR 7222:2011), 3 corpos-de-prova para avaliação da absorção de água por imersão e massa específica no estado endurecido aos 28 dias (ABNT NBR 9778:2009), além de 6 corpos-de-prova para a realização do ensaio de módulo de elasticidade (ABNT NBR 8522:2008).

Para a avaliação da condutividade térmica, 6 placas de concreto com 300,5 mm x 300,5 mm de largura e 45 mm de altura, foram produzidas para cada traço, sendo submetidos ao ensaio as duas placas que apresentaram superfície mais plana (ABNT NBR 15220:2005). Também foi analisada a microestrutura das amostras dos concretos, com e sem argila expandida, a partir da técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

Em conformidade com os objetivos desta pesquisa, mencionados nos capítulos anteriores, este capítulo apresenta o detalhamento do programa experimental adotados para o estudo dos concretos leves, como descrito na Figura 5.1.

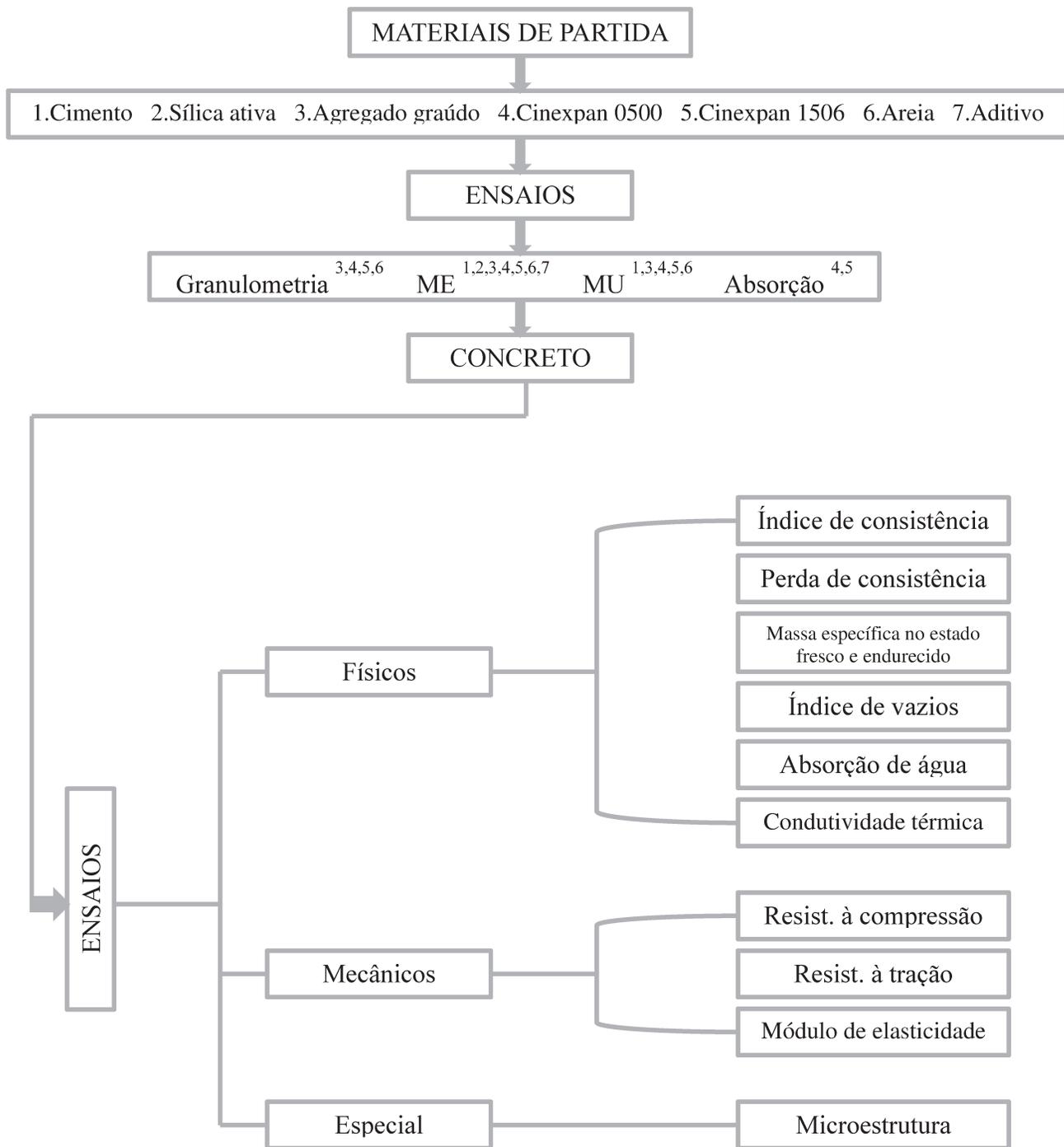


Figura 5.1: Fluxograma do programa experimental.

5.1. MATERIAIS

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram caracterizados por meio de ensaios físicos, obedecendo às prescrições da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

5.1.1. Cimento Portland

Na produção dos concretos, empregou-se o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV ARI), fabricado pela empresa Holcim. Optou-se por utilizar o cimento de alta resistência inicial, pois se desejou obter 40 MPa de resistência à compressão para aplicação dos concretos em painéis pré-moldados. A Tabela 5.1 apresenta as características e propriedades desse cimento.

Tabela 5.1: Propriedades físicas e químicas do CPV ARI.

Características e propriedades		Unidade	CPV ARI
<i>Massa específica (ABNT NBR 23:2001)</i>		<i>Kg/dm³</i>	<i>3,15</i>
<i>Massa unitária no estado solto (ABNT NBR 45:2006)</i>		<i>Kg/dm³</i>	<i>1,03</i>
<i>Tempo de pega (ABNT NBR 65:2003)</i>	<i>Início</i>	<i>min</i>	<i>130</i>
	<i>Fim</i>	<i>min</i>	<i>210</i>
<i>Resistência à compressão (f_{cj}) (ABNT NBR 7215:1997)</i> *	<i>1 dia</i>	<i>MPa</i>	<i>27,5</i>
	<i>3 dias</i>	<i>MPa</i>	<i>42,3</i>
	<i>7 dias</i>	<i>MPa</i>	<i>46,8</i>
	<i>28 dias</i>	<i>MPa</i>	<i>56</i>

* Valores disponibilizados pelo fabricante Holcim.

5.1.2. Sílica ativa

Utilizou-se sílica ativa fornecida pela empresa SILICON Indústria e Comércio de Produtos Químicos Ltda., com massa específica (ABNT NBR 23:2001) igual a 2,20 kg/dm³. A Tabela 5.2 apresenta a composição química da sílica ativa utilizada nesta pesquisa.

Tabela 5.2: Análise química da sílica ativa.

Composto	%
<i>Fe₂O₃</i>	0,08
<i>CaO</i>	0,36
<i>Al₂O₃</i>	0,17
<i>MgO</i>	0,55
<i>Na₂O</i>	0,19
<i>K₂O</i>	1,29
<i>SiO₂</i>	95,61

Fonte: Site SILICON.

5.1.3. Agregado graúdo

O agregado graúdo para a produção do concreto foi do tipo basáltico, proveniente da região de Limeira/SP. Apresentou massa específica (ABNT NBR 53:2009) de 2,90 kg/dm³ e massa unitária compacta (ABNT NBR 45:2006) de 1,51 kg/dm³. A composição granulométrica desse material foi realizada de acordo com as prescrições da ABNT NBR 248:2003. A Tabela 5.3 apresenta a composição granulométrica do agregado graúdo, a Figura 5.2 apresenta a curva granulométrica e a Figura 5.3 ilustra a execução do ensaio. A Figura 5.4 ilustra a execução do ensaio de massa unitária compacta.

Tabela 5.3: Composição granulométrica do agregado graúdo.

Abertura da peneira (mm)	Brita	
	% retida	% acumulada
12,5	0	0
9,5	1	1
6,3	27	28
4,8	34	63
2,4	29	91
1,2	2	94
0,6	1	94
0,3	0	94
0,15	0	94
Resíduo	6	100
D _{máx} característica	9,5 mm	
Módulo de finura	5,31	

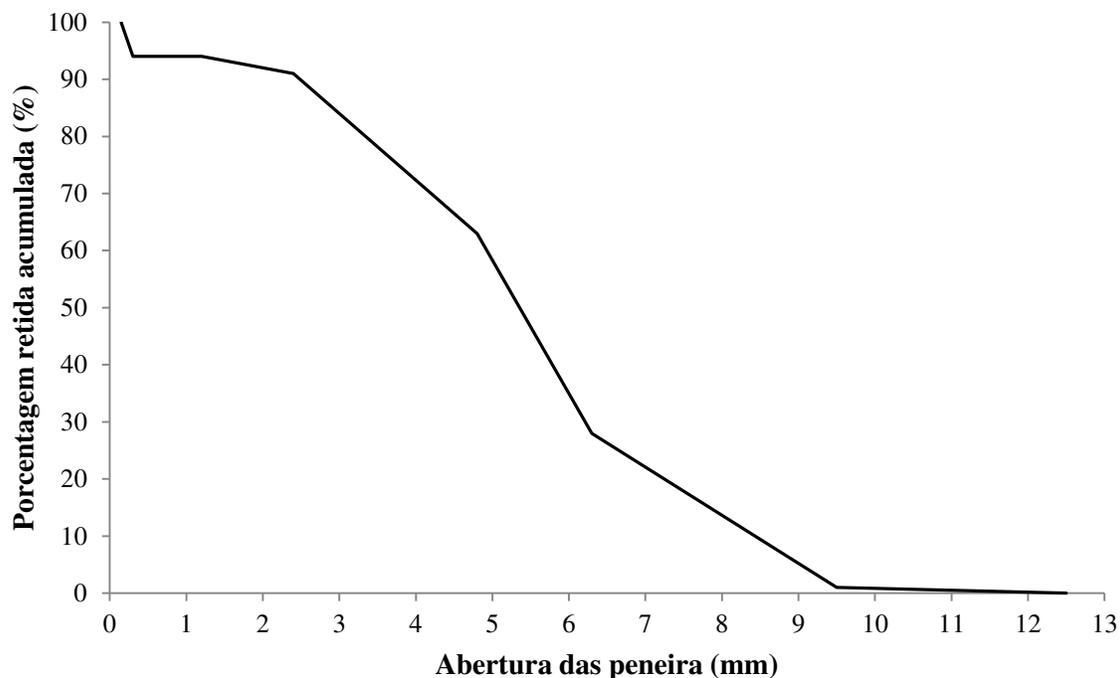


Figura 5.2: Curva granulométrica do agregado graúdo.



Figura 5.3: Ensaio de massa unitária do agregado graúdo.



Figura 5.4: Ensaio de granulometria do agregado graúdo.

5.1.4. Argila expandida

Como agregado leve, utilizou-se a argila expandida nacional, fabricada pela empresa CINEXPAN S.A., em duas graduações: CINEXPAN 0500 ($D_{\text{máx}} = 4,8$ mm e Resistência à compressão para esmagamento: 8 a 15 MPa) e CINEXPAN 1506 ($D_{\text{máx}} = 9,5$

mm e Resistência à compressão para esmagamento: < 2 MPa). Esse agregado leve, produzido pelo processo de nodulação (forno rotativo) a temperaturas médias de 1100°C, apresenta formato arredondado regular (Figura 5.5) com camada externa de baixa porosidade. A Tabela 5.4 apresenta o resultado da análise química do agregado leve.



Figura 5.5: Agregados leves nacionais: a) CINEXPAN 0500 e, b) CINEXPAN 1506.

Tabela 5.4: Análise química do agregado leve.

Composto	%
<i>Fe₂O₃</i>	<i>10,9</i>
<i>CaO</i>	<i>0,10</i>
<i>Al₂O₃</i>	<i>18,9</i>
<i>MgO</i>	<i>3,50</i>
<i>Na₂O</i>	<i>0,22</i>
<i>K₂O</i>	<i>5,7</i>
<i>SiO₂</i>	<i>52,8</i>

Fonte: Site CINEXPAN.

A Tabela 5.5 apresenta os valores da massa específica e da massa unitária (ABNT NBR 45:2006) dos dois tipos de argila expandida. A Tabela 5.6 apresenta a composição granulométrica dos agregados leves, de acordo com as prescrições da ABNT NBR 248:2003, enquanto a Figura 5.6 apresenta a curva granulométrica.

A massa específica do agregado leve CINEXPAN 0500 foi determinada pelo método prescrito na ABNT NBR 52:2009, enquanto a CINEXPAN 1506, a ABNT NBR 53:2009.

Tabela 5.5: Características dos agregados leves.

Propriedades	CINEXPAN 0500	CINEXPAN 1506
<i>Massa específica (kg/dm³)</i>	1,52	1,15
<i>Massa unitária no estado seco e solto (kg/dm³)</i>	0,85	0,62

Tabela 5.6: Composição granulométrica dos agregados leves.

Abertura da peneira (mm)	CINEXPAN 0500		CINEXPAN 1506	
	% retida acumulada	% limite de acordo com a ABNT NM 35:1995	% retida acumulada	% limite de acordo com a ABNT NM 35:1995
9,5	0	-	4	0-10
6,3	0	-	25	-
4,8	0	0-15	60	10-35
2,4	15	-	91	35-65
1,2	42	20-60	97	-
0,6	71	-	99	-
0,3	90	65-90	100	75-95
0,15	97	78-95	100	85-95
Resíduo	100	-	100	-
D _{máx} caract.	4,8 mm		9,5 mm	
Módulo de finura	3,10		5,50	

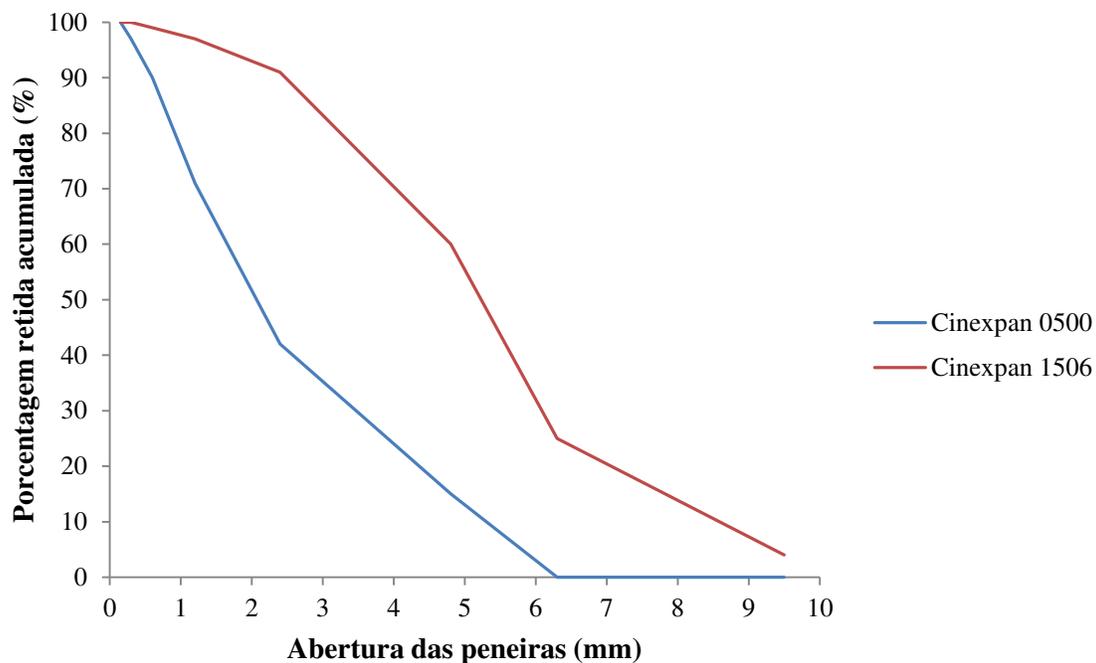


Figura 5.6: Curva granulométrica do agregado leve.

A Figura 5.7 ilustra uma imagem comparativa entre as dimensões da argila expandida nacional CINEXPAN 1506 e do agregado graúdo basáltico, utilizados na fabricação dos concretos leves estruturais desenvolvidos nesta pesquisa.



Figura 5.7: Comparação granulométrica entre a CINEXPAN 1506 (à esquerda) e o agregado graúdo (à direita), utilizados nesta pesquisa.

Os valores da absorção dos agregados leves nacionais estão dispostos na Tabela 5.7 e foram disponibilizados pela fabricante CINEXPAN S.A.

Tabela 5.7: Absorção de água dos concretos leves.

Tempo	Absorção de água (%)	
	CINEXPAN 0500	CINEXPAN 1506
1 min	0,50	0,67
5	1,00	1,50
10	1,30	2,00
30	2,20	3,10
1 hora	3,00	3,83
2	3,70	4,33
6	4,83	5,50
1 dia	6,83	7,50

Fonte: Site CINEXPAN.

5.1.5. Areia natural

Empregou-se areia natural quartzosa proveniente do município de Limeira, estado de São Paulo. A Tabela 5.8 apresenta a composição granulométrica e a Figura 5.8 a curva granulométrica da areia, segundo as prescrições da ABNT NBR 248:2003 (Figura 5.9). A areia utilizada apresentou massa específica (ABNT NBR 52:2009) igual a $2,65 \text{ kg/dm}^3$ (Figura 5.10) e massa unitária no estado solto e seco (ABNT NBR 45:2006) igual a $1,52 \text{ kg/dm}^3$ (Figura 5.11).

Tabela 5.8: Granulometria da areia natural.

Abertura da peneira (mm)	Areia natural	
	% retida	% acumulada
4,8	0,132	0,132
2,4	1,021	1,153
1,2	3,018	4,171
0,6	8,909	13,079
0,3	41,818	54,897
0,15	36,383	91,281
Resíduo	8,719	100,00
$D_{\text{máx}}$ característica	1,2 mm	
Módulo de finura	1,64	
Classificação	Zona utilizável inferior	

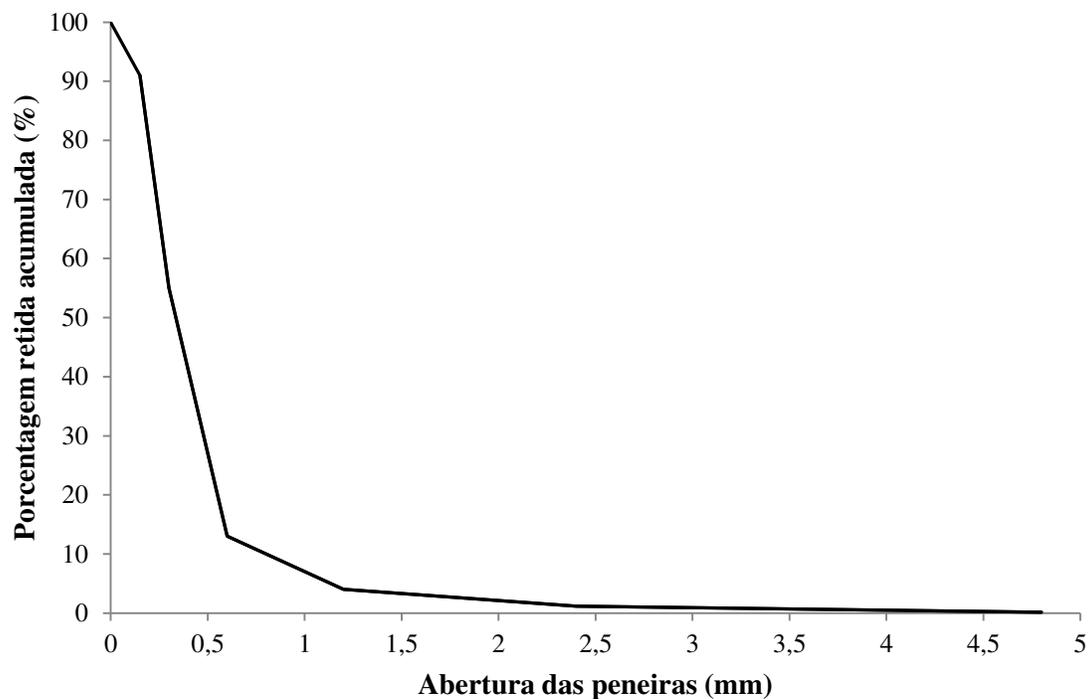


Figura 5.8: Curva granulométrica da areia quartzosa.

Observou-se a partir da análise das Tabelas 5.3, 5.6 e 5.8 que a granulometria da argila expandida CINEXPAN 0500 e da areia natural são correspondentes, bem como a granulometria da CINEXPAN 1506 com o agregado graúdo.



Figura 5.9: Ensaio de granulometria da areia.



Figura 5.10: Ensaio de massa específica da areia.



Figura 5.11: Ensaio de massa unitária da areia.

5.1.6. Aditivo superplastificante (SPA)

O aditivo superplastificante utilizado foi do tipo acelerador com elevado efeito redutor de água, classificado como SPA segundo a ABNT NBR 11768:2011, fabricado pela empresa BASF S.A. A Tabela 5.9 apresenta as características físicas e químicas do aditivo superplastificante.

Tabela 5.9: Características físicas e químicas do aditivo superplastificante.

Propriedades e características	Unidade	Resultado
<i>Massa específica</i>	<i>kg/dm³</i>	<i>1,19</i>
<i>pH</i>	-	<i>6</i>
<i>Teor de sólidos</i>	<i>%</i>	<i>30</i>
<i>Viscosidade</i>	<i>cps</i>	<i>< 150</i>
<i>Aspecto</i>	-	<i>Líquido</i>
<i>Cor</i>	-	<i>Branco turvo</i>
<i>Base química</i>	-	<i>Éter policarboxílico</i>

Fonte: Manual do produto disponibilizado pela BASF S.A.

5.2. DOSAGEM DOS CONCRETOS LEVES ESTRUTURAIS

A dosagem dos concretos leves estruturais, os quais utilizaram conjuntamente cimento Portland de alta resistência inicial, sílica ativa, aditivo superplastificante e agregados leves nacional, foi realizada com a finalidade de se obter um concreto com:

- a) valores de índice de consistência em torno de 200 ^{+/-} 10 mm, a fim de garantir a trabalhabilidade necessária para moldagem;
- b) baixa massa específica, tanto no estado fresco, como no endurecido, caracterizando os concretos como leves;
- c) resistência mecânica acima de 20 MPa aos 28 dias de idade, caracterizando os concretos como estruturais;

d) excelentes valores de condutividade térmica, para a manutenção do conforto térmico.

Algumas dosagens foram estudadas, com a finalidade de entendimento das principais metodologias utilizadas para a fabricação de concretos leves estruturais. Rossignolo (2009) recomenda desenvolver traços que combinem diferentes granulometrias de argila expandida, na substituição de agregados miúdos e graúdos, para que ocorra o melhor empacotamento dos materiais, obtendo-se um concreto coeso, assim como, com menores valores de massa específica e que apresente excelentes valores quanto à resistência mecânica.

Borja (2001), Bogas *et al.* (2012) e Hubertová *et al.*, 2013, aconselham a utilização de sílica ativa em, no máximo, 10% em relação a quantidade de cimento introduzido na mistura do concreto, além da incorporação de pequenas porcentagens de aditivos superplastificantes que auxiliam na manutenção da consistência, permitindo a redução da relação água/cimento.

Outro elemento fundamental para a fabricação de concretos leves estruturais é a administração do teor de argamassa, que segundo Malaiskiene *et al.* (2011) e Utama *et al.* (2012), devem apresentar valores acima de 65%, além de consumo de cimento superior à 500 kg/m^3 , visto que a argamassa torna-se a fase mais resistente do concreto leve estrutural e os agregados, a parte mais frágil, como já observado por Rossignolo (2009), Díaz *et al.* (2010) e Jalal *et al.* (2012).

Frente a tais recomendações técnicas para dosagem, as metodologias utilizadas na fabricação dos concretos leves estruturais desta pesquisa seguiram as prescrições do IPT/USP (Instituto de Pesquisas Tecnológicas), devido à falta de uma prescrição da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), bem como, a utilização das prescrições feitas pelo ACI 213R-03, as quais também foram utilizadas por Rossignolo (2003), Moravia (2007), Maycá *et al.* (2008), Borja (2011) e Angelin *et al.* (2012).

O teor de sílica ativa utilizado nos concretos foi de 10%, em relação à massa de cimento, a relação água/cimento foi de 0,4 e teor de argamassa de 65%. Fixaram-se,

também, as porcentagens de areia natural e CINEXPAN 0500, para efeito de comparação entre os traços desenvolvidos. A Tabela 5.10 apresenta os traços dos concretos obtidos.

Tabela 5.10: Dosagem dos concretos.

Traço	Proporcionamento (em massa) <i>C:SA:AG:A:C0500:C1506:SPA</i> ¹	Consumo de cimento (kg/m ³)
T1	<i>1 : 0,1 : 1,6 : 1,28 : 0,23 : 0 : 0,037</i>	520
T2	<i>1 : 0,1 : 1,19 : 1,28 : 0,23 : 0,18 : 0,037</i>	550
T3	<i>1 : 0,1 : 0,8 : 1,28 : 0,23 : 0,37 : 0,019</i>	565
T4	<i>1 : 0,1 : 0,4 : 1,28 : 0,23 : 0,55 : 0,019</i>	575
T5	<i>1 : 0,1 : 0 : 1,28 : 0,23 : 0,74 : 0,019</i>	580

¹ cimento : sílica ativa : agregado graúdo : areia : CINEXPAN 0500 : CINEXPAN 1506 : superplastificante

5.3. PRODUÇÃO DOS CONCRETOS

5.3.1. Mistura dos materiais

Para a mistura dos materiais, seguiram-se as prescrições da ABNT NBR 12821:2009. Devido à alta absorção de água pelos agregados leves, de forma a compensar esse efeito, fez-se um umedecimento dos mesmos por 24 horas, antes de serem utilizados na produção dos concretos (Figura 5.12).

5.3.1.1. Concreto de referência

Após a realização do processo de umedecimento da argila expandida, houve a separação e pesagem dos materiais utilizados na fabricação dos concretos. No momento da fabricação das peças, o índice de temperatura apresentou uma média de 25°C (^{+/-} 2°C) e teor de umidade em torno de 60%, mostrando-se adequados.

O processo de mistura, em betoneira de eixo inclinado previamente umedecida, ocorreu da seguinte forma: primeiramente introduziu-se o agregado graúdo convencional, em seguida, a água proveniente da rede pública, logo após, o cimento Portland de alta resistência inicial foi introduzido na betoneira, seguido da areia e da argila expandida

nacional CINEXPAN 0500 e, por último, a sílica ativa foi incluída na mistura. Em seguida houve a mistura dos materiais na betoneira de eixo inclinado por aproximadamente 5 minutos. Logo após introduziu-se o aditivo superplastificante, ocorrendo uma nova mistura por 3 minutos.

Após o término do processo de amassamento do concreto, em betoneira de eixo inclinado, foi observado que a mistura cimentícia apresentou-se coesa, sem serem observados os fenômenos de segregação e exsudação entre os materiais.

Foi realizado o ensaio de abatimento do tronco de cone, segundo as prescrições da ABNT NBR 67:1998, por meio do qual pode-se verificar a consistência e plasticidade do concreto fabricado, com a finalidade de obter uma trabalhabilidade adequada prevista (200 ± 10 mm), e, assim, efetuar a moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, além das placas de concreto com 300,5 mm x 300,5 mm de largura e 45 mm de altura.

5.3.1.2. Concretos leves

O processo de mistura dos materiais, na fabricação dos concretos leves, ocorreu de forma análoga ao utilizado para a confecção do concreto de referência, sendo, a argila expandida CINEXPAN 1506, introduzida após o agregado graúdo e antes da água.

A Figura 5.13 e a Figura 5.14 representam, respectivamente, os materiais separados para a produção dos concretos e o momento da introdução dos materiais na betoneira inclinada.



Figura 5.12: Umedecimento da argila expandida.



Figura 5.13: Materiais separados para a produção dos concretos.



Figura 5.14: Introdução dos materiais na betoneira de eixo inclinado.

5.3.2. Adensamento

Após a realização do ensaio de consistência (ABNT NBR 67:1998) e segundo a revisão bibliográfica, adotou-se a vibração por imersão (Figura 5.15), para os corpos-de-prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, com a finalidade de evitar a formação de vazios. Para os moldes das placas de concreto de 300,5 x 300,5 mm de largura e 45 mm de altura, optou-se pelo adensamento em mesa vibratória (Figura 5.16), para que houvesse total preenchimento das formas, de acordo com as prescrições da ABNT NBR 5738:2008.

A Figura 6.8, no Capítulo 6, ilustra os corpos-de-prova após a ruptura à tração por compressão diametral, nos quais se pode observar que o processo de adensamento manual foi eficiente, evitando a segregação dos agregados leves.



Figura 5.15: Adensamento mecânico dos corpos-de-prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura.

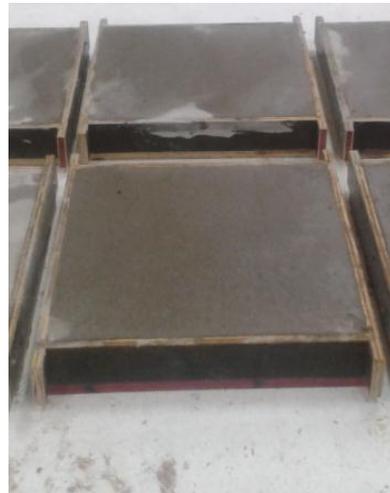


Figura 5.16: Adensamento das placas de concreto de 300,5 x 300,5 mm de largura e 45 mm de altura.

5.3.3 Ensaio dos concretos no estado fresco

Após os concretos serem misturados e amassados, alguns ensaios no estado fresco foram realizados, como perda de consistência, massa específica e teor de ar incorporado.

Tais ensaios e resultados serviram para a caracterização dos concretos fabricados nesta pesquisa.

Os ensaios dos concretos no estado fresco foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Faculdade de Tecnologia da UNICAMP.

5.3.3.1 Perda de consistência

O ensaio de perda de consistência foi realizado de acordo com as prescrições da ABNT NBR 10342:2012, a qual estabelece a verificação do índice de consistência do concreto em um dado período de tempo ou até atingir um valor específico de abatimento. Foi estabelecida, para esta pesquisa, a leitura dos índices de consistência dos concretos de 15 em 15 minutos durante 2 horas, mesma metodologia adotada por Rossignolo (2003).

5.3.3.2 Massa específica no estado fresco e teor de ar incorporado

Para a determinação da massa específica no estado fresco e teor de ar incorporado, seguiu-se as prescrições da ABNT NBR 9833:2009.

5.3.4. Procedimento de cura

Após 24 horas, os corpos-de-prova foram desmoldados, e, em seguida, submetidos ao processo de cura úmida, onde a temperatura foi de 23°C (\pm 2°C) e umidade relativa do ar acima de 95% (Figura 5.17). Os corpos-de-prova permaneceram em cura até a data da realização dos ensaios, 7 ou 28 dias após a moldagem, de acordo com as prescrições da ABNT NBR 5738:2008.



Figura 5.17: Corpos-de-prova em cura úmida.

5.3.5. Ensaio dos concretos no estado endurecido

A Tabela 5.11 apresenta os procedimentos normatizados utilizados na avaliação das propriedades dos concretos fabricados nesta pesquisa.

Tabela 5.11: Ensaio normatizados dos concretos no estado endurecido.

Item	Norma
Massa específica, índice de vazios e absorção de água por imersão	<i>ABNT NBR 9778:2009 – Argamassa e concreto endurecidos-Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica</i>
Resistência à compressão	<i>ABNT NBR 5739:2007 – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto</i>
Resistência à tração	<i>ABNT NBR 7222:2011 – Argamassa e concreto-Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos</i>
Módulo de deformação	<i>ABNT NBR 8522:2008 – Concreto-Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação</i>
Condutividade térmica	<i>ABNT NBR 15220:2005 – Desempenho térmico</i>

5.3.5.1 Massa específica, índice de vazios e absorção de água por imersão

Os valores de massa específica, índice de vazios e absorção de água por imersão dos concretos, no estado endurecido, foram determinados segundo as prescrições da ABNT

NBR 9778:2009, para concretos leves com idade de 28 dias, utilizando-se corpos-de-prova com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Foram moldados 3 corpos-de-prova para cada traço de concreto desenvolvido.

O ensaio de massa específica, índice de vazios e absorção de água por imersão, foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Faculdade de Tecnologia da UNICAMP.

5.3.5.2 Resistência à compressão e à tração

Os ensaios de resistência à compressão e à tração por compressão diametral foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Faculdade de Tecnologia da UNICAMP.

A resistência à compressão dos concretos foi determinada segundo as prescrições da ABNT NBR 5739:2007, utilizando-se corpos-de-prova cilíndricos, com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, nas idades de 7 e 28 dias. Para cada dosagem e idade, foram moldados 4 corpos-de-prova.

Os valores de resistência à tração por compressão diametral foram determinados segundo as prescrições da ABNT NBR 7222:2011, nas idades de 7 e 28 dias, utilizando-se 3 corpos-de-prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura para cada dosagem e idade.

5.3.5.3 Módulo de deformação

A determinação dos valores de módulo de deformação dos concretos foi realizada segundo as prescrições da ABNT NBR 8522:2008, para concretos nas idades de 7 e 28 dias, utilizando-se corpos-de-prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Para cada dosagem e idade foram analisados 3 corpos-de-prova. O carregamento foi constante de $0,50 \pm 0,05$ MPa/s e o valor do módulo de deformação foi calculado utilizando-se a tensão correspondente a 50% do carregamento último.

O ensaio para determinar o módulo de deformação foi realizado no Laboratório da Faculdade de Engenharia Civil (FEC/UNICAMP).

5.3.5.4 Condutividade térmica

O ensaio para a determinação da condutividade térmica dos concretos foi realizado junto ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT/SP), por meio do equipamento Guarded Hot Plate, marca Holometrix, modelo GHP 300.

A determinação da condutividade térmica foi realizada segundo as prescrições da ABNT NBR 15220:2005 para os concretos com 28 dias de idade, utilizando-se corpos-de-prova com 300,5 mm x 300,5 mm de largura e 45 mm de altura, segundo as dimensões do equipamento, para execução do ensaio. Foram moldadas 6 placas de concreto para cada traço, sendo que foram analisadas apenas as duas melhores peças.

Após a desmoldagem dos corpos-de-prova, realizou-se o polimento das peças para que as superfícies ficassem lisas e paralelas, com a finalidade de que o desvio da planicidade das superfícies dos corpos-de-prova não fosse superior a 0,2 mm sobre toda a largura dos mesmos.

Os corpos-de-prova foram secos em estufa ventilada e aquecida a uma temperatura de 25°C ($\pm 2^\circ\text{C}$), de forma a não alterar as características do material. Em seguida os corpos-de-prova foram esfriados dentro de um dessecador e pesados a temperatura ambiente. Utilizou-se a metodologia prescrita para corpos-de-prova com resistência térmica superior a 0,3 m²K/W, a qual prescreve a utilização uma placa de material compressível nas interfaces entre os corpos-de-prova e as placas de medição, de modo a se obter um contato térmico uniforme.

5.3.5.5 Análise microestrutural

A análise da microestrutura da matriz de cimento foi realizada junto ao Instituto de Física da Universidade Estadual de Campinas (IF/UNICAMP), por meio do equipamento JSM-5410 Scanning Microscope.

A técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi utilizada para análise da interface entre a matriz de cimento e o agregado dos concretos, com e sem argila expandida nacional, para efeito de comparação. As amostras foram provenientes de pequenos fragmentos dos corpos-de-prova dos concretos preparados utilizando-se os teores de sílica ativa e superplastificante adotados no processo de dosagem dos concretos.

6

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo reserva-se à apresentação e à discussão dos resultados das análises experimentais dos concretos leves, divididas em três etapas principais:

- a) caracterização das propriedades físicas e mecânicas dos concretos;
- b) avaliação da condutividade térmica;
- c) estudo da microestrutura da matriz de cimento.

As análises físicas e mecânicas, de resistência à compressão e à tração por compressão diametral, foram realizadas no Laboratório de Materiais da Construção Civil da Faculdade de Tecnologia – FT da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. O ensaio para determinar o módulo de deformação foi realizado no Laboratório da Faculdade de Engenharia Civil (FEC/UNICAMP), enquanto a análise da microestrutura da matriz de cimento foi realizada junto ao Instituto de Física da Universidade Estadual de Campinas (IF/UNICAMP). Os laboratórios da UNICAMP têm seus equipamentos calibrados anualmente, sendo os mesmos de referência e bem conceituados.

O ensaio para a determinação da condutividade térmica dos concretos foi realizado junto ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT/SP), o qual apresenta grande confiabilidade metrológica, creditado pelo INMETRO.

6.1. Caracterização das propriedades dos concretos leves

6.1.1. Propriedades no estado fresco

As caracterizações das propriedades dos concretos no estado fresco foram realizadas no Laboratório de Materiais da Construção Civil da Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas (FT/UNICAMP).

6.1.1.1. Índice de consistência

Todos os concretos estudados apresentaram coesão e consistência, resultando em uma excelente trabalhabilidade para a execução da moldagem dos corpos-de-prova. Não foram observados os fenômenos de exsudação e segregação dos agregados leves em estudo (Figura 6.1), fato atribuído, segundo Jalal *et al.* (2012), principalmente, pelo uso da sílica ativa.

Os valores do índice de consistência para todas as dosagens dos concretos obedeceram ao intervalo de 200 ± 10 mm, segundo as prescrições da ABNT NBR 7215:1997 (Figura 6.2). Analisando os resultados apresentados na Tabela 6.1, nota-se um aumento nos valores no índice de consistência conforme o aumento na quantidade de agregado leve nos concretos, devido às propriedades físicas deste material.

Tabela 6.1: Propriedades dos concretos leves no estado fresco.

Traço	CINEXPAN 1506 (%)	Índice de consistência (mm)	Consumo de cimento (kg/m^3)	Massa específica (kg/m^3) ABNT NBR 9833:2009	Teor de ar (%) ABNT NBR 9833:2009
T1	0	190	520	2303	3,00
T2	25	200	550	2289	3,34
T3	50	200	565	2250	3,43
T4	75	210	575	2012	3,44
T5	100	210	580	1788	3,54



Figura 6.1: Concreto com coesão.



Figura 6.2: Ensaio de índice de consistência.

6.1.1.2. Massa específica e teor de ar incorporado

Os valores de massa específica e teor de ar incorporado dos concretos foram determinados segundo as prescrições da ABNT NBR 9833:2009 e são apresentados na Tabela 6.1. Os valores da massa específica no estado fresco variaram entre 1788 e 2303 kg/m³, ou seja, houve uma redução de 22% da massa específica nos concretos leves em comparação ao concreto com agregado convencional.

Os valores do teor de ar incorporado obtidos para os concretos aumentaram, em média, 15% a partir do aumento de agregado leve nos concretos desenvolvidos nesta pesquisa, valores próximos aos observados por Rossignolo (2003), Pereira (2008) e Malaiskiene *et al.* (2011), Utama *et al.* (2012) e Liu *et al.* (2013).

6.1.1.3. Perda de consistência

A análise da perda de consistência dos concretos foi realizada segundo a ABNT NBR 10342:2012. A Figura 6.3 apresenta os resultados do estudo de perda de consistência dos concretos leves durante as primeiras duas horas após a mistura dos materiais.

Verificou-se que todas as dosagens estudadas apresentaram comportamento semelhante, ao longo das duas primeiras horas após a mistura, com valores de índice de consistência (ABNT NBR 7215:1997) acima de 190 mm, após a primeira hora e acima de 175 mm ao final da análise. O valor do índice de consistência dos concretos ao fim da

primeira hora pode ser considerado satisfatório, observando-se a trabalhabilidade necessária para a produção de elementos pré-fabricados.

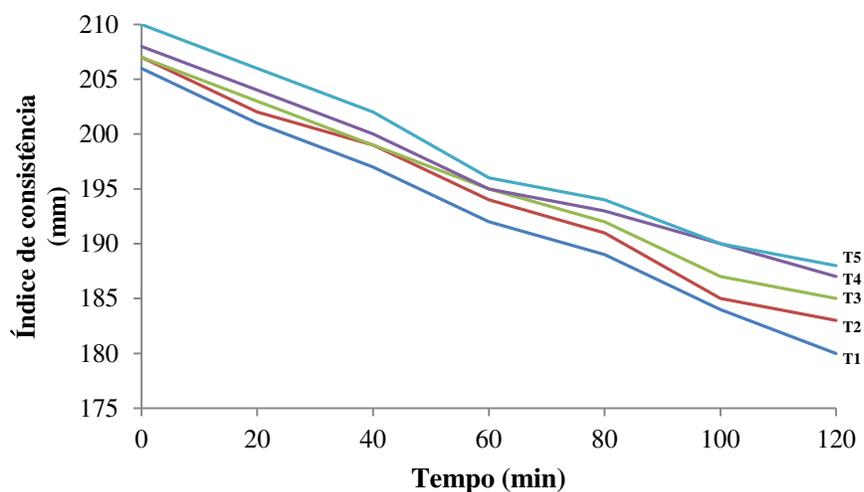


Figura 6.3: Perda de consistência dos concretos leves estruturais.

6.1.2. Propriedades no estado endurecido

As análises mecânicas, de resistência à compressão e à tração, bem como a avaliação da massa específica e absorção, foram realizadas no Laboratório de Materiais da Construção Civil da Faculdade de Tecnologia (FT/UNICAMP). O ensaio para determinar o módulo de deformação foi realizado no Laboratório da Faculdade de Engenharia Civil (FEC/UNICAMP)

6.1.2.1 Resistência à compressão e massa específica

A resistência à compressão dos concretos foi determinada segundo as prescrições da ABNT NBR 5739:2007, utilizando-se corpos-de-prova cilíndricos, com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, nas idades de 7 e 28 dias. Para cada dosagem e idade, foram moldados 4 corpos-de-prova.

A massa específica do concreto leve, no estado seco, foi determinada segundo as prescrições da ABNT NBR 9778:2009 para concretos leves com idade de 28 dias, utilizando-se corpos-de-prova com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Foram moldados 3 corpos-de-prova para cada tipo de concreto. Os valores obtidos de resistência à compressão e massa específica seca dos concretos leves são apresentados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2: Resistência à compressão e massa específica dos concretos leves.

Traço	CINEXPAN 1506 (%)	Resistência à compressão (MPa)		Massa específica (kg/m ³)
		7 dias	28 dias	
T1	0	53	63	2400
T2	25	40	42	2205
T3	50	35	40	2033
T4	75	29	37	1902
T5	100	26	32	1687

Os valores da resistência à compressão dos concretos apresentaram uma redução, média, de 17% aos 7 dias e de 15% aos 28 dias de idade, conforme o aumento do agregado leve CINEXPAN 1506 nos concretos. Comparando o concreto com agregado convencional (T1) com o concreto com 100% de agregado leve (T5), houve uma redução de 30% da massa específica do concreto no estado endurecido. A Figura 6.4 apresenta a relação entre a resistência à compressão aos 28 dias e a massa específica dos concretos leves e a Figura 6.5 ilustra o ensaio de resistência à compressão.

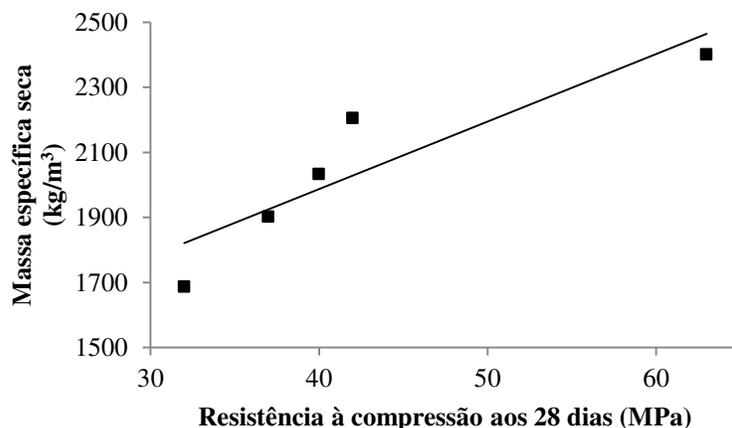


Figura 6.4: Relação entre resistência à compressão aos 28 dias e massa específica dos concretos leves.



Figura 6.5: Ensaio de resistência à compressão.

Nos resultados apresentados na Tabela 6.2, observa-se que os valores da resistência à compressão dos concretos leves foram semelhantes entre as idades de 7 e 28 dias, indicando, assim, que aos 7 dias os concretos leves apresentam estabilização dos valores dessa propriedade. Segundo Rossignolo (2009), Bektas *et al.* (2012), Hubertová *et al.* (2013) e Angelin *et al.* (2013a), considera-se a estabilização dos valores de resistência à compressão aos 7 dias de idade uma característica dos concretos com agregados leves, pois, normalmente, aos 7 dias de idade, os valores da resistência à compressão da matriz de cimento ultrapassam os valores da resistência à compressão do agregado, principalmente com a utilização de cimento de alta resistência inicial, ou seja, a resistência final do concreto não se beneficia na mesma proporção com o aumento da resistência à compressão da matriz de cimento.

Durante a realização das análises experimentais, observou-se que as rupturas dos concretos leves submetidos à compressão foram mais frágeis com o aumento dos valores da resistência à compressão. Quando o concreto com massa específica normal é submetido à tensão de compressão, a propagação das fissuras normalmente ocorre na matriz de cimento ou na interface agregado-matriz, pois, geralmente, o agregado mostra-se mais resistente do que a matriz de cimento, absorvendo uma considerável quantidade de energia. Segundo Malaiskiene *et al.* (2011), Sim *et al.* (2012) e Angelin *et al.* (2013b), nos concretos com agregados leves, tipicamente menos resistentes que a matriz de cimento, a propagação das

fissuras ocorre, normalmente, nos agregados, ocasionando um acúmulo de tensões na matriz de cimento, provocando, assim, uma ruptura brusca do concreto.

Entende-se, também, que a manutenção desta propriedade ocorre devido ao uso de adições minerais, como a sílica ativa, utilizada na fabricação das peças de concreto desta pesquisa. Segundo Duan *et al.* (2013), este fato, torna a mistura do concreto mais estável, aumentando, assim, a sua resistência mecânica, conseqüentemente a sua durabilidade.

6.1.2.2 Resistência à tração

Os valores de resistência à tração por compressão diametral foram determinados segundo as prescrições da ABNT NBR 7222:2011, nas idades de 7 e 28 dias, utilizando-se 3 corpos-de-prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura para cada dosagem e idade. Os valores de resistência à tração por compressão diametral são apresentados na Tabela 6.3, onde pode-se observar que, para todos os traços, os valores apresentaram-se acima de 2 MPa, valor mínimo exigido pela ABNT NBR 7222:2011. A Figura 6.6 apresenta a relação pela qual é possível estimar o valor da resistência à tração do concreto leve em função dos valores de resistência à compressão, enquanto a Figura 6.7 ilustra a realização do ensaio de resistência à tração. A Figura 6.8 ilustra os corpos-de-prova após a ruptura por tração diametral, onde pode-se verificar que não houve segregação dos agregados leves.

Tabela 6.3: Valores da resistência à tração dos concretos leves.

Traço	CINEXPAN 1506 (%)	Resistência à tração (MPa)	
		7 dias	28 dias
T1	0	4	6
T2	25	2,5	4,1
T3	50	2,4	3,8
T4	75	2,3	3,2
T5	100	2,1	3,15

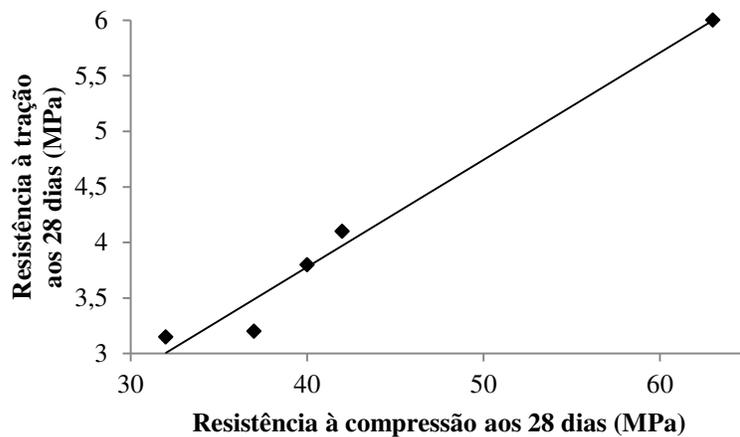


Figura 6.7: Realização do ensaio de resistência à tração.

Figura 6.6: Relação entre resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão aos 28 dias dos concretos leves.



Figura 6.8: Corpos-de-prova após a ruptura por tração diametral.

Percebe-se nos resultados apresentados pela Tabela 6.3 que, houve um decréscimo de aproximadamente 37%, aos 7 dias, e 32% aos 28 dias, nos valores de resistência à tração por compressão diametral do concreto convencional para os concretos com agregados leves. Houve pouca variação desta propriedade entre os concretos T2, T3, T4 e T5, fato também observado por outros autores, como Rossignolo (2003), Moravia (2007), Maycá *et al.* (2008), Her-Yung (2009), Borja (2011), Ho *et al.* (2012), Ma *et al.* (2013) e Angelin *et al.* (2013a).

6.1.2.3 Módulo de deformação

A determinação dos valores de módulo de deformação dos concretos foi realizada segundo as prescrições da ABNT NBR 8522:2003, para concretos nas idades de 7 e 28 dias, utilizando-se corpos-de-prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Para cada dosagem e idade foram analisados 3 corpos-de-prova. O carregamento foi constante de $0,50 \pm 0,05$ MPa/s e o valor do módulo de deformação foi calculado utilizando-se a tensão correspondente a 50% do carregamento último. A Tabela 6.4 apresenta os resultados de módulo de deformação obtidos para os concretos leves.

Observou-se nos resultados apresentados na Tabela 6.4 que os valores do módulo de deformação obtidos para os concretos leves foram inferiores aos normalmente observados para os concretos com agregados tradicionais, para os mesmos níveis de resistência à compressão, como pode ser observado na Figura 6.9. Essa redução está em conformidade com estudos anteriores (Pereira, 2008; Rossignolo, 2009; Díaz *et al.*, 2010; Ho *et al.* 2012; Wang *et al.*, 2013; Angelin *et al.*, 2013c) e deve-se essencialmente à baixa resistência à compressão dos agregados leves, cerca de 10% do valor observado para os agregados tradicionais, como o basalto, por exemplo. Observa-se, também, que a diferença entre os valores do módulo de deformação obtidos aos 7 e 28 dias foi de aproximadamente 25%.

A Figura 6.10 ilustra o ensaio de módulo de elasticidade realizado na Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas (FEC/UNICAMP).

Tabela 6.4: Valores do módulo de deformação dos concretos leves.

Traço	CINEXPAN 1506 (%)	Módulo de deformação (GPa)	
		7 dias	28 dias
T1	0	35	52
T2	25	34	40
T3	50	25	33
T4	75	21	28
T5	100	20	25

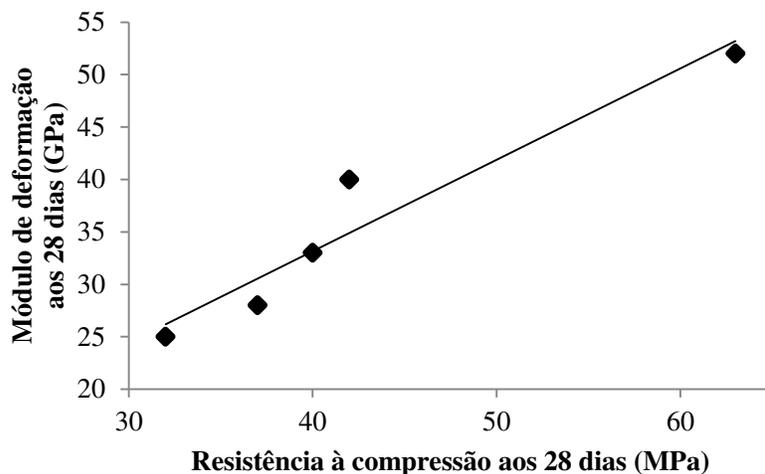


Figura 6.9: Relação entre resistência à compressão e módulo de deformação dos concretos leves aos 28 dias.



Figura 6.10: Ensaio de módulo de elasticidade.

6.1.2.4 Absorção de água por imersão e índice de vazios

A determinação dos valores de absorção de água por imersão e índice de vazios dos concretos leves foi realizada segundo as recomendações da ABNT NBR 9778:2009 para os concretos com idade de 28 dias, utilizando-se corpos-de-prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Foram analisados 3 corpos-de-prova para cada tipo de concreto. Os valores de absorção de água por imersão e de índice de vazios são apresentados na Tabela 6.5.

Tabela 6.5: Absorção de água por imersão e índice de vazios dos concretos leves.

Traço	CINEXPAN 1506 (%)	Absorção de água aos 28 dias (%)	Índice de vazios aos 28 dias (%)
T1	0	4,02	8,83
T2	25	6,4	11,32
T3	50	7,06	11,68
T4	75	8,22	13,07
T5	100	9,15	13,37

Observou-se, quanto a absorção de água por imersão, valores médios de 7%, aos 28 dias, valor considerado adequado, de acordo com as prescrições da ABNT NBR 11173:1990, bem como os encontrados por Jalal *et al.* (2012).

Analisando a Tabela 6.5, percebe-se que com a maior incorporação do agregado leve, maior é a quantidade de vazios permeáveis nos concretos. A Figura 6.11 apresenta a relação entre a absorção de água aos 28 dias e o consumo de cimento dos concretos leves. Pode-se observar que o consumo de cimento tem pouca influência nos valores da absorção de água por imersão dos concretos leves, fato também observado por Rossignolo (2003) e Borja (2011).

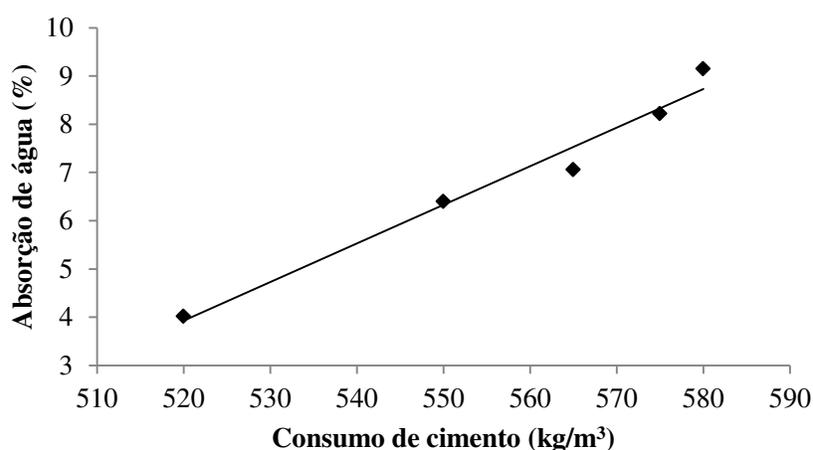


Figura 6.11: Relação entre a absorção de água por imersão e o consumo de cimento dos concretos leves aos 28 dias.

Os valores médios de absorção de água e índice de vazios permeáveis dos concretos leves aos 28 dias, 7% e 11,65%, respectivamente, foram muito próximos dos observados nos concretos com agregados tradicionais, fato também observado por Bogas *et al.* (2012), Ho *et al.* (2012), Utama *et al.* (2012), Liu *et al.* (2013), Angelin *et al.* (2013d) e Golewski *et al.* (2014), demonstrando, assim, que não há aumento significativo do índice de permeabilidade dos concretos com a utilização dos agregados leves.

6.2. Avaliação da condutividade térmica dos concretos leves

O ensaio para a determinação da condutividade térmica dos concretos leves foi realizado junto ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT/SP), por meio do equipamento Guarded Hot Plate, marca Holometrix, modelo GHP 300.

A determinação da condutividade térmica foi realizada segundo as prescrições da ABNT NBR 15220:2005 para os concretos com 28 dias de idade, utilizando-se corpos-de-prova com 300,5 mm x 300,5 mm de largura e 45 mm de altura. Foram moldadas 6 placas de concreto para cada traço, sendo que foram analisadas apenas as duas melhores peças (Figura 6.12). Após a desmoldagem dos corpos-de-prova, realizou-se o polimento das peças para que as superfícies ficassem lisas e paralelas, com a finalidade de que o desvio da planicidade das superfícies dos corpos-de-prova não fosse superior a 0,2 mm sobre toda a largura dos mesmos.

A Tabela 6.6 apresenta os valores da condutividade térmica obtidos nos concretos produzidos nesta pesquisa, enquanto a Figura 6.13 apresenta a relação entre a condutividade térmica e a massa específica dos concretos desenvolvidos nesta pesquisa. A Figura 6.14 ilustra os corpos-de-prova sendo ensaiados no IPT/SP.

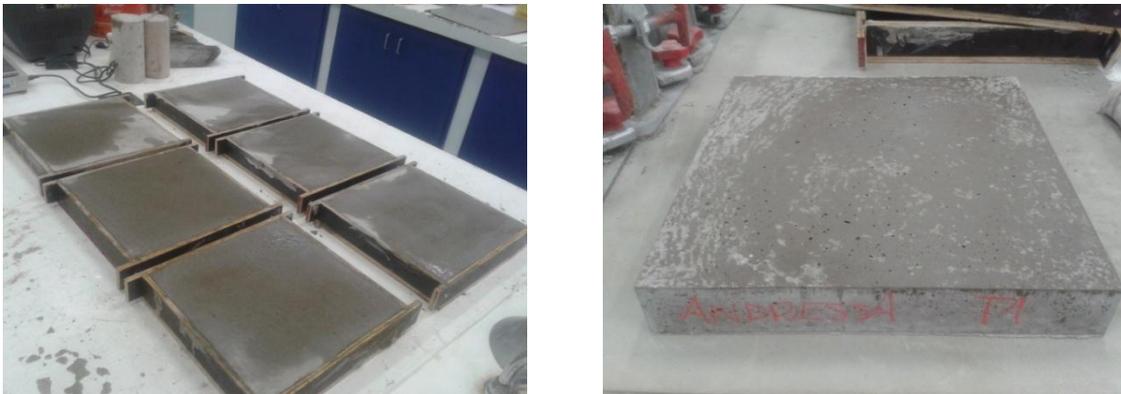


Figura 6.12: Peças de concreto para a realização do ensaio de condutividade térmica.

Tabela 6.6: Condutividade térmica, massa específica e resistência térmica dos concretos leves produzidos nesta pesquisa.

Traço	Cinexpan 1506 (%)	Valores obtidos para os concretos produzidos nesta pesquisa		
		Massa específica (kg/m ³)	Condutividade térmica (W/mK)	Resistência térmica (m ² K/W)
T1	0	2400	1,00	0,045
T2	25	2205	0,77	0,058
T3	50	2033	0,73	0,062
T4	75	1902	0,72	0,063
T5	100	1687	0,61	0,074

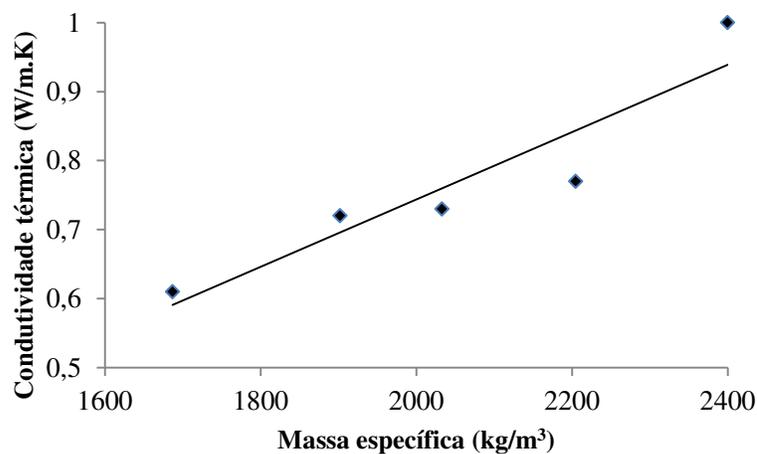


Figura 6.13: Relação entre a condutividade térmica e a massa específica dos concretos aos 28 dias.



Figura 6.14: Equipamento utilizado para o ensaio de condutividade térmica.

Os valores de resistência térmica obtidos para os concretos leves estruturais produzidos nesta pesquisa apresentaram valores acima de 0,02 m²K/W, o qual é recomendado para a execução deste ensaio, segundo as prescrições estabelecidas pela ABNT NBR 15220:2005.

Observou-se que os valores de condutividade térmica, para todos os concretos estudados, estão de acordo com os valores máximos prescritos pela ABNT NBR 15220:2005.

De acordo com a Tabela 6.6 e a Figura 6.13 houve um aumento da condutividade térmica com o aumento da massa específica, ou seja, os valores da condutividade térmica

são diretamente influenciados pelo valor da massa específica do concreto, especificamente pelo teor de argila expandida. Quanto maior o teor de argila expandida no concreto menores são os valores de condutividade térmica, fato também observado por Ferreira (2003), Granja e Labaki (2004), Lamberts (2005), Maciel (2006), Sacht, (2008), Frota e Schiffer (2009), Díaz *et al.* (2010) e Andiç-Çakir *et al.* (2012).

6.3. Estudo da microestrutura dos concretos

As análises da microestrutura foram realizadas nos concretos com 28 dias de idade e as amostras foram preparadas no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Faculdade de Tecnologia (FT/UNICAMP) e o ensaio microestrutural foi realizado junto ao Instituto de Física da Universidade Estadual de Campinas (IF/UNICAMP), por meio do microscópio modelo JSM-5410 Scanning Microscope.

6.3.1. Análise da microestrutura da matriz de cimento

A técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi utilizada para análise da interface entre a matriz de cimento e o agregado dos concretos, com e sem argila expandida nacional, para efeito de comparação. As amostras foram provenientes de pequenos fragmentos dos corpos-de-prova dos concretos preparados utilizando-se os teores de sílica ativa e superplastificante adotados no processo de dosagem dos concretos, conforme descrito na Tabela 6.10, com relação água/cimento de 0,40 e 65% de teor de argamassa para todas as dosagens.

A análise do interior do agregado mostra-se importante para observar a eventual penetração de pasta e para definir, de forma clara, a interface entre o agregado e a matriz de cimento. As Figuras de 6.15 e 6.16 apresentam exemplos dos perfis analisados para os concretos com argila expandida e basalto, respectivamente.

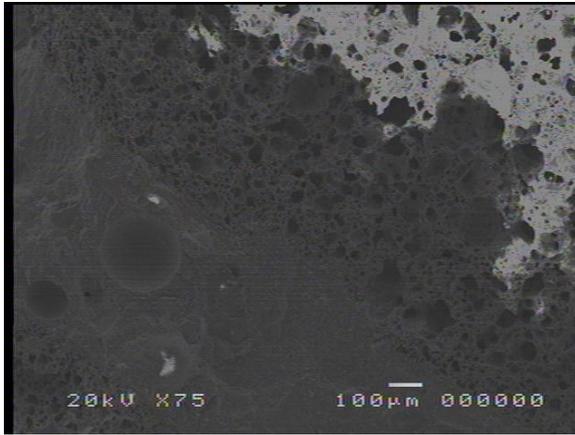


Figura 6.15: Micrografia (MEV) do perfil de análise do concreto com argila expandida.

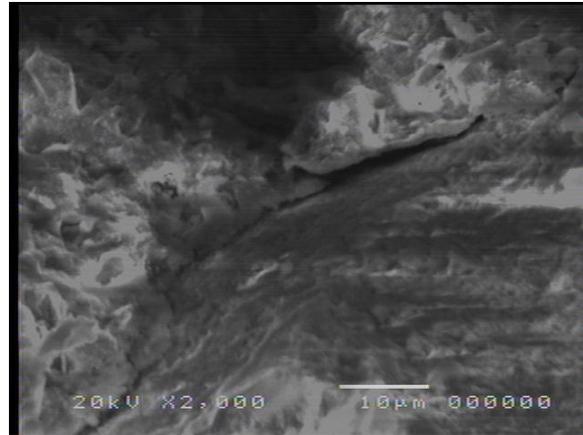


Figura 6.16: Micrografia (MEV) do perfil de análise do concreto com basalto.

Observou-se que a espessura da zona de transição nos concretos com agregados leves foi expressivamente inferior aos observados nos concretos com basalto. Esse efeito está relacionado, principalmente, com a maior absorção de água dos agregados leves, em comparação ao basalto, reduzindo, assim, a quantidade de água na superfície desse tipo de agregado, com conseqüente redução de espessura da zona de transição.

Diversos pesquisadores, como Rossignolo (2003), Mehta *et al.* (2008), Borja (2011) e Golewski *et al.* (2014), afirmam que há uma forte relação entre a espessura e qualidade da zona de transição agregado-matriz e as propriedades mecânicas e a durabilidade dos concretos. A zona de transição influencia diretamente as propriedades relacionadas à resistência mecânica e o módulo de elasticidade, conseqüentemente alterando o mecanismo de propagação de fissuras e a permeabilidade dos concretos.

A utilização de sílica ativa, devido a sua atividade pozolânica, na composição dos concretos leves estruturais desta pesquisa, além de evitar o fenômeno de segregação (Jalal *et al.*, 2012), também auxiliaram na redução da espessura da zona de transição, fato também observado por Heikal *et al.* (2013), Mohammed *et al.* (2013) e Duan *et al.* (2013), que ressaltam, ainda, que as adições minerais proporcionam um arranjo mais denso das partículas microcristalinas presentes nos concretos, tal como na hidratação das folhas de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), aumentando, assim, a resistência mecânica e durabilidade.

7

CONCLUSÕES

Esta dissertação apresenta um estudo sobre um tipo particular de concreto, com características e propriedades diferenciadas em função da utilização conjunta de cimento de alta resistência inicial, sílica ativa, superplastificante acelerador e agregados leves. Este concreto pode ter aplicação específica no setor da construção civil, na produção de elementos pré-fabricados, tais como painéis estruturais e de vedação.

De acordo com os objetivos inicialmente estipulados, o programa experimental utilizado mostrou-se adequado para a análise das características e propriedades dos concretos leves fabricados.

A metodologia utilizada para a dosagem dos concretos se mostrou eficiente, não apresentando o fenômeno de exsudação, além de obter valores dentro dos exigidos de teor de argamassa e consumo de cimento.

Os concretos leves estruturais, para todas as dosagens estudadas, apresentaram coesão e consistência adequadas para o manuseio e moldagem, além da manutenção da trabalhabilidade por, pelo menos, uma hora após a mistura.

Os processos de adensamento utilizados para os concretos leves, vibração por imersão e mesa vibratória, foram suficientes e não se observou o fenômeno de segregação dos agregados no estado fresco.

Quanto aos valores obtidos no ensaio de massa específica no estado endurecido, o concreto de referência (T1) apresentou resultado de 2400 kg/m^3 , enquanto o concreto leve estrutural com 100% de CINEXPAN 1506 (T5) apresentou valor de 1687 kg/m^3 , ou seja, houve uma redução de 30%.

Observou-se que os valores da resistência à compressão dos concretos apresentaram, em média, 40 MPa, sendo que houve uma redução de 16%, conforme o aumento do agregado leve CINEXPAN 1506 nas misturas.

Quanto aos valores de módulo de deformação, 52 GPa foi o valor obtido pelo traço de referência (T1) e 25 GPa o valor obtido pelo traço T5. Em média, houve uma redução de 25% dos concretos convencionais para os concretos leves.

Observou-se que os valores da resistência à compressão dos concretos apresentaram, em média, 4 MPa, valor normalmente obtido para concretos leves com as mesmas características de dosagem.

Verificou-se que os índices obtidos no ensaio de condutividade térmica, por meio do método da placa quente protegida (ABNT NBR 15220:2005), nos concretos com 100% de argila expandida foram menores em comparação ao concreto sem argila expandida nacional CINEXPAN 1506, apresentando valor máximo de condutividade térmica de 1,00 W/mK.

Nos estudos microestruturais, observou-se que com a utilização conjunta do agregado leve nacional e a sílica ativa, houve uma diminuição significativa da espessura da zona de transição agregado-matriz, em comparação aos concretos com agregados tradicionais.

A partir do conjunto de informações de dosagem obtidas no programa experimental, observou-se que os concretos leves produzidos podem ser utilizados em elementos pré-moldados, devido, principalmente, à diminuição no tempo de moldagem e do peso próprio. Sugere-se, então, sua aplicação em elementos estruturais ou de vedação, como painéis de concreto e lajes aveolares, devido essencialmente à redução da massa específica e ao excelente desempenho nas propriedades mecânicas, proporcionando a fabricação de peças leves, que proporcionam maior conforto térmico sem comprometer a função estrutural.

PROPOSTAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento desta pesquisa, uma série de aspectos referentes ao desenvolvimento da tecnologia dos concretos leves mostrou-se merecedores de aprofundamento científico futuro. Com isso, a seguir, apresentam-se algumas propostas de desenvolvimentos futuros:

- estudo da dosagem, produção e propriedades do concreto autoadensável com agregados leves nacional;
- análise do comportamento estrutural de painéis de concreto leve;
- utilização de agregados leves reciclados, como o pneu;
- estudo aprofundado da condutividade térmica e isolamento acústico nos concretos leves;
- análise da influência da redução da espessura da zona de transição agregado-matriz nas propriedades dos concretos.

8

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agnesini, M.V.C.; Gomes Neto, D.P. *Microconcretos leves com argila expandida: influência da adição de sílica ativa no fator de eficiência em dosagem de pré-fabricados de pequena espessura: estudo de caso*. In: 40º Congresso Brasileiro do Concreto, 1998.

American Concrete Institute – ACI. Guide For structural lightweight aggregate concrete, ACI 213R-03. ACIA Manual of Concrete Practice, 2003.

American Concrete Institute – ACI. Standard practice for selecting proportions for structural lightweight concrete, ACI 211.2-98, 2004.

Andiç-Çakır, O; Hızal, S. *Influence of elevated temperatures on the mechanical properties and microstructure of self consolidating lightweight aggregate concrete*. Construction and Building Materials, p.575-583, 2012.

Angelin, A.F.; Lintz, R.C.C.; Barbosa, L.A.G. *Studies of Mechanical Properties and Absorption of Lightweight Concrete with Brazilian Expanded Clay*. Advanced Materials Research (Online), v. 742, p. 231-236, 2013d.

Angelin, A.F.; Lintz, R.C.C.; Jacintho, A.E.P.G.A.; Gachet-Barbosa, L.A. *Estudo das Propriedades Mecânicas de Concretos Contendo Argila Expandida*. 54º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON, Maceió, 2012.

Angelin, A.F.; Ribeiro, L.C.L.J.; Pires, M.S.G.; Jacintho, A.E.P.G.A.; Lintz, R.C.C.; Barbosa, L.A.G. *Effects of Consumption of Cement in Mechanical Properties of Lightweight Concrete Containing Brazilian Expanded Clay*. Applied Mechanics and Materials, v. 368-370, p. 925-928, 2013a.

Angelin, A.F.; Ribeiro, L.C.L.J.; Pires, M.S.G.; Jacintho, A.E.P.G.A.; Lintz, R.C.C.; Barbosa, L.A.G. *Mechanical Evaluation of Concrete Containing Lightweight Aggregates*. Applied Mechanics and Materials, v. 405-408, p. 2699-2702, 2013b.

Angelin, A.F.; Ribeiro, L.C.L.J.; Pires, M.S.G.; Lintz, R.C.C.; Trautwein, L.M.; Barbosa, L.A.G. *Study of Density and Modulus of Elasticity of Lightweight Concrete with Brazilian Aggregate*. Applied Mechanics and Materials, v. 467, p. 257-261, 2013c.

Armelin, H.S.; Lima, M.G.; Selmo, S.M.S. *Alta resistência com argila expandida*. Revista Ibracon, n09, p.42-47, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto. NBR 5738: **Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10342: **Concreto — Perda de abatimento — Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11768: **Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12821: **Preparação de concreto em laboratório - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220: **Desempenho térmico de edificações – Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575: **Edificações Habitacionais - Desempenho**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 23: **Agregados - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 23: **Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 248: **Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 35: **Agregados leves para concreto estrutural**. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 45: **Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária**. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 52: **Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 53: **Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: **Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 65: **Cimento Portland - Determinação do tempo de pega**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 67: **Concreto – Ensaio de abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 68: **Concreto – Determinação da consistência pelo espalhamento na mesa de Graff**. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: **Concreto – Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222: **Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522: **Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação**. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: **Concreto – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9833: **Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 7215: **Concreto – Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 1997.

Bektas, F.; Wang, K. *Performance of ground clay brick in ASR-affected concrete: Effects on expansion, mechanical properties and ASR gel chemistry*. Cement & Concrete Composites, p.273-278, 2012.

Bogas, J.A.; Gomes, A; Pereira, M.F.C. *Self-compacting lightweight concrete produced with expanded clay aggregate*. Construction and Building Materials, p. 1013-1022, 2012.

Borja, E.V. *Efeito da adição da argila expandida e adições minerais na formulação de concretos estruturais leves autoadensáveis*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

Bremner, T.W. *Concreto de agregado leve*. Revista Técnica, n37, p.45-47, 1998.

Breton, D.; Charles-Gibergues, A.; Ballivy, G.; Grandet, J. *Contribuiton to the formation mechanism of the transition zone between rock-cement paste*. In: Cement and concrete research, v.23, 1993.

Chandra, S.; Berntsson, L.; *Lightweight aggregate concrete: science, technology and applications*. Noyes Publications, USA, 2002.

Comité Euro-International du Béton e Fédération Internationale de la Précontrainte – CEB-FIP. *Lightweight aggregate concrete – Manual of design and technology*. The Construction Press, 1977.

Daly, A. F.; *Use of lightweight aggregate concrete in bridges*. In: Second International Symposium of Structural Lightweight Aggregate Concrete. Kristiansand, Noruega, 2000.

Díaz, J.J.C.; García Nieto, P.J. ; Hernández, J.D.; Rabanal, F.P.A. *A FEM comparative analysis of the thermal efficiency among floors made up of clay, concrete and lightweight concrete hollow blocks*. Applied Thermal Engineering, p.2822-2826, 2010.

Duan, P.; Shui, Z.; Chen, W.; Shen, C. *Efficiency of mineral admixtures in concrete: Microstructure, compressive strength and stability of hydrate phases*. Applied Clay Science, p.115-121, 2013.

Eurolightcon – Economic Design and Construction with Lightweight Aggregate Concrete. LWAC Materials Properties, State-of-the-art. Project BE96-3942/R2, Noruega, 1998.

Ferreira, R.C. *Desempenho Físico-Mecânico e Propriedades Termofísicas de Tijolos e Mini-Painéis de Terra Crua Tratada com Aditivos Químicos*. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Agrícola, FEAGRI/UNICAMP, 2003.

Frota, A.B.; Schiffer, S.R. *Manual do conforto térmico*. 8ª Edição, Editora Studio Nobel, 2009.

Golewski, G.J.; Sadowski, T. *An analysis of shear fracture toughness K_{IIc} and microstructure in concretes containing fly-ash*. Construction and Building Materials, p.207-214, 2014.

Gomes Neto, D.P. *Dosagem de microconcretos leves de alto desempenho para produção de pré-fabricados de pequena espessura – Estudo de caso*. Dissertação de mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

Granja, A.D.; Labaki, L.C. *Paredes orientadas a leste e a oeste: uma abordagem crítica em relação ao conforto e à eficiência energética*. In: Encontro nacional sobre conforto no ambiente construído, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, v.4, n.4, p.65-75, 2004.

Heikal, M.; Zohdy, K.M.; Abdelkreem, M. *Mechanical, microstructure and rheological characteristics of high performance self-compacting cement pastes and concrete containing ground clay bricks*. Construction and Building Materials, p.101-109, 2013.

Helland, S.; Maage, M. *Strenght loss in unremixed LWA-concrete*. In: *International Symposium of Structural Lightweight Aggregate Concrete*. Noruega, p.533-540, 1995.

Her-Yung, W. *Durability of self-consolidating lightweight aggregate concrete using dredged silt*. In: Construction and building materials, n.23, p.2332-2337, 2009.

Ho, A.C.; Turatsinze, A.; Hameed, R.; Vu, D.C. *Effects of rubber aggregates from grinded used tyres on the concrete resistance to cracking*. Journal of Cleaner Production, p.209-215, 2012.

Hoff, G. C. *High strength lightweight concrete for artic applications*. In: ACI Symposium on Performance of Structural Lightweight Concrete, Dallas, 1991.

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

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

Hubertová, M.; Hela, R. *Durability of lightweight expanded clay aggregate concrete*. Concrte and Concrete Structures Conference, p.2-6, 2013.

Ibrahim, N.M.; Salehuddin, S.; Amat, R.C.; Rahim, N.L.; Izhar, T.N.T. *Performance of lightweight foamed concrete with waste Clay brick as coarse aggregate*. ICESD, p.497-501, Dubai, 2013.

Jalal, M.; Mansouri, E.; Sharifipour, M.; Pouladkhan, A.R. *Mechanical, rheological, durability and microstructural properties of high performance self-compacting concrete containing SiO₂ micro and nanoparticles*. Materials and Design, p.389-400, 2012.

Lamberts, R. *Desempenho térmico de edificações*. Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil. LABEEE, Florianópolis, 2005.

Liu, J.; Ba, M.; He, Z.; Li, Y. *Microstructure and performance of sludge-ceramisite concrete*. Construction and Building Materials, p.82-88, 2013.

Ma, H.L.; Cui, C.; Li, X.; Hu, S.L. *Study on mechanical properties of steel fiber reinforced autoclaved lightweight shell-aggregate concrete*. Materials and Design, p.565-571, 2013.

Maciel, A.A. *Integração de conceitos bioclimáticos ao projeto arquitetônico*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2006.

Malaiskiene, J.; Vaiciene, M.; Zurauskiene, R. *Effectiveness of technogenic waste usage in products of building ceramics and expanded clay concrete*. In: Construction and Building Materials, VGTU (Vilnius ediminas Technical University), Lithuania, 2011.

Maycá, J.; Recena, F.A.P.; Cremonini, R.A. *Contribuição ao estudo da argila expandida nacional como alternativa de agregado graúdo para concretos leves estruturais*. Curso de especialização em construção civil – NORIE/UFRGS, 2008.

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

Mohammed, M.K.; Dawson, A.R.; Thom, N.H. *Production, microstructure and hydration of sustainable self-compacting concrete with different types of filler*. Construction and Building Materials, p.84-92, 2013.

Monteiro, P.J.M. *Caracterização da microestrutura do concreto: Fases e interfases, aspectos de durabilidade e de microfissuração*. Tese (livre-docência), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

Moravia, W.G. *Influência de parâmetros microestruturais na durabilidade do concreto leve produzido com argila expandida*. Tese de Doutorado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

Neville, A. M.; Brooks, J.J. *Tecnologia do concreto*. 2ª edição, Editora Brookman, Porto Alegre, 2013.

Paulon, V.A. *Microestrutura do concreto convencional*. In: Isaia, G.C. (Ed.) *Concreto: ensino, pesquisa e realizações*, São Paulo, IBRACON, v.1, p.583-604, 2005.

Pereira, M.R.; *Estudo da adição de argila expandida na formulação de concretos leves*. Tese de mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

Pietrobon, C.E.; Lamberts, R.; Pereira, F.O.R. *Estratégias bioclimáticas para o projeto de edificações: conceituação e aplicação para Maringá-PR*. In: Encontro nacional e III Encontro latino-americano sobre conforto no ambiente construído, 2001.

Rossignolo, J. A.; Agnesini, M.V.C. *Concreto leve estrutural*. In: *Concreto: ensino, pesquisa e realizações*, São Paulo, IBRACON, v.2, p. 333-62, 2005.

Rossignolo, J.A. *Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos – Dosagem, produção, propriedades e microestrutura*. Tese (doutorado), Interunidades EESC/IFSC/IQSC da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

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

Rossignolo, J.A. *Módulo de deformação do concreto leve estrutural de alto desempenho*. Revista Minerva, v.2, p.99-106, 2005.

Rossignolo, J.A.; Agnesini, M.V.C. *Propriedades no estado fresco dos microconcretos leves de alto desempenho modificados com polímero – Estudo de caso*. In: IV Congresso de Engenharia Civil, Juiz de Fora, v.1, p.511-22, 2000.

Rossignolo, J.A.; Agnesini, M.V.C. *Retração por secagem dos concretos leves de alto desempenho modificados com polímero*. In: 43º Congresso Brasileiro do Concreto, Foz do Iguaçu, p.01-11, 2001.

Rossignolo, J.A.; Agnesini, M.V.C.; Morais, J.A. *Properties of high-performance LWAC for precast structures with Brazilian lightweight aggregates*. Cement & Concrete composites, v.25, 2003.

Rossignolo, J.A.; Oliveira, I.L. *Concreto leve estrutural com metacaulim*. Revista Minerva, v.3, p.177-187, 2006.

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

Rossignolo, J.A.; Pereira, J.R.L. *Influência do agregado no desempenho da resistência à compressão do concreto: comparação entre basalto e argila expandida*. In: V Encontro tecnológico da engenharia civil e arquitetura, Maringá, p. 1-6, 2005.

Sacht, H. M. *Painéis de vedação de concreto moldados in loco: Avaliação de desempenho térmico e desenvolvimento de concretos*. Dissertação de mestrado, Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

Sacht, H. M.; Rossignolo, J. A.; Santos, W. N. *A influência do teor de argila expandida na condutividade térmica do concreto leve*. In: 49º Congresso Brasileiro do Concreto, Bento Gonçalves, v.1, p.1-10, 2007.

Santos, M.E. *et al. Argila expandida como agregado para concreto leve*. Tema livre – Apresentação à reunião anual do IBRACON, São Paulo, 1986.

Sim, J.; Yang, K.; Kim, H.; Choi, B. *Size and shape effects on compressive strength of lightweight concrete*. Construction and Building Materials, p.854–864, 2012.

Utama, N.A.; McLellan, B.C.; Gheewala, S.H.; Ishihara, K.N. *Embodied impacts of traditional clay versus modern concrete houses in a tropical regime*. Building and EnvironNBrent, p.362-369, 2012.

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

Wang, H.Y.; Chen, B.T.; Wu, Y.W. *A study of the fresh properties of controlled low-strength rubber lightweight aggregate concrete (CLSRLC)*. Construction and Building Materials, p.226-231, 2013.

Wasserman, R.; Bentur, A. *Interfacial interactions in lightweight aggregate concretes and their influence on the concrete strength*. In: Cement and concrete composites, v.18, p.67-76, 1996.

Zhang, M. H.; GjØrv, O. E. *Characteristics of lightweight aggregates for high-strength concrete*. ACI Materials Journal, v88, n., p.150-158, 1991b.

Zhang, M. H.; GjØrv, O. E. *Mechanical properties of high-strength lightweight concrete*. ACI Materials Journal, v88, n3, p.240-247, 1991a.

Zhang, M. H.; GjØrv, O. E. *Microstructure of the interfacial zone between lightweight concrete and cement paste*. Cement and concrete research, v20, p.610-618, 1990.

Zhang, M. H.; GjØrv, O. E. *Penetration of cement paste into lightweight aggregate*. Cement and concrete research, v22, p.47-55, 1992.