



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ESTUDO DA ADIÇÃO DE ARGILA EXPANDIDA NA FORMULAÇÃO DE
CONCRETOS LEVES

MAURÍCIO RODRIGUES PEREIRA

Orientador: Prof. Dr. Antônio Eduardo Martinelli

NATAL- RN
Novembro – 2008



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ESTUDO DA ADIÇÃO DE ARGILA EXPANDIDA NA FORMULAÇÃO DE
CONCRETOS LEVES

MAURÍCIO RODRIGUES PEREIRA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, do Centro de Ciências Exatas e da Terra, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

NATAL- RN
Novembro - 2008

Catálogo da Publicação na Fonte. UFRN / SISBI / Biblioteca Setorial Especializada Especializada do Centro de Ciências Exatas e da Terra – CCET.

Pereira, Maurício Rodrigues.

Estudo da adição de argila expandida na formulação de concretos leves / Maurício Rodrigues Pereira. – Natal, 2008.
82 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Eduardo Martinelli

Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Ciências Exatas e da Terra. Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, 2008.

1. Concreto leve - Dissertação. 2. Argila expandida - Dissertação. 3. Absorção de íons cloreto - Dissertação. 4. Porosidade - Dissertação. I. Martinelli, Antônio Eduardo. II. Título.

RN/UF/BSE-CCET

CDU: 624.012.45



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS-PPGCEM

DECLARAÇÃO

Declaramos, para todos os fins, que **Mauricio Rodrigues Pereira**, defendeu sua Dissertação de Mestrado intitulada "Estudo da adição de argila expandida na formulação de concretos leves", em 10 de Novembro de 2008, no Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, tendo sido.....*APROVADO*....., com conceito.....*"A"*.....

Natal, 10 de Novembro de 2008.

Prof. Dr. Antonio Eduardo Martinelli
Orientador e Presidente da Banca

Prof. Dr. Dulce Maria de Araújo Melo
Examinadora Interna

Prof. Dr. Ana Cecília Vieira da Nóbrega
Examinadora Interna

Prof. Dr. Alexandro Diógenes Barreto
Examinador Externo

VISTO

Prof. Dr. Wilson Acchar
Coordenador do PPGCEM

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Inácio e Raimunda, uma saudade imorredoura., ausentes do convívio familiar, souberam me conduzir nos caminhos do saber;

Ao meu filho, Matheus, um estímulo para o meu trabalho;

À minha esposa, Ionilza, uma companheira que faz parte do meu existir.

AGRADECIMENTOS

- A DEUS, pelo privilégio da minha existência e por me fortalecer nos momentos difíceis da minha vida;
- Ao meu orientador Prof. Dr. Antonio Eduardo Martinelli, pelo empenho, dedicação e paciência em transmitir seus conhecimentos;
- Aos meus Irmãos pelo apoio e incentivo durante o curso;
- Aos Cunhados e Cunhadas pelo apoio e disponibilidade;
- Aos Tios e Tias pela atenção e compreensão;
- Ao CEFET-PI, em especial, ao Prof. Francisco das Chagas Santana, por apoiar a capacitação dos servidores desta conceituada Instituição;
- Aos Professores da Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da UFRN;
- Ao CEFET-PB, em particular, ao Prof. João Batista de Oliveira, pelo apoio e compreensão, que possibilitou a conclusão do Curso;
- À Prof^a Dra. Raquel Franco, do Laboratório de Geoquímica da UFRN , pelo apoio e colaboração;
- Ao CEFET-RN, em particular, ao Prof. Francisco das Chagas Mariz, pelo apoio pedagógico;
- Ao Prof. Msc. Edilberto Borja – CEFET-RN, pela contribuição técnico-pedagógica;
- À CINEXPAN S.A., pelo fornecimento de materiais para realização deste trabalho de pesquisa;
- Aos colaboradores do Laboratório de Cimentos da UFRN: Júlio, Marlon, Jaciane, Elizângela e Bruna Guedes, pelo apoio e compreensão;
- Aos amigos: Antônio João, Georgiana, Laura, Nicácio, Ivamar, Jesuína, Ivanete, Toinha, Gabriela, Haroldo, Marina, Pinto, Paulo Henrique e Lenilson Xavier, pela atenção e disponibilidade;
- Aos estagiários do CEFET-RN: Elton, Bruno, Anaiara, pelo apoio e colaboração;
- Aos colegas de curso do Mestrado, pelo apoio e amizade.
- À empresa de Cimento Poty, pelo fornecimento de material, em particular, ao eng. Carlos Magno.
- Ao Sr. Francisco de Assis Brás, pelo apoio e colaboração.

A Grandeza de DEUS:

“Olho as florestas murmurando ao vento
E, ao ver que Tu plantaste cada pé,
Recordo a cruz, o lenho tão cruento,
E no teu Filho afirmo a minha fé.”

(Harpa Cristã)

PEREIRA, M. R. – Estudo da adição de argila expandida na formulação de concretos leves. 2008. Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN.

RESUMO

Considerando-se as tendências de novos materiais na Construção Civil, o concreto leve tem sido objeto de vários trabalhos, com ênfase na granulometria e suas matérias – primas. Incluem-se neste estudo a alteração de traços e dos materiais que compõem esse concreto, analisando alterações nas propriedades mecânicas como resistência à compressão e tração por compressão diametral, além da interface agregado/matriz, porosidade e perfil de absorção de íons cloreto no concreto leve à base de argila expandida. Os experimentos foram realizados através de moldagem de corpos de prova cilíndricos, com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. A dosagem experimental foi efetuada sem aditivos ou adições minerais, nos traços unitários em massa: (T1) 1 : 2,01 : 1,10 : 0,78 – (T2) 1 : 2,00 : 1,32 : 0,62 - (T3) 1 : 1,93 : 1,54 : 0,47 (cimento : areia : argila expandida 0500 : argila expandida 1506); fixando-se a relação água/cimento em 0,43. Para tanto, utilizou-se como agregado graúdo uma argila expandida, nas graduações 9,5 mm/0500 e 19 mm/1506. A argila de graduação maior era revestida com uma camada vitrificada, o que propiciou menor absorção de água pelo concreto. Os resultados mostraram que a utilização da argila expandida como agregado leve é uma solução tecnicamente viável na produção de concreto leve para Construção Civil.

Palavras-Chave: Concreto leve, argila expandida, porosidade, íons cloreto.

PEREIRA, M. R. – Estudo da adição de argila expandida na formulação de concretos leves. 2008. Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN.

ABSTRACT

Lightweight concrete has been the subject of several studies towards the development of new building materials. Emphasis has been given on the particle size effect and nature of aggregates used as raw materials. The present study includes an analysis of the materials that make this kind of concrete, analyzes of mechanical properties such as compressive and tensile strength, in addition to assessments of the interface concrete aggregate/matrix interface, porosity and absorption profile of chloride ions in lightweight concrete based on expanded clay. The experiments were carried out by molding cylindrical samples 100 mm in diameter and 200 mm in height. The dosage experiments were performed without additives or with the addition of minerals: (T1) 1: 2.01: 1.10: 0.78 – (T2) 1: 2.00: 1.32 : 0.62 - (T3) 1 :1.93 :1.54: 0.47 (cement : sand : expanded clay 0500 : expanded clay 1506).The water to cement ratio was set to 0.43. Expanded clay minerals with different average particle sizes were used, i.e., 9.5 mm/0500 and 19 mm/1506. The larger aggregate was coated by a glassy layer, yielding lower water absorption characteristics to the concrete. The results showed that the use of light expanded clay aggregates is a technically interesting solution to the production of lightweight concrete for construction applications.

Keywords: Lightweight concrete, expanded clay, porosity, chloride ions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Concreto leve com argila expandida.....	16
Figura 2.2 – Espectro dos agregados e concretos leves.....	17
Figura 2.3 – Intervalos de massas específicas com diversos concretos leves.....	19
Figura 2.4 – Navio tanque USS Selma.....	21
Figura 2.5 – Edifícios com múltiplos pavimentos construídos com concreto leve...	22
Figura 2.6 – Painéis de concreto leve (paredes).....	23
Figura 2.7 – Produtos de hidratação.....	26
Figura 2.8 – Agregados produzidos pelos processos de sinterização e forno rotativo.....	30
Figura 2.9 – Forno rotativo para produção de argila expandida.....	31
Figura 2.10 – Modelo simplificado da rede de poros do concreto.....	43
Figura 2.11 – Zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento.....	45
Figura 2.12 – Curvas tensão-deformação de concreto leve à base de argila Expandida.....	48
Figura 3.1 – Organograma de planejamento experimental.....	51
Figura 3.2 – Curva granulométrica da areia fina.....	54
Figura 3.3 – Graduação das argilas expandidas.....	55
Figura 3.4 – Curva granulométrica da argila 0500.....	56
Figura 3.5 – Curva granulométrica da argila 1506.....	58
Figura 3.6 – Difratograma de Raios X da argila expandida.....	60
Figura 3.7 – Confecção dos corpos de prova.....	61
Figura 3.8 – Esquema de corpo de prova em solução de NaCl.....	63
Figura 3.9 – Corpos de prova em solução de NaCl (12% em massa).....	64
Figura 3.10 – Corpos de prova serrados ao meio.....	64
Figura 3.11 – Furos periférico e central	65
Figura 4.1 – Perfil dos traços T-1, T-2 e T-3	67
Figura 4.2 – Descrição da ruptura colunar à compressão axial.....	69
Figura 4.3 – Descrição da ruptura à tração por compressão diametral.....	69
Figura 4.4 – Formação de poros e zona de transição.....	70
Figura 4.5 – Aderência entre as duas fases do concreto.....	70
Figura 4.6 – Formação de poros no concreto leve.....	71

Figura 4.7 – Perfil de concentração de cloreto total (Traço T-1).....	72
Figura 4.8 – Perfil de concentração de cloreto total (Traço T-2).....	73
Figura 4.9 – Perfil de concentração de cloreto total (Traço T-2).....	74
Figura 4.10 – Perfil de concentração de cloreto total nos T-1, T-2 e T-3 na região periférica.	75
Figura 4.11 – Perfil de concentração de cloreto total nos Traços T-1, T-2 e T-3...	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classificação do concreto leve quanto à resistência.....	19
Tabela 2.2 – Dados de referência da massa específica dos concretos leves.....	20
Tabela 2.3 – Compostos do clínquer e suas abreviações.....	24
Tabela 2.4 – Compostos e percentuais do cimento Portland.....	25
Tabela 2.5 – Produtos de hidratação do cimento Portland.....	27
Tabela 2.6 – Densidades aparentes médias.....	27
Tabela 2.7 – Relação entre Resistência à compressão média e o teor de cimento.....	36
Tabela 2.8 – Exigências para concreto leve estrutura.....	37
Tabela 3.1 – Análise química do cimento Portland CP-II-Z 32 – RS.....	52
Tabela 3.2 – Composição granulométrica da areia.....	53
Tabela 3.3 – Propriedades das argilas expandidas 0500 e 1506.....	55
Tabela 3.4 – Composição granulométrica da argila expandida 0500.....	56
Tabela 3.5 – Composição Granulométrica da argila expandida 1506.....	57
Tabela 3.6 – Análise química da argila expandida 0500.....	58
Tabela 3.7 – Análise química da argila expandida 1506.....	59
Tabela 3.8 – Composição dos Traços T-1, T-2 e T-3.....	60
Tabela 4.1 – Resistência à compressão e à tração por compressão diametral....	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/C – Relação água/cimento

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

Abs. – Absorção

ACI – American Concrete Institute

ASTM – American Society for Testing Materials

C.C. – Concentração de Cloreto

γ – Massa específica

EVA – Etileno acetato de vinila

EPS – Poliestireno expandido

F_{ck} – Resistência característica do concreto estabelecida no projeto

K – Coeficiente de permeabilidade

M.E. – Massa específica

M.E. ap. – Massa específica aparente

MO – Microscopia Ótica

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

– Porosidade

SUM RIO

1.0 – INTRODUÇÃO.....	13
2.0 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1 – Concretos leves.....	16
2.1.1 – Definições.....	17
2.1.2 – Classificação do concreto leve.....	18
2.1.3 – Aplicações.....	21
2.1.4 – Principais componentes do Concreto Leve.....	23
2.1.4.1 – Cimento Portland.....	23
2.1.4.1.1 – Constituintes.....	24
2.1.4.1.2 – Composição Química.....	24
2.1.4.1.3 – Hidratação do Cimento.....	25
2.1.4.2 – Agregados.....	27
2.1.4.2.1 – Agregado leve.....	28
2.1.4.2.2 – Classificação dos agregados leves.....	28
2.1.4.2.3 – Processos de fabricação.....	30
2.1.4.2.4 – Porosidade e absorção.....	31
2.1.4.3 – Estrutura interna e propriedades mecânicas.....	32
2.1.5 – Dosagem do Concreto Leve.....	33
2.1.5.1 – Propriedades do Concreto leve no estado fresco.....	33
2.1.5.1.1 – Trabalhabilidade.....	34
2.1.5.1.2 – Segregação e exsudação.....	35
2.1.6 – Propriedades do concreto leve endurecido.....	35
2.1.6.1 – Massa específica.....	35
2.1.6.2 – Resistência à compressão e à tração por compressão diametral.....	35
2.1.6.3 – Fator água/cimento.....	37
2.1.6.4 – Permoporosidade.....	38
2.1.6.5 – Ação de cloretos no Concreto.....	41
2.1.6.6 – Interface entre o agregado e a matriz de cimento...	44
2.1.6.7 – Propriedades Térmicas e Acústicas.....	46
2.1.6.8 – Propriedades Elásticas.....	47

2.1.6.9 – Durabilidade do concreto leve.....	49
3.0 – MATERIAIS E M TODOS.....	50
3.1 – Materiais e caracterização.....	52
3.1.1 – Cimento Portland Composto CP-Z-32.....	52
3.1.2 – Agregado miúdo.....	53
3.1.3 – Agregado graúdo.....	54
3.1.4 – Propriedades das argilas expandidas.....	55
3.1.5 – Ensaio dos agregados miúdo e graúdo.....	59
3.2 – M todos.....	60
3.2.1 – Definição dos traços.....	60
3.2.2 – Moldagem dos corpos de prova.....	61
3.2.3 – Procedimentos para as análises química e microestrutural.	62
3.2.3.1 – Difração de Raios X (DRX).....	62
3.2.3.2 – Espectroscopia por Dispersão de Raios X (EDX)....	62
3.2.3.3 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	62
3.2.3.4 – Espectrometria de Fluorescência de Raios X (WDS)	62
3.2.3.5 – Microscopia Ótica (MO)	63
3.2.4 – Procedimento experimental para determinação do cloreto	63
total	63
4.0 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	66
4.1 – Propriedades do concreto leve no estado fresco.....	66
4.1.1 – Consistência.....	66
4.1.2 – Exsudação e segregação.....	66
4.2 – Propriedades do concreto leve endurecido.....	67
4.2.1 – Resistências à compressão, à tração por compressão	67
diametral e massa específica.....	67
4.2.2 – Porosidade do concreto estudado.....	69
4.2.3 – Perfil de concentração do cloreto total.....	71
4.3.4 – Considerações sobre o perfil de concentração do cloreto	76
total.....	76
5.0 – CONCLUSÕES.....	77
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	79
REFERÊNCIAS.....	80

1.0 – INTRODUÇÃO

Desde o advento do concreto moderno em meados do século XIX, até o início dos anos 80, esse material permaneceu como uma mistura de cimento, agregados e água, sem muitas inovações que pudessem melhorar substancialmente a composição e suas propriedades. No entanto, em décadas recentes, com o desenvolvimento da tecnologia, o concreto tem passado por algumas modificações em função da evolução das técnicas e equipamentos. Isto possibilitou estudos mais acurados de sua microestrutura e em especial, a interface entre a matriz e o agregado. O uso de novos materiais na composição desse compósito também integra a gama de incrementos realizados em termos de concreto especial. Além disso, destaca-se a importância dos aditivos e adições diversas. Esse conjunto de opções tem gerado alterações significantes nas propriedades mecânicas e na durabilidade dos concretos.

Como um produto conseqüente do desenvolvimento da tecnologia em concreto, surgiu o concreto leve que tem sido utilizado desde o início do século passado para fins estruturais e de vedação com excelentes resultados (ROSSIGNOLO, 2003). Ainda segundo esse pesquisador, a utilização de agregados leves ocasionam mudanças significativas em outras importantes propriedades dos concretos, como trabalhabilidade, resistência mecânica, módulo de elasticidade, retração, fluência e também redução da espessura da zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento.

De acordo com Metha e Monteiro (1994), os agregados com massa unitária inferior a 1120 kg/m³ são considerados leves, e têm aplicação na produção de diversos tipos de concretos leves. Conseguem-se agregados leves naturais através do beneficiamento de rochas ígneas vulcânicas como pumicita, escória ou tufo. Por outro lado, os agregados leves industrializados podem ser fabricados por tratamento térmico de uma variedade de materiais, por exemplo, argilas, folhelhos, ardósia, diatomita, perlita, vermiculita, escoria de alto forno e cinza volante.

De acordo com Rossignolo (2003), os concretos com agregados leves tem sido utilizados desde o início do século passado, para fins estruturais e de vedação, com excelentes resultados. A partir de 1980, foram realizadas rigorosas pesquisas

sobre os concretos leves em todo mundo, demonstrando grande potencial do uso desse material, nas mais diversas áreas da Construção Civil.

Em face do avanço tecnológico, começou-se a repensar a importância do concreto leve como elemento de vedação (paredes), painéis, regularização de lajes e pisos, em geral, tendo em vista as vantagens que oferecem ao setor da Construção, principalmente no que refere à redução do peso das estruturas.

Em geral, o que se percebe, é que existem vários tipos de concreto leve, dentre os mais comuns têm-se concreto celular espumoso, concreto com EPS, concreto com EVA, concreto à base de argila expandida, concreto com vermiculita, entre outros. Além disso, o concreto leve apresenta uma larga aplicação de acordo com as características dos agregados, que normalmente são utilizados para os casos específicos da técnica construtiva.

Pretende-se com este trabalho realizar uma análise preliminar dos materiais que compõem o concreto leve de argila expandida, verificando a porosidade, o perfil de concentração de cloreto, interface agregado matriz em função da distribuição dos agregados na massa desse material.

Sendo assim, este estudo pretende mostrar a viabilidade do concreto leve na Construção Civil, através de alguns aspectos importantes no que refere às propriedades citadas anteriormente. As estruturas de concreto submetidas à ação das intempéries, principalmente em meios agressivos, sofrem deterioração por influência da névoa salina em ambientes marinhos, em especial, na costa litorânea brasileira, onde habita uma população de aproximadamente 45 milhões de pessoas.

Esta pesquisa tem como objetivo estudar a porosidade, o perfil de concentração de cloreto total, resistências à compressão e à tração por compressão diametral e interface, com vistas na distribuição dos agregados e sua formação de poros.

Os objetivos específicos desta pesquisa podem ser resumidos nos seguintes aspectos:

- Estudar os traços que proporcionem melhor distribuição dos agregados, caracterizando o estado fresco e endurecido do concreto leve estrutural para a/c igual a 0,43;
- Identificar e avaliar microscopicamente a interface matriz – agregado, verificando a formação de poros na matriz;
- Caracterizar o perfil de concentração do cloreto total para o concreto leve estrutural.

2.0 – REVIS O BIBLIOGRAFICA

2.1 – Concretos leves

O concreto de baixa densidade surgiu como um material que viesse a corresponder as necessidades impostas pelas obras, uma vez que suas propriedades trazem grandes benefícios à Construção Civil. A utilização de argila expandida como agregado leve para produção de concreto, como mostra a figura 2.1, têm despertado pesquisadores no sentido de buscar soluções que venham a proporcionar um melhor aproveitamento desse material, que ainda se restringe a elementos de vedação (painéis de paredes).

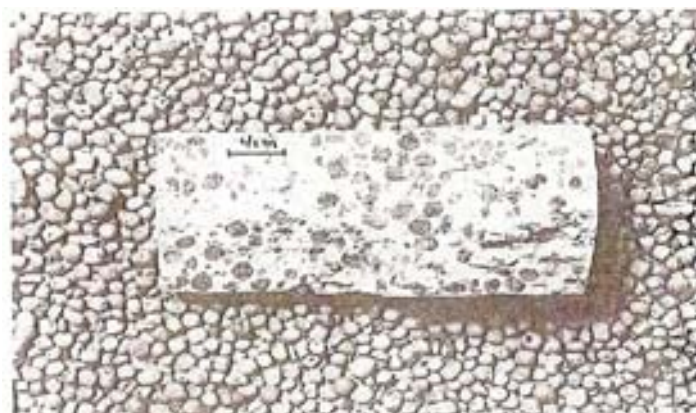


Figura 2.1 – Concreto leve com argila expandida
(SOUZA SANTOS, 1992)

De acordo com Bauer (2000), o principal uso que se faz da argila expandida é como agregado leve para concreto, seja concreto de enchimento, seja concreto estrutural ou de pré - moldados com resistência $f_{ck} \sim 30$ MPa. O concreto de argila expandida, além da baixa densidade de 1,0 a 1,8, apresenta muito baixa condutividade térmica – cerca de 1/15 da do concreto de brita ou de diabase: 0,15 W/mK contra 2,0 W/mK (0,2 kcal.m/m² h° C a 1,8 kcal.m/m² h° C).

A figura 2.2 apresenta um largo espectro de agregados leves, com massa específica unitária do agregado, variando de 80 kg/m³ a 900 kg/m³ para cada tipo de agregado, bem como massa específica do concreto e sua classificação em função da resistência à compressão.

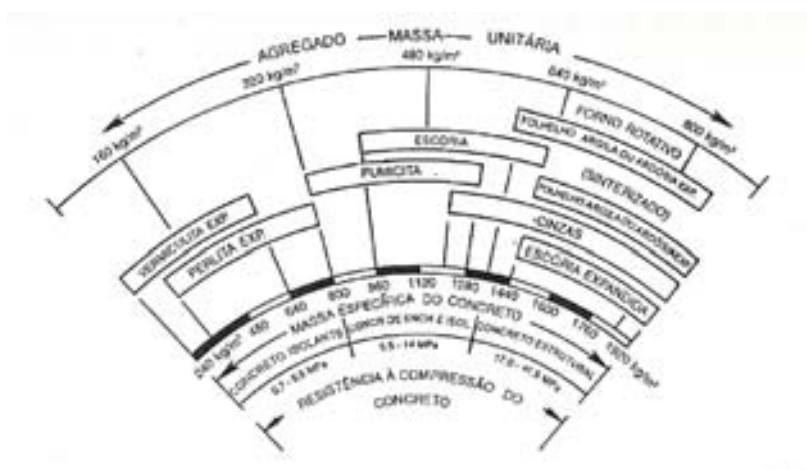


Figura 2.2 – Espectro dos agregados e concretos leves
(METHA E MONTEIRO, 1994)

2.1.1 – Definições

O concreto leve caracteriza-se pela baixa massa específica aparente em relação aos concretos tradicionais. Estes últimos têm massas específicas entre 2300kg/m³ e 2500 kg/m³, não havendo até agora uma definição precisa sobre qual valor que indica a separação entre os dois tipos de concreto. Admite-se, em geral, o valor de 2000 kg/m³ como máximo valor de massa específica para o concreto ser considerado leve (PETRUCCI, 1995).

Souza Santos (1992) argumenta que não existe uma definição geral para concreto leve (ASTM, 1963); e que no sentido lato, o termo pode ser aplicado a qualquer concreto em que tenha sido feita uma experiência para obter uma massa específica inferior a do concreto denso normal, que é da ordem de 2400 kg/m³; geralmente concretos de massa específica inferior a 1800 kg/m³ são considerados como concretos leves.

Para Metha e Monteiro (1994), o termo concreto leve é usado para concreto cuja massa específica é inferior a 1800 kg/m³. O concreto leve estrutural é um

concreto convencional, salvo que, por razões de economia, esse compósito é feito com agregados leves, em que seu peso específico é cerca de dois terços do peso específico do concreto produzido com agregados naturais típicos.

De acordo com Rossignolo (2003), os concretos leves estruturais são obtidos com a substituição total ou parcial dos agregados tradicionais por agregados leves e, usualmente são caracterizados pelo valor da massa específica seca abaixo de 2000 kg/m³.

2.1.2 - Classificação do concreto leve

Segundo Neville (1997), o ACI213R-87 usa a massa específica para classificar o concreto leve de acordo com a aplicação, representada na figura 2.3, em três categorias: concreto leve estrutural, com massa específica entre 1350 kg/m³ e 1900 kg/m³ - esse concreto é usado para fins estruturais e tem uma resistência mínima de 17 MPa; concreto de baixa massa específica de 300 kg/m³ e 800 kg/m³ - esse concreto é usado para fins não estruturais principalmente para isolamento térmica. Entre essas duas categorias está o concreto com resistência moderada, cuja resistência à compressão, em cilindros, varia entre 7MPa e 17MPa, onde as características de isolamento térmica são intermediárias entre o de baixa massa específica e o estrutural.

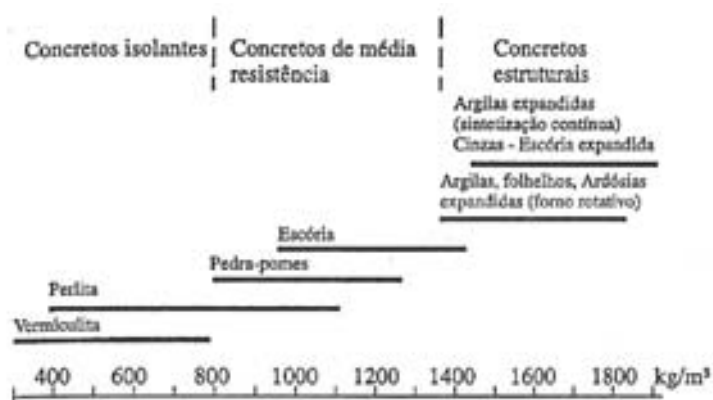


Figura 2.3 - Intervalos de massas específicas com diversos concretos leves após secagem ao ar. (NEVILLE, 1997)

Segundo Cole e Zertterstrom (1954 apud SOUZA SANTOS, 1992), a classificação preliminar dos concretos leves foi sugerida pelo U.S. Bureau of Reclamation, e posteriormente adotada pela ASTM como especificação em 1964. A tabela 2.1 apresenta a classificação do concreto leve em função da resistência à compressão.

Tabela 2.1 – Classificação do concreto leve quanto à resistência (SOUZA SANTOS, 1992)

Classe	Resistência à compressão (kgf/cm ²)	Uso
(a) Estrutural	210 a 350	Elementos estruturais, vigas, pilares, etc.
(b) Baixa massa Especifica	70 a 300	Paredes de sustentação e vigas, como as utilizadas em casas para residência.
(c) Isolação	14 a 70	Revestimento que não suportam cargas e paredes, e tetos isolantes.

As propriedades desejadas para um concreto leve, feito com agregado leve, são as seguintes (COLE e ZETTERSTROM, 1954; apud SOUZA SANTOS, 1992):

- 1) Elevada resistência mecânica;
- 2) Pequena absorção de água;
- 3) Pequeno peso por unidade de volume (massa específica aparente);
- 4) Boas propriedades isolantes, térmicas e acústicas;
- 5) Pequena dilatação ou contração;
- 6) Boa trabalhabilidade;
- 7) Baixo custo de produção;
- 8) Ser facilmente serrável; pregos devem ser cravados com facilidade;
- 9) Elevada resistência ao congelamento e ao degelo;
- 10) Resistência ao aparecimento de manchas de ferrugem;

A tabela 2.2 apresenta os valores limites de massa específica seca citados em alguns documentos normativos ou de referência para os concretos leves (ROSSIGNOLO, 2003)

Tabela 2.2 – Dados de referência da massa específica dos concretos leves
(ROSSIGNOLO, 2003)

Referência	Massa específica (kg/m ³)
RILEM (1975)	$\gamma < 2000$
CEB-FIP (1977)	$\gamma < 2000$
NS 3473 E (1992)	$1200 < \gamma < 2200$
ACI 213R-87 (1997)	$1400 < \gamma < 1850$
CEN prEN206-25 (1999)	$800 < \gamma < 2000$

Ainda segundo Rossignolo (2003), o ACI 213R-87 (1997) especifica que o concreto leve, além de apresentar o valor da massa específica dentro dos limites apresentados na tabela 2.2, deve apresentar resistência à compressão acima de 17,2 MPa.

Neville (1997) comenta que o uso de concretos com massa específica menor pode resultar vantagens significativas quanto a elementos estruturais com menor seção transversal e uma correspondente redução das dimensões das fundações, e que ocasionalmente permite a construção sobre solos com menor capacidade de suporte.

2.1.3 Aplicações

O início da utilização de concretos de cimento Portland com agregados leves, tal qual o conhecemos hoje, ocorreu durante a primeira guerra mundial, quando a América 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/m³, enquanto o valor usual de resistência à compressão dos concretos tradicionais na época, era de 15 MPa (ROSSIGNOLO, 2003).

Segundo Souza Santos (1992), os numerosos exemplos de aplicação e durabilidade do concreto leve podem ser encontrados na literatura estrangeira, e um dos mais interessantes é o do navio tanque “USS Selma” de 7500 t, ilustrado na figura 2.4, lançado ao mar em 1919, construído com concreto leve feito com folhelho expandido – haidite; esse navio afundou depois de alguns anos de uso, e após 34

anos debaixo do mar, a resistência à compressão do concreto leve era de 70 MPa, enquanto os dados desse concreto, após 28 dias de cura, eram de 35 MPa.



Figura 2.4 – Navio tanque USS Selma (Rossignolo, 2003)

Rossignolo (2003) argumenta que 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 de estudos e aplicações do concreto leve para execução de estruturas de edifícios, tabuleiros de pontes e construção pré-fabricada.

De acordo com Souza Santos (1992), os concretos leves são usados na fabricação dos seguintes materiais de construção: tijolos de alvenaria, painéis para paredes inclinadas, tetos e pisos pré-moldados, concreto estrutural para edifícios de vários andares, na estrutura e pavimentos de pontes e pavimentos de pistas de decolagem de aviões a jato.

Rossignolo (2003) reforça que, a partir da década de 50, edifícios de múltiplos pavimentos foram executados com concreto leve, tais como: Austrália Square Tower (Austrália) em 1967, Park Regis (Austrália) em 1968, Standart Bank (África do Sul) em 1970 e o BMW Building (Alemanha) em 1972. A figura 2.5 mostra alguns edifícios construídos com esse compósito cerâmico.

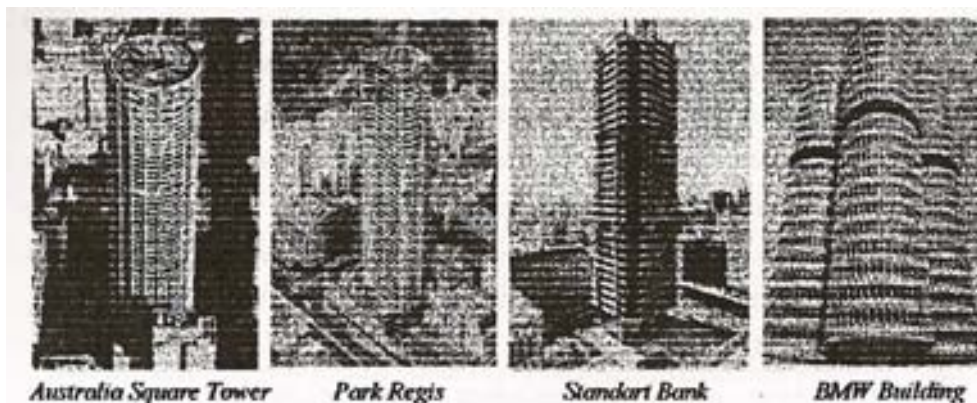


Figura 2.5 – Edifícios de múltiplos pavimentos construídos com concreto leve
(ROSSIGNOLO, 2003)

No entanto, observa-se que a maioria das aplicações de concreto leve em todo mundo, continua a ser na produção de elementos e painéis pré-fabricados de concretos, isto se deve aos menores custos de manuseio, transporte e construção, uma vez que os produtos de concreto leve são convenientes para esse tipo de construção. A figura 2.6 ilustra o uso do concreto leve com elementos pré-fabricados para paredes (METHA e MONTEIRO, 1994).

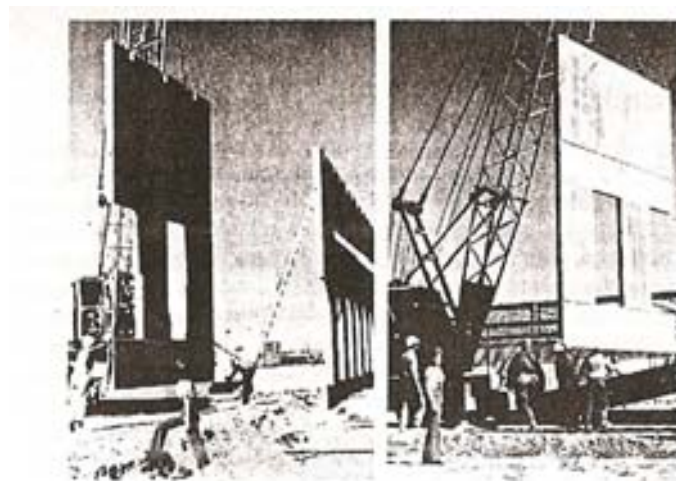


Figura 2.6 – Painéis de concreto leve (paredes).
(METHA E MONTEIRO, 1994)

O início dos estudos e da utilização dos concretos leves no Brasil, ocorreram no ano de 1970, com a implantação de uma unidade de produção de agregados leves (argila expandida) pelo grupo Rabelo, a CINASITA S.A., atualmente CINEXPAN S.A, com a finalidade de fornecer agregados leves para a CINASA – Construção Industrializada Nacional – também do grupo Rabelo, 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 (ROSSIGNOLO, 2003).

2.1.4 - Principais componentes do concreto leve

2.1.4.1 – Cimento Portland

É o produto obtido pela pulverização do clínquer, constituído essencialmente de silicatos hidráulicos de cálcio, com uma certa proporção de sulfato de cálcio natural, contendo, eventualmente, adições de certas substâncias que modificam suas propriedades ou facilitam seu emprego.

O Clínquer é um produto de natureza granulosa, resultante da calcinação de uma mistura daqueles materiais, conduzida até a temperatura de sua fusão incipiente (Bauer, 2000).

2.1.4.1.1 – Constituintes

Os constituintes fundamentais do cimento Portland são a cal (CaO), sílica (SiO₂), alumina (Al₂O₃), óxido ferro (F₂O₃), certa proporção de magnésia (MgO) e uma pequena porcentagem de anidrido sulfúrico (SO₃), que é adicionado após a calcinação para retardar o tempo de pega do produto. Tem ainda, como constituintes menores, impurezas, óxido de sódio (Na₂O), óxido de potássio (K₂O), óxido de Titânio (TiO₂) e outras substâncias de menor importância. Os óxidos de potássio e sódio constituem os denominados álcalis do cimento (BAUER, 2000).

2.1.4.1.2 – Composição química

Segundo METHA e MONTEIRO (1994), o cimento Portland consiste de vários compostos de cálcio, porém os resultados de análises químicas de rotina são expressos em termos de óxidos dos elementos presentes. Também, costuma-se expressar os compostos individuais dos óxidos do clínquer usando as seguintes abreviações:

TABELA 2.3 – Compostos do clínquer e suas abreviações (METHA e MONTEIRO, 1994)

Óxido	Abreviação	Compostos	Abreviações
CaO	C	3CaO. SiO ₂	C ₃ S
SiO ₂	S	2CaO. SiO ₂	C ₂ S
Al ₂ O ₃	A	3CaO. Al ₂ O ₃	C ₃ A
Fe ₂ O ₃	F	4CaO. Al ₂ O ₃ . Fe ₂ O ₃	C ₄ AF
MgO	M	4CaO. 3Al ₂ O ₃ . SO ₃	C ₄ A ₃ S
SO ₃	S	3CaO ₂ SiO ₂ . 3H ₂ O	C ₃ S ₂ H ₃
H ₂ O	H	CaSO ₄ . 2H ₂ O	C ₃ S ₂ H ₂

De acordo com Neville (1997), os percentuais dos compostos principais na composição do cimento Portland são os seguintes:

TABELA 2.4 – Compostos e percentuais do cimento Portland (NEVILLE, 1997).

Compostos	Percentuais
Silicato Tricálcico (C ₃ S)	60 – 67
Silicato Dicálcico (C ₂ S)	17 – 25
Aluminato Tricálcico (C ₃ A)	3 – 8
Ferraluminato Tetracálcico (C ₄ AF)	0,5 – 0,6

Os demais compostos como o MgO (de 0,5% a 4%), o SO₃ (2% a 3,5%) e os álcalis (0,3% a 1,2%).

2.1.4.1.3 – Hidratação do cimento

A hidratação é um processo em que ocorrem reações químicas do cimento anidro com água, que gera produtos com características de pega e endurecimento (METHA e MONTEIRO, 1994).

Na presença de água, os silicatos (C_3S e C_2S) e os aluminatos (C_3A e C_4AF) formam produtos de hidratação, representados esquematicamente na figura 2.7, onde os pontos cheios representam as partículas de gel, os espaços intersticiais são os poros de gel e os marcados com C são os poros capilares, e que, com o transcorrer do tempo dão origem a uma massa firme e resistente, a pasta de cimento endurecido (NEVILLE, 1997).



Figura 2.7 – Produtos de hidratação (NEVILLE, 1997).

Petrucci (1995) argumenta que a hidratação do cimento consiste na transformação de compostos anidros mais solúveis em compostos hidratados menos solúveis. No processo de hidratação para formação de uma camada de gel em torno dos grãos dos compostos anidros, de maneira que, na zona de transição (zona intermediária entre o cristal primário e o gel), a solução é supersaturada em relação aos compostos hidratados.

Todos os compostos não hidratam com a mesma velocidade. Os aluminatos são conhecidos por hidratarem muito mais rapidamente do que os silicatos. O enrijecimento e a pega característica da pasta do cimento Portland, são altamente determinados por reações de hidratação envolvendo os aluminatos.

Os silicatos que compõem aproximadamente 75% do cimento Portland comum, têm um importante papel na determinação das características de endurecimento (METHA e MONTEIRO, 1994). Os principais produtos da hidratação presentes na pasta de cimento são apresentados na tabela 2.5

TABELA 2.5- Produtos de hidratação do cimento Portland.
(METHA e MONTEIRO, 1994)

Produto	Quantidade	Formas
Silicato de cálcio hidratado (C – S – H)	50% a 60% do volume de sólidos.	Pequenos cristais fibrilares.
Portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou CH	20% a 25% do volume de sólidos	Cristais prismáticos grandes hexagonais
Sulfoaluminatos	15% a 20% do volume de sólidos	Cristais prismáticos aciculares

Além dos produtos de hidratação constantes na tabela 2.5, há também a presença de grãos anidros do clínquer, com dimensões num intervalo de $1\mu\text{m}$ a $50\mu\text{m}$.

2.1.4.2 – Agregados

São materiais particulados, incoesivos, de atividade química praticamente nula, constituídos de misturas de partículas, cobrindo extensa gama de tamanhos (BAUER, 2000).

Os agregados que compõem o concreto tradicional variam normalmente, em volume, entre 24% a 30% de agregados miúdos e 31% a 51% de agregados graúdos (SMITH, 1998). Em se tratando de agregados leves para produção de concreto, essas composições são alteradas em função das características peculiares como tipo de agregados e sua finalidade aplicativa.

De acordo com a densidade do material, os agregados são classificados em leves, médios e pesados. A tabela 2.6 apresenta alguns agregados e valores aproximados das médias das densidades aparentes.

TABELA 2.6 – Densidades aparentes médias (BAUER, 2000).

Leves	Médios	Pesados
Vermiculita 0,3	Calcário 1,4	Barita 2,9
Argila expandida 0,8	Granito 1,5	Hematita 3,2
Escória granulada 1,0	Cascalho 1,6	Magnetita 3,3

2.1.4.2.1 – Agregado Leve (argila expandida)

Nesta pesquisa, utilizou-se o agregado leve industrializado obtido a partir da argila, para produção da argila expandida.

A argila é um material muito fino, constituído de grãos lamelares de dimensões inferiores a dois micrometros, formada, em proporções muito variáveis, de silicato de alumínio e óxidos de silício, ferro, magnésio e outros elementos. Para a produção de argila expandida, a matéria – prima precisa ser dotada da propriedade de piroexpansão, isto é: de apresentar formação de gases quando aquecida a altas temperaturas (acima de 1000 °C). Nem todas as argilas possuem essa propriedade (BAUER, 2000).

A argila expandida é um produto que se obtém através do aquecimento de alguns de tipos de argila na temperatura em torno de 1200°C. Próximo desta temperatura, uma parte dos constituintes do material se funde resultando em uma massa viscosa, enquanto a outra parte se decompõe quimicamente liberando gases que são incorporados por esta massa sinterizada, expandindo-a em até sete vezes o seu volume inicial. Esses gases retidos no interior da argila, não podem escapar para o seu exterior devido à fase líquida que envolve as partículas da argila. Essa estrutura porosa se mantém após o resfriamento, de modo que a massa unitária do material resultante torna-se menor do que antes do aquecimento, podendo ser utilizada como agregado graúdo na produção de concretos leves, com o objetivo de reduzir o peso próprio das estruturas (MORAVIA et al., 2006).

2.1.4.2.2 – Classificação dos agregados leves

Os agregados leves podem ser classificados em naturais ou artificiais. Os agregados leves naturais são obtidos através da extração direta em jazidas, seguida de classificação granulométrica. Esse tipo de agregado tem pouca aplicação em concretos estruturais em função da grande variabilidade de suas propriedades e da localização das jazidas. Têm-se como exemplo a pedra-pomes e as escórias vulcânicas. Os agregados leves artificiais são obtidos em processos industriais e, geralmente são qualificados de acordo com a matéria – prima utilizada no processo de fabricação. Têm-se argilas e escórias expandidas (ROSSIGNOLO, 2003).

De acordo com Souza Santos (1992), a ASTM (1964) estabeleceu três especificações para os agregados leves:

a) Agregados leves para concreto estrutural (C 330-64 T) – Esses agregados são preparados através da expansão, calcinação ou sinterização de materiais, como escória de alto-forno, argilas, diatomitos, cinzas, folhelhos argilosos e ardósia ou pelo processamento de materiais naturais, como pumicita (pedra-pomes), escórias ou tufos vulcânicos;

b) Agregados leves para fabricação de peças de alvenaria de concreto (C 331-64 T) – São preparados pela expansão, calcinação ou sinterização de materiais, como escória de alto-forno, argilas, diatomitos, cinzas, folhelhos argilosos e ardósia ou pelo processamento de materiais naturais, como pumicita, escórias ou tufos vulcânicos ou por cinzas provenientes da combustão de carvão ou de coque;

c) Agregados leves para fabricação de concreto isolante (C 332-61) – Podem ser preparados pela expansão de materiais, como perlita ou vermiculita, para produção de concreto leve de massa específica aparente entre $0,23 \text{ g/cm}^3$ a $0,80 \text{ g/cm}^3$ e condutividade térmica entre $0,00016 \text{ cal/s/cm}^2/^\circ\text{C/cm}$ a $0,00052 \text{ cal/s/cm}^2/^\circ\text{C/cm}$ ou pela expansão, calcinação ou sinterização de materiais, como escória de alto-forno, argilas, diatomitos, cinzas, folhelhos argilosos e ardósia para produção e concreto leve de massa específica aparente entre 720 kg/m^3 a 1440 kg/m^3 e condutividade térmica entre $0,00036 \text{ cal/s/cm}^2/^\circ\text{C/cm}$ a $0,00100 \text{ cal/s/cm}^2/^\circ\text{C/cm}$.

Ainda segundo Souza Santos (1992), o agregado leve para concreto estrutural se classifica em três granulometrias, com as seguintes massas específicas aparentes máximas:

a) agregado fino - máximo de 1120 kg/m^3 ; b) agregado grosso – máximo de 800 kg/m^3 ; c) combinação de agregados finos e grossos – máximo de 1000 kg/m^3 . Em função da resistência à compressão, os concretos produzidos com agregados leves, após 28 dias, apresentam os seguintes valores: a) 28 MPa (mínima) para massa específica aparente máxima de $1,80 \text{ g/cm}^3$; b) 21 MPa (mínima) para 1750 kg/m^3 máxima; c) 14 MPa (mínima) para 1650 kg/m^3 .

2.1.4.2.3 – Processos de fabricação

Os processos mais utilizados para fabricação dos agregados leves são sinterização e forno rotativo. No processo de sinterização, a matéria-prima é misturada em uma proporção adequada de combustível, podendo ser carvão finamente moído ou coque. Em seguida submete-se esse material a altas temperaturas, utilizando uma grelha móvel, com conseqüente expansão, em função da formação de gases (ROSSIGNOLO, 2003).

O agregado obtido pelo processo de sinterização apresenta os poros abertos, ilustrados na figura 2.8 (a) em recobrimento e com altos valores de absorção de água. Além disso, o produto final desse processo é um clínquer muito irregular e de arestas vivas, que exige britagem para atender a todas as graduações granulométricas necessárias para a produção de concretos leves.

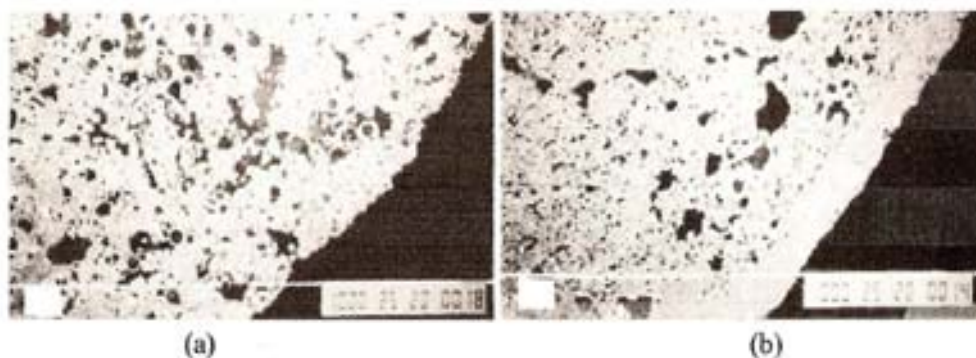


Figura 2.8 – Agregados produzidos pelos processos de (a) Sinterização e (b) Forno rotativo – MEV (ROSSIGNOLO, 2003).

Os agregados produzidos pelo processo do forno rotativo (ou Nodulação), mostrado na figura 2.8 (b), normalmente possuem granulometria variada, formato arredondado regular e âmago formado por uma massa esponjosa microcelular, envolta por uma casca cerâmica vitrificada, resistente e com baixa permeabilidade, que sugere ao agregado uma porosidade fechada. O agregado produzido por este processo recebe também a denominação “encapado”, pois possui uma camada externa de material vítreo, que diminui significativamente a absorção de água (ROSSIGNOLO, 2003).

Segundo Bauer (2000), a graduação desse agregado é da ordem de 4,8/25mm, com praticamente 80% de material 19/25mm. O peso específico unitário é da ordem 4000 N/m³ e a absorção da água, da ordem 19%. O peso específico absoluto (do material do grão) está entre 10 kN/m³. a 14 kN/m³.

De acordo com CEB/FIP, 1977; apud ROSSIGNOLO (2003), os agregados produzidos em forno rotativo, apresentado na figura 2.9, para a produção de argilas expandidas, geralmente apresentam forma esférica e uma fina camada externa com baixa porosidade, possibilitando, assim, a obtenção de boa trabalhabilidade com baixas relações água/cimento. Entretanto, em função do formato esférico, esse tipo de agregado apresenta maior facilidade de segregação do que o produzido por sinterização.



Figura 2.9 – Forno rotativo para produção de argila expandida (SOUZA SANTOS, 1992)

2.1.4.2.4 – Porosidade e absorção

Um dos aspectos que particulariza os agregados leves é alta porosidade, tendo como conseqüência uma baixa massa específica aparente.

As características de porosidade e absorção de água dos agregados leves afetam significativamente as propriedades dos concretos no estado fresco e o processo de hidratação do cimento. A velocidade e a quantidade de água absorvida pelos agregados leves dependem dos seguintes fatores: porosidade total; conectividade entre os poros; características da superfície do agregado e umidade do agregado antes da mistura (NEVILLE, 1997a; EUROLIGHTCON, 1998 apud ROSSIGNOLO (2003).

A absorção do agregado leve após 24 horas pode variar entre 5% e 20% em relação à massa de material seco, mas para agregados de boa qualidade utilizado em concreto estrutural, não é mais do que 15% (NEVILLE, 1997).

2.1.4.3 – Estrutura interna e propriedades mecânicas

Segundo Rossignolo (2003), a estrutura interna tem um efeito importante na resistência mecânica e no módulo de deformação dos agregados leves. Para a mesma matéria-prima e processo de fabricação, agregados com estruturas bastante porosa são menos resistentes do que os agregados com estrutura pouco porosa. O tamanho e a distribuição dos poros também são decisivos na resistência mecânica dos agregados leves.

Para um mesmo grau de porosidade, é interessante que haja uma distribuição uniforme de pequenos poros, ao invés de poucos poros de grande diâmetro. A redução da porosidade, em algumas áreas específicas, também influencia a resistência mecânica do agregado. Pode-se citar, como exemplo, a argila expandida, em que a camada externa de baixa porosidade aumenta a resistência mecânica deste agregado.

Ainda de acordo com Rossignolo (2003), o valor do módulo de deformação dos agregados leves pode ser estimado através da equação 2.1 (FIP, 1983), que relaciona o módulo de deformação, E_c (MPa) e a massa específica γ (kg/m³) do agregado leve. Os valores do módulo de deformação dos agregados leves utilizados em concretos estruturais variam entre 10 GPa e 18 GPa.

$$E_c = 0,008 \cdot \gamma^2 (\text{MPa}) \quad (2.1)$$

Quanto maior for a diferença entre os valores do módulo de deformação do agregado e da matriz de cimento, maior será a diferença entre a resistência à compressão da matriz de cimento e do concreto. O aumento do módulo de deformação do agregado leve aumenta também os valores da resistência à compressão e do módulo do concreto.

2.1.5 – Dosagem do concreto Leve

A dosagem é um processo que consiste em definir um traço, através do qual se obtém a quantidade de cada componente da mistura do concreto para produzir um material que atenda a certos requisitos considerados importantes como trabalhabilidade, resistência e durabilidade.

O método do volume absoluto, baseado no método do ACI para dosagem de misturas de concreto normal, não é indicado para a dosagem do concreto leve, pois a relação entre a resistência e o fator água/cimento não pode ser efetivamente usada por causa da dificuldade em se determinar a água de amassamento será absorvida, não só pela grande quantidade de absorção de água pelo agregado poroso (10 a 20%), como também pelo fato de que alguns agregados continuam absorver água durante semanas. No entanto, para alguns agregados leves, é possível o uso do método volumétrico (ACI) com dosagem do concreto normal, desde que se faça um ajuste nas proporções através de experimentos para atender as exigências de trabalhabilidade do concreto fresco e propriedades do concreto endurecido sejam satisfatórias. Para isso, é fundamental começar com volumes iguais de agregados miúdos e graúdos, fazendo os ajustes necessários para atingir o abatimento desejado (METHA e MONTEIRO, 1994).

O ACI - 211.2-98 é um método que tem a finalidade de fornecer, por via de regra, métodos aplicáveis para selecionar e ajustar proporções de misturas para concreto estrutural leve. Estes métodos são também aplicáveis em concreto contendo uma combinação de agregado leve e agregado normal.

Os métodos utilizados para dosagem dos concretos com massa específica normal podem ser utilizados para os concretos leves, porém três fatores adicionais devem ser considerados: a necessidade de projetar um concreto com massa específica particular, a influência dos agregados leves nas propriedades dos concretos e a absorção de água dos agregados leves (ROSSIGNOLO, 2003)

2.1.5.1 – Propriedades do concreto leve no estado fresco

2.1.5.1.1 – Trabalhabilidade

Define-se a trabalhabilidade como sendo a propriedade do concreto no estado fresco que caracteriza sua maior ou menor capacidade de ser empregado com determinada finalidade, sem perda da sua homogeneidade. A trabalhabilidade não é apenas uma característica inerente ao concreto; como a consistência, mas envolve também a consideração da natureza da obra e dos métodos adotados para o transporte, lançamento e adensamento.

A consistência é um dos principais fatores que influencia a trabalhabilidade do concreto, e que pode ser definida como grau de unidade do concreto intimamente relacionado com o grau de plasticidade da massa (TARTUCE E GIOVANNETTI, 1990).

As propriedades dos concretos leves no estado fresco e os fatores que afetam são essencialmente os mesmos que influem no concreto normal. Contudo, devido à baixa densidade e à textura áspera característica do agregado poroso, principalmente quando é britado, a trabalhabilidade do concreto necessita de uma atenção especial. Geralmente, o lançamento, adensamento e acabamento de concretos leves requerem um esforço relativamente menor. Para avaliação da trabalhabilidade, considera-se o índice de consistência, medido pelo abatimento do tronco de cone ou pela mesa de espalhamento, um dos parâmetros mais adequados para a verificação das características associadas à trabalhabilidade dos concretos no estado fresco (METHA E MONTEIRO, 1994).

A faixa de variação dos valores para o índice de consistência dos concretos leves, geralmente mostra-se menor do que a utilizada para os concretos tradicionais. Os concretos leves com altos valores de índice de consistência apresentam grandes possibilidades de segregação dos agregados e, por outro lado, concretos leves com baixos valores de consistência apresentam dificuldade no adensamento (ROSSIGNOLO, 2003).

Segundo Neville (1997), um abatimento elevado pode causar segregação, com partículas grandes de agregados na parte superior. Deste modo a vibração prolongada pode resultar segregação muito mais rapidamente do que com concretos normais.

2.1.5.1.2 – Segregação e exsudação

No concreto leve ocorre a segregação das partículas de agregados dada a baixa massa específica desse material. Já a exsudação se apresenta normalmente como acontece no concreto tradicional, ou seja, a água de amassamento aflora na superfície do concreto (NEVILLE, 1997).

A segregação e exsudação dos concretos leves podem ser evitados ou minimizados, tomando-se alguns cuidados no processo de dosagem, como granulometria adequada dos agregados, substituição total ou parcial do agregado miúdo por areia natural e utilização de adições minerais (METHA e MONTEIRO, 1994).

2.1.6 – Propriedades do concreto leve endurecido

2.1.6.1 - Massa específica

Além da trabalhabilidade, a massa específica e a resistência são as duas propriedades normalmente exigidas para o concreto leve estrutural. As especificações limitam a massa específica seca ao ar do concreto no valor máximo de 1840 Kg/m^3 , mas não há limite mínimo. Todavia, quando é usado altamente poroso, com dimensão máxima maior que 19 mm, a massa específica do concreto pode ser reduzida a menos de 1440 Kg/m^3 , mas o produto pode não ser capaz de atingir a resistência a compressão mínima de 17 MPa aos 28 dias, exigida para o concreto leve estrutural (Metha e Monteiro, 1994).

2.1.6.2 – Resistências à compressão e à tração por compressão diametral

A limitação da resistência dos concretos leves imposta pela resistência do agregado graúdo pode ser minorada pelo uso de agregado com menor tamanho máximo. Isto se deve ao fato de que, com fragmentação das partículas maiores de agregado, a ruptura ocorre através dos poros maiores que, assim, são eliminados.

As partículas de agregado graúdo são relativamente fracas e sua resistência pode ser um fator limitante da resistência do concreto leve. Contudo, não existe uma relação definida entre a resistência do agregado e a resistência do concreto (NEVILLE, 1997).

Metha e Monteiro (1994) comentam que as resistências à compressão de projeto entre 20 MPa e 34 MPa aos 28 dias são comuns, ainda que usando um alto teor de cimento e agregado leve de boa qualidade e de pequena dimensão de 9 mm a 13 mm (no máximo), é possível, em algumas usinas de pré-moldados e de protendido, produzir concreto de 40 MPa a 48 MPa. Ainda segundo os autores, o ACI 213-R-79 relaciona a resistência média de compressão com o teor de cimento, tanto para concreto somente com agregado leve como para o concreto com areia e agregado leve. A tabela 2.7 mostra essa relação entre resistência e o consumo por metro cúbico de concreto.

Tabela 2.7 – Relação entre resistência à compressão média e o teor de cimento (METHA e MONTEIRO, 1994).

Resistência a Compressão (MPa)	Cimento (Kg/m ³)	
	Somente Agregado Leve	Agregado Leve e Areia Natural
17,24	240-305	204-305
20,68	260-335	250-335
27,58	320-395	290-395
34,47	375-450	360-450
41,37	440-500	420-500

Ainda de acordo com Metha e Monteiro (1994), a resistência à tração por compressão diametral, através de cilindros de concreto, conforme especifica a ASTM C 496, é uma medida relativa conveniente da resistência à tração. Em exame de corpos de prova rompidos de concreto com agregado leve, após ensaio de tração por compressão diametral, revelaram de forma clara, ao contrário do ocorre com o concreto normal, ou seja, o agregado é geralmente o componente mais fraco do sistema, em virtude da reação pozolânica e da aderência pasta/agregado, na superfície dos agregados leves, ser mais resistente do que as partículas do agregado. As normas estabelecidas pela ASTM C 330 exigem, para resistência à compressão e à tração por compressão diametral e para massa específica aparente do concreto estrutural leve, os valores apresentados na tabela 2.8.

Tabela 2.8– Exigências para concreto estrutural leve
(METHA e MONTEIRO, 1994).

Massa específica seca ao ar máx aos 28 dias (Kg/m ³)	Resistência à tração por compressão diametral mín. aos 28 dias (MPa)	Resistência à compressão mín. aos 28 dias (MPa)
	Todos os agregados leves	
1760	2,1	28
1680	2,0	21
1600	2,2	17
	Combinação de areia natural com agregado leve	
1840	2,3	28
1760	2,1	21
1680	2,1	17

2.1.6.3 – Fator água/cimento

Define-se o fator água/cimento como a quantidade de água utilizada na massa do concreto em relação ao cimento. Esse fator é um dos parâmetros mais importantes relacionado com a resistência à compressão, pois quanto mais água em relação ao cimento da pasta, tanto mais poros e, conseqüentemente, menor a resistência desse material (TARTUCE E GIOVANNETTI, 1990).

De acordo com Neville (1997), a porosidade capilar da pasta depende tanto da relação água/cimento da mistura como do grau de hidratação; ou seja, o fator água /cimento determina a porosidade da pasta de cimento endurecida em qualquer estágio da hidratação.

O ACI 211.2-98 recomenda uma relação água/cimento para estruturas molhadas continuamente ou frequentemente expostas ao congelamento e degelo de 0,50 e para estruturas expostas a água do mar ou sulfatos de 0,45.

Adotou-se para esta pesquisa um fator água/cimento de 0,43 para os traços estudados, a fim de restringir as variáveis envolvidas na confecção do concreto, tendo em vista que se trata de um estudo preliminar.

2.1.6.4 – Permoporosidade

O termo “permoporosidade” é frequentemente utilizado na Geologia e na Engenharia do Petróleo, para caracterizar as propriedades das rochas sob o ponto de vista da porosidade e da permeabilidade. O concreto por ser um material essencialmente poroso e também por desenvolver permeabilidade a fluídos, tem características de material permoporoso. Por isso, incorporou-se esse termo no contexto do concreto leve.

A permoporosidade é definida como o sistema de poros que permite o escoamento de fluído através de um material sólido.

Define-se porosidade (η) como a proporção do volume de vazios em relação ao volume total, conforme equação (2.2).

$$\eta = \frac{V_v}{V} \quad (2.2)$$

Onde: V_v - Volume de vazios

V - Volume Total

A permeabilidade é definida como uma propriedade que governa a taxa de fluxo de um fluído através de um sólido poroso (METHA E MONTEIRO, 1994).

Sob o ponto de vista da estrutura da pasta de cimento hidratado, o importante para a permeabilidade é a natureza do sistema de poros no interior da sua massa e também na região próxima da interface com o agregado. Essa região de transição ocupa entre um terço e a metade do volume total da pasta de cimento hidratada, tendo uma microestrutura diferente do restante da pasta. A interface é, também, o local onde ocorre a microfissuração. Por essas razões, poderia se esperar que a região da interface contribuísse de forma significativa para permeabilidade do concreto. Contudo, apesar da maior porosidade da região de transição, a permeabilidade do concreto é controlada pela pasta de cimento hidratada, que é a única fase contínua no concreto (NEVILLE, 1997).

Ainda segundo Neville (1997), os poros importantes para a permeabilidade são aqueles com diâmetro de, pelo menos, 120 nm ou 160 nm, e que esses poros

devem ser contínuos. Poros que não são efetivos para o escoamento, compreendem, além dos descontínuos, aqueles que contêm adsorvida e aqueles que embora grandes, tenham uma entrada estreita. Os agregados, também, podem conter poros, que, normalmente, são descontínuos; além disso, as partículas de agregado são envolvidas pela pasta de cimento, de modo que os seus poros não contribuem para a permeabilidade do concreto.

Com a presença de microfissuras na zona de transição entre agregado e a pasta de cimento, torna compreensível a causa pela qual a permeabilidade da argamassa ou concreto é maior que a permeabilidade da pasta de cimento correspondente. E também, o tamanho e a granulometria do agregado afetam as características de exsudação de uma mistura de concreto a qual, por sua vez, influencia a resistência da zona de transição. Durante os períodos iniciais de hidratação a zona de transição é fraca e vulnerável à fissuração devido a esforços diferenciais entre a pasta do cimento e o agregado induzidos geralmente por retração de secagem, contração térmica e carga aplicada externamente.

A permeabilidade do concreto à água depende principalmente da relação água/cimento, a qual determina o tamanho, volume e continuidade dos espaços capilares, bem como da dimensão máxima do agregado que influencia as microfissuras na zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento (METHA e MONTEIRO, 1994)

Para os concretos leves, os agregados podem apresentar grande influência na permeabilidade dos concretos caso apresentem a estrutura porosa comunicante, e por esta razão, facilita o fluxo de líquido e gases e, conseqüentemente, de agentes agressivos no concreto. Alguns agregados leves, como a argila expandida, apesar de apresentarem valores de porosidade acima de 50%, apresentam baixa permeabilidade, uma vez que a maioria dos poros não são interligados, não criando, assim, caminhos preferenciais (ROSSIGNOLO, 2003).

A baixa permeabilidade dos concretos leves resulta de vários fatores: a relação água / cimento da pasta é baixa; é melhor a qualidade da região da interface em torno do agregado de modo que não se formam percursos mais fáceis em volta desse agregado; e a compatibilidade dos módulos de elasticidade do agregado e da matriz significam pouca microfissuração sob carga ou por efeito de variações térmicas. Além disso, o suprimento de água pelo agregado possibilita o

prosseguimento da hidratação do cimento com uma conseqüente redução da permeabilidade (NEVILLE, 1997).

De acordo com Rossignolo (2003), os concretos leves estruturais apresentam permeabilidade a líquidos e gases semelhante ou inferior à observada nos concretos tradicionais, para o mesmo nível de resistência à compressão. Atribuem-se estes resultados aos baixos valores da relação água/aglomerante dos concretos leves, em relação aos concretos tradicionais, para se obter a mesma resistência à compressão, à diminuição de fissuras internas do concreto leve pela maior proximidade dos módulos de deformação do agregado e da matriz de cimento e à melhoria da qualidade da matriz, na zona de transição.

Ainda que o concreto leve seco ao ar tender a apresentar um alto grau de absorção de umidade, isto não significa alta permeabilidade. A permeabilidade do concreto leve é baixa e conseqüentemente, sua durabilidade a soluções químicas agressivas é normalmente bastante satisfatória. O principal motivo para a baixa permeabilidade e a excelente durabilidade do concreto leve é a ausência generalizada de microfissuração na zona de transição agregado-pasta; isto deve-se à similaridade dos módulos de elasticidade do agregado leve e a fração de argamassa, e também, devido à reação pozolânica entre os silicatos de alumínio reativos das partículas do agregado leve termicamente ativado e o hidróxido de cálcio da pasta (METHA e MONTEIRO, 1994).

Enquanto a porosidade se refere à totalidade dos vazios e a absorção é função dos poros que têm comunicação com o exterior, a permeabilidade tem relação com a continuidade destes canais (PETRUCCI, 1995).

Estudos recentes indicaram que a capacidade de um meio absorver líquido por capilaridade pode está correlacionada com a permeabilidade, e é função da porosidade, diâmetro dos poros, distribuição e continuidade dos poros no interior da matriz do concreto.

Em muitos casos, a permeabilidade de cloreto no concreto usual, utilizando o método AASHTO, é usado para comparar a permeabilidade do concreto, mas poucos pesquisadores têm estudado a permeabilidade do cloreto no concreto leve – LAWC (TOMMY e ABID NADEEM, 2006).

2.1.6.5 – Ação de cloretos no concreto estrutural

Os cloretos presentes no concreto, normalmente são incorporados na mistura por agregados contaminados, por água do mar, ou água salobra, ou por aditivos com cloretos, resultando na deterioração das estruturas de concreto armado. Esses sais, também, podem ser depositados sobre a superfície do concreto na forma de gotículas de água do mar, retiradas por turbulência e transportadas pelo vento, ou poeira propagada pelo ar e depois se molha pelo orvalho. Além disso, os cloretos veiculados pelo ar podem percorrer grandes distâncias, que inclusive, já observaram casos de transporte de até 2 km; e ainda sendo possível o transporte a distâncias maiores, isto dependendo da ação do vento e da topografia local (NEVILLE, 1997).

Sabe-se que a água, oxigênio e íons cloreto desempenham papéis importantes na corrosão da armadura e fissuração do concreto e, para isso, a permeabilidade é fundamental para controlar os vários processos envolvidos na degradação desse material. O efeito da água do mar sobre o concreto merece atenção especial, sobretudo, porque, as estruturas marítimas costeiras e de alto mar estão expostas à ação simultânea de numerosos processos de deterioração física e química, o que propiciam circunstâncias para entender a complexidade da questão de durabilidade do concreto, de forma prática (METHA e MONTEIRO, 1994).

Segundo Helene (1993) a penetração de íons cloreto no concreto pode ocorrer por permeabilidade, absorção capilar, difusão iônica, migração iônica, gravidade, vento e energia cinética, dependendo exclusivamente da porosidade. O mecanismo de penetração do íons cloreto, por permeabilidade, no concreto, está relacionado com o regime laminar estacionário e não turbulento – a lei de Darcy, expressa através da equação 2.3:

$$V = K \frac{H}{X} = \frac{Q}{S} \quad (2.3)$$

Onde:

V = Velocidade da percolação da água em m/s.

K = Coeficiente de permeabilidade da água no concreto em m/s.

H = Pressão da água em m.c.a.

X = Espessura do concreto percolado pela água em "mm".

Q = Vazão percolada em m³/s.

S = Área da superfície.

Ainda segundo Helene (1993), a difusão de cloretos no interior do concreto está fortemente associada ao fator água/cimento; logo, concretos com elevada relação a/c proporcionam maior penetração de umidade, além da difusão de oxigênio, cloretos e dióxido de carbono.

Segundo Gentil (1996), a atuação do cloreto de sódio tem ocasionado corrosão em grande número de pontes com invernos rigorosos que utilizam degelo com sais. E que, as estruturas situadas em orla marítima são vulneráveis à deterioração, tendo em vista a penetração de névoa salina na massa do concreto, podendo atingir a armadura.

A ação química da água do mar provém do fato que ela contém vários sais em solução. A salinidade total típica é de 3,5%. Só que dos sais dissolvidos, o cloreto de sódio contribui com 78% e o cloreto de magnésio e sulfato de magnésio com 15%. Para os valores de diferentes oceanos, a proporção em diversos sais é praticamente constante; por exemplo, no oceano atlântico, a concentração de íons, em porcentagem, é: cloretos - 2,00, sulfatos - 0,28, sódio - 1,11, magnésio - 0,14, cálcio - 0,05 e potássio - 0,04 (NEVILLE,1997).

Há duas formas de encontrar cloretos nos concretos: como cloreto livre, solúvel ou dissociável, na forma de íon na água dos poros, ou como cloreto combinado, formando parte das fases hidratadas do cimento. O primeiro faz referência ao cloreto efetivamente agressivo à armadura e, o segundo, normalmente se encontra combinado na forma de cloroaluminato de cálcio, $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$, conhecido como sal de Friedel. A soma do cloreto livre e o combinado resultam no cloreto total. Ainda que o cloreto solúvel em água seja o que pode

provocar a corrosão, faz-se necessário determinar os cloretos totais vistos que parte dos cloretos combinados podem vir a ficar disponíveis para reações deletérias devido a fenômenos tais como carbonatação ou elevação de temperatura (PEREIRA e CINCOTTO, 2001).

No concreto, os íons cloreto podem coexistir quimicamente ligado ao aluminato tricálcico ou Sal de Friedel, adsorvido na superfície dos poros; e sob a forma íon livre. Estas formas tendem ao equilíbrio, sendo íon livre o mais prejudicial à estrutura, propiciando a corrosão do aço (JOUKOSKI, A. et al., 2001).

As normas, geralmente, estabelecem limites rigorosos para o teor total de cloreto no concreto, qualquer que seja a origem (NEVILLE, 1994). Esses limites variam de um país para outro; isto deve-se a dificuldade de estabelecer um limite seguro, abaixo do qual não exista risco de despassivação da armadura, uma vez que este limite depende de algumas variáveis, tais como: tipo de cimento, proporção de cimento, relação água/cimento, conteúdo de umidade, e outros. Mesmo que o concreto não contenha cloretos inicialmente, há possibilidade desses íons cloreto chegarem até a armadura através da rede de poros, caso a estrutura esteja situada em ambientes marinhos. Essa rede de poros é um emaranhado de canais e capilares, nem sempre comunicados entre si, mas que permitem que o concreto apresente uma certa permeabilidade aos líquidos e aos gases (ANDRADE PERDRIX, 1992). A figura 2.10 mostra um modelo esquemático de uma rede de poros do concreto.

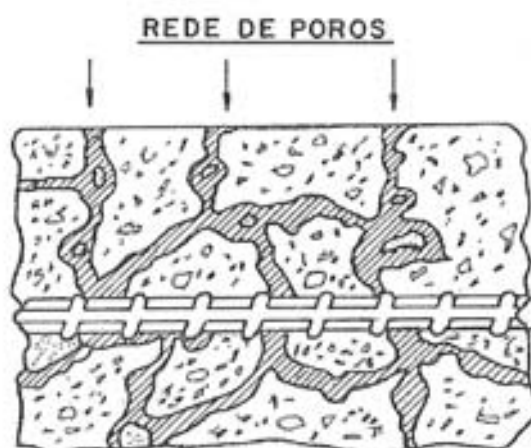


Figura 2.10 – Modelo simplificado da rede de poros do concreto
(ANDRADE PERDRIX, 1992)

Rossignolo (2003) argumenta que a velocidade e a quantidade de íons cloreto que penetram no concreto dependem, fundamentalmente, das propriedades da matriz de cimento. Com isso, os concretos leves e os concretos tradicionais apresentam características semelhantes com relação à resistência à penetração de íons cloretos.

2.1.6.6 – Interface entre o agregado leve e a matriz de cimento

A interface ou zona de transição é considerada a fase de resistência limite no concreto. É nesta fase que o concreto se rompe a um nível de tensão consideravelmente mais baixo do que a resistência dos dois constituintes principais – argamassa matriz e o agregado graúdo.

A resistência da zona de transição em qualquer ponto depende do volume e do tamanho dos vazios presentes. Para concreto de baixa relação água/cimento, nas primeiras idades, o volume e tamanho de vazios na interface serão maiores do que na matriz de argamassa, tendo como consequência uma fraca resistência. Entretanto, com o aumento da idade, a resistência da zona de transição pode tornar-se igual ou maior do que a resistência da matriz de argamassa (METHA e MONTEIRO, 1994)

A zona de transição, ilustrada na figura 2.11, influencia diretamente as propriedades relacionadas à resistência mecânica, módulo de deformação, mecanismo de propagação de fissuras e permeabilidade de agentes agressivos nos concretos, demonstrando assim, a importância do estudo da interface agregado matriz dos concretos (ROSSIGNOLO, 2003).



Figura 2.11 – Zona de transição entre o agregado leve e a matriz de cimento (Micrografia ótica de transmissão -100x) (ROSSIGNOLO, 2003)

Para o concreto leve, se a camada externa do agregado for mais densa, o comportamento da interface é igual à do agregado tradicional. Todavia, o agregado leve com uma camada externa mais porosa, que atrai a migração de íons, conduz a formação de uma zona de transição mais densa, melhorando o intertravamento mecânico entre o agregado e a pasta de cimento (NEVILLE, 1997).

Estudos realizados por FAGERLUND (1972 apud ROSSIGNOLO, 2003) propõem que a qualidade da matriz de cimento ao redor do agregado leve, na zona de transição, apresenta melhoria de desempenho em relação ao agregado tradicional devido ao efeito de filtragem, em que o agregado leve absorve pasta da água presente na pasta de cimento, reduzindo deste modo, a relação água/cimento da matriz de cimento próxima a superfície do agregado leve. Esse fato diminui a permeabilidade e aumenta a resistência mecânica da matriz de cimento na interface agregado-matriz.

A interface entre o agregado leve e a matriz de cimento apresenta baixa porosidade e caracteriza-se pela alta ancoragem mecânica entre o agregado leve e a matriz de cimento, conseqüência da rugosidade da superfície do agregado. Observou-se também, nestes estudos que os agregados leves produzidos em forno rotativo, utilizando argila expandida, não apresentam potencial de reação pozolânica com a matriz do cimento (ROSSIGNOLO, 2003).

A zona de transição representa a região interfacial entre as partículas de agregado graúdo e a pasta de cimento. Essa região consiste de uma camada delgada com 10 μm a 50 μm de espessura ao redor do agregado graúdo, o que torna a zona de transição geralmente mais fraca do que os outros dois componentes principais do concreto, e conseqüentemente, exerce uma influência muito maior sobre o comportamento mecânico do concreto do que pode ser esperado pela sua espessura.

Segundo NEVILLE (1997), a boa aderência entre o agregado leve e a pasta de cimento hidratada, decorre de vários fatores, tais como: a textura áspera da superfície de muitos agregados leves, resultando no intertravamento mecânico entre os dois materiais; os módulos de elasticidade das partículas de agregado leve e da pasta de cimento não são muito diferentes e, conseqüentemente, não são induzidas tensões diferenciais entre os dois materiais pelas cargas aplicadas ou por variações térmicas ou higroscópicas; a água absorvida pelo agregado no momento da mistura se torna, com o tempo, disponível para a hidratação do cimento não hidratado remanescente, o que torna mais forte a aderência e entre o agregado e a matriz.

2.1.6.7 - Propriedades térmicas e acústicas

Estas propriedades foram arroladas neste estudo sob o ponto de vista da aplicabilidade do concreto leve como um material que tem bom desempenho térmico-acústico, conforme autores pesquisados.

As propriedades térmicas dos concretos leves em relação aos concretos tradicionais são relativamente expressivas; isto se deve à combinação de alguns fatores, tais como: menor condutividade térmica, menor coeficiente de expansão térmica e maior estabilidade dos agregados leves quando expostos a altas temperaturas (ROSSIGNOLO, 2003).

A baixa condutividade térmica dos concretos leves reduz o aumento da temperatura em caso de incêndio. Além disso, o agregado leve é estável a temperaturas elevadas, uma vez que seu processamento se deu a uma temperatura acima de 1100 °C (NEVILLE, 1997).

O coeficiente de expansão térmica de concreto contendo folhelho expandido como agregado leve, é da ordem de $6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ a $8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Os valores típicos de condutividade térmica de concreto contendo somente argila expandida como

agregado e aqueles contendo argila expandida como agregado graúdo e areia natural são 0,22 e 0,33 Btu/pé²-hr-°F/pé, respectivamente (METHA E MONTEIRO, 1994).

A absorção acústica dos concretos leves pode ser considerada boa, devido ao fato de que a energia sonora propagada pelo ar se transforma em calor nos minúsculos vazios do agregado, de maneira que o coeficiente de absorção acústica é cerca de duas vezes maior do que a dos concretos normais. Todavia, uma superfície revestida pode refletir muito mais o som. Os concretos leves não tem boa isolamento acústica, pois essa isolamento aumenta com a massa específica do material (NEVILLE, 1997).

2.1.6.8 – Propriedades Elásticas

Dada a importância da elasticidade do concreto, optou-se por acrescentar este parâmetro para justificar a influência da zona de transição entre o agregado e a matriz.

De acordo com Neville (1997), a boa aderência entre o agregado leve e a matriz, é a causa da ausência de microfissuras na aderência às primeiras idades, tendo como consequência a linearidade da relação tensão x deformação até 90% da resistência final. Isso ocorre, particularmente, com os concretos leves com fumo de sílica e tem resistência aos 28 dias cerca de 90 MPa. A figura 2.12 mostra a relação tensão – deformação de concretos leves, em que se observa o comportamento das curvas, quando todos os agregado são leves, e também, quando da substituição parcial do agregado miúdo leve por agregado miúdo normal.

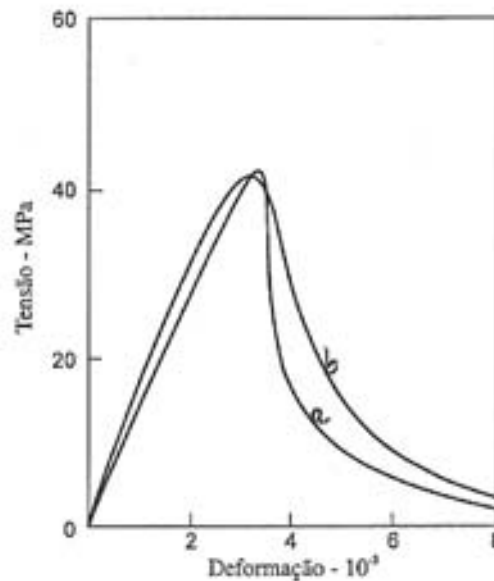


Figura 2.12 – Curvas tensão-deformação de concreto leve à base de argila expandida; (a) todo agregado leve e (b) agregado miúdo normal. (NEVILLE, 1997)

O módulo de elasticidade do concreto leve pode ser expresso em função da resistência à compressão. Contudo, em virtude da boa aderência da pasta de cimento com as partículas, o concreto leve apresenta uma ação combinada relativamente satisfatória, de modo que as propriedades elásticas do agregado têm maior influência sobre o módulo de elasticidade do concreto em relação aos concretos com agregados normais.

Para resistência até 41MPa, o ACI 318-89 (revisado em 1992) representa o módulo de elasticidade do concreto, E_c , em GPa, através da expressão (2.4):

$$E_c = 43 \cdot 10^{-6} \cdot \rho^{1,5} \sqrt{f_c'} \quad (2.4)$$

Onde: f_c' – resistência determinada em cilindros (MPa)

ρ – massa específica do concreto em kg/m^3

Os concretos feitos com argila expandida ou cinza volante sinterizada, têm valores do módulo de elasticidade entre 18 GPa e 26 GPa.

2.1.6.9 – Durabilidade do Concreto Leve

Um dos fatores de grande relevância na tecnologia do concreto é a durabilidade, tendo em vista que a vida útil do material exerce grande influência nos custos das obras.

A durabilidade do concreto é um conceito relativo que proporciona o conhecimento do comportamento desse material, sujeito à deterioração em menor ou maior grau em função de determinadas situações, que podem conduzir ao desenvolvimento progressivo, geralmente lento, de desordens que, num processo contínuo, possibilitam a uma desagregação completa da estrutura. Todavia, esses processos destrutivos podem, muitas vezes, ser interrompidos saneando-se causas de destruição gradual, reconduzindo a estrutura a condições de sobrevivência (BAUER, 2000).

Nenhum material é infinitamente durável, pois sua vida útil depende de interações ambientais, da microestrutura e, conseqüentemente, de suas propriedades, que se alteram com o passar do tempo (METHA e MONTEIRO, 1994). A vida do concreto é definida como o período em que o material mantém suas propriedades acima dos limites mínimos especificados (SOUSA E RIPPER, 1998).

Segundo Neville (1997), não existem efeitos adversos sobre a durabilidade do concreto leve, salvo quando os agregados saturados são submetidos ao congelamento e degelo. A suscetibilidade do concreto à deterioração por exposição a temperaturas muito baixas (-156°C) depende das propriedades da pasta de cimento hidratada como para os concretos normais. Somente se as próprias partículas de agregados estiverem saturadas, é que podem ser foco de deterioração; o ciclo de expansão/contração devido à variação acentuada da temperatura pode destruir a aderência com a matriz que a envolve.

3.0 - MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo identifica os materiais estudados e os métodos de ensaios utilizados para viabilização desta pesquisa. Todos os procedimentos de ensaios foram realizados no Laboratório de Cimentos da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e no Laboratório de Construção Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio Grande do Norte (CEFET-RN).

De acordo com os objetivos desta pesquisa, esse capítulo apresenta um organograma de planejamento experimental, para uma melhor sistematização desse estudo, como mostra a figura 3.1.

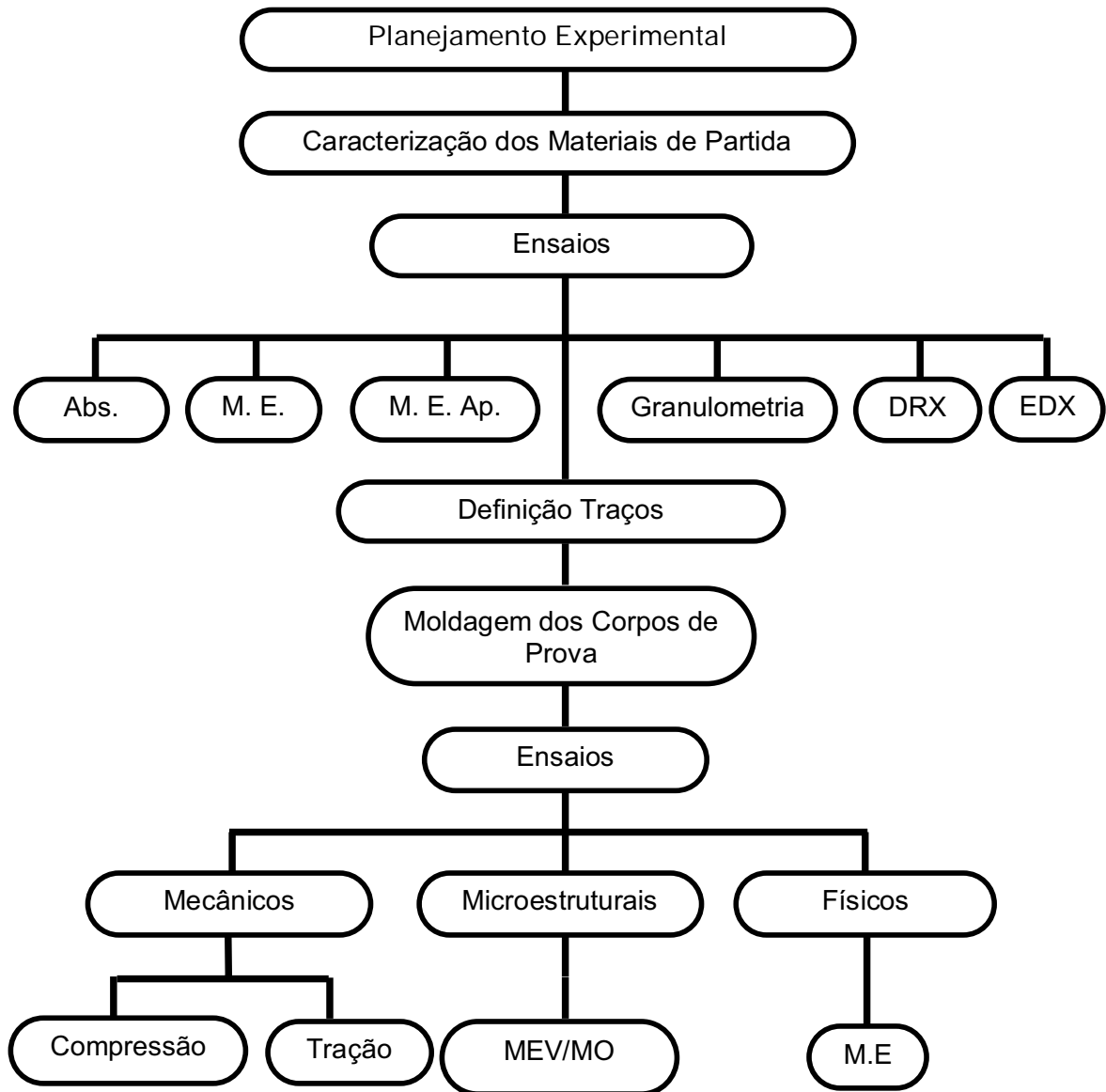


Figura 3.1 – Organograma

3.1 – Materiais e caracterização

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram caracterizados através de ensaios físicos e químicos, obedecendo as recomendações da ABNT.

3.1.1 – Cimento Portland Composto CP-Z-32-RS

Utilizou-se para produção do concreto leve o cimento Portland composto tipo CP-II - Z -32-RS, fabricado pela Empresa POTY, com massa específica igual a 3090 kg/m³ e módulo de finura 2,4%. Esse tipo de cimento composto apresenta uma composição percentual de (clínquer + gesso) entre 76% e 94%, com uma adição de material pozolânico entre 6 e 14%, além do material carbonático com percentual variando entre 0 e 10%, contribuindo assim, para as seguintes características: pequeno retardo no tempo de início de pega, pequenas reduções na resistência inicial e calor de hidratação, diminuição de fissuras devido à retração, maior resistência aos agentes agressivos e aumento de durabilidade. Os compostos químicos (Tabela 3.1) do cimento foram determinados por meio do ensaio de Espectroscopia de Dispersão de Raios-X (modelo EDX -720) do laboratório de Cimentos da UFRN. A finura deste cimento foi fornecida pelo fabricante.

Tabela 3.1- Análise química do cimento Portland CP-II-Z 32 – RS

Compostos químicos	Percentuais(%)
Perda de massa por ação do calor	5,16
SiO ₂	18,88
Fe ₂ O ₃	3,43
Al ₂ O ₃	7,07
CaO	60,82
MgO	1,87
SO ₃	5,38
Na ₂ O +K ₂ O	2,00
Resíduos insolúveis	12,51

Finura (Blaine) = 3950 cm²/g

3.1.2 – Agregado miúdo

Na produção do concreto leve foi utilizada a areia natural quartzosa proveniente de depósitos sedimentares do Rio Potengi, apresentando um módulo de

finura de 2,24 - classificada como areia fina, com uma massa específica 2620 kg/m³. A composição granulométrica desse material foi realizada de acordo com as recomendações da NBR NM 248/2003. O resultado da composição encontra-se na tabela 3.2, a qual mostra um percentual de partículas com boa distribuição.

Tabela 3.2 – Composição granulométrica da areia

Abertura da peneira (mm)	Material Retido (g)	Percentual Retido (%)	Percentual Acumulado(%)
4,75	7,20	0,72	0,72
2,36	34,80	3,48	4,20
1,18	83,40	8,34	12,54
0,60	212,60	21,26	33,80
0,30	439,10	43,91	77,71
0,15	170,50	17,05	94,76
<0,15	52,40	5,24	100,00
Total	1000,00	100,00	
Dim. Máx característica:	2,36	Módulo de Finura:	2,24

Sabe-se que curva de distribuição granulométrica mostra não apenas os tamanhos de partículas presentes no material, mas também o tipo de distribuição dessas partículas em vários tamanhos. A curva granulométrica da figura 3.2 apresentou uma graduação contínua, caracterizada por uma ampla faixa de partículas bem distribuídas.

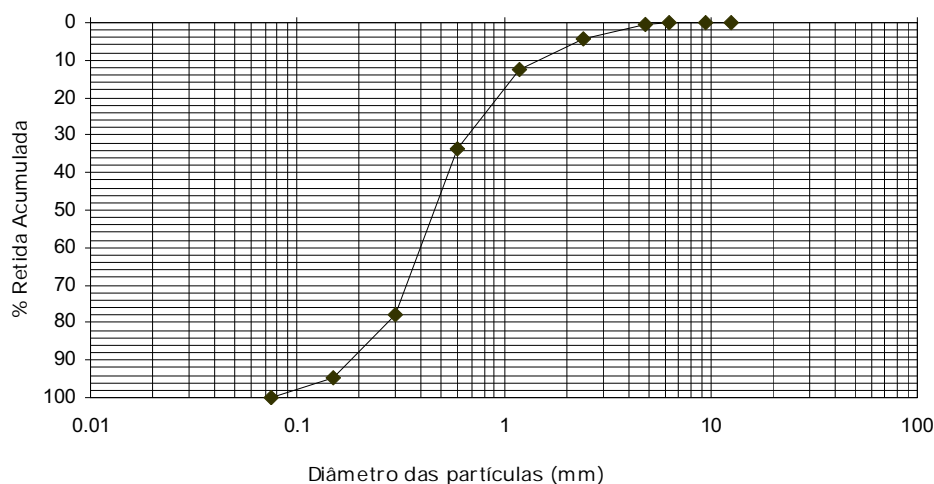


Figura 3.2 – Curva granulométrica da areia fina

3.1.3 – Agregado graúdo (argila expandida)

O agregado graúdo para produção do concreto leve foi a argila expandida de menor graduação (triturada), mostrada na figura 3.3 (a) e a argila de graduação maior com casca vítrea, apresentada na figura 3.3 (b), produzidas pela CINEXPAN S.A., com as seguintes graduações: Cinexpan 0500 (Dimensão máxima característica igual a 4,8 mm) e Cinexpan 1506 (Dimensão máxima característica = 19 mm). Essas argilas foram produzidas pelo processo do forno rotativo (nodulação) a uma temperatura média de 1100 °C, apresentando forma arredondada regular com uma camada externa de baixa porosidade (1506) em relação a menor (0500) britada. A argila tipo 0500 apresenta-se como um material triturado, de graduação equivalente à areia grossa, que possui uma composição similar à argila 1506. Ao passo que a argila 1506 é recoberta por uma casca cerâmica vítrea, em que sua graduação equivale à brita 1.



(a) 0500

(b) 1506

Figura 3.3 – Graduação das argilas expandidas

3.1.4 – Propriedades das argilas expandidas

A tabela 3.3 apresenta os valores da massa específica, massa específica aparente e absorção de água das argilas 0500 e 1506, bem como agregado de rochas graníticas – a brita, para efeito de comparação. Os ensaios foram realizados segundo as recomendações da ABNT.

Tabela 3.3 – Propriedades das argilas expandidas 0500 e 1506

Propriedades	Argila 0500	Argila 1506	Brita
Massa específica (kg/m ³)	1320	970	2400
Massa específica aparente (no estado solto) (kg//m ³)	810	540	1500
Absorção de água (%) (24 horas)	17	18	2

Os ensaios para determinação da composição granulométrica das argilas expandidas 0500 e 1506, foram realizados com base nas recomendações da norma NBR NM 248/2003. Os resultados desses ensaios encontram-se nas tabelas 3.4 e 3.5 e suas respectivas curvas granulométricas são apresentadas nas figuras 3.4

Tabela 3.4 – Composição granulométrica da argila expandida 0500

Abertura da peneira (mm)	Material Retido (g)	Percentual Retido (%)	Percentual Acumulado (%)
6,30	0,0	0,0	0,0
4,75	21,50	2,15	2,15
2,36	473,50	47,35	49,50
1,18	303,00	30,30	79,80
0,60	148,00	14,80	94,60
0,30	44,50	4,45	99,05
0,15	8,00	0,80	99,85
<0,15	1,50	0,15	100,00
Total	1000,00	100,00	
Dim. Máx característica	4,75	Módulo de Finura	4,25

A curva granulométrica da argila 0500 da figura 3.4 mostrou uma distribuição de partículas uniforme, com uma tendência para distribuição contínua entre os diâmetros 0,07mm e 4mm.

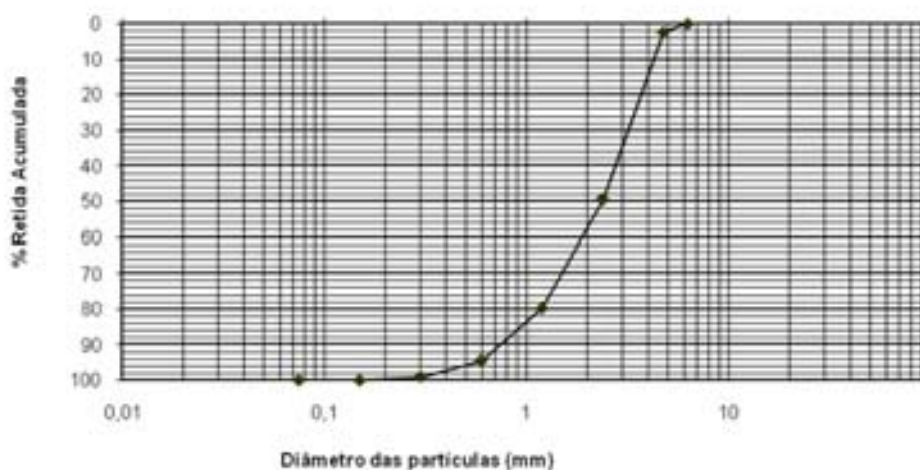


Figura 3.4 – Curva Granulométrica da argila 0500

Tabela 3.5 – Composição Granulométrica da argila expandida 1506

Abertura da peneira (mm)	Material Retido (g)	Percentual Retido (%)	Percentual Acumulado(%)
19,00	0,00	0,00	0,00
12,50	667,00	13,34	13,34
9,50	1642,50	32,85	46,19
6,30	1798,00	35,96	82,15
4,75	710,50	14,21	96,36
2,36	105,50	2,11	98,47
1,18	51,00	1,02	99,49
0,60	24,00	0,48	99,97
0,30	0,50	0,01	99,98
0,15	0,50	0,01	99,99
<0,15	0,50	0,01	100,00
Total	5000,00	100,00	
Dim. Máx. característica	19 mm	Módulo de Finura	6,40

De acordo com a figura 3.5, a curva granulométrica da argila 1506 apresentou uma distribuição característica de material malgraduado, indicando que a maior parte dos grãos se mostrou do mesmo tamanho, isto é, confirma que o material tem uma graduação uniforme.

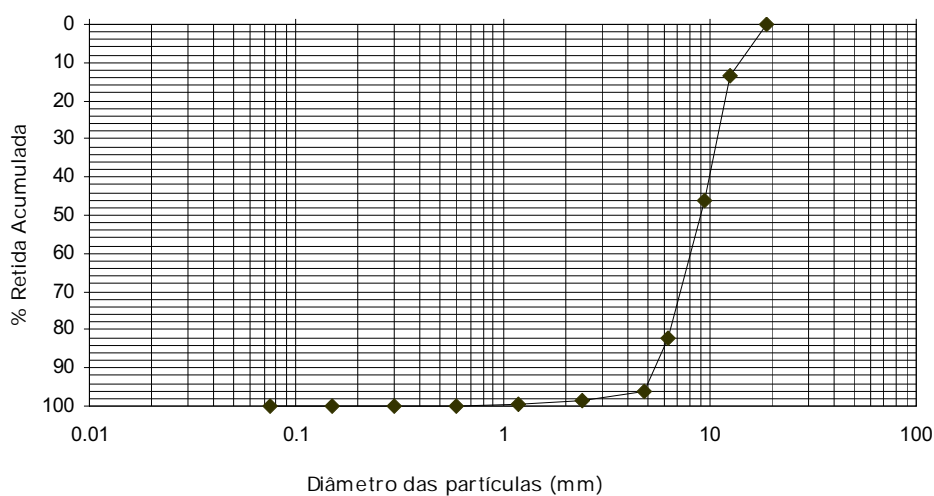


Figura 3.5 – Curva Granulométrica da argila 1506

A análise química percentual dos compostos das argilas expandidas 0500 e 1506 encontra-se nas tabelas 3.6 e 3.7, respectivamente. A composição química dessas argilas expandidas diverge minimamente em seus valores percentuais. Por isso, considerou-se a argila expandida 0500 para análise de Difração de Raios X.

Tabela 3.6 – Análise química da argila expandida 0500

Compostos químicos	Percentuais(%)
SiO ₂	55,42
Al ₂ O ₃	23,73
Fe ₂ O ₃	9,58
K ₂ O	5,53
MgO	2,20
SO ₃	1,31
TiO ₂	1,16
Outros	1,07
Total	100,00

Tabela 3.7 – Análise química da argila expandida 1506

Compostos químicos	Percentuais(%)
SiO ₂	55,12
Al ₂ O ₃	25,12
Fe ₂ O ₃	9,37
K ₂ O	5,08
MgO	2,15
SO ₃	1,27
TiO ₂	0,86
Outros	1,03
Total	100,00

3.1.5 – Ensaio dos agregados miúdo e graúdo

Utilizou-se como agregado leve graúdo a argila expandida e como agregado miúdo a areia natural fina. Esses agregados foram submetidos aos ensaios físicos e químicos, descritos a seguir.

- Físicos – ensaios que consistem em determinar a granulometria, massa específica, massa específica aparente e absorção, objetivando uma dosagem adequada para produção do concreto em estudo.
- Químicos – experimentos que caracterizam e determinam a composição desses agregados e do cimento através de técnicas de EDX, DRX.

O ensaio de Difração de Raios X foi realizado no Núcleo de Estudos e Pesquisa de Petróleo e Gás Natural, com o objetivo de caracterizar e identificar as fases químicas da argila expandida. A figura 3.6 apresenta o Difratoograma de Raio X da argila expandida tipo 0500, em que sua composição química é praticamente igual a da argila 1506. De acordo com o difratograma, observa-se que entre 15° e 38° houve uma elevação da linha de base, indicando a fase amorfa do material; e na fase cristalina, a presença de sílica e espinélio de ferro.

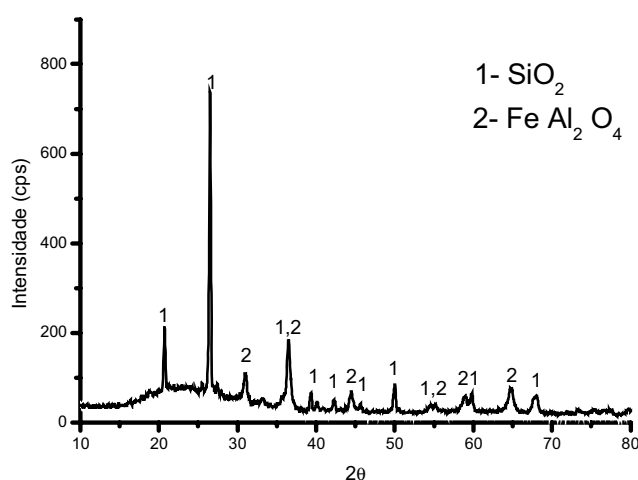


Figura 3.6 – Difratoograma de Raios X da argila expandida 0500

3.2 - Métodos

3.2.1 - Definição dos traços

A composição dos traços foi definida de acordo com as recomendações do ACI211.2-98, observando os ajustes necessários para alcançar o objetivo desta pesquisa. Os traços obtidos foram denominados T-1, T-2 e T-3, com as proporções dos materiais apresentadas na tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Composição dos Traços T-1, T-2 e T-3.

Traços	Proporção dos materiais	Argilas		Fator a/c
		0500	1506	
T-1	1:2,01:1,10:0,78	50%	50%	0,43
T-2	1:2,00:1,32:0,62	60%	40%	0,43
T-3	1:1 93:1,54:0,47	70%	30%	0,43

Os percentuais das argilas expandidas 0500 e 1506 adotados nesta pesquisa, deve-se às recomendações de pesquisadores. Em se tratando de dois agregados graúdos aconselha-se tomá-los, inicialmente, percentuais iguais e, em seguida, fazer as alterações necessárias. Para composição desses traços foram feitos vários experimentos a fim de obter os traços de melhor desempenho.

3.2.2 – Moldagem dos corpos de prova

No processo de mistura dos materiais, a ordem empregada foi a seguinte: colocou-se na betoneira as argilas, metade da água, depois o cimento e areia e finalmente o restante da água. O amassamento do concreto se deu cerca cinco minutos de funcionamento da betoneira, observando a consistência esperada. Devido à alta absorção de água pelos agregados (argilas) e, para compensar esse efeito, fez-se um pré-umedecimento dos agregados por 24 horas, antes de serem utilizados na concretagem. Após o amassamento, foi realizado ensaio de abatimento do tronco de cone, segundo a NBR MN 67/1998, em que se obteve um slump de 145 mm para o traço T-1, 170 mm para o T-2 e 185 mm para terceiro traço T-3, verificando a consistência, plasticidade e coesão do concreto, com a finalidade de obter uma trabalhabilidade adequada, e assim, efetuar a moldagem desses corpos de prova, segundo as recomendações da ABNT, obtendo assim, os traços T-1, T-2 e T-3. Para cada traço, foram moldados 12 corpos de prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200mm de altura. Esses corpos de prova permaneceram nos moldes por 24 horas, conforme figura 3.7. Posteriormente foram desmoldados e, em seguida, imersos em câmara úmida, onde permaneceram por um período de 28 dias.



Figura 3.7 – Confeção dos corpos de prova

3.2.3 – Procedimentos para as análises química e microestrutural

Os procedimentos para as análises química e microestrutural do concreto leve foram realizados através das técnicas Difração de Raios X (DRX), Espectrometria de Raios X por Dispersão de Energia (EDX), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectrometria de Fluorescência de Raios X (EFRX) e Microscopia Ótica (MO), com aplicações a seguir:

3.2.3.1 – Difração de Raios X (DRX)

A DRX foi utilizada para análise da argila expandida, com a finalidade de identificar qualitativamente as fases cristalinas presentes no material. Para tal ensaio, utilizou-se o Difractômetro / Shimadzu - XDR 6000, com varredura angular de 0° a 80°, do Núcleo de Estudos em Pesquisas de Petróleo e Gás Natural da UFRN.

3.2.3.2 - Espectroscopia por Dispersão de Raios X (EDX)

Esta técnica foi empregada na análise semiquantitativa das amostras de argila expandida e do cimento CP II - Z-32 RS, através do equipamento Shimadzu-EDX-720, do Laboratório de Cimentos da UFRN.

3.2.3.3 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi utilizada em amostras de corpos de prova para verificar a formação de poros em cada traço, observando, também, a zona de transição entre o agregado e a matriz. O equipamento Philips XL 30 E-SEM, do Núcleo de Estudos em Petróleo e Gás Natural.

3.2.3.4 – Espectrometria de Fluorescência de Raios X (WDS)

A Espectrometria de Fluorescência de Raios X (Espectrômetro por dispersão de comprimento de ondas – WDS) foi utilizada para analisar e identificar a presença de cloreto total nas amostras. Foram estudadas 21 amostras do pó extraído dos corpos de prova da região periférica e central, através da Análise semi-

quantitativa por Espectrometria de Fluorescência de Raios X (EFRX) do Laboratório de Geoquímica da UFRN.

3.2.3.5 – Microscopia Ótica (MO)

A técnica de Microscopia Ótica foi empregada para analisar, de forma mais precisa, a interface agregado/matriz do concreto com argila expandida, através do equipamento Olympus - BX60M, do Laboratório de Cimentos.

3.2.4 – Procedimento experimental para determinação do cloreto total

Para determinação da concentração de cloreto total, foram moldados 12 corpos-de-prova e submetidos ao processo de cura, em câmara úmida, durante 28 dias, e em seguida, colocados em estufa por 24 horas e depois imersos em solução de Cloreto de Sódio (NaCl), 12% em massa (este percentual foi adotado em função do curto período do experimento – 7 dias), conforme esquema ilustrado na figura 3.8 e corpos de prova em solução apresentados na figura 3.9, por períodos de 1 dia, 3 dias e 7 dias, para cada traço; e depois colocados em estufa a 105°C, também por 24 horas.

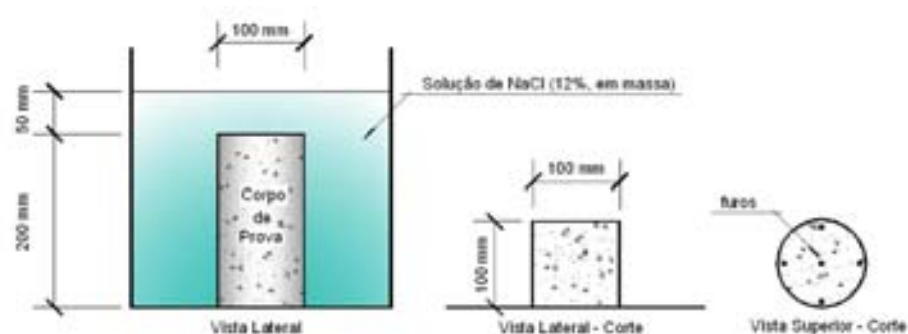


Figura 3.8 – Esquema de corpo de prova em solução de NaCl



Figura 3.9 – Corpos de prova em solução de NaCl
(12% em massa)

Posteriormente, os corpos de prova foram serrados ao meio, mostrados na figura 3.10, objetivando o aumento da área de contato. Em seguida, os corpos de prova foram furados na região central (C) e na região periférica (P), conforme mostra a figura 3.11. O pó extraído, foi analisado através da Espectrometria de Fluorescência de Raios X para verificação da presença de Sódio (Na) e do Cloro (Cl).



Figura 3.10 - Corpos de prova serrados ao meio



Figura 3.11 - Furos periférico e central

4.0 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados das análises experimentais do concreto leve à base de argila expandida, com a finalidade de analisar a porosidade, perfil de concentração de cloreto total, interface agregado/matriz, resistência à compressão e a resistência à tração por compressão diametral, observando as alterações granulométricas dos agregados.

4.1– Propriedades do concreto leve no estado fresco

O concreto estudado apresentou uma boa coesão e uma consistência adequada para a moldagem dos corpos de prova.

4.1.1– Consistência

Os valores do índice de consistência para os traços T-1, T-2 e T-3 apresentaram uma variação entre 140 mm e 190 mm. O aumento do slump em função dos traços, deve-se ao “efeito rolamento”, ou seja, com a acréscimo de partículas menores ao redor das partículas maiores, gerou um aumento no abatimento do material.

4.1.2 – Exsudação e segregação

Na confecção dos corpos de prova, não foram observados os fenômenos de exsudação e segregação no concreto leve, uma vez que se obedeceu cuidadosamente a Norma NBR NM 67/1998. A figura 4.1 mostra o perfil de distribuição dos agregados no concreto leve, referente aos traços T-1, T-2 e T -3, confirmando a eficiência no adensamento desse material.

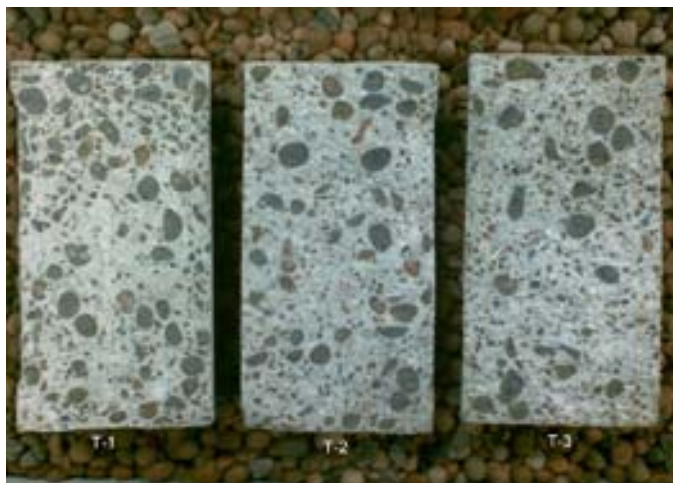


Figura 4.1 – Perfil dos traços T-1, T-2 e T-3.

4.2 – Propriedades do concreto leve endurecido

4.2.1 – Resistências à compressão, à tração por compressão diametral e massa específica.

A resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral são fundamentais para avaliar o desempenho das estruturas de concreto, uma vez que a resistência é um parâmetro preponderante nos projetos estruturais e no controle de obras.

Os ensaios de compressão e de tração por compressão diametral e massa específica, apresentaram resultados aceitáveis de acordo com as normas prescritas. Foram realizados os ensaios de resistência à compressão (NBR 5739/94) e de resistência à tração por compressão diametral (NBR 7222/94) com idade de 28, utilizando-se corpos de prova com 100 mm de e 200 mm de altura. Foram moldados 6 corpos de prova para cada traço. Os valores médios de resistência à compressão, à tração por compressão diametral e massa específica seca do concreto leve são apresentados na tabela 4.1

Tabela 4.1 – Resistência à compressão e à tração por compressão diametral

Traço	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	Dias	Massa específica (kg/m ³)
T-1	20,80	1,98	28	1650
T-2	22,77	2,24	28	1670
T-3	22,16	2,32	28	1740

Com relação aos concretos tradicionais que, normalmente, apresentam valores de massa específica em torno de 2300 kg/m³, o concreto leve apresentou uma redução dos valores da massa específica entre 32% e 39%. No que diz respeito aos valores das resistências à compressão e à tração por compressão diametral, observa-se que o concreto leve apresentou valores aceitáveis sob o ponto de vista do consumo de cimento calculado para a dosagem – 425 kg/m³ de concreto. O teor de cimento foi considerado alto para os valores das resistências obtidos nos traços da tabela 4.1 em relação a tabela 2.8, que estabelece uma resistência à compressão de 34,47 MP para um consumo de cimento na faixa de 360-450kg por metro cúbico de concreto. Segundo alguns pesquisadores, isso é comum para o concreto leve, pois resistência à compressão entre 20MPa e 34MPa, o consumo de cimento é normalmente alto.

No ensaio de ruptura para determinação da resistência à compressão, os corpos de prova apresentaram fissuras de rompimento de forma colunar; isto ocorre no plano de ruptura que atravessa o agregado por sua fragilidade e maior rigidez da matriz, como pode ser observada figura 4.2, bem como a forma colunar do concreto leve.



Figura 4.2 - Descrição da ruptura colunar à compressão axial

Para ensaio de tração por compressão diametral, o plano de ruptura dos corpos de prova, figura 4.3, mostrou-se adequado conforme previsto em norma.



Figura 4.3 – Descrição da ruptura à tração por compressão diametral

4.2.2 – Porosidade do concreto estudado

Esta propriedade se caracteriza pelo volume de poros contido em volume total de uma amostra de concreto, geralmente expressa em %. A porosidade do material foi analisada por meio de imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), enfatizando a formação de poros e sua distribuição no concreto leve.

De acordo com a figura 4.4, o concreto apresentou uma pequena porosidade em relação ao sistema de poros da argila expandida, delimitada pela zona de

transição entre o agregado e a matriz. A figura 4.5 mostra a afinidade das duas fases do concreto, apresentando assim, uma boa aderência entre os materiais proporcionada pela similaridade dos módulos de elasticidades do agregado e da matriz.

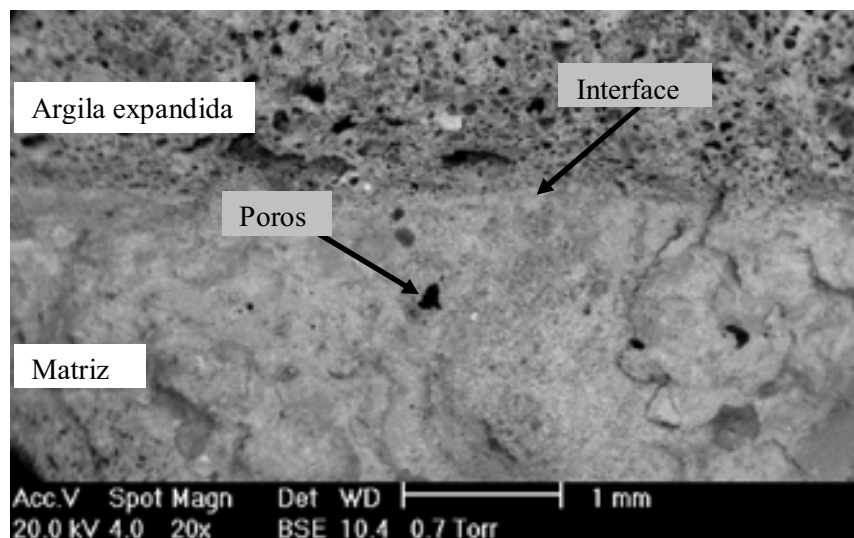


Figura 4.4 - Formação de poros e zona de transição

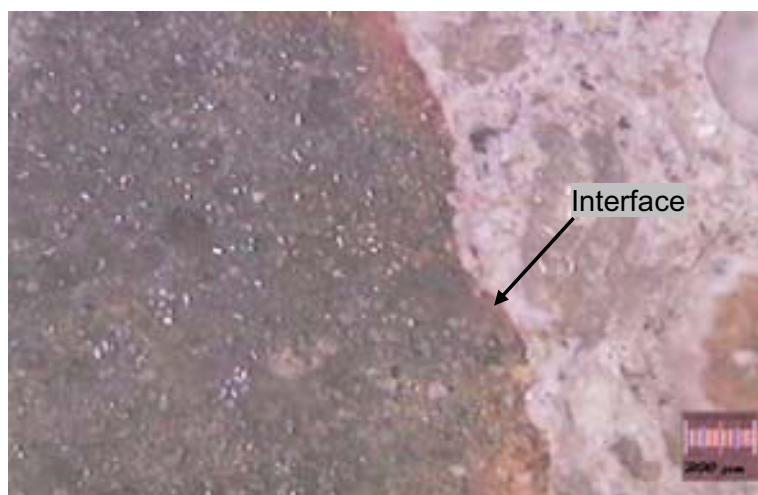


Figura 4.5 – Aderência entre as duas fases do concreto (50x)

Com base na figura 4.6, observa-se que a matriz do concreto leve apresentou uma pequena porosidade em relação à quantidade de poros do agregado de argila expandida, e essa porosidade se configurou em todos os traços estudados. Os

poros que contribuem essencialmente para a permeabilidade do concreto leve são derivados da matriz, uma vez que a zona de transição se apresenta praticamente isenta de fissuras.

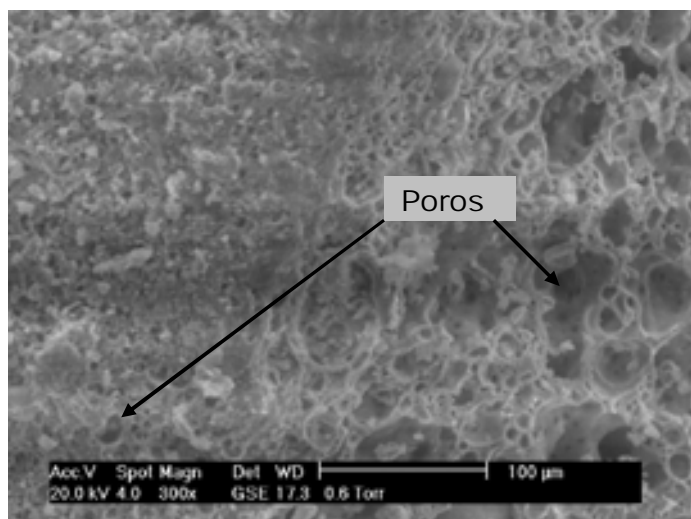


Figura 4.6 – Formação de poros no concreto leve

4.2.3 – Perfil de concentração do cloreto total

A concentração de cloreto total do concreto leve foi determinada experimental com base em procedimento adotado no item 3.2.4 do capítulo 3, utilizando-se 4 corpos de prova de cada traço, imersos em solução salina de Cloreto de Sódio – NaCl (12% em massa), durante o período de 1, 3 e 7 dias.

Com este procedimento, foi possível determinar a concentração de cloreto total nos corpos de prova de concreto através do Espectrômetro de Fluorescência de Raios X (EFRX)-WDS, obtendo-se os resultados apresentados nos gráficos das figuras 4.7 a 4.11. Em todas essas figuras, os percentuais de cloreto total se confirmaram nas regiões periférica e central.

De acordo com o gráfico (percentuais de cloreto total x tempo) da figura 4.7, observa-se que a concentração de cloreto total, do traço T-1 na região periférica dos corpos de prova, cresceu ao longo do tempo, no sentido radial para o centro, enquanto que na região central, o crescimento da concentração prosseguiu até o 3º dia, e a partir deste tempo, inicia-se o decaimento da concentração de cloreto total até o tempo final. Isto revela que a concentração de cloreto no concreto comportou-

se de como esperada, mas com um percentual reduzido em relação à região periférica.

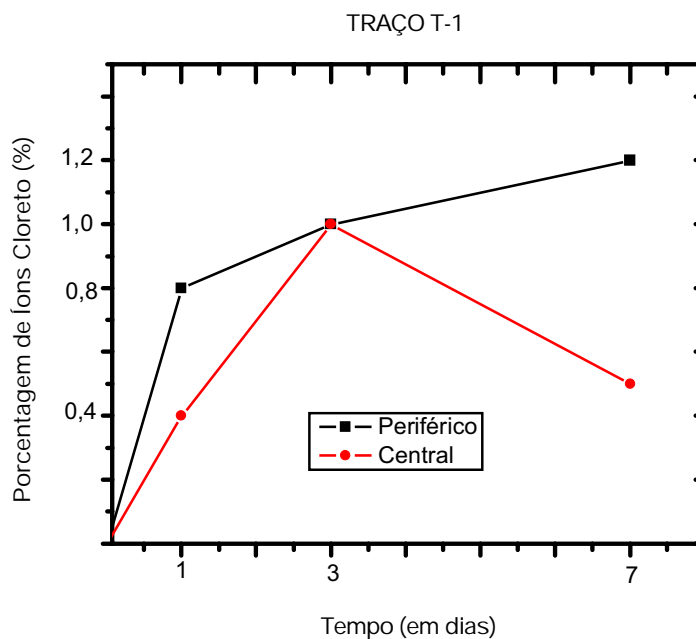


Figura 4.7 - Perfil de concentração de cloreto total

Na figura 4.8, o comportamento da concentração de cloreto total do traço T-2 da região periférica, ocorreu de forma similar em relação ao T-1, porém com um pequeno acréscimo da concentração tanto na região periférica quanto na central. No entanto, a penetração de cloreto no concreto foi maior que a concentração do gráfico da figura 4.7, mostrando, assim, a facilidade de penetração do cloreto no compósito do traço T-2.

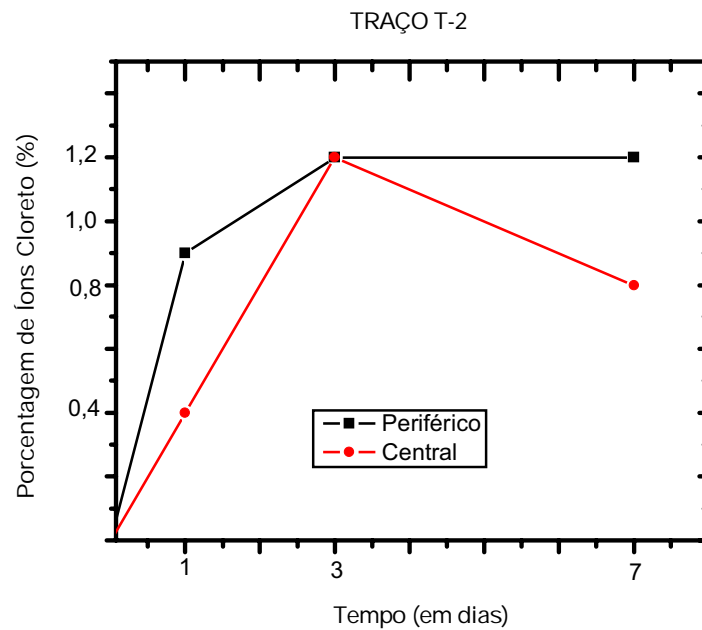


Figura 4.8 – Perfil de concentração de cloreto total

O gráfico da figura 4.9, do terceiro traço, identifica o efeito da permeabilidade de íons cloreto nas regiões periférica e central. Com isso, é possível observar que a penetração do cloreto na região periférica cresceu ainda mais até o 3º dia. Todavia, a partir deste tempo, começou a decrescer; ao passo que a concentração de cloreto na região central se procedeu de forma semelhante. Ou seja, configurou-se um paralelismo entre as concentrações de cloreto das regiões periférica e central.

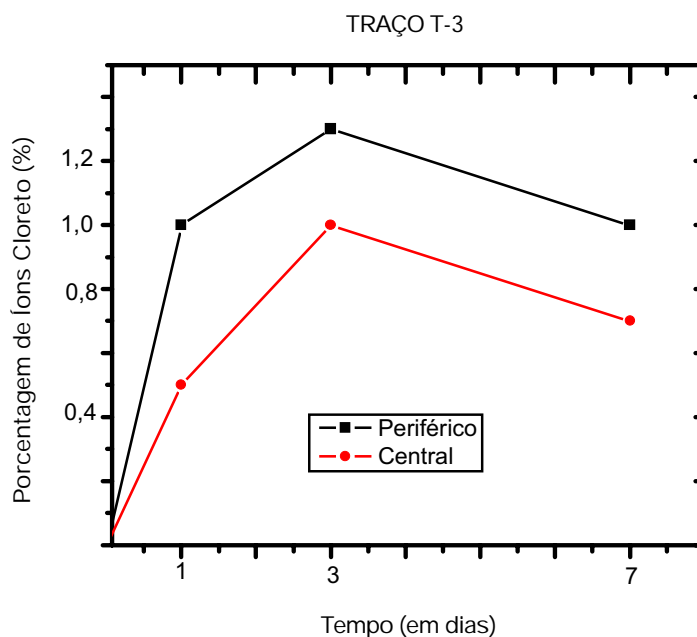


Figura 4.9 – Perfil de concentração de cloreto total

Com base no gráfico da figura 4.10 da região periférica, observa-se um crescimento percentual de cloreto do traço T-3 tanto no 1º dia quanto no 3º dia, com relação aos traços T-1 e T-2, e a partir deste tempo, inicia-se um decréscimo de penetração do cloreto ao longo do tempo, indicando uma certa dificuldade de penetração do cloreto. O traço T-2 apresentou um percentual de crescimento de cloreto maior do que T-1 no 1º dia, e mantendo constante até o final do período. Ao passo que o traço T-1 mostrou um crescimento de penetração de cloreto proporcional no 1º e 3º dias e, em seguida, o percentual de penetração de cloreto convergiu para o mesmo valor percentual do traço T-2 no sétimo dia. Os traços T-1 e T-2 indicaram maior facilidade de penetração de cloreto do que o traço T-3, na região periférica.

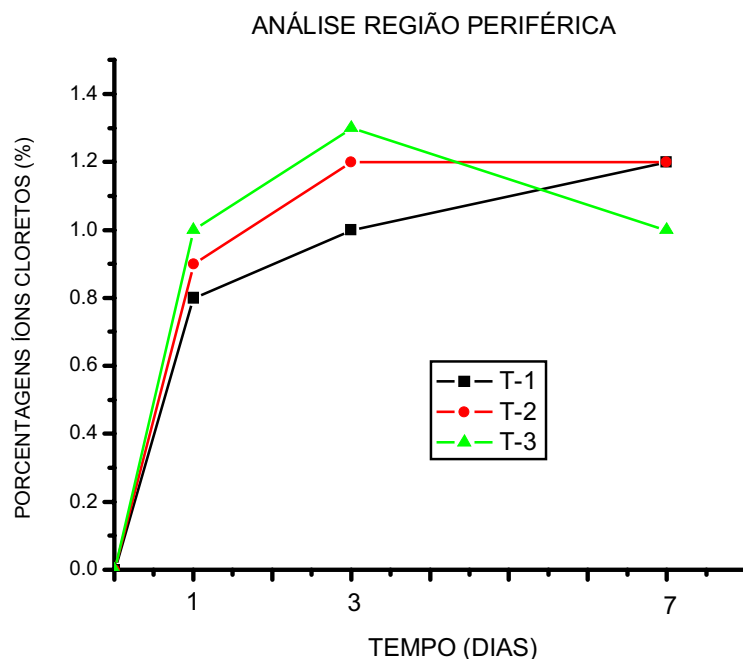


Figura 4.10– perfil de concentração de cloreto total nos T-1, T-2 e T-3 na região periférica

Analisando o gráfico da figura 4.11, da Região Central, percebe-se que o percentual de penetração de cloreto do traço T-2 apresentou um aumento significativo em relação aos traços T-1 e T-2 até 3º dia, e a partir deste tempo, começou a reduzir o percentual de cloreto até o 7º dia, onde mostrou um percentual maior de penetração em relação aos traços anteriores. Os traços T-1 e T-3 apresentaram um aumento percentual de cloreto similares até o 3º dia, quando esses traços indicaram uma redução de percentual de cloreto ao longo do tempo, sendo que o traço T-1 mostrou um menor percentual de cloreto no 7º dia. De modo geral, os traços T-1, T-2 e T-3 indicaram facilidade de penetração de cloreto até o 3º dia, e a partir daí, apresentaram dificuldade de penetração de cloreto no concreto.

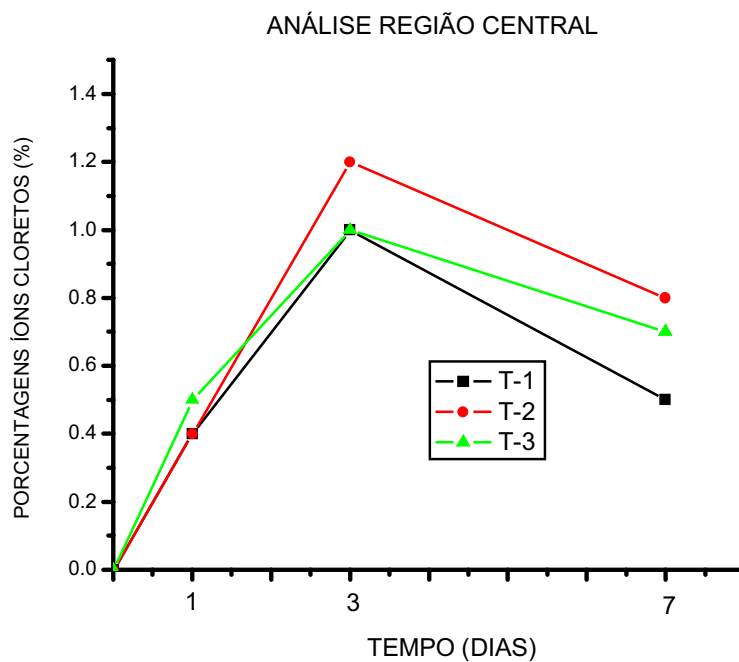


Figura 4.11 – Perfil de concentração de cloreto total nos Traços T-1, T-2 e T-3.

4.3.4 – Considerações sobre o perfil de concentração do cloreto total

Com base no comportamento gráfico do percentual da concentração de cloreto total, através das figuras 4.7 a 4.11, percebe-se que todos os traços T-1, T-2 e T-3 se configuram com a mesma tendência de penetração de cloreto ao longo do tempo, a pesar de uma pequena discrepância no que diz respeito ao decréscimo de penetração de cloreto a partir do 3º dia.

5.0 - CONCLUSÕES

Este Trabalho de Pesquisa apresenta um estudo que trata de um concreto especial - o concreto com agregado leve de argila expandida, em que suas propriedades e características são diferenciadas em relação aos concretos tradicionais, principalmente àquelas que alteram seu comportamento mecânico, físico e químico.

Com base nos objetivos propostos, a metodologia utilizada mostrou-se apropriada para obtenção e análise dos resultados.

Foi observado que o concreto leve à base de argila expandida apresentou características importantes no que diz respeito aos aspectos:

- O agregado graúdo (argila expandida com casca vítrea e argila expandida britada) utilizado na produção do concreto constituiu-se basicamente de material cerâmico, com altos teores de sílica, alumina e óxido de ferro, além de outros componentes com percentuais menores;
- A massa específica do agregado graúdo relativa à argila 0500 variou entre 46% e 64% menor que o agregado tradicional, e no caso da argila 1506 a redução ficou entre 49% e 62%, contribuindo assim, para produção do concreto leve estrutural;
- As taxa de absorção de água pelos agregados graúdos foram: 17% para argila 0500 e 18% para argila 1506. Esses valores foram considerados altos em relação aos agregados britados de rochas graníticas – em torno de 2%. Diante dessa porosidade, foi necessário fazer um pré-umedecimento desses agregados antes da confecção do concreto, garantindo assim um material de boa qualidade;
- A trabalhabilidade do concreto referente aos traços T-1, T-2 e T-3 foi considerada adequada no que tange à consistência, embora com o aumento progressivo dos abatimentos em função dos traços e mantendo uma relação água/cimento constante (0,43) para os traços. Este aumento deve-se ao efeito rolamento pelo acréscimo de percentual de argila 0500 com relação à argila 1506;

- Para os traços T-1, T-2 e T-3, os resultados dos ensaios de resistência à compressão e de tração por compressão diametral aos 28 dias, mostrados na tabela 4.1, foram satisfatórios, conforme exigência para concreto estrutural leve apresentada na tabela 2.8. Além disso, os valores das resistências à compressão confirmam que o concreto se enquadra na faixa de concreto estrutural segundo critérios do ACI-213R-87/1997 que estabelece um valor mínimo de resistência de 17 MPa, para qualquer traço estudado, com uma massa específica inferior a 1850kg/m³.
- A alta porosidade da argila expandida não contribuiu de forma significativa para a penetração de cloreto no concreto, uma vez que o agregado leve se reveste de uma casca cerâmica vítrea, além de promover uma boa aderência entre o agregado e matriz, devido à similaridade dos módulos das partículas do agregado leve e da pasta, favorecendo a não existência de fissuras na zona de transição. Com isto, a permeabilidade da matriz depende do sistema de poros, da relação água/cimento e da evolução do processo de hidratação;
- Observou-se, também, que no 3º dia todos os gráficos apresentaram uma situação atípica, onde o percentual de cloreto total reduziu na região central ou aumentou lentamente, e decresceu, também, na região periférica. Isto significa dizer que na região central o efeito da capilaridade supera os efeitos difusionais, invertendo o fluxo de difusão da região periférica;
- Com as informações obtidas através do planejamento experimental, verificou-se que a argila expandida é um material tecnicamente viável para a produção de concreto leve estrutural com aplicação na Construção Civil, tendo em vista que suas propriedades apresentaram um bom desempenho, principalmente no que se refere à resistência mecânica, massa específica e interface.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De acordo com esta pesquisa e durante o seu desenvolvimento, surgem alguns aspectos correlativos, que merecem um aprofundamento e a necessidade de novos estudos e novas soluções para mitigar os problemas de deterioração das estruturas de concreto. Diante disso, apresentam-se algumas sugestões de trabalhos futuros:

1. Quantificar porosidade por intrusão de mercúrio e permeabilidade por Permeabilímetro à água para o concreto desenvolvido;
2. Estudo teórico-comparativo do concreto leve analisado com o concreto Tradicional;
3. Fazer estudo aprofundado da zona de transição agregado-matriz;
4. Avaliar a durabilidade do concreto leve frente ao processo de corrosão das armaduras através de estudos eletroquímicos;
5. Realizar estudos sobre a atividade pozolânica nos concretos leves;
6. Estudar a carbonatação no concreto com argila expandida, verificando a influência desse fenômeno na zona de transição e na rede de poros de pasta de cimento endurecida;
7. Verificar a influência da reação álcali-agregado no concreto leve.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – Standart Practice for Selecting for Structural Lightweight Concrete. ACI 211.2-98, march 1998.

ANDRADE PERDRIX, Maria del Carmen – Manual para Diagnóstico de Obras Deterioradas por corrosão de armaduras, 1ª edição, PINI, São Paulo, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Guia Básico de Utilização do Cimento Portland. 7ª edição. São Paulo, 2002. 28 p (BT-106).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248 – Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 30 – Agregados – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52 – Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11579 – Cimento Portland – Determinação da Finura por meio da Peneira 75 micrômetros (peneira 200). Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR MN 67 – concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222 – Argamassa e concreto - Determinação da resistência á tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738 Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova . Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739 Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

BAUER, L.A Falcão – Materiais de construção – 5ª ed. rev.
Rio de Janeiro. LTC Editora, 2000, vols. 1e 2.

GENTIL, V. Corrosão. 3ª edição – LTC Editora. Rio de Janeiro, 1996

HELENE, P.R.L - Contribuição ao estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado . São Paulo,1993. Tese(Livre docência), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 231p. 1993.

JAMIL, Alduaij Khalid, M. Nascer Haque, Khalid, Ellaithy – Lightweight concrete in hot Coastal Áreas. Kwait University – 1999.

JOUKOSKI, A. ET AL., - Desempenho elétrico de Concreto Armado com cimento Portland CP-Z-32, em função do envelhecimento por íons cloreto. Parte I, Estudo da corrosão. 43º Congresso Brasileiro do Concreto, Foz do Iguaçu, III-020 (2001).

METHA, K; MONTEIRO, J. M. – Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais. Editora PINI, São Paulo, 1994.

MORAVIA, W. G. et al. – Caracterização microestrutural da argila expandida para aplicação como agregado em concreto leve estrutural - Departamento de Engenharia Metalúrgica, UFMG- Belo Horizonte - Revista Cerâmica 52(2006),193-199

NEVILLLE, A. M. -Propriedades do Concreto. Editora PINI . São Paulo. 1997

PETRUCCI, Eládio G.R. Materiais de Construção – 9º ed. São Paulo, Editora globo, 1993.

PETRUCCI, Eládio G.R. – Concreto de cimento Portland – 13ª ed.São Paulo Editora globo, 1995.

PEREIRA, Lúcia de Fátima Lacerda da Costa; CINCOTTO, Maria Alba – Determinação de Cloretos em Concreto de Cimentos Portland: Influência do eTipo de Cimento – EPUSP, 2001. 19p – (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/294;

ROSSIGNOLO, J.A. Concreto Leve de Alto Desempenho modificado com SB para Pré-fabricados Esbeltos – Dosagem, Produção, Propriedades e Microestrutura. São Carlos, 2003. 211p. Tese de Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

SMITH, William F. – Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais, 3ª edição. Lisboa – Editora McGraw-Hill de Portugal, 1998.

SOUZA SANTOS, P. – Ciência e Tecnologia das Argilas 2ª ed. São Paulo – Editora Edgard Blücher Ltda. 1992.

SOUSA, V. RIPPER, T. – Patologia, Recuperação e Reforço de Estrutura de Concreto - 1ª edição, Editora PINI, São Paulo, 1998.

TARTUCE, Ronaldo; GIOVANNETI, Edio - Princípios Básicos sobre Concreto de Cimento Portland. PINI –IBRACON, 1990.

TOMMY, y. Lo, H.Z. Cui, Abid Nadeen, Z.G. LI – The effects of air contendo on Permeability of Lightweight concrete. University of Hong Kong, 2003.

www.ibge.gov.br/home/estatística/população/contagem2007/defaulttab.shtm.
.Acesso : em 15.07.08.