

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA**

**CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MINAS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**“Comportamento térmico e avaliação microestrutural  
de concretos leves  
produzidos com argila expandida”**

Autor: Weber Guadagnin Morávia  
Orientador: Prof. Wander Luiz Vasconcelos

Dezembro/2004

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA**

**CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MINAS**

**Weber Guadagnin Morávia**

**COMPORTAMENTO TÉRMICO E AVALIAÇÃO MICROESTRUTURAL  
DE CONCRETOS LEVES  
PRODUZIDOS COM ARGILA EXPANDIDA**

Dissertação de mestrado apresentada ao Curso de  
Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de  
Minas da Universidade Federal de Minas Gerais.

Área de Concentração: Ciência e Engenharia de Materiais  
Orientador: Prof. Wander Luiz Vasconcelos

Belo Horizonte 09 de dezembro de 2004  
Escola de Engenharia da UFMG

**A Deus, pais e irmãos,  
e a minha esposa Juliana,  
exemplos de amor e força.**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que, de alguma forma, me auxiliaram na realização deste trabalho e, em especial:

A Deus, por tudo, e por me guiar em mais um desafio da minha vida.

Ao meu orientador, Prof. Wander Luiz Vasconcelos, pela orientação, pelos conhecimentos que me foram passados e pela valiosa contribuição na realização deste trabalho.

À Prof<sup>a</sup>. Adriana Guerra Gumieri, pela paciência, auxílio e pelas grandes sugestões ao longo deste trabalho.

Ao Prof. Abdias Magalhães Gomes, pelas dicas na obtenção dos materiais e apoio durante a realização dos ensaios de resistência mecânica dos concretos.

Ao Prof. Gabriel de Oliveira Ribeiro, pelo incentivo, amizade e conselhos.

Ao Prof. Calixto, pelas importantes sugestões apresentadas.

Ao Prof. Paulo Brandão, pela disponibilidade durante o esclarecimento de minhas dúvidas.

Ao Prof. Eduardo Arantes, pelo incentivo e apoio antes e durante o mestrado.

Ao Prof. Antônio Neves de Carvalho Júnior pelo incentivo e amizade.

À Prof. Maria Tereza pelo apoio e ensaios realizados.

Ao engenheiro Carlos Augusto de Souza, colega de graduação e de pós-graduação, pela amizade e por ter me ensinado os atalhos do mestrado.

Aos colegas do LMC e CEPGEM: Ana Cristina, Ângela, Guilherme, Ioná, Juliana, Marcílio, Mariana, Naiana, Roberta, Sônia e Vilma pela amizade e apoio.



Aos funcionários, Adimilson, Alberto, Cida, Nelson, Nilce, Vanete, Ilda e Isa Marques, dos Departamentos de Engenharia de Materiais e Construção, de Engenharia de Minas e de Engenharia Metalúrgica e Materiais, pelo auxílio e amizade.

Às funcionárias Patrícia e Andreia pelo profissionalismo e auxílio nos ensaios realizados.

À Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, universidade onde me formei.

À CAPES pelo apoio financeiro que tornou possível o desenvolvimento desta pesquisa.

À empresa Cinexpan – Indústria e Comércio Ltda. pelo fornecimento das amostras de argila expandida.

À empresa Holcim S. A. pelo fornecimento das amostras de cimento CPV ARI-PLUS.

Aos meus pais, irmãos e em especial à minha esposa Jú, pelo imprescindível amor, apoio e incentivo.

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	IV
SUMÁRIO .....	VI
LISTA DE FIGURAS .....	VIII
LISTA DE TABELAS .....	X
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XI
RESUMO .....	XIII
ABSTRACT .....	XIV
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVO.....	4
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1 Concreto .....	5
3.2 Principais componentes do concreto .....	5
3.2.1 Cimento Portland .....	5
3.2.1.1 Constituintes do cimento Portland.....	5
3.2.1.2 Principais reação de hidratação do cimento Portland.....	7
3.2.1.3 Tipos de cimento Portland .....	9
3.2.2 Água de amassamento .....	11
3.2.3 Agregados .....	11
3.2.3.1 Agregado leve.....	14
3.2.3.1.1 Argila expandida.....	15
3.3 Tipos de concreto leve .....	19
3.3.1 Concreto aerado .....	20
3.3.2 Concretos sem finos .....	21
3.3.3 Concreto de agregado leve.....	22
3.4 Propriedades do concreto leve estrutural .....	23
3.4.1 Massa específica aparente .....	25
3.4.2 Resistência de dosagem.....	26
3.4.3 Modulo de elasticidade .....	27
3.4.4 Durabilidade.....	29
3.4.5 Propriedades Térmicas do Concreto.....	29
3.4.5.1 Condutividade térmica .....	30
3.4.5.2 Difusividade Térmica .....	31

3.4.5.3 Calor Específico ou Capacidade Calorífica .....	33
3.4.5.4 Coeficiente de Dilatação Térmica .....	33
3.5 Zona de transição entre agregado e pasta de cimento .....	35
4. METODOLOGIA .....	42
4.1 Caracterização do materiais .....	42
4.1.1 Cimento Portland .....	42
4.1.2 Agregado miúdo .....	43
4.1.3 Agregado graúdo convencional – Brita calcária .....	43
4.1.4 Agregado graúdo leve – Argila expandida. ....	44
4.1.5 Água .....	46
4.2 Definição das proporções dos constituintes dos concretos.....	46
4.3 Propriedades físicas dos concretos.....	49
4.3.1 No estado fresco.....	49
4.3.2 No estado endurecido.....	50
4.4 Avaliação microestrutural do concreto.....	51
4.5 Análises térmicas .....	53
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	55
5.1 Cimento Portland.....	55
5.2 Agregado miúdo.....	56
5.3 Agregado graúdo convencional – Brita calcária.....	56
5.4 Agregado graúdo leve – Argila expandida.....	57
5.5 Proporções dos constituintes dos concretos.....	62
5.6 Propriedades dos concretos.....	63
5.6.1 No estado endurecido.....	63
4.4 Avaliação microestrutural do concreto.....	68
4.5 Análises térmicas .....	76
6 CONCLUSÕES.....	80
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	84
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3. 1 – Espectro dos agregados leves e dos correspondentes concretos. ....	14
Figura 3. 2 – “Leca” agregado de argila expandida manufaturada em forno rotativo. ..	15
Figura 3. 3 – Forno rotativo usado para produção de argila expandida .....	16
Figura 3. 4 – Zonas em que se encontram as composições químicas das argilas com possível expansão térmica. ....	18
Figura 3.5 – Os três tipos de concreto leve. ....	20
Figura 3. 6 – Relação do tipo de agregado leve com massa específica do concreto leve. ....	23
Figura 3. 7 – Seção de ruptura por compressão diametral. ....	36
Figura 3. 8 – Formas de interações entre matriz de cimento e o agregado. ....	38
Figura 3. 9 - Zona de transição entre o agregado graúdo e a argamassa de cimento. ....	39
Figura 4. 1 – Agregado graúdo – brita calcária.....	43
Figura 4. 2 – Agregado graúdo – argila expandida.....	44
Figura 4. 3 – avaliação visual da consistência requerida de acordo com o método do IPT. ....	47
Figura 4. 4 – Corpos de prova de concreto com traço pobre, médio e rico.....	48
Figura 4. 5 – Balde, feito de tela, utilizado para a pré-umidificação da argila expandida. ....	48
Figura 4. 6 – Ensaio de abatimento de tronco de cone do concreto leve com traço médio. ....	50
Figura 4. 7 – Preparação das amostras do concreto de referência e do concreto leve, respectivamente, para a avaliação da morfologia no MEV. ....	52
Figura 4. 8 - Aparelho Kemtherm QTM-D3.....	54
Figura 5. 1 – Difratograma da argila expandida.....	59
Figura 5. 2 - Micrografias (MEV) - morfologia da superfície externa e interna, para duas ampliações da argila expandia. ....	60
Figura 5. 3 - Resistência à compressão dos concretos analisados.....	65
Figura 5. 4 - Curva de Abramas do concreto leve e do concreto de referência.....	66
Figura 5. 5 – Difratograma do concreto leve – traço pobre. ....	69
Figura 5. 6 – Difratograma do concreto de referência – traço pobre.....	69
Figura 5. 7 – Difratograma do concreto leve – traço rico. ....	70
Figura 5. 8 – Difratograma do concreto de referencia – traço rico. ....	70

Figura 5. 9 - Micrografias (MEV) - morfologia da zona de transição dos concretos (300X) .....	71
Figura 5. 10 - Micrografias (MEV) - morfologia zona de transição dos concretos (1000X) .....	72
Figura 5. 11 - Micrografia (MEV) - zona de transição do concreto leve (2000X) .....	73
Figura 5. 12 - Micrografias (MEV) - morfologia da zona de transição dos concretos (5000X).....	74
Figura 5.13 - Micrografias (MEV) - linhas onde foram feitas análises químicas elementares. ....	75
Figura 5. 14 – Gráficos indicando os teores dos elementos ao longo da linhas.....	75
Figura 5. 15 – Termograma do concreto leve .....	77
Figura 5. 16 – Termograma do concreto de referência.....	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela III. 1 – Propriedades dos principais compostos do cimento Portland. ....	8
Tabela III. 2 – Tipos de cimentos Portland e suas constituições.....	10
Tabela III. 3 – Classificação dos agregados segundo a massa unitária.....	13
Tabela III. 4 – Proporções dos materiais do concreto convencional para diferentes resistências .....	27
Tabela III. 5 – Relação entre a resistência à compressão média e o teor de cimento para concretos leves. ....	27
Tabela III. 6 – Valores típicos de condutividade térmica do concreto .....	30
Tabela III. 7– Valores da difusividade térmica para concreto com diferentes agregados graúdos.....	32
Tabela IV. 1– Técnicas de análise química da argila expandida.....	45
Tabela V. 1 – Características do Cimento Portland CPV.....	55
Tabela V. 2 - Resultados da análise granulométrica, módulo de finura e massa específica da areia. ....	56
Tabela V. 3 - Resultados da análise granulométrica, dimensão máxima, módulo de finura massa unitária, massa específica real e a absorção da argila expandida.....	57
Tabela V. 4 – Análise química da argila expandida. ....	58
Tabela V. 5 – Composição química das áreas analisadas por microscopia eletrônica	61
Tabela V. 6 - Porosimetria por intrusão de mercúrio para a argila expandida.....	61
Tabela V. 7 - consumo dos materiais por metro cúbico de concreto.....	62
Tabela V. 8 – Traços dos concretos e resultados do slump teste. ....	62
Tabela V. 9 – Massa específica dos concretos analisados.....	63
Tabela V. 10 - Resultados da resistência à compressão axial dos concreto.....	64
Tabela V. 11 – Módulo de elasticidade estático e dinâmico dos concretos analisados.....	67
Tabela V. 12 - Percentagem de óxidos presentes nos concretos (traço médio). ....	68
Tabela V. 13 - Composições químicas das áreas indicadas analisadas por EDS.....	74
Tabela V. 14 – Resultados das termoanálises do concreto leve.....	78
Tabela V. 15 – Resultados das termoanálises do concreto de referência.....	78
Tabela V. 16 - Condutividade térmica dos concretos analisados aos 150 dias.....	79

## LISTA DE SÍMBOLOS

A –  $\text{Al}_2\text{O}_3$

C –  $\text{CaO}$

H –  $\text{H}_2\text{O}$

S –  $\text{SiO}_2$

C-S – Hidróxido de cálcio

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado

$\text{C}_2\text{S}$  –  $2 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  – Silicato dicálcio ou bicálcico

$\text{C}_3\text{S}$  –  $3 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  – Silicato tricálcio ou tricálcico

$\text{CaO}$  → Óxido de cálcio (cal)

$\text{SiO}_2$  → Dióxido de silício (sílica)

$\text{Fe}_2\text{O}_3$  → Óxido de ferro (hematita)

$\text{Al}_2\text{O}_3$  → Óxido de alumínio (alumina)

$\text{MgO}$  → Óxido de magnésio ou periclásio (Magnésia)

$\text{CaCO}_3$  – Carbonato de cálcio ou calcita

$\text{Mg}(\text{OH})_2$  – Hidróxido de magnésio ou brucita

$\text{Ca}(\text{OH})_2$  – Hidróxido de cálcio ou portlandita

$\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$  – carbonato de cálcio e magnésio ou dolomita

CP V – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

NBR – Norma Brasileira Registrada

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

ASTM – American Society for Testing and Materials, Philadelphia (USA)

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa (Portugal)

RILEM – Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions, Paris (França)

# – malha da Peneira

DRX – Difração de raios-X

EDS – Energy Dispersive Spectrometry

TG – Termogravimetria

DTG – Termogravimetria Derivada

DTA – Análise térmica diferencial

PPC – Perda por compressão

MPa - Mega Pascal

$f_{cj}$  = Resistência média do concreto à compressão, prevista para a idade de j dias;

$f_{ck}$  = Resistência característica do concreto à compressão, especificada no projeto estrutural;

$S_d$  = Desvio padrão em função do grau de controle da obra;

$S_d = 4,0$  MPa – Controle rigoroso;

$S_d = 5,5$  MPa – Controle razoável;

$S_d = 7,0$  MPa – Controle rigoroso.



## RESUMO

Recentemente, mais atenção tem sido dada para a influência da zona de transição entre agregado e matriz de cimento em várias propriedades do concreto. A maioria dos trabalhos de pesquisa nesta área não avaliam concretos leves. Este trabalho tem por objetivo avaliar e comparar as propriedades térmicas e a microestrutura da zona de transição entre o agregado leve de argila expandida e a matriz de cimento, com a microestrutura da zona de transição, entre agregados de rochas calcárias e a matriz de cimento. Foram realizados ensaios de resistência à compressão, análises químicas, difração de raios-X, microscopia eletrônica de varredura com microanalisador EDS, avaliação da porosidade por porosimetria de mercúrio e por adsorção ou dessorção de nitrogênio, termogravimetria (TG) e análise térmica diferencial (DTA) para concretos com agregados leves e concretos com agregados convencionais. Os resultados obtidos, permitiram avaliar as influências da composição química e porosidade da argila expandida na formação da zona de transição com a matriz de cimento, na resistência mecânica e nas propriedades térmicas do concreto leve. Foi observado uma melhor interligação mecânica entre a argila expandida e a matriz de cimento. O concreto leve apresentou uma redução da resistência à compressão, menor condução de calor e maior resistência térmica em relação ao concreto convencional.

## ABSTRACT

Recently more attention has been given for the influence of the transition zone between aggregate and cement matrix in some properties of the concrete. The majority of the research works in this area didn't study lightweight concrete. This work has with objective evaluate and compare the thermal properties and the microstructure of the transition zone between the light expanded clay aggregate and the cement matrix, with the microstructure of the transition zone, between limy rocks aggregate and the cement matrix. Assays of compressive strength, chemical analysis, X-ray diffraction, scanning electron microscopy with microprobe analyzer (SEM-EDS), mercury porosimetry, and thermal analysis (TG), (DTG) and (DTA) for lightweight concrete and concrete with normal weight aggregate. The gotten results, had allowed to evaluate the influences of the chemical composition and porosity of the expanded clay in the formation of the transition zone with the cement matrix, in the resistance mechanics and thermal properties of the lightweight concrete. One better mechanics interconnection was observed between the expanded clay and the cement matrix. The lightweight concrete presented a reduction of the compressive strength, minor conduction of heat and greater thermal resistance in relation to the conventional concrete.

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o consumo mundial de cimento é de 1,1 bilhão de toneladas anualmente. Cada tonelada de cimento consumida é convertida, em média, em oito toneladas de concreto. Estima-se, portanto, que o consumo mundial total de concreto seja de 8,5 bilhões de toneladas por ano, superando o consumo de aço, que é da ordem de 750 milhões de toneladas. Em relação ao aço, o consumo de concreto nos Estados Unidos é cinco vezes maior e dez vezes maior na maioria dos países do mundo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS - ABM, 2000). Segundo Brunauer e Copeland, apud MEHTA e MONTEIRO (1994), o homem não consome nenhum outro material em tal quantidade, a não ser a água. Além disso, o concreto é considerado o material mais utilizado na Engenharia Civil.

As razões da maior utilização do concreto em relação aos outros materiais são: sua excelente resistência à ação da água sem deterioração séria; facilidade na obtenção de diversas formas e volumes devido à sua consistência plástica; baixo custo e disponibilidade dos principais componentes; e menor consumo de energia para sua obtenção (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Como exemplo da importância do concreto em obras de grande porte, podemos citar a Barragem de Itaipu, localizada na fronteira do Brasil-Paraguai, com custo estimado em 18,5 bilhões de dólares, onde foram utilizados vinte tipos de concreto, totalizando 12,5 milhões de metros cúbicos.

A baixa relação resistência-peso do concreto, quando comparada ao aço, constitui um problema econômico na construção de edifícios altos, pontes com grandes vãos e estruturas flutuantes. Para melhorarmos essa relação podemos diminuir a massa específica do concreto ou aumentar sua resistência. Nos últimos décadas, tem-se conseguido, com sucesso, uma redução da massa específica do concreto através da utilização de agregados leves. A massa específica aparente desse tipo de concreto é de aproximadamente  $1600 \text{ kg/m}^3$  e a resistência à compressão apresenta valores de 25 MPa a 40 MPa (MEHTA e MONTEIRO 1994).

O concreto com agregado leve é o tipo de concreto leve mais utilizado, devido à variedade de tipos de agregados com baixa densidade, que permitem a produção de concretos com diferentes tipos de aplicação. O concreto com agregado leve quando comparado aos outros tipos de concreto leve (aerado e sem finos), pode atingir resistências à compressão maiores (concreto leve estrutural), podendo ser usado estruturalmente.

Em geral, os concretos leves são mais caros do que os convencionais. Isso pode ser explicado pelo maior consumo de cimento, já que a quantidade de água necessária à mistura é maior devido à alta absorção dos agregados leves. No entanto, NEVILLE (1982), ressalta que:

“... para muitas aplicações, as vantagens do concreto leve sobrepujam as desvantagens e há uma tendência acentuada, no mundo todo, no sentido de se utilizar cada vez mais o concreto leve, especialmente em usos novos, como em concreto protendido, em edifícios de grande altura e também em cascas de cobertura.”

O concreto é um material compósito, constituído de agregados graúdos envolvidos por uma matriz de cimento, areia e água. O comportamento mecânico e a durabilidade do concreto são influenciados pelos tipos de agregados, pela matriz de argamassa cimento e pela zona de transição entre esta matriz e os agregados (ZANG e GJØRV, 1991).

Pouco se sabe sobre a zona de transição devido à dificuldades experimentais. Entretanto, recentemente, mais atenção tem sido dada para a influência da zona de transição entre agregado e a matriz de cimento em várias propriedades do concreto. No entanto, a maioria dos trabalhos de pesquisa nesta área tem investigado agregados convencionais.

Na construção de edifícios, o peso próprio do concreto representa uma parcela muito grande da carga total atuante sobre a estrutura e a redução da massa específica do concreto, torna-se de grande interesse econômico. Com o concreto leve podemos ter uma redução da massa específica entre 25% e 35%. Desta forma, as seções das peças estruturais podem ser menores, resultando na redução das dimensões das fundações e menor custo da obra. Além disso, com o uso do concreto leve, as fôrmas devem suportar pressões menores do que quando empregadas em concretos convencionais, diminuindo a quantidade de madeira e reduzindo o número de peças para escoramento, resultando em um aumento da produtividade (NEVILLE, 1982).

A redução do peso próprio das estruturas, sem comprometer a resistência, permite a construção de edifícios mais altos e com maiores vãos entre as peças estruturais. Além disso, como o coeficiente de condutividade térmica é menor devido a redução da massa volumétrica do material, o concreto leve contribui para a redução do consumo de energia, quando se faz o condicionamento do ar no interior das construções com este tipo de concreto (COUTINHO, 1988).

A estrutura físico química do concreto varia com o tempo, com a umidade e a temperatura, o que torna muito difícil o estudo de concretos sob a ótica da Ciência e Engenharia dos Materiais. Por outro lado, as técnicas disponíveis atualmente para a caracterização estrutural dos materiais têm permitido relacionar composição, estrutura e processamento do material com suas propriedades, contribuindo, assim, para uma interação entre a Engenharia Civil e a Engenharia de Materiais, para o desenvolvimento de concretos mais econômicos e com melhor desempenho.

## **2 OBJETIVO**

O presente trabalho tem como objetivo analisar o comportamento térmico e avaliar a microestrutura da zona de transição entre o agregado graúdo e a matriz de cimento em concreto leve produzido com agregados de argila expandida bem como compara-la com a do e concreto convencional, produzido com rochas calcárias.

## **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **3.1 CONCRETO**

O concreto é um material de larga aplicação na Construção Civil, obtido pela composição de cimento Portland, agregados e água, podendo conter aditivos que também influenciam no seu desempenho. A proporção entre os seus constituintes (traço) deve atender às condições requeridas de resistência, trabalhabilidade e durabilidade.

### **3.2 PRINCIPAIS COMPONENTES DO CONCRETO**

#### **3.2.1 Cimento Portland**

O cimento Portland é um pó fino acinzentado, constituído essencialmente de silicatos e aluminatos de cálcio, que, quando misturado com água, adquire propriedades tais como ser moldável e ser capaz de desenvolver elevada resistência mecânica ao longo do tempo.

O cimento Portland é o aglomerante mais importante e mais utilizado na Construção Civil. A denominação do cimento Portland é decorrente da semelhança do cimento fabricado industrialmente com a pedra de Portland, calcário extraído em Dorset, na Inglaterra.

Aglomerantes são materiais pulverulentos que se hidratam na presença de água formando uma pasta resistente capaz de aglutinar agregados, dando origem às argamassas e aos concretos (RIBEIRO et al, 2002).

#### **3.2.1.1 Constituintes do cimento Portland**

Os constituintes do cimento Portland se dividem entre aqueles que são fundamentais à sua composição e aqueles que estão presentes em menores proporções.

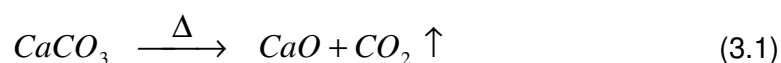
De acordo com MEHTA e MONTEIRO (1994) os principais componentes são:

- CaO → Óxido de Cálcio (cal);
- SiO<sub>2</sub> → Dióxido de Silício (sílica);
- Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> → Óxido de Ferro (hematita);
- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> → Óxido de Alumínio (alumina);
- MgO → Óxido de Magnésio (Magnésia);
- SO<sub>3</sub> → Anidrido Sulfúrico.

Os componentes secundários, ou seja, aqueles presentes no cimento em menores proporções, são:

- Na<sub>2</sub>O → Óxido de Sódio;
- K<sub>2</sub>O → Óxido de Potássio;
- TiO<sub>2</sub> → Óxido de Titânio;
- Impurezas e outras substâncias de menor importância.

O cimento Portland, cujos constituintes foram citados anteriormente, é obtido a partir da mistura de matérias-primas como calcário e argila, em proporções adequadas, devidamente moídas e homogeneizadas. Quando submetido a temperaturas acima de 800°C, o CaCO<sub>3</sub> (carbonato de cálcio) que constitui o calcário se decompõe e passa para a forma de CaO (cal) e CO<sub>2</sub> (RIBEIRO et al, 2002), segundo a equação 3.1.



O CaO reage com Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (alumina), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (hematita) e SiO<sub>2</sub> (sílica), provenientes da argila, no interior do forno rotativo a temperaturas em torno de 1450°C, formando o clínquer e resultando nos seguintes compostos químicos (RIBEIRO et al, 2002):

- 3 CaO.SiO<sub>2</sub> = C<sub>3</sub>S → Silicato tricálcico
- 2 CaO.SiO<sub>2</sub> = C<sub>2</sub>S → Silicato dicálcico
- 3 CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = C<sub>3</sub>A → Aluminato tricálcico
- 4 CaO. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = C<sub>4</sub>AF → Ferro aluminato tetracálcico

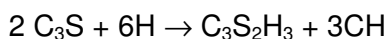


O clínquer, depois de resfriado e moído, recebe a adição de gesso ( $\text{CaSO}_4$  – sulfato de cálcio), com a finalidade de impedir que as reações de hidratação entre o cimento e a água, quando da utilização do cimento, sejam instantâneas.

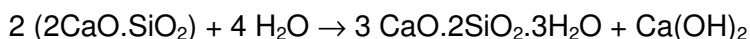
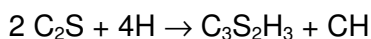
### 3.2.1.2 Principais reação de hidratação do cimento Portland

As principais reações de hidratação do cimento Portland serão mostradas a seguir. A primeira mostra a reação adotada no meio técnico, ou seja, com sua fórmula química abreviada, e a segunda reação, será a reação quimicamente correta, sem abreviaturas e simplificações (COSTA, 1999).

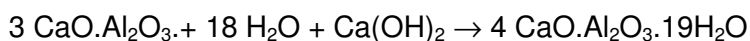
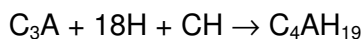
Reação de hidratação do  $\text{C}_3\text{S}$ :



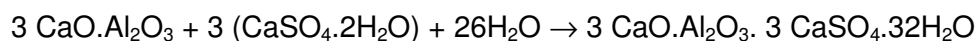
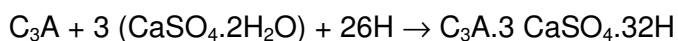
Reação de hidratação do  $\text{C}_2\text{S}$ :



Reação de hidratação do  $\text{C}_3\text{A}$  (temperatura inferior a 20 °C):



Reação de hidratação do  $\text{C}_3\text{A}$  em presença de gesso:



Segundo COSTA (1999), cálculos estequiométricos demonstram que o  $C_3S$  quando hidratado produz 61% de  $C_3S_2H_3$  e 39 % de CH, ao passo que, sob as mesmas condições de hidratação o  $C_2S$  produz 82% de  $C_3S_2H_3$  e 18% de CH. Uma vez que as propriedades adesivas da pasta de cimento Portland se devem principalmente à formação de silicato de cálcio hidratado ( $C_3S_2H_3$ ), é de se esperar que a resistência do cimento Portland aumente com o aumento do teor do  $C_2S$ . O mesmo ocorre para durabilidade, devido ao menor teor de  $Ca(OH)_2$ , composto químico conhecido como portlandita.

A tabela III.1, reúne algumas propriedades importantes dos principais compostos do cimento Portland.

Tabela III. 1 – Propriedades dos principais compostos do cimento Portland.

Composto	Nomenclatura	Propriedades
$C_3S$	Silicato Tricálcico	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Possui a forma de pequenos grãos equidimensionais e incolores.</li> <li>2. Principal responsável pela resistência a curto prazo, principalmente ao fim do primeiro mês de cura.</li> <li>3. Segundo componente mais importante na produção do calor de hidratação.</li> <li>4. Segundo componente responsável pelo tempo de pega.</li> <li>5. Sua forma impura é conhecida como Alita.</li> <li>6. Sua velocidade de hidratação é controlada pela velocidade de difusão dos íons através das camadas sobrejacentes do produto hidratado.</li> </ol>
$C_2S$	Silicato Dicálcico	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Apresenta-se em três fases diferentes: <ul style="list-style-type: none"> <li>- temperaturas elevadas-<math>\alpha</math>-<math>C_2S</math></li> <li>- temperaturas em torno de 1450 °C - <math>\beta</math>-<math>C_2S</math></li> <li>- temperaturas em torno de 670 °C - <math>\gamma</math>-<math>C_2S</math></li> </ul> </li> <li>A fase <math>\beta</math>-<math>C_2S</math> é a mais comum e esta presente nos cimentos comerciais na forma de grãos arredondados, geralmente geminados.</li> <li>2. Principal responsável pela resistência a longo prazo, principalmente ao fim de um ano ou mais.</li> <li>3. Sua forma impura é também conhecida como Belita.</li> <li>4. Sua hidratação é controlada pela sua baixa velocidade intrínseca de reação.</li> <li>5. O produto final da hidratação do <math>C_2S</math> tem uma relação cal/sílica de 1,65.</li> </ol>
$C_3A$	Aluminato Tricálcico	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Apresenta-se na forma de partículas cristalinas retangulares.</li> <li>2. Principal componente na produção do calor de hidratação.</li> <li>3. Principal componente responsável pelo tempo de pega, quando presente na forma cristalina</li> <li>4. Sua forma predominante é a de placas achatadas.</li> <li>5. Atua como fundente na fabricação do cimento Portland.</li> </ol>
$C_4AF$	Ferro Aluminato Tetracálcico	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Apresenta-se sob a forma de solução sólida</li> <li>2. Atua como fundente na fabricação do cimento Portland.</li> </ol>

Fonte: COSTA (1999).

### 3.2.1.3 Tipos de cimento Portland

Existem vários tipos de cimento Portland sendo produzidos, diferenciando-se pela sua composição química e por algumas adições durante o seu processamento, tais como, escória de alto forno, pozolanas, materiais carbonáceos, entre outros, resultando características e propriedades que devem ser consideradas na escolha do cimento para cada tipo de aplicação. Atualmente, no mercado nacional, podemos considerar as seguintes opções:

- Cimento Portland Comum (CP I);
- Cimento Portland Composto (CP II);
- Cimento Portland de Alto-Forno (CP III);
- Cimento Portland Pozolânico (CP IV);
- Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V);
- Cimento Portland Resistente a Sulfatos (RS);
- Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (BC);
- Cimento Portland Branco (CPB);
- Cimento Portland Petrolífero (CPP).

O Cimento Portland Comum (CP I) pode conter adição (CP I-S), neste caso de 1% a 5%, em massa, de material pozolânico, escória ou filler (calcário finamente moído) e o restante de clínquer mais gesso. O Cimento Portland Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F) tem adições de escória, pozolana e filler, respectivamente, em proporções maiores que no CP I-S. Já o Cimento Portland de Alto Forno (CP III) e o Cimento Portland Pozolânico (CP IV) contam com proporções maiores de adições: escórias, de 30% a 70% (CP III), e pozolanas de 15% a 50% (CP IV) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2004).

As adições de materiais pozolânicos e de escória de alto forno têm permitido a redução dos custos de produção, sem queda no desempenho dos cimentos, desde que estes sejam aplicados corretamente.

A tabela III.2 fornece os tipos de cimento Portland e as respectivas proporções de clínquer e adições, permitidas pelas normas nacionais indicadas. Vale ressaltar que os cimentos com adição de sílica ativa não estão ainda normatizados.

Tabela III. 2 – Tipos de cimentos Portland e suas constituições.

Tipo de cimento Portland	Sigla	Constituição				Norma ABNT
		Clínquer + gesso	Escória	Pozolana	Mat. Carbonático	
Comum	CP I	100%	0%			NBR 5732
	CP I – S	95 a 99%	1 a 5%			
Composto	CP II – E	56 a 94%	6 a 34%	0%	0 a 10%	NBR 11578
	CP II – Z	76 a 94%	0%	6 a 14%	0 a 10%	
	CP II – F	90 a 94%	0%	0%	6 a 10%	
Alto forno	CP III	25 a 65%	35 a 70%	0%	0 a 5%	NBR 5735
Pozolânico	CP IV	45 a 85%	0%	15 a 50%	0 a 5%	NBR 5736
Alta resistência inicial	CP V – ARI	95 a 100%	0%	0%	0 a 5%	NBR 5733
Resistentes aos sulfatos	RS	Idêntica a um dos cinco anteriores, do qual é derivado				NBR 5737
Destinado Para poços petrolíferos	CPP Classe G	100%	0%			NBR 9831

Fonte: COSTA (1999), e RIBEIRO et al (2002).

### **3.2.2 Água de amassamento**

Água de amassamento, é a água necessária para a hidratação dos compostos do cimento e para a trabalhabilidade do concreto. Essa água, quando potável, natural ou distribuída por uma Companhia de Abastecimento Municipal, tem qualidade suficiente para ser utilizada no amassamento do concreto.

Segundo RIGO (1998), quando a água é desconhecida, podemos comparar a resistência do concreto feito com essa água com as resistências de concretos similares confeccionados com água pura. Os corpos de prova feitos com a água desconhecida devem apresentar resistência à compressão aos 7 e aos 28 dias de idade, no mínimo igual a 90% da resistência dos corpos de prova de referência.

O excesso de substâncias dissolvidas na água de amassamento do concreto pode afetar a resistência e o tempo de pega, devido aos íons que alteram as reações de hidratação, levando a reações de expansão e promovendo a corrosão da armadura. Maior quantidade de substâncias em suspensão pode impedir a cristalização dos produtos das reações de hidratação, interpondo-se entre os cristais em crescimento, diminuindo a coesão do concreto (COUTINHO, 1988).

### **3.2.3 Agregados**

Entende-se por agregado o material granular, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para o uso em concretos e argamassas. O termo inerte é utilizado por se tratar de um material que não reage quimicamente com a água. Entretanto, esta denominação, não representa uma forma correta de se referenciar o agregado, pois a palavra inerte significa não reativo, mas em alguns casos, ocorrem reações químicas na zona de transição entre o agregado e a argamassa de cimento, areia e água.

Conforme a dimensão das partículas, existe uma terminologia que classifica o agregado em gráudo e miúdo. A NORMA BRASILEIRA REGISTRADA - NBR 7211 – Agregados para concreto - define o agregado gráudo como pedregulho ou a brita proveniente de rochas estáveis, ou a mistura de ambos, cujos grãos passam por uma peneira de malha quadrada com abertura nominal de 152 mm e ficam retidos na peneira ABNT 4,8 (Nº 4). Já o agregado miúdo é definido como areia de origem natural ou resultante do britamento de rochas estáveis, ou a mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira 4,8 mm e ficam retidos na peneira ABNT 0,075 mm (peneira Nº 200).

Os agregados são materiais com valores comerciais menores que o do cimento, portanto influenciam diretamente no custo do concreto. Além disso, proporcionam uma menor retração das pastas formadas por cimento e água, e aumentam a resistência ao desgaste superficial dos concretos (RIBEIRO *et al.*, 2002).

Algumas características dos agregados determinam importantes propriedades do concreto tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. As principais dentre elas são: composição granulométrica, forma e textura superficial dos agregados, substâncias deletérias presentes e massa unitária.

Composição granulométrica é a distribuição dos grãos por faixas granulométricas, expressa em termos das porcentagens retidas acumuladas nas série de peneiras da ABNT. Dentro da mesma classe de agregados gráudos ou miúdos, a composição granulométrica tem influência direta na trabalhabilidade do concreto e no seu custo. Por exemplo, areias muito grossas produzem misturas de concreto ásperas e pouco trabalháveis, enquanto que areias muito finas aumentam o consumo de água, e portanto o consumo de cimento para uma dada relação (água/cimento), aumentando o custo do concreto. Agregados que não possuem excesso ou deficiência nas faixas granulométricas produzem concretos mais trabalháveis e econômicos (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A forma e a textura superficial das partículas influenciam, principalmente as propriedades do concreto no estado fresco em relação ao estado endurecido.

Quanto à forma dos grãos, os agregados podem ser classificados como arredondados, angulosos ou lamelares (termo utilizado no Brasil, para formas achatadas ou alongadas) (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A textura superficial é classificada e definida dependendo de quanto a superfície do agregado é lisa ou áspera, e pode ser classificada principalmente como vítrea, lisa, áspera ou porosa (NEVILLE, 1982).

As substâncias deletérias podem ocasionalmente estar contidas nos agregados miúdos e graúdos. Essas substâncias podem se apresentar sob a forma de argila em torrões e materiais friáveis, materiais pulverulentos ou impurezas orgânicas e devem ter os seus teores limitados (de acordo com a norma NBR 7211), de maneira a não prejudicar a qualidade do concreto, como por exemplo a trabalhabilidade, a durabilidade, a pega ou o endurecimento.

Os agregados podem ser classificados quanto à sua massa unitária (relação entre a massa e o volume ocupado pelos sólidos e os vazios), em normais, leves, ou pesados, o que influencia no tipo de aplicação, como pode ser visto na Tabela III.3.

Tabela III. 3 – Classificação dos agregados segundo a massa unitária.

Classificação	Massa unitária $\gamma$ (kg/dm <sup>3</sup> )	Exemplos	Principais aplicações
Leves	$\gamma < 1$	Escória de alto forno, Argila expandida, vermiculita	Pontes, pré moldados, Concretos para isolamento térmico e acústico.
Normais	$1 < \gamma < 2$	Areia, brita e pedregulho	Obras em geral.
Pesados	$\gamma > 2$	Barita, linolita, magnesita	Concretos estruturais de blindagem contra radiações.

Fonte: RIBEIRO *et al* (2002).

### 3.2.3.1 Agregado leve

A massa unitária dos agregados mais utilizados em concretos convencionais varia de  $1400 \text{ kg/m}^3$  a  $1700 \text{ kg/m}^3$ . Agregados com massa unitária menor que  $1120 \text{ kg/m}^3$  são considerados leves, e possuem como principal característica uma estrutura altamente porosa. Esses agregados podem ser naturais ou produzidos industrialmente (COUTINHO, 1988).

Os agregados leves naturais geralmente são de origem vulcânica, como por exemplo, pedra-pomes, cinzas vulcânicas e tufa (NEVILLE, 1982). A diatomita é um exemplo de agregado leve natural de origem sedimentar, rica em sílica, constituída essencialmente por carapaças de algumas diatomáceas (algas microscópicas unicelulares) (Comércio, Indústria e Exportação de Minérios Ltda. – CIEMIL, 2004). Devido ao fato de serem somente encontradas em alguns lugares, o uso dos agregados leves naturais não é muito difundido.

Os agregados artificiais são obtidos por tratamento térmico de uma variedade de materiais e são classificados com base na matéria prima utilizada e no processo de fabricação. Dentre os agregados artificiais, temos os resultantes da aplicação de calor para a expansão de argilas, poliestireno, ardósias, folhelhos, perlitas e vermiculitas e os provenientes de um processo especial de resfriamento, pelo qual se obtém uma expansão, como a escória de alto forno (subproduto da fabricação de ferro gusa). A Figura 3.1 mostra um espectro dos agregados leves e dos correspondentes concretos.

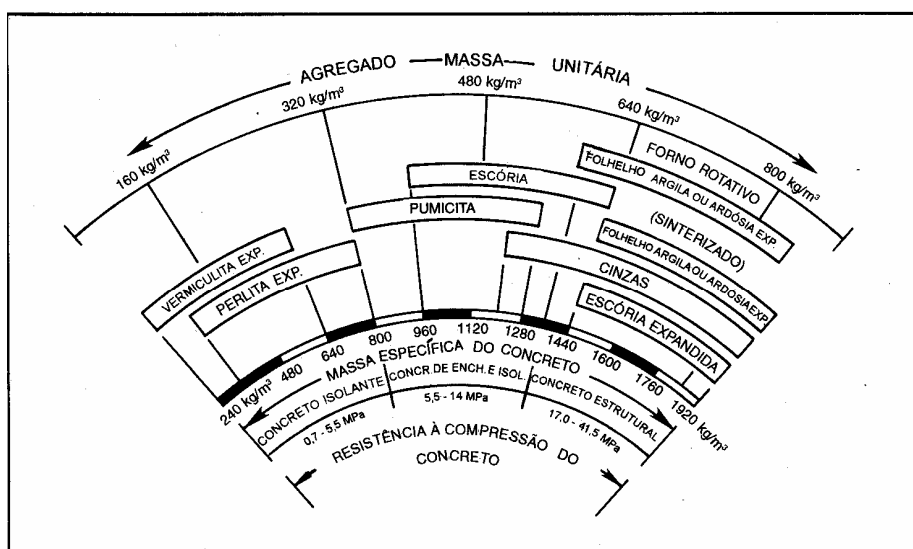


Figura 3. 1 – Espectro dos agregados leves e dos correspondentes concretos.

Fonte: MEHTA e MONTEIRO, (1994).



### 3.2.3.1.1 Argila expandida

Segundo COUTINHO (1988), a descoberta da argila expandida foi feita em 1885, mas só em 1918 o americano S. J. Heyde utilizou-a como agregado para concreto. O processo de fabricação do agregado de argila expandida, conhecido pela sigla LECA (light expanded clay aggregate), produzido em fornos rotativos foi patenteado na Dinamarca na década de 40. Na Figura 3.2 podemos visualizar a argila expandida produzida em forno rotativo, utilizada como agregado graúdo em concreto leve.



Figura 3. 2 – “Leca” agregado de argila expandida manufaturada em forno rotativo.

Fonte: SHORT e KINNIBURGH (1963).

A argila expandida é o produto obtido por aquecimento de alguns tipos de argila a temperatura entre 1000°C e 1200°C. Nesta faixa de temperatura, uma parte dos constituintes do material se funde gerando uma massa viscosa, enquanto a outra parte se decompõem 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 exterior devido à fase líquida que envolve as partículas da argila. Essa estrutura porosa se mantém após o resfriamento, de modo que a massa específica aparente do material resultante torna-se menor do que antes do aquecimento, podendo, o produto final, ser utilizado como agregado leve (SHORT e KINNIBURGH, 1963; COUTINHO, 1988).

O agregado de argila expandida pode ser produzido pelo tratamento térmico da matéria prima triturada e classificada granulometricamente, ou moída e pelletizada, sendo este processo geralmente realizado em forno rotativo a gás ou óleo diesel, similar aos usados na fabricação de cimento Portland. Pode também ser obtido por sinterização contínua. Nesse caso, o material bem umedecido é transportado numa esteira, sob queimadores, de modo que o calor envolve gradualmente toda a espessura da camada (NEVILLE, 1982; MEHTA e MONTEIRO, 1994). A Figura 3.3 ilustra um forno rotativo utilizado para produção de argila expandida.



Figura 3. 3 – Forno rotativo usado para produção de argila expandida  
Fonte: SHORT e KINNIBURGH (1963).

Os agregados de argila expandida produzidos pelo processo de sinterização contínua tem massa específica entre  $650\text{kg/m}^3$  e  $900\text{kg/m}^3$  e os produzidos em forno rotativo, entre  $300\text{kg/m}^3$  e  $650\text{kg/m}^3$  (NEVILLE, 1982).

SHORT e KINNIBURGH (1963) citam que para a produção destes agregados, a argila deve se fundir a temperaturas baixas e ao mesmo tempo, deve conter constituintes minerais que irão produzir gases em tal temperatura. Isso garante a produção desse agregado de forma econômica.

Os principais gases formados são: dióxido de enxofre, vapor de enxofre, dióxido de carbono, monóxido de carbono, oxigênio, hidrogênio e vapor de água. Estes gases resultam das reações entre os componentes minerais da argila, como o carvão, que reduz os óxidos de ferro; a pirita, que se dissocia em enxofre e pirrotita em temperaturas entre 600°C e 1000°C. O enxofre e a pirrotita, quando em temperaturas mais elevadas, oxidam-se e formam dióxido de enxofre. Em torno de 1000°C, a hematita e a linolita transformam-se em magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) liberando oxigênio. A calcita e a dolomita libertam dióxido de carbono, e os minerais argilosos liberam vapor de água (COUTINHO, 1988).

Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), os álcalis e outras impurezas presentes na argila são os agentes responsáveis pela formação da massa viscosa a uma temperatura mais baixa (aproximadamente 600°C), enquanto os materiais carbonáceos ou minerais carbonáticos são as fontes dos gases que proporcionam a expansão dessa massa.

A necessidade do aparecimento de uma fase em fusão (com viscosidade suficientemente elevada para aprisionar os gases) origina uma restrição na escolha da argila. Os teores de sílica, alumina e fundentes (cal, magnésia, óxido de ferro e álcalis) não devem ultrapassar determinados limites, sem os quais, a argila não se fundiria a temperatura mais baixas, ou fundiria-se numa massa insuficientemente viscosa (COUTINHO, 1988).

Segundo Soloviena apud COUTINHO (1988), a composição química da argila expandida deve estar dentro dos seguintes limites:

$\text{Al}_2\text{O}_3$	-----	16 a 20%
$\text{SiO}_2$	-----	50 a 65%
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	-----	5 a 9%
$\text{CaO}$	-----	1 a 4%
$\text{MgO}$	-----	1,5 a 3,5%
$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	-----	1,5 a 4,5%
$\text{SO}_3$	-----	0 a 1,5%
S	-----	0 a 1,5%

Os limites de perda ao fogo estão entre 6 e 8%, dos quais, 1 a 3,5% deve ser matéria orgânica.

A Figura 3.4 mostra duas representações diferentes do diagrama ternário com a composição química necessária para a argila ter característica expansiva.

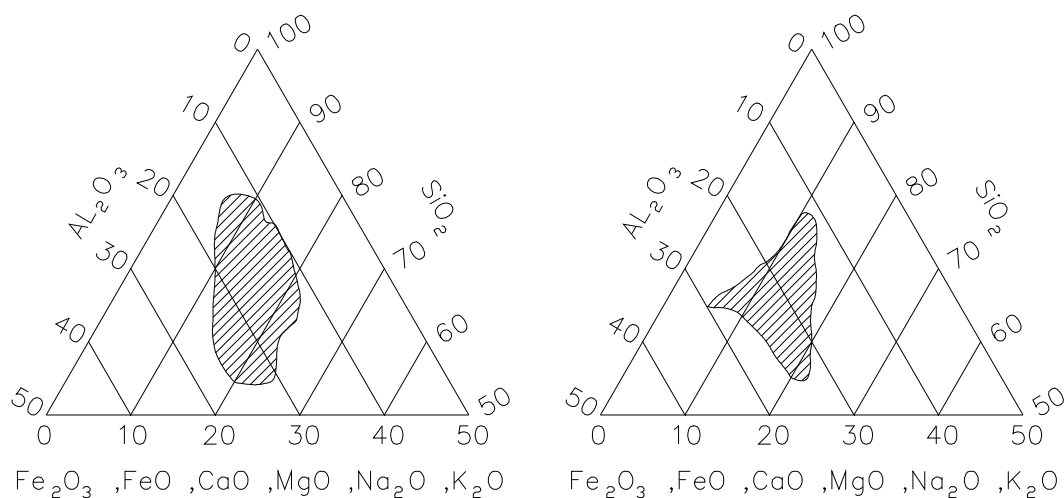


Figura 3. 4 – Zonas em que se encontram as composições químicas das argilas com possível expansão térmica.

Fonte: COUTINHO (1988).

Quando os constituintes minerais necessários para a fusão e para a produção dos gases não estão presentes na argila, eles podem ser incorporados durante a manufatura, misturando-se artificialmente pirita, hematita, dolomita, calcita, carvão ou combustíveis líquidos em pequenas porcentagens como óleo combustível, ou nafta (SHORT e KINNIBURGH, 1963; COUTINHO, 1988).

CALIXTO *et al.* (2001) ressaltam que a massa específica real da argila constituinte dos grãos expandidos são de aproximadamente 2,63 g/cm<sup>3</sup>. Quando moídos em grãos menores que 0,075mm, a argila expandida deixa de ser "expandida", pois a matriz porosa não mais existirá, já que a maioria dos poros possuem tamanhos maiores que 0,075mm de diâmetro, e a moagem irá destruí-los. Assim, quanto maior a partícula, maior será a porosidade intrínseca do material, e menor será a massa específica.

Para o concreto leve estrutural, recomenda-se o uso da argila expandida com dimensão máxima característica de 19mm. Grãos de argila expandida menores apresentam maior massa específica aparente e conseqüentemente maior resistência mecânica, devido ao menor volume de vazios. Além disso, no caso de concretos mais fluidos, dimensões menores da argila expandida proporcionam menor segregação por flutuação do agregado graúdo (CALIXTO *et al.*, 2001).

A argila expandida possui uma alta absorção de água. Se mantida por mais do que 24 horas em contato com a água à pressão de 1 atm, é possível alcançar até 20% de absorção. Entretanto, se exposta à pressões acima de 1 atm (como acontece com o concreto bombeado, que chega a 100 atm ou 120 atm), a absorção de água pode até dobrar, levando a uma descaracterização do traço por perda excessiva de plasticidade (slump), e um aumento da massa específica total do concreto devido a água que passa a ocupar os poros internos da argila. Segundo CALIXTO *et al.* (2001), para contornar este problema, há três soluções:

a - conviver com esta característica e prever a absorção máxima através de ensaios de laboratório ou práticos;

b - tratar a argila superficialmente, impermeabilizando-a para diminuir o ingresso de água para dentro do grão;

c - evitar bombeamentos ou pressões superiores a 5 atm, utilizando-se métodos de lançamento por meio de guias ou elevadores.

### **3.3 TIPOS DE CONCRETO LEVE**

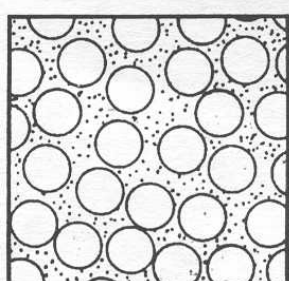
Segundo SHORT e KINNIBURGH (1963), os princípios gerais de obtenção de concreto leve são três:

O primeiro baseia-se na introdução de grandes vazios através de bolhas de gás no interior da massa de concreto. Esses vazios devem ser distinguidos dos vazios muito pequenos produzidos pela incorporação de ar. Este tipo de concreto é conhecido através de diversas denominações como concreto aerado, ou celular, ou de espuma, ou com gás.

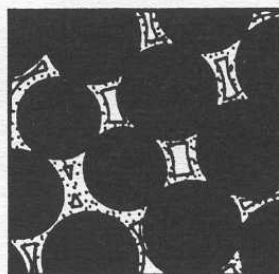
O segundo consiste simplesmente em omitir o agregado miúdo do concreto, de modo que se forma uma grande quantidade de vazios. Geralmente é usado agregado de massa específica convencional. Este concreto é designado, abreviadamente, como concreto sem finos.

No terceiro caso, utiliza-se um agregado poroso de massa específica baixa, no lugar do agregado convencional, (cuja massa específica é de aproximadamente  $2.600 \text{ kg/m}^3$  ).

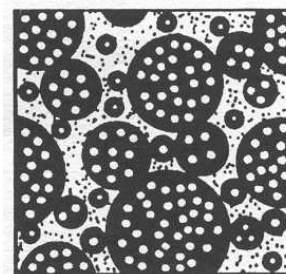
Os três tipos de concreto leve estão ilustrados esquematicamente na Figura 3.5. Em essência, em todos os tipos, a redução da massa específica do concreto é obtida pela presença de vazios na sua estrutura. É claro que podem ser obtidos concretos leves com a combinação desses tipos, como por exemplo, o concreto sem finos combinado com agregados leves.



concreto aerado



concreto sem finos



concreto com agregado leve

Figura 3.5 – Os três tipos de concreto leve.

Fonte: SHORT e KINNIBURGH (1963).

NEVILLE (1982), ressalte que:

“É evidente que a presença destes vazios reduz a resistência do concreto leve em relação ao concreto normal, mas em muitas aplicações a resistência não é fundamental. Os concretos leves proporcionam um bom isolamento térmico, e tem uma durabilidade satisfatória, mas não são muito resistentes à abrasão.”

### 3.3.1 Concreto aerado

Consiste em um tipo de concreto onde são introduzidas bolhas na mistura ainda plástica de cimento e areia, de modo a produzir um material com estrutura celular. Por essa razão, o concreto é denominado concreto celular ou aerado. A rigor, o termo concreto não é apropriado, pois geralmente não é utilizado agregado graúdo.

Existem dois métodos, aplicados em concreto, para se produzir aeração.

No primeiro, a aeração é obtida através de uma reação que provoca o desprendimento de um gás no interior da argamassa fresca (cimento, água, areia), de modo que, após a pega, ela contenha uma grande quantidade de bolhas. A argamassa deve ter uma consistência adequada para que o gás consiga expandi-la sem escapar de seu interior. Assim, devem ser combinados a evolução do desprendimento de gás, a consistência da argamassa e o tempo de pega. Segundo NEVILLE (1982), normalmente é utilizado o alumínio em pó, finamente moído, em proporções da ordem de 0,2% da massa de cimento. A reação do pó de alumínio ativo com o hidróxido de cálcio, libera hidrogênio, formando bolhas. Zinco em pó ou ligas de alumínio também podem ser usados. Às vezes, utiliza-se peróxido de hidrogênio, e neste caso é liberado o oxigênio.

No segundo método, a aeração é produzida pela adição de um agente espumante na argamassa. Em geral, utiliza-se uma forma de proteína hidrolizada, ou sabão de resina, que introduz e estabiliza bolhas de ar durante a mistura, a partir de uma rotação elevada. Em alguns processos, adiciona-se numa betoneira comum, durante a mistura, uma espuma estável, previamente formada (NEVILLE, 1982). Este tipo de concreto é utilizado na produção de blocos de concreto para a Construção Civil e são conhecidos como concreto altoclavado.

O concreto aerado, apresenta retrações maiores do que nos concretos de agregados leves com igual resistência, devido à falta do agregado graúdo neste tipo de concreto. Além disso, as armaduras, quando não protegidas, são vulneráveis à corrosão, mesmo quando o ataque externo não é muito severo. Este fato é devido à alta porosidade desse tipo de concreto. Sendo assim, as armaduras devem ser protegidas por tratamento de imersão em líquidos anticorrosivos.

### **3.3.2 Concretos sem finos**

Este tipo de concreto leve é obtido suprimindo-se o agregado miúdo, ou seja, o concreto sem finos é constituído somente de cimento, agregado graúdo e água.

O concreto sem finos, é portanto, uma aglomeração de grãos de agregado graúdo, sendo cada um deles envolvido por uma camada de pasta de cimento (cimento mais água) de pequena espessura. Existem, por esse motivo, grandes poros no interior do concreto, que são os responsáveis pela baixa resistência mecânica e pela redução de massa específica.

O custo de concretos sem finos é relativamente baixo, pois o teor de cimento pode chegar a valores pequenos. Isso se deve à ausência das grandes áreas superficiais da areia que deveriam ser envolvidas pela pasta de cimento.

A massa específica desses concretos depende, principalmente, da granulometria do agregado graúdo. Podemos obter concretos com menor massa específica utilizando agregados com o mesmo tamanho de grão, pois agregados com uma granulometria bem distribuída vão preencher os vazios entre os grãos maiores, com grãos menores. Para agregados convencionais, a massa específica dos concretos sem finos varia entre 1600 e 2000 kg/m<sup>3</sup>, mas usando-se agregados leves obtém-se massas específicas de até 640 kg/m<sup>3</sup> (NEVILLE, 1982).

Normalmente os concretos sem finos não são usados em concreto armado, mas quando necessário, a armadura deve ser revestida por uma camada fina, aproximadamente 3mm, de pasta de cimento, para melhorar a aderência. Este tipo de concreto é mais utilizado em painéis para isolamento térmico e acústico.

### **3.3.3 Concreto de agregado leve**

O concreto de agregado leve abrange um campo consideravelmente amplo, devido à variedade de tipos destes agregados, que permitem a produção de concretos leves com diferentes tipos de aplicação, o que torna este tipo de concreto mais utilizado.

Como principais aplicações, os concretos de agregados leve são utilizados em estruturas na forma de peças pré moldadas, paredes moldadas *in loco*, lajes de edifícios com muitos pavimentos e tabuleiros de pontes com grandes vãos.

Quando comparado aos outros tipos de concreto leve, o concreto de agregado leve pode atingir resistências à compressão maiores (concreto leve estrutural), podendo ser usado estruturalmente. Além disso, apresenta menor retração em relação ao concreto aerado e melhor aderência nas barras de aço, quando comparado aos concretos sem finos.



Alguns agregados leves, mesmo com aparências semelhantes, podem resultar em concretos com propriedades muito diferentes, de modo que se faz necessária uma caracterização do agregado, a fim de conhecer suas propriedades antes da sua aplicação.

É difícil classificar os concretos de acordo com o tipo de agregado usado, pois as propriedades dos mesmos dependem também da granulometria dos agregados, do teor de cimento, da relação água/cimento e do grau de adensamento. No entanto, podemos ter uma noção da massa específica aparente do concreto com a utilização de alguns tipos de agregados leve, como mostra a Figura 3.6.

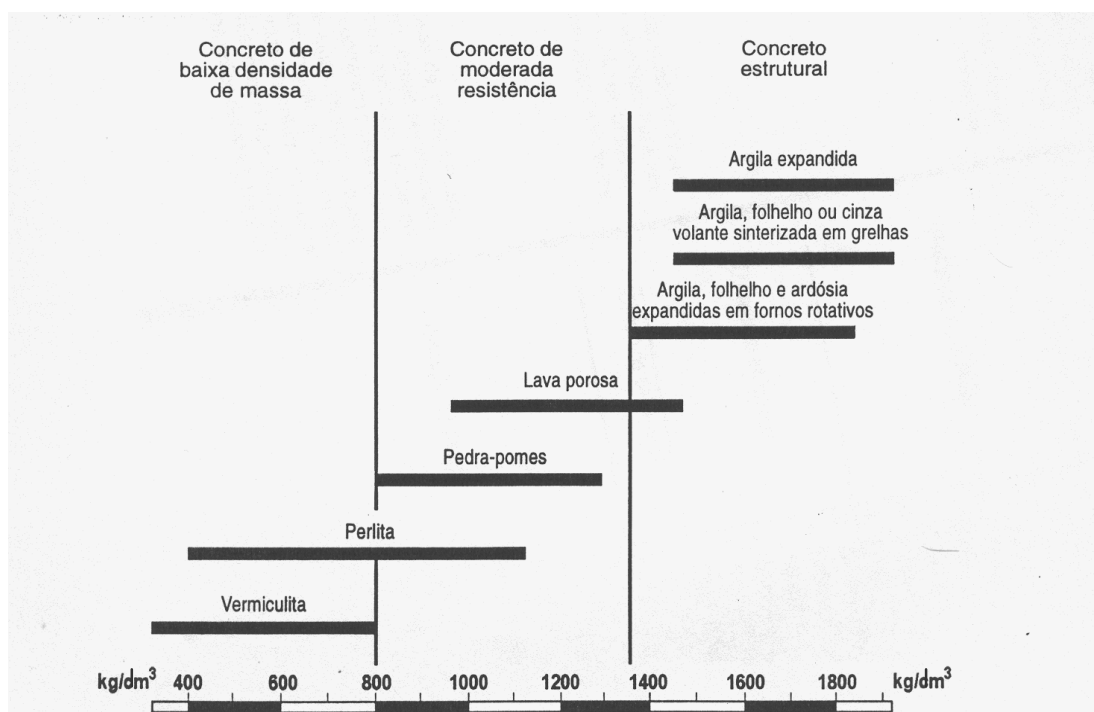


Figura 3. 6 – Relação do tipo de agregado leve com massa específica do concreto leve.  
Fonte: Sobral, (1996).

### 3.4 PROPRIEDADES DO CONCRETO LEVE ESTRUTURAL

Concreto leve estrutural é um concreto estrutural em todos os sentidos, exceto por utilizar agregados leves, com a finalidade de reduzir o peso próprio da estrutura e o custo total da obra. Portanto, para que o concreto seja classificado como concreto leve estrutural, as especificações de normas, como será visto no item 3.4.3, limitam a sua massa específica aparente e exigem uma resistência à compressão mínima, aos 28 dias, para assegurar a qualidade do concreto.

As principais propriedades a serem observadas dizem respeito à trabalhabilidade do concreto, massa específica, resistência à compressão e propriedades térmicas, todas relacionadas com a redução da massa específica.

### **3.4.1 Trabalhabilidade**

Trabalhabilidade é a facilidade de manuseio do concreto durante a mistura, transporte, lançamento nas formas e adensamento sem segregação.

Devido à baixa densidade e à textura porosa do agregado, a trabalhabilidade do concreto de agregado leve requer uma atenção especial.

Em geral, o concreto leve apresenta menor trabalhabilidade pois seu abatimento (slump), ou fator de adensamento, é menor do que em um concreto convencional. A razão disso é que a ação da gravidade é menor no caso de agregados leves.

Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), em concretos contendo agregado leve, o alto abatimento e a vibração excessiva podem proporcionar sedimentação da argamassa, mais pesada que o agregado leve, ficando em falta na superfície, onde é mais necessária para o acabamento de peças com grandes áreas como lajes e pavimentos. Esse fenômeno é denominado de segregação do agregado graúdo e é o inverso do que acontece com o agregado convencional, onde a segregação resulta num excesso de argamassa na superfície.

A granulometria do agregado e o fator água/cimento exercem influência na trabalhabilidade dos concretos e devem ser considerados em conjunto pois, quanto menor for a granulometria do agregado maior será a quantidade de água necessária para envolver os grãos do mesmo, formando uma película d'água responsável por uma boa trabalhabilidade. Portanto, a granulometria que produz uma boa trabalhabilidade para um dado fator água/cimento pode não ser a melhor para outro valor dessa relação.

Segundo a norma NBR 12821 – Preparação de concreto em laboratório - as argila expandidas apresentam alto índice de absorção, portanto devem ser usadas somente após sua saturação.

KNIGHTS apud LEITE (2001), estudando agregados reciclados de tijolos cerâmicos, sugere que apenas a absorção desse agregado, relativa a 10 minutos de imersão em água, deve ser compensada no teor de água total colocado nas misturas de concreto, ao invés da taxa de absorção relativa às 24 horas de ensaio. Isto porque este foi considerado o tempo suficiente para reduzir a alta absorção dos agregados reciclados no estudo em questão.

LEITE (2001) concluiu em estudo realizado com várias amostras de agregado reciclados de tijolos cerâmicos que, após 5 minutos de imersão em água, as amostras atingiram 95% da absorção máxima. Deste modo, 5 minutos foi considerado tempo de saturação suficiente para efetuar a pré-umidificação dos agregados.

#### **3.4.1 Massa específica aparente**

Define-se massa específica aparente como a relação entre a massa do material seco (em estufa a temperaturas entre 100°C e 110°C durante 24 horas) e o volume igual ao do sólido, geralmente expressa em quilograma por metro cúbico.

Segundo a norma americana AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM C 330-77 (1991), a massa específica do concreto leve estrutural no estado seco não deve ser maior do que 1850 kg/m<sup>3</sup> e, deve apresentar valores entre 1400 kg/m<sup>3</sup> e 1800 kg/m<sup>3</sup>. O concreto leve isolante (sem função estrutural) geralmente tem massa específica menor do que 800 kg/m<sup>3</sup>.

A massa específica do concreto de agregados leves depende, principalmente, da massa específica aparente dos grãos do agregado e está diretamente relacionada com a resistência à compressão. Ao contrário do que ocorre com agregados convencionais, agregados leves com uma curva granulométrica rica em partes mais finas conduzem a uma maior densidade e a uma maior resistência do concreto. A substituição de agregados leves miúdos por areia natural (mais pesada), também aumenta a densidade do concreto leve (SOBRAL, 1996).

A massa específica do concreto no estado endurecido é influenciada pela massa específica do seus constituintes e pelas proporções da mistura. A granulometria e a forma dos grãos também podem influenciar, proporcionando uma melhor distribuição das partículas.

### 3.4.2 Resistência de dosagem

Segundo a NBR 12655 – Concreto - Preparo, controle e recebimento - a resistência de dosagem é calculada pela fórmula:

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65 S_d \quad (3.2)$$

Onde:

$f_{cj}$  = Resistência do concreto à compressão aos j dias de idade.

$f_{ck}$  = Resistência característica à compressão do concreto;

$S_d$  = Desvio padrão em função do grau de controle da obra;

$S_d = 4,0$  MPa – Controle rigoroso (profissional presente na obra e materiais em peso);

$S_d = 5,5$  MPa – Controle razoável (profissional presente na obra, cimento em peso e o restante em volume);

$S_d = 7,0$  MPa – Controle razoável (cimento em peso e o restante em volume);

Segundo a ASTM C 330-77, o concreto leve estrutural deve ter uma resistência à compressão aos 28 dias de idade, determinada em corpo de prova cilíndrico padronizado, não inferior a 17 MPa.

De acordo com NEVILLE (1982), foram obtidas resistências à compressão de até 60 MPa, em concretos de agregado leve, com teores de cimento muito altos (560 kg/m<sup>3</sup>). Um concreto de agregado leve com resistência à compressão de 20 MPa, por exemplo, pode consumir entre 240 kg e 400 kg de cimento por metro cúbico, dependendo do tipo de agregado. Para concretos com agregado leve e resistência à compressão igual a 30 MPa, o consumo de cimento fica entre 330 kg/m<sup>3</sup> e 500 kg/m<sup>3</sup>. Geralmente, em concretos com agregado leve, o consumo de cimento pode superar em até dois terços os valores obtidos para concretos com agregado convencional, para uma mesma resistência. Nas Tabelas III.4 e III.5 pode-se comparar o consumo de materiais e os respectivos valores de resistência para ambos os concretos.

Tabela III. 4 – Proporções dos materiais do concreto convencional para diferentes resistências

	Resistência Baixa	Resistência Moderada	Resistência Alta
Resistência aos 28 dias (MPa)	18	30	60
Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	255	356	510
Água (kg/m <sup>3</sup> )	178	178	178
Agregado Miúdo (kg/m <sup>3</sup> )	801	848	890
Agregado Graúdo (kg/m <sup>3</sup> )	1169	1032	872

Fonte: METHA e MONTEIRO (1994).

Tabela III. 5 – Relação entre a resistência à compressão média e o teor de cimento para concretos leves.

Resistência à compressão Aos 28 dias (MPa)	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	
	Agregado graúdo leve e Agregado miúdo leve	Agregado graúdo leve e areia lavada natural
17,24	240 – 305	240 – 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

Fonte: ACI 213 R (1987).

### 3.4.3 Modulo de elasticidade

O módulo de elasticidade estático ou módulo de deformação elástica, para concretos, é obtido a partir da inclinação da curva tensão-deformação, sob carregamento uniaxial de tração ou compressão.

Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), temos três tipos de módulo de elasticidade estático:

O módulo tangente, que é dado pela inclinação de uma reta tangente à curva em qualquer ponto da mesma.

O módulo secante, que é dado pela inclinação de uma reta traçada da origem a um ponto da curva, correspondente a 40% da tensão da carga de ruptura.

O módulo da corda, que é dado pela inclinação de uma reta traçada entre dois pontos da curva tensão deformação. Um ponto representando uma deformação longitudinal de 50  $\mu\text{m}/\text{m}$  ao ponto que corresponda a 40 por cento da carga última.

Segundo SOBRAL (1996), para a mesma resistência à compressão, o módulo de elasticidade do concreto leve é, de modo geral, menor em comparação com o do concreto convencional (utilizando a brita como agregado). O valor do módulo de elasticidade do concreto leve oscila entre um terço e dois terços do valor do módulo de elasticidade do concreto convencional (SHORT e KINNIBURGH, 1963).

SCHDELER apud NEVILLE (1982), encontrou para o módulo de elasticidade de concretos contendo argila expandida, com  $f_{ck}$  variando de 21MPa a 42MPa, valores entre 10,5 GPa e 14 GPa. Substituindo o agregado miúdo leve por areia natural, os módulos de elasticidade aumentam geralmente de 15% a 30%.

Quando comparado ao concreto convencional, o concreto com agregado leve tem retração (contração durante a secagem) ligeiramente maior e fluência (aumento da deformação com o tempo para uma mesma tensão) consideravelmente maior. Desta forma, parece que a baixa resistência à compressão e o baixo módulo de elasticidade afetam mais a fluência do que a retração por secagem (METHA e MONTEIRO, 1994).

De acordo com SHORT e KINNIBURGH (1963), o módulo de elasticidade tem grande importância para o concreto leve estrutural devido à sua influência sobre as flechas das peças sujeitas a flexão, sobre a distribuição das forças internas na seção transversal de peças sujeitas à compressão e sobre a carga crítica no caso de peças propensas à ruína devido à instabilidade elástica. Nesses casos, o baixo valor do módulo de elasticidade tem uma influência desfavorável. Por outro lado, há uma influência favorável no que diz respeito à resistência mecânica das peças sujeitas ao impacto (ductibilidade), que melhora com os valores mais baixos do módulo de elasticidade.

Segundo SWAMY e BANDYOPADHYAY apud SOBRAL (1996), os dados obtidos sobre as propriedades elásticas do concreto leve ainda são muito falhos. Portanto, recomenda-se a obtenção desses dados experimentalmente, a partir dos concretos leves a serem utilizados.

#### **3.4.4 Durabilidade**

Apesar do concreto de agregado leve seco ao ar tender a apresentar um alto grau de absorção de umidade, isto não significa alta permeabilidade. A principal razão para a baixa permeabilidade e a excelente durabilidade do concreto leve, de acordo com HOLM et al. (1984), é a ausência generalizada de microfissuração na zona de transição entre agregado e a matriz de cimento, devido à similaridade entre os módulos de elasticidade do agregado leve e da argamassa. Além disso, a reação pozolânica entre silicatos de alumínio do pó dos grãos de agregado leve e o hidróxido de cálcio da matriz de cimento, é responsável pelo aumento da resistência e densificação da zona de transição.

Os agregados leves são porosos e, conseqüentemente, mais friáveis que os agregados convencionais. Portanto, concreto contendo agregado leve geralmente apresenta baixa resistência à abrasão. A substituição do agregado leve miúdo por areia natural melhora essa propriedade (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

#### **3.4.5 Propriedades Térmicas do Concreto**

Na maioria dos materiais de construção existe uma relação direta entre a mudança de temperatura e as alterações dimensionais. Sendo assim, o estudo das propriedades térmicas do concreto é importante para que possamos conhecer, compreender e prever o comportamento deste material com a variação de temperatura. As propriedades térmicas dos concretos de cimento Portland são as propriedades mais ignoradas e menos entendidas na Construção Civil.

As principais propriedades térmicas de interesse no concreto são a condutividade térmica, a difusividade térmica, o calor específico e o coeficiente de dilatação térmica.

### 3.4.5.1 Condutividade térmica

Condutividade térmica é a medida da capacidade de um determinado material conduzir calor, e pode ser definida pela razão entre o fluxo de calor transmitido através de uma área unitária do material e o gradiente de temperatura. “A condutividade térmica é medida em Joules por segundo por metro quadrado de área de um corpo, para um gradiente de temperatura de 1°C por metro de espessura desse corpo” (SCALOM e McDONALD, 1999).

COUTINHO (1988), utilizando outras unidades, define o coeficiente de condutividade térmica como “o número de calorías-gramas que atravessam 1 cm de espessura submetido a uma diferença de temperatura de 1°C, por centímetro quadrado, em um segundo”.

Segundo NEVILLE (1982), “a condutividade dos concretos convencionais depende da composição e, quando o concreto está saturado, este apresenta valores geralmente entre 1,4 J/m s°C e 3,6 J/m s°C”. Na Tabela III.6 são apresentados os valores da condutividade térmica de concretos confeccionados com diferentes tipos de agregado.

Tabela III. 6 – Valores típicos de condutividade térmica do concreto

Tipo de agregado	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Condutividade térmica (J/m s°C)
Barita	3640	1,38
Igneas	2540	1,44
Dolomita	2560	3,68
Agregado leve	480 –1760	0,14 – 0,60

Fonte: NEVILLE (1982).

Podemos observar que os concretos com agregado de calcário dolomítico apresentam valores de condutividade térmica bem maiores que os valores obtidos em concretos com agregado leve.



O teor de água presente internamente nos poros representa um fator de grande importância na condutividade térmica dos concretos. Quanto maior a saturação, menor a condutividade térmica dos concretos convencionais no estado endurecido. Entretanto, em concreto leve, um aumento de 10% no teor de umidade resulta em um aumento da condutividade de cerca de 50%. Isto pode ser facilmente explicado, pois a condutividade térmica do ar é menor do que da água, que por sua vez é menor que a metade do valor da condutividade térmica da pasta de cimento (NEVILLE, 1982).

NEVILLE (1982) explica que a massa específica não influi, de forma considerável, na condutividade térmica de concretos convencionais. Entretanto, em concretos leves, a condutividade térmica varia com a massa específica devido à baixa condutividade térmica do ar relacionada à porosidade do agregado leve.

No Brasil, a condutividade térmica do concreto é determinada segundo o método prescrito na norma NBR 12820 – Concreto Endurecido – Determinação da Condutividade Térmica, Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT,1993).

#### 3.4.5.2 Difusividade Térmica

Em concretos, “... a difusividade térmica representa a velocidade com que ocorrem variações de temperatura no interior de uma massa e é, portanto, um indicador da facilidade com que o concreto pode sofrer estas variações” (NEVILLE, 1982).

A difusividade térmica está relacionada, com a condutividade térmica ( $K$ ) através da expressão:

Onde:

$$k = \frac{K}{c \rho} \quad (3.3)$$

$K$  = difusividade,  $m^2/s$

$K$  = condutividade térmica,  $J/m s \text{ } ^\circ C$

$c$  = calor específico,  $J/kg \text{ } ^\circ C$

$\rho$  = massa específica do material,  $kg/m^3$

A partir da equação 3.3, verifica-se que a difusividade térmica em concretos é diretamente proporcional à sua condutividade térmica e inversamente proporcional ao produto da massa específica e do calor específico. Para concretos convencionais, a massa específica e o calor específico não variam muito e a difusividade térmica depende mais da condutividade térmica. Já para concreto leve, a massa específica e a condutividade térmica diminuem, sendo esta redução mais significativa na massa específica, resultando, conseqüentemente, em um maior valor da difusividade térmica.

Para concretos convencionais, os valores típicos de difusividade térmica situam-se no intervalo entre 0,002m<sup>2</sup>/h e 0,006m<sup>2</sup>/h, dependendo do tipo de agregado. Os seguintes minerais estão ordenados segundo os valores de difusividade crescente: basalto, riolito, granito, calcário, dolomita e quartzito, (NEVILLE, 1982). A Tabela III.7 apresenta valores da difusividade térmica para diferente tipos de agregado graúdo.

Tabela III. 7– Valores da difusividade térmica para concreto com diferentes agregados graúdos.

Agregado graúdo	Difusividade térmica (1) (m <sup>2</sup> /h)	Difusividade térmica (2) (m <sup>2</sup> /h)
Quartzo	-	0,0079
Quartzito	0,0054	0,0061
Dolomita	0,0047	-
Calcário	0,0046	0,0055
Granito	0,0040	-
Riolito	0,0033	-
Basalto	0,0030	0,0025

Fonte: (1) ACI, (1986) e (2) SCALOM e McDONALD, (1999).

A medida da difusividade consiste, essencialmente, em determinar a relação tempo e diferença de temperatura entre o interior e a superfície de um corpo de prova, inicialmente a uma mesma temperatura, quando se varia a temperatura da superfície. Devido à influência do teor de umidade sobre as propriedades térmicas do concreto, a difusividade deve ser mantida em corpos de prova do concreto com um teor de umidade igual ao existente na estrutura real (NEVILLE, 1982).

No Brasil, o método para determinação da difusividade térmica do concreto está prescrito na Norma Brasileira Registrada NBR 12815 – Concreto Endurecido – Determinação da Difusividade Térmica (ABNT, 1993).

#### **3.4.5.3 Calor Específico ou Capacidade Calorífica**

Segundo MITCHELL apud SCANLON e McDONALD (1999), a definição correta de calor específico é “... a razão entre a quantidade de calor necessária para aumentar 1° uma unidade de peso do material, e a quantidade de calor necessária para aumentar 1° o mesmo peso de água”. Para o sistema de unidade em cal/g °C a capacidade calorífica da água é igual a 1. No Sistema Internacional de Unidades (SI), o calor específico é expresso em J/kg °K, que pode ser obtida pela multiplicação do fator 4,1868 x 10<sup>3</sup> por cal/g °C.

As diferenças mineralógicas entre os agregados normalmente utilizados em concretos convencionais têm pouca influência no calor específico dos mesmos, com valores compreendidos no intervalo entre 840 J/kg °C e 1170 J/kg °C. No entanto, o calor específico aumenta com a elevação da temperatura e é consideravelmente maior com o aumento do teor de umidade do concreto (NEVILLE, 1982; MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Pesquisas feitas por HARMATHY e ALLEN, citados por SCANLON e McDONALD (1999), indicam que o calor específico do concreto leve com agregado expandido pouco difere do calor específico do concreto convencional à temperatura ambiente, mas aumenta consideravelmente à temperaturas próximas de 600 °C.

No Brasil, o calor específico do concreto é determinado segundo o método prescrito na NBR 12817 – Concreto Endurecido – Determinação do Calor Específico (ABNT, 1993).

#### **3.4.5.4 Coeficiente de Dilatação Térmica**

O coeficiente de dilatação térmica pode ser definido como a “variação da dimensão linear por unidade de comprimento, devido a mudança de 1° na temperatura”. Como na maioria dos materiais de construção, o concreto tem um coeficiente de dilatação térmica positivo (SCALOM e McDONALD, 1999; MEHTA e MONTEIRO, 1994; FURNAS, 1987).

As argamassas de cimento e os agregados, apresentam diferentes coeficientes de dilatação térmica, influenciando no coeficiente de dilatação térmica do concreto, que é resultante destes dois valores. O coeficiente de dilatação térmica varia entre  $11 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  a  $16 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  para pasta de cimento, de  $8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  a  $12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  para a argamassa (cimento, areia e água), e entre os limites de  $3 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  e  $7 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  para a maioria dos agregados (NEVILLE, 1982). O agregado faz com que ocorra menor coeficiente de dilatação proporcionando maior estabilidade volumétrica aos concretos

Segundo NEVILLE (1982) e COUTINHO (1988), quando os coeficientes de dilatação térmica do agregado e da pasta de cimento diferem muito entre si, uma variação grande de temperatura pode causar um movimento diferencial e conseqüentemente, ruptura das ligações entre as partículas dos agregados e a pasta que os envolve. No entanto, quando a variação de temperatura não ultrapassa a faixa entre  $40 \text{ } ^\circ\text{C}$  e  $60 \text{ } ^\circ\text{C}$ , e a diferença entre os dois coeficientes não é superior a  $5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , esse movimento diferencial não é muito significativo, talvez porque seja compensado por outros esforços tais como o da retração. Portanto, a escolha de um agregado com coeficiente de dilatação térmica próximo ao da pasta de cimento, torna-se um fator importante para a prevenção de fissuras em concreto e para a durabilidade da estrutura.

Entretanto, quando determinamos o coeficiente de dilatação térmica dos agregados, devemos atentar para o fato de que nem todos os minerais possuem características isotrópicas (comportamento e deformação semelhantes em todas as direções). Minerais como a calcita  $\text{CaCO}_3$  (calcário calcítico), por exemplo, dão origem à brita calcárea, apresentando características anisotrópicas, com um coeficiente de dilatação térmica de  $26 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  segundo um eixo cristalográfico, e  $-4,8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  na direção normal. (COUTINHO, 1988).

No Brasil, o método para determinação do coeficiente de dilatação térmica do concreto consta na NBR 12815 – Concreto Endurecido – Determinação do Coeficiente de Dilatação Térmica Linear (ABNT, 1993).

### 3.5 ZONA DE TRANSIÇÃO ENTRE AGREGADO E PASTA DE CIMENTO

Definimos zona de transição como a região entre materiais diferentes ou fases distintas, entre os quais existe uma superfície de contato denominada interface, onde estão presentes alguns tipos de ligações. Podemos considerar vários tipos de interfaces no concreto (MONTEIRO, 1985):

- interfaces entre as várias fases que compõem a matriz de cimento;
- interfaces entre a matriz de cimento e os materiais pozolânicos;
- interfaces entre a matriz de cimento e os agregados;
- interfaces entre a matriz e as barras de armadura;
- interfaces entre a matriz de cimento e as fibras que estiverem presentes nos concretos especiais.

Geralmente, a interface de maior interesse é aquela entre a matriz de cimento e o agregado graúdo, que no caso deste trabalho é a argila expandida.

Parece haver um consenso entre os diversos pesquisadores, de que as regiões de interface constituem pontos fracos na estrutura do concreto e que, além disso, essas regiões influenciam claramente na resistência mecânica, aderência, módulo de ruptura, rigidez a flexão e permeabilidade desse material. Por outro lado, ainda não se sabe até que ponto as propriedades do concreto podem ser melhoradas por meio de incrementos na performance da ligação pasta agregado.

Analisando a microestrutura do concreto, pode-se obter informações importantes a respeito da zona de transição entre o agregado graúdo e a matriz da argamassa de cimento, tais como: fases formadas, porosidade e microfissuras presentes; características que influenciam de forma significativa diversas propriedades do concreto.

Ensaio em corpos de prova cilíndricos de concreto, submetidos à tração por compressão diametral, demonstram que em concretos com agregado leve a seção de ruptura passa através desse agregado, devido à maior resistência da zona de transição e da argamassa que o envolve, como pode ser visto na Figura 3.7a. Por outro lado, em concretos convencionais, o agregado graúdo é mais denso e resistente, e a fratura contorna esse agregado passando pela zona de transição e pela matriz de cimento, ilustrado na Figura 3.7b. (MEHTA e MONTEIRO 1994).



(a) Concreto leve

(b) Concreto convencional

Figura 3. 7 – Seção de ruptura por compressão diametral.

Foi descoberto que as diferenças na resistência do concreto não podem ser sempre relacionadas a diferenças na resistência do agregado. Estas podem ser relacionadas a processos físicos e químicos na interface, que tem uma influência na resistência total. O processo físico, identificado na interface, foi a densificação na zona de transição. O processo químico foi associado com a atividade pozolânica do pó do agregado e deposição do CH nas cavidades do agregado. Este processo começa efetivamente apenas depois de 28 dias.

Uma importante característica do agregado leve é sua boa aderência com a argamassa de cimento que o envolve. Isto é consequência de vários fatores (COUTINHO, 1988):

Em primeiro lugar, a textura áspera da superfície de muitos agregados leves resulta em um intertravamento mecânico com a argamassa de cimento. De fato, muitas vezes, ocorre uma certa penetração da pasta de cimento para o interior dos poros abertos na superfície das partículas de agregado graúdo.

Em segundo lugar, os módulos de elasticidade das partículas de agregado leve e da pasta de cimento não são muito diferentes. Como consequência, não são introduzidas tensões diferenciais entre os dois materiais quando as cargas são aplicadas ou por variações térmicas ou higroscópicas.

Em terceiro lugar, a água absorvida pelo agregado no momento da mistura se torna, com o tempo, disponível para a hidratação do cimento anidro remanescente. Como boa parte dessa hidratação adicional ocorre na região da interface agregado – pasta, torna-se mais forte a aderência entre o agregado e a matriz.

Na zona de transição ocorrem ligações entre as fases, e mesmo que o cimento e o agregado graúdo tenham, individualmente, resistências elevadas, a resistência do concreto poderá ser bem menor caso a zona de transição tenha menor resistência.

Segundo COUTINHO (1988), em qualquer fenômeno de aderência, os principais tipos de ligações presentes na interface agregado graúdo e argamassa de cimento são:

- a) Ligação física – está relacionada às causas mecânicas como: forma e rugosidade do agregado, em nível macroscópico; porosidade e absorção superficial do agregado, em nível microestrutural. Está ainda relacionada às forças eletrostáticas (forças de Van der Waals) entre a matriz de argamassa de cimento e a superfície do agregado.
- b) Ligação epitáxica - Ligação regular entre cristais da matriz de argamassa de cimento e cristais do agregado graúdo, formando uma continuidade entre essas estruturas com ou sem formação de solução sólida.
- c) Ligação química - Aderência devido às reações químicas entre os produtos de hidratação do cimento e a superfície do agregado graúdo.

É importante ressaltar que essas ligações não ocorrem isoladamente, pois um tipo de ligação pode ser consequência de outra forma de ligação, que se interagem, resultando na aderência entre agregado e matriz de cimento. Na figura 3.9. são ilustradas três formas de interações ou formas de ligações entre a matriz de cimento e o agregado graúdo.

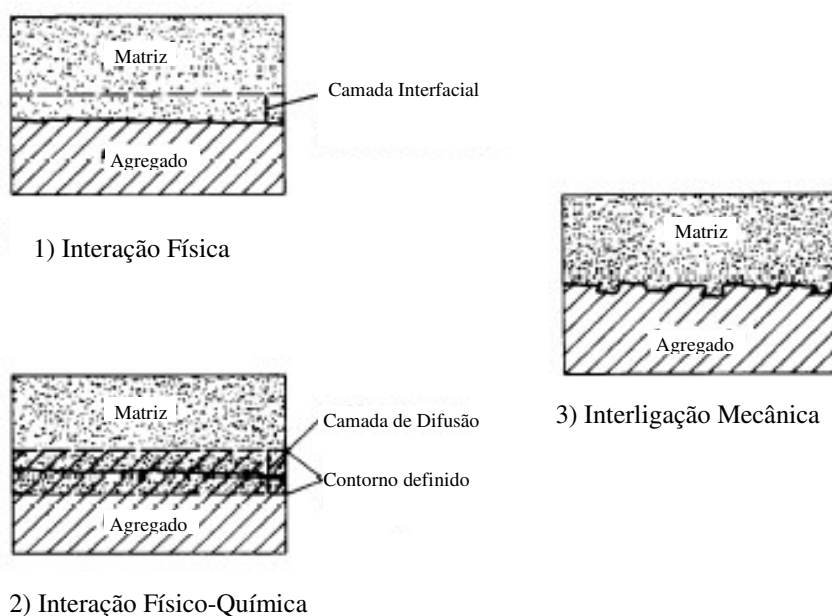


Figura 3. 8 – Formas de interações entre matriz de cimento e o agregado.

Fonte: ZANG e GJØRV (1990)

1 - Interações Físicas: para o caso de agregados com uma superfície mineral lisa (ex. quartzo) e sem interações químicas com a matriz, a resistência da ligação pode ser desconsiderada, mesmo que a matriz seja resistente. A interface, neste caso, representa a ligação mais fraca do sistema.

2 - Interação Físico Química: através de interações químicas, podem ser desenvolvidas fortes ligações químicas entre agregado graúdo e a matriz de cimento.

3 – Interação Mecânica: para agregados porosos ou com uma superfície rugosa, a pasta de cimento ou produtos da sua hidratação podem penetrar dentro das cavidades ou poros da superfície do agregado. Desta forma, multiplica-se a aderência dos agregados à matriz da argamassa.



Acredita-se que a interface entre agregados leves e argamassa de cimento é caracterizada por uma interligação mecânica em combinação com uma interação química na forma de reação pozolânica (ZANG e GJØRV, 1990).

De acordo com MASO apud METHA e MONTEIRO (1994), no estado fresco do concreto, forma-se, ao redor dos agregados graúdos, um filme de água que pode levar a uma maior relação água/cimento nas proximidades do agregado graúdo do que na matriz da argamassa de cimento.

“...os íons de cálcio, sulfato, hidroxila, e aluminato formados pela dissolução dos compostos de sulfato de cálcio e de aluminato de cálcio, combinam-se para formar a etringita e hidróxido de cálcio. Devido à relação água /cimento elevada, estes produtos cristalinos vizinhos ao agregado graúdo consistem de cristais relativamente grandes, e conseqüentemente formam uma estrutura mais porosa do que na matriz da pasta de cimento ou na matriz da argamassa. Os cristais em placa de hidróxido de cálcio tendem a formar-se em camadas orientadas, por exemplo, com o eixo perpendicular à superfície do agregado. Finalmente, com o progresso da hidratação, o C-S-H pouco cristalizado e uma segunda geração de cristais menores de etringita e de hidróxido de cálcio começam a preencher os espaços vazios entre o reticulado criado pelos cristais grandes de etringita e de hidróxido de cálcio. Isto ajuda a aumentar a densidade e, conseqüentemente, a resistência da zona de transição.”

A Figura 3.9 ilustra a zona de transição entre o agregado graúdo e a argamassa de cimento, bem como a distribuição das principais fases presentes.

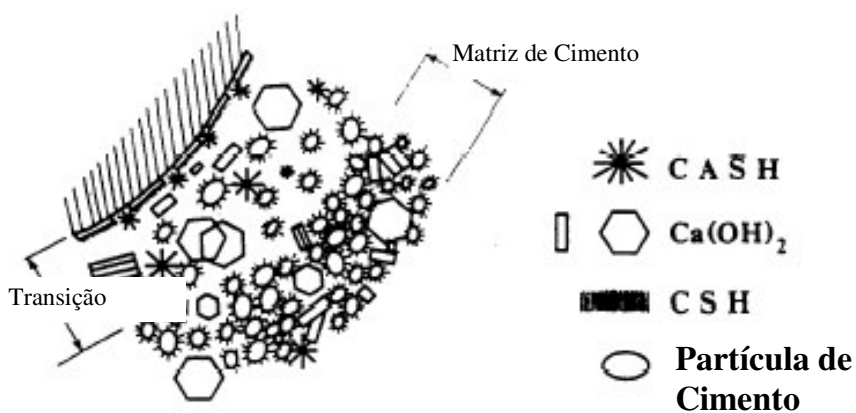


Figura 3. 9 - Zona de transição entre o agregado graúdo e a argamassa de cimento.

Fonte: ZANG e GJØRV, (1990).

Nas idades iniciais, o volume de vazios presentes na zona de transição é maior do que no interior da pasta, devido a uma película de água que se forma ao redor do agregado graúdo, aumentando a relação água/cimento. Desta forma, o crescimento de cristais nessa região encontra pouca oposição, pois tem-se uma solução fracamente saturada e o tamanho e a concentração dos compostos cristalinos, tais como o hidróxido de cálcio e a etringita, aumentam na zona de transição. Os cristais grandes de hidróxido de cálcio (portlandita), formam planos de clivagem preferencial que facilitam o surgimento de fissuras. Tais efeitos são responsáveis pela resistência da zona de transição, em geral, mais baixa do que a da matriz da argamassa de cimento no concreto (METHA e MONTEIRO, 1994).

NEVILLE (1982) afirma que “essas fissuras permanecem estáveis até cerca de 30% da carga limite e a partir desse valor, começam a aumentar em comprimento e espessura. Entre 70% e 90% da resistência final, as fissuras se interligam de modo que se forma um sistema contínuo de fissuras”. Mantendo-se as tensões, ocorre uma propagação rápida das fissuras, culminando com a ruptura do concreto.

É necessário um nível de energia maior para a formação e propagação das fissuras na matriz da argamassa de cimento, sob carga de compressão, enquanto que, sob a carga de tração, as fissuras propagam-se rapidamente a um nível de tensão muito menor. “É por esta razão que o concreto rompe de modo frágil à tração, mas é relativamente dúctil à compressão”, motivo pelo qual a resistência à compressão do concreto é uma ordem de grandeza maior do que a resistência à tração (METHA e MONTEIRO, 1994).

PERRY e GILLOTT apud COUTINHO (1988), citam que a rugosidade superficial do agregado graúdo tem maior influência na redução das tensões de início de propagação das fissuras do que na resistência final.

Para um corpo homogêneo sob um estado simples de tensões, as trajetórias das tensões são linhas retas ou curvas simples. No concreto, devido à presença dos agregados, as superfícies de contato entre agregado e a matriz de argamassa podem formar todos os ângulos possíveis com a direção das forças externas. Como resultado, as tensões localizadas variam significativamente acima ou abaixo da tensão nominal aplicada (NEVILLE, 1982).

Segundo METHA e MONTEIRO (1994), “com o aumento da idade, a resistência da zona de transição pode tornar-se igual ou mesmo maior do que a resistência da matriz” quando são utilizados agregados silicosos, que formam produtos como silicatos de cálcio hidratado durante a hidratação. No caso de agregados de calcário, as reações químicas de hidratação formam carboaluminatos hidratados, que cristalizam-se nos vazios da zona de transição contribuindo para sua resistência.

Segundo ZANG e GJØRV (1990), um estudo russo apresentado por KHOKHRIN, utilizando microscopia eletrônica de varredura, revelou a formação de novas fases químicas na zona de transição entre a argila expandida e a matriz da argamassa de cimento. O estudo confirmou constatações anteriores, a partir de observações das micrografias dos agregados de argila expandida obtidas antes e depois da imersão em uma solução saturada de cal, mostrando evidências da reação química.

De acordo com FAGERLUND apud ZANG e GJØRV (1990), as propriedades da zona de transição podem melhorar devido a um efeito de “filtração” da pasta de cimento (viscosa), onde apenas a água entra no agregado. Isto promoveria uma relativa impermeabilização ao redor dos poros externos do agregado leve, e poderia minimizar o ingresso de água, proporcionando um efeito de enrijecimento da interface.

Segundo KHOKHRIN apud ZANG e GJØRV (1990), testes de microdureza na zona de transição entre agregado leve e a argamassa de cimento indicaram uma espessura de aproximadamente 60µm e uma resistência entre 9MPa e 15MPa para a zona de transição, enquanto que para a resistência da matriz da argamassa de cimento foram obtidos valores entre 6MPa e 8MPa.

De acordo com WASSERMAN e BENTUR (1996), devido aos processos físicos/químicos que ocorrem na zona de transição, a resistência à compressão do concreto leve pode aumentar entre 20% e 40%.

## **4. METODOLOGIA**

Visando atingir os objetivos propostos neste trabalho, foi desenvolvida uma metodologia experimental para a avaliação e comparação das propriedades e da microestrutura do concreto com agregados leves de argila expandida com as do concreto com agregados de rochas calcárias. Desta forma, serão estudadas propriedades do concreto no estado fresco e no estado endurecido, a partir de três traços distintos.

### **4.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAIS**

#### **4.1.1 Cimento Portland**

O cimento utilizado nos traços de concreto foi o CPV (NBR 5733 – Cimento Portland de alta resistência inicial), que tem como característica principal a alta resistência inicial. Este tipo de cimento foi escolhido por se tratar de um aglomerante hidráulico “mais puro” e por estar disponível comercialmente na região, já que os outros tipos de cimento Portland possuem altos teores de adições como escória de alto forno e pozolanas, que poderiam afetar os resultados das reações químicas de interesse.

Na caracterização do cimento foram feitas análise química, determinação da massa específica, finura, determinação dos tempos de pega, e ensaios de resistência à compressão, de acordo com as seguintes normas:

- NM 23 - Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica;
- NBR 11579 - Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira # 75  $\mu\text{m}$  (nº 200);
- NBR 11581 - Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega;
- NBR 7215 - Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão.

#### 4.1.2 Agregado miúdo

Foi escolhido como agregado miúdo, areia de origem quartzosa, lavada, natural, proveniente do município de Esmeralda – MG.

A composição granulométrica e o módulo de finura foram determinados de acordo com a norma NBR 7217 - Agregados – Determinação da composição granulométrica; e a massa específica foi obtida conforme a norma NBR 9776 – Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman.

#### 4.1.3 Agregado graúdo convencional – Brita calcária

Nos concretos de referência, foi utilizado um agregado graúdo de origem calcária, proveniente da região de Belo Horizonte, como pode ser visto na Figura 4.1.



Figura 4. 1 – Agregado graúdo – brita calcária

Como não foi possível classificar o agregado graúdo de argila expandida, comercializado, de acordo com as especificações da Norma NBR 7211 – Agregados para concreto - devido às suas porcentagens retidas acumuladas, em peso, nas peneiras de abertura nominal não se enquadrarem com os limites granulométricos prescritos nesta norma, foi feita uma composição granulométrica do agregado graúdo convencional (brita calcária) para que este correspondesse à granulometria do argila expandida.

A composição granulométrica e a dimensão máxima característica deste agregado foram determinadas de acordo com a NBR 7217 - Agregados – Determinação da composição granulométrica - e a massa unitária foi obtida conforme a NBR 7251 – Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária.

#### **4.1.4 Agregado graúdo leve – Argila expandida.**

No presente trabalho utilizou-se uma argila expandida como agregado graúdo, cuja matéria-prima foi obtida na região do Recôncavo Baiano e produzida no estado de São Paulo, Brasil. A Figura 4.2, mostra a argila expandida utilizada neste trabalho para a produção de concreto leve.



Figura 4. 2 – Agregado graúdo – argila expandida

Na caracterização física da argila expandida avaliou-se a granulometria, a massa unitária, a massa específica real e a absorção de água do agregado. O ensaio de granulometria foi realizado conforme a NBR 7217 – Agregados – Determinação da composição granulométrica. A massa unitária foi determinada segundo as prescrições da NBR 7251 – Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária. A massa específica real foi obtida por picnometria com Hélio. Para a realização deste ensaio, o material foi moído com a finalidade de expor os poros fechados (isolados), de forma que o volume medido correspondesse somente ao volume do sólido, excluindo-se os poros da amostra. O teor de absorção foi obtido pelo método da norma NBR 9937 – Agregados – Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. A evolução da absorção do agregado foi avaliada com o tempo.

Para caracterização da microestrutura da argila expandida foram realizadas análise química, mineralógica, morfológica e avaliação da porosidade.

Na caracterização química empregou-se a metodologia descrita na Tabela IV.1.

Tabela IV. 1– Técnicas de análise química da argila expandida

Elementos	Metodologia
Ca, Mg	Volumetria, por complexão, com EDTA.
Si	Gravimetria, solubilização com HCl, fluorização com HF.
Al, Na, K	Espectrofotometria de absorção atômica, equipamento AAnalyst 300, Perkin-Elmer, modo chama.
Fe	Volumetria, por oxi-redução, com dicromato de potássio.
C	Combustão direta, com detecção por infravermelho, equipamento CS-244, LECO.
PPC	Calcinação a 1000°C, até peso constante.

Na caracterização mineralógica, as principais fases cristalinas presentes na amostra de argila expandida foram determinadas utilizando-se a técnica de difração de raios-X. Foi empregado o difratômetro da marca PHILIPS, modelo PW-3710 (radiação  $\text{CuK}\alpha$ , corrente de 30 mA e tensão de 40kV, varredura com passo de  $0,060^\circ$  e tempo de coleta de 1,0 segundo por passo). Para análise das fases cristalinas, os valores de “d” (distância interplanar) foram considerados com aproximação de  $\pm 0,01\text{\AA}$  (CULLITY,1956; GUMIERI, 2002).

A análise morfológica e a análise química elementar das fases presentes na argila expandida foram obtidas pela técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) com analisador de raios-X por dispersão de energia (EDS) acoplado. Foi empregado um microscópio marca JEOL, modelo JSM-6360LV, sendo as amostras metalizadas com filme de carbono. As fotomicrografias foram obtidas por elétrons secundários.

A porosidade aparente da amostra foi determinada utilizando-se porosimetria por intrusão de mercúrio. Esta técnica é adequada para avaliação de poros com diâmetros entre 0,04  $\mu\text{m}$  e 300  $\mu\text{m}$ . A análise foi realizada considerando-se o volume dos grãos da amostra na forma de agregados. Foram escolhidos agregados com dimensão de 9,5 mm, por esta dimensão representar grande parte da granulometria da argila expandida estudada neste trabalho.

#### **4.1.5 Água**

A água de amassamento utilizada foi proveniente do abastecimento local, satisfazendo as características exigidas pela norma NBR 11560 - Água destinada ao amassamento do concreto para estruturas classe I, em centrais nucleoeletricas - Qualidade e controle – tais como, ser pura e isenta de partículas que possam afetar a qualidade dos concretos.

## **4.2 DEFINIÇÃO DAS PROPORÇÕES DOS CONSTITUINTES DOS CONCRETOS**

Foi utilizado o método de dosagem recomendado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo IPT/EPUSP, descrito por HELENE e TERZIAN (1992). Este método, conhecido como método das tentativas, baseia-se na obtenção de traços de concreto que proporcionam uma consistência requerida e uma resistência à compressão média ( $f_{cj}$ ) a j dias de idade, sendo o mais recomendado para a determinação de traços de concreto leve. Foi utilizado como parâmetro de dosagem um teor de argamassa de 60% para os dois tipos de concreto. Verificou-se, durante os ensaios preliminares, que esse teor é o mais indicado quando se utiliza agregado leve de argila expandida, com alta absorção.

Para a avaliação do desempenho mecânico dos concretos foram adotados 3 diferentes traços (pobre, médio e rico em consumo de cimento) para os concretos convencionais (referência) e para os concretos leves (utilizando argila expandida como agregado graúdo).



Como foi previsto uma redução da resistência do concreto leve em relação ao concreto de referência, optou-se por avaliar concretos com resistências a partir de 20 MPa, sendo este valor considerado como mínimo para concretos estruturais, de acordo com a norma brasileira NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. A resistência à compressão de 35 MPa foi adotada como limite superior, considerando-se que para valores acima deste, o consumo de cimento para os concretos leves seria bastante elevado, inviabilizando economicamente estes concretos.

A Figura 4.3, ilustra a avaliação visual da consistência requerida do concreto de acordo com o método de dosagem do IPT, para um teor de argamassa de 60% com agregados graúdos dosados em volume.



Figura 4. 3 – avaliação visual da consistência requerida de acordo com o método do IPT.

Foram moldados 4 corpos de prova, sendo um reserva, para cada idade de ruptura de cada traço, sendo ao todo 72 corpos de prova cilíndricos (10 cm de diâmetro e 20cm de altura). Os corpos de prova foram moldados e curados em câmara úmida de acordo com a NBR 5738 – Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto – Procedimento - e foram rompidos nas idades de 3, 7 e 28 dias, de acordo com as especificações da NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos – Método de ensaio. Os resultados de resistência à compressão dos concretos serviram de parâmetro para avaliação da zona de transição e sua influência nas propriedades mecânicas do concreto.

As Figuras 4.4a e 4.4b ilustram os 72 corpos de prova de concreto, quatro por idade de ruptura de cada traço, moldados no mesmo dia, para os ensaios de resistência mecânica, módulo de elasticidade e condutividade térmica.



(a)



(b)

Figura 4. 4 – Corpos de prova de concreto com traço pobre, médio e rico.

Foi feita uma pré-umidificação da argila expandida durante 5 minutos, conforme recomendado por LEITE (2001), para compensar parcialmente a taxa de absorção dos agregados leves, minimizando os problemas de trabalhabilidade do concreto e, ao mesmo tempo, reduzindo o excesso de água na mistura, o que implicaria na redução de sua resistência mecânica. Essa pré-umidificação retirou o material pulverulento que acompanhava o agregado leve, cuja influência na resistência à compressão foi avaliada posteriormente. A Figura 4.5 mostra o baldo utilizado para a pré-umidificação do argila expandida.



Figura 4. 5 – Balde, feito de tela, utilizado para a pré-umidificação da argila expandida.

A quantidade de água que o agregado pode absorver depende ainda da umidade do agregado, do tempo de contato do agregado com a água e da ordem de mistura dos materiais na betoneira (primeiro contato com a água, ou com a pasta de cimento). Desta forma os materiais foram colocados na betoneira na seguinte seqüência:

100% da areia;  
100% do cimento;  
homogeneização a seco;  
20% de água;  
100% argila expandida pré umidificada;  
80% água.

Verificou-se durante os ensaios preliminares, que esta seqüência era a mais indicada pois reduziu a absorção da água pela argila expandida no início da mistura.

Com o objetivo de avaliar a influência do pó que acompanhava a argila expandida na resistência á compressão do concreto leve, foi dosado um traço médio, no qual, não foi feita a pré-umidificação do agregado leve, e sim uma correção da quantidade de água utilizada na mistura. O pó foi retirado através de peneiramento da argila expandida e a quantidade (em massa) foi determinada pela porcentagem que ficou no fundo durante o ensaio de granulometria deste agregado.

### **4.3 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS CONCRETOS**

#### **4.3.1 No estado fresco**

É importante destacar que a resistência do concreto é influenciada por aspectos relativos ao processo de produção (mistura, transporte, lançamento, adensamento e cura). Neste sentido, é importante avaliar a trabalhabilidade do concreto no estado fresco.

A trabalhabilidade do concreto pode ser medida através de sua consistência. Para a avaliação da consistência e da plasticidade dos concretos no estado fresco, foi adotado o método proposto pela Norma Mercosul NM 67 – Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone – Método de ensaio, por ser o mais utilizado nas obras. As Figuras 4.6a e 4.6b ilustram o ensaio de abatimento de tronco de cone do concreto leve com traço médio.



Figura 4. 6 – Ensaio de abatimento de tronco de cone do concreto leve com traço médio.

#### 4.3.2 No estado endurecido

O estudo da utilização da argila expandida como agregado graúdo para concreto foi desenvolvido levando-se em consideração sua influência na massa específica e nas propriedades mecânicas do concreto.

A massa específica do concreto no estado endurecido é influenciada pela massa específica do seus constituintes e pelas proporções da mistura. A granulometria e a forma dos grãos também podem influenciar, proporcionando um melhor distribuição das partículas.

A massa específica dos concretos no estado endurecido foi determinada utilizando-se 3 corpos de prova cilíndricos na idade de 3, 7 e 28 dias, conforme a recomendação proposta pela norma NBR 9778 – Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água por imersão – índice de vazios e massa específica – Método de ensaio.

A resistência à compressão é a propriedade mais especificada na aplicação deste material, ainda que, em certas aplicações, ela pode não ser a propriedade mais importante.

Os ensaios de resistência à compressão axial foram conduzidos de acordo com a NBR 5739 – Ensaio de compressão de corpos de prova de concreto cilíndricos. Foram rompidos corpos de prova cilíndricos de concreto, com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, nas idades 3, 7 e 28 dias, utilizando-se a prensa hidráulica.

O módulo de elasticidade estático, correspondente ao módulo tangente inicial, foi obtido a partir de diagrama tensão-deformação do concreto, sob carregamento estático de compressão axial, em corpos de prova cilíndricos, de acordo com a norma NBR 8522 – Concreto – Determinação do módulo de deformação estático e diagrama – Tensão x deformação. Foram ensaiados 3 corpos de prova para cada traço e tipo de concreto aos 28 dias de idade.

A obtenção do módulo de elasticidade dinâmico dos concretos (módulo de Yong), a partir da medida da frequência de ressonância (longitudinal ou transversal) de peças de concreto, é determinada pela norma americana ASTM-C 215-91. Para a determinação desse módulo, utilizou-se para cada traço proposto 3 corpos de prova cilíndricos, dimensões 10x20 cm, com 150 dias de idade.

#### **4.4 AVALIAÇÃO MICROESTRUTURAL DO CONCRETO**

Para avaliação microestrutural dos concretos foram realizadas análises química e mineralógica. Na caracterização química dos concretos empregou-se a metodologia descrita na Tabela IV.1. Na caracterização mineralógica, as principais fases cristalinas presentes nos concretos foram determinadas utilizando-se a técnica de difração de raios-X. Foi utilizado o Difrátômetro da marca PHILIPS, modelo PW- 3710 (radiação  $\text{CuK}\alpha$ , corrente de 30 mA e tensão de 40kV, varredura com passo de 0,060°/Seg).

Foi avaliada microscopicamente, a morfologia da zona de transição entre o agregado graúdo e a matriz de cimento e realizou-se uma análise química elementar das fases presentes. Essas análises foram obtidas pela técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) com analisador de raios-X por dispersão de energia (EDS) acoplado. Foi empregado um microscópio marca JEOL, modelo JSM-6360LV, sendo as amostras metalizadas com filme de carbono.

As Figuras 4.7a e 4.7b ilustram a preparação das amostras do concreto de referência e do concreto leve, respectivamente, para as análises microscópicas.



(a)



(b)

Figura 4. 7 – Preparação das amostras do concreto de referência e do concreto leve, respectivamente, para a avaliação da morfologia no MEV.



Foi realizada ainda para os dois tipos de concreto uma análise química elementar (MEV) na zona de transição, ao longo de linhas traçadas nas micrografias, entre o agregado graúdo e a matriz de cimento, para avaliar qualitativamente a composição química elementar ao longo da zona de transição.

#### **4.5 ANÁLISES TÉRMICAS**

O estudo das propriedades térmicas do concreto é importante para que possamos conhecer, compreender e prever o comportamento deste material com a variação de temperatura.

A termogravimetria (TG) baseia-se no estudo da variação de massa de uma amostra, resultante de uma transformação física (sublimação, evaporação, condensação) ou química (degradação, decomposição, oxidação) em função da temperatura (MOTHÉ e AZEVEDO, 2002).

Em outras palavras, pode ser definida como um processo contínuo que mede a variação de massa (perda ou ganho) de um material em função da temperatura.

Para uma melhor avaliação e visualização das curvas TG, foram desenvolvidos instrumentos capazes de registrarem a derivada das curvas de TG, curvas de termogravimetria derivada (DTG).

De acordo com MOTHÉ e AZEVEDO (2002), a Análise Térmica Diferencial (DTA) é uma técnica térmica em que se mede a mudança de temperatura (reações endotérmicas ou exotérmicas) entre a amostra e uma substância inerte, quando ambas são submetidas ao aquecimento ou resfriamento. Desta forma, a técnica pode ser utilizada na identificação de compostos.

As curvas TG e DTA foram obtidas a partir de análises térmicas em atmosfera dinâmica de ar, a 10°C/min, em cadinho de alumina. Os ensaios foram realizados em um termoanalisador modelo STA409EP da marca NETZSCH.

Para avaliação da condutividade térmica dos concretos, foi utilizando um aparelho da marca Kemtherm modelo QTM-D3, de acordo com a Figura 4.8. Esse aparelho mede a condutividade térmica de forma rápida, processando automaticamente os dados gerados a partir de uma sonda colocada em uma face plana da amostra. A Figura 4.8 mostra o equipamento utilizado para o ensaio de condutividade térmica dos concretos.



Figura 4. 8 - Aparelho Kemtherm QTM-D3

O princípio de funcionamento desse aparelho foi patenteado no Japão e baseia-se no cálculo matemático do calor transiente que passa pelo fio de uma sonda em contato com a amostra.

A condutividade térmica dos concretos, foi avaliada colocando-se a sonda na face plana dos corpos de prova cilíndricos (sentido radial), para os traços pobre, médio e rico, com 150 dias de idade.



## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 CIMENTO PORTLAND

A Tabela V.1 apresenta as características físicas e os resultados da análise química do cimento utilizado na fabricação dos concretos.

Tabela V. 1 – Características do Cimento Portland CPV.

Índices Físicos	
Dens. Preenchimento (kg/dm <sup>3</sup> )	0,92
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,26
Finura – peneira n° 200 (%)	2,0
Tempo de início de pega (min.)	160
Tempo de fim de pega (min.)	240
Resist. Comp. 3 dias (MPa)	36,8
Resist. Comp. 7 dias (MPa)	43,3
Resist. Comp. 28 dias (MPa)	47,1
Análise Química	
Óxidos	Teores (%)
CaO	67,13
SiO <sub>2</sub>	19,34
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,13
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,67
FeO	0,04
MgO	0,52
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,10
K <sub>2</sub> O	0,68
Na <sub>2</sub> O	0,02
PPC	3,32

As porcentagens dos óxidos encontradas na análise química do cimento se enquadram nos limites estabelecidos pela norma NBR 5733 – Cimento Portland de alta resistência inicial. Já os índices físicos obtidos, correspondem aos valores fornecidos pelo fabricante.

## 5.2 AGREGADO MIÚDO

A Tabela V.2 apresenta os resultados da análise granulométrica e características físicas da areia utilizada.

Tabela V. 2 - Resultados da análise granulométrica, módulo de finura e massa específica da areia.

Peneiras (mm)	Material Retido (gramas)	% Retida	% Retida Acumulada
4,8	0	0	0
2,4	0,9	0	0
1,2	62,6	6	6
0,6	310,3	31	37
0,3	414,3	41	78
0,15	187,0	19	97
Fundo	24,9	3	100
Total	1000,0	100	-
Módulo de Finura	2,18		
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,58		

De acordo com o ensaio de granulometria, o agregado miúdo utilizado nesta pesquisa pode ser classificado como areia fina, pois as suas porcentagens retidas acumuladas, em massa, se enquadram na zona 2 da NBR 7211 – Agregados para concreto.

## 5.3 AGREGADO GRAÚDO CONVENCIONAL – BRITA CALCÁRIA

A massa unitária obtida para o agregado graúdo de origem calcária (brita) foi igual a 1,638 kg/dm<sup>3</sup>. Foi feita uma composição granulométrica com distribuição igual à da argila expandida, como pode ser visto no item a seguir.

#### 5.4 AGREGADO GRAÚDO LEVE – ARGILA EXPANDIDA.

A Tabela V.3 apresenta os resultados dos ensaios de granulometria, massa unitária, massa específica real e a absorção da argila expandida utilizada neste trabalho.

Tabela V. 3 - Resultados da análise granulométrica, dimensão máxima, módulo de finura massa unitária, massa específica real e a absorção da argila expandida.

Peneiras (mm)	Material Retido (gramas)	% Retida		% Retida Acumulada	
19	0	0		0	
12,5	433	9		9	
9,5	2553	51		60	
6,3	1520	30		90	
4,8	393	8		98	
Fundo	100	2		100	
Total	5000	100		-	
Dimensão Máxima Característica (mm)	19				
Módulo de Finura	6,48				
Massa unitária (kg/dm <sup>3</sup> )	0,46				
Massa específica real (g/cm <sup>3</sup> )	2,57				
Absorção de Água por Imersão Total (%)	Tempo (min)				
	5	15	30	60	24h
	15	15	20	25	30

A massa unitária se encontra na faixa entre 300 kg/m<sup>3</sup> e 650 kg/m<sup>3</sup>, correspondente às argilas expandidas produzidas em forno rotativo.

A massa específica real da argila expandida aproxima-se dos valores da massa específica de sua matéria-prima, pois depois de moída, a matriz porosa da argila expandida não mais existe. Assim, quanto maior o agregado de argila expandida, maior será a porosidade intrínseca do material, e menor será sua massa unitária.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela V.3, verifica-se que a argila expandida apresenta alta absorção de água em relação aos agregados convencionais. Esta elevada absorção está relacionada à estrutura porosa dos seus grãos. Verificou-se que durante o intervalo de 24 horas, sugerido pela norma NBR 9776 para agregados convencionais, a absorção de água não se estabilizou. Apesar disso, não foi necessário continuar com o ensaio de saturação, tendo em vista que grande parte da absorção foi obtida com 60 minutos de imersão.

Na Tabela V.4 estão demonstrados os resultados obtidos na análise química da argila expandida. Os teores dos constituintes para que a argila tenha características expansivas também estão listados nesta tabela. Esses limites não devem ser ultrapassados, pois a argila não se fundiria a uma temperatura suficientemente baixa, ou fundiria numa massa insuficientemente viscosa (COUTINHO, 1988).

Tabela V. 4 – Análise química da argila expandida.

Óxidos	Análise química (%)	Limites químicos (%)
SiO <sub>2</sub>	63,35	50 a 65
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,68	5 a 9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,48	16 a 20
K <sub>2</sub> O	4,32	1,5 a 4,5
Na <sub>2</sub> O	0,388	
MgO	3,68	1,5 a 3,5
TiO <sub>2</sub>	0,416	-
CaO	0,248	1 a 4
S	0,017	0 a 1,5
PPC	0,81	6 a 8

Através dos resultados da Tabela V.4, pode-se observar que, no geral, a composição química da amostra encontra-se dentro da faixa considerada para argilas com características expansivas, apresentadas por COUTINHO (1988).

A Figura 5.1 apresenta o difratograma e os principais compostos da argila expandida.

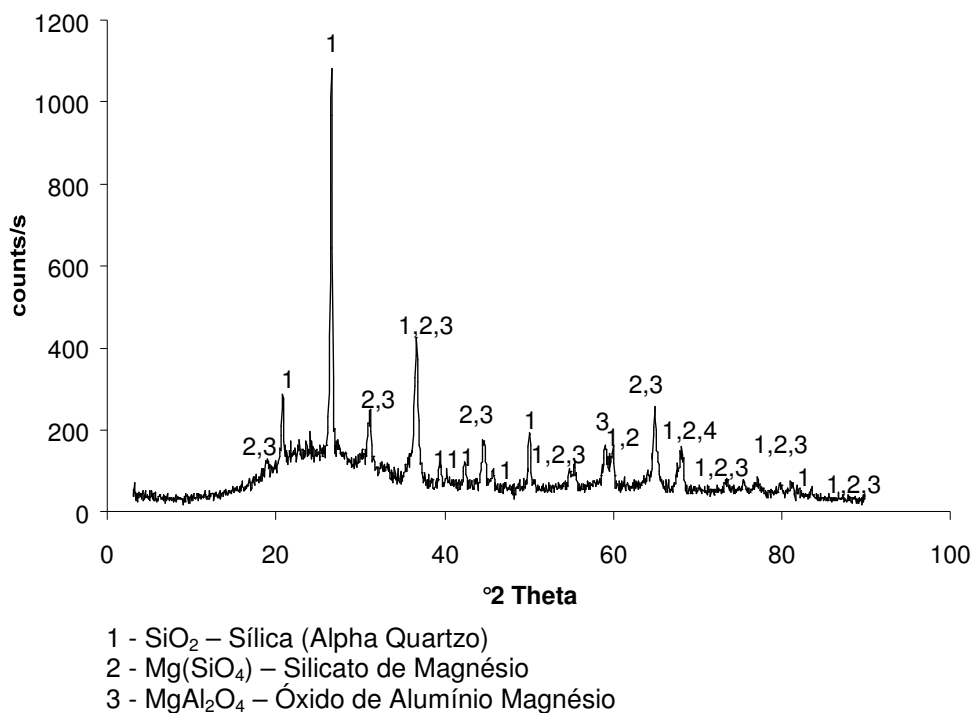


Figura 5. 1 – Difratograma da argila expandida

De acordo com a Figura 5.1, os principais compostos cristalinos encontrados nas amostras de argila expandida analisada foram: Sílica ( $\text{SiO}_2$ ) na forma morfológica de  $\alpha$ Quartzo, Silicato de Magnésio [ $\text{Mg}(\text{SiO}_4)$ ] e Óxido de Alumínio Magnésio ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ) na forma de espinélio. Observa-se no difratograma um halo de amorfismo evidenciando a presença de fases amorfas na argila expandida estudada.

A Figura 5.2, apresenta micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura, ilustrando a morfologia da argila expandida.

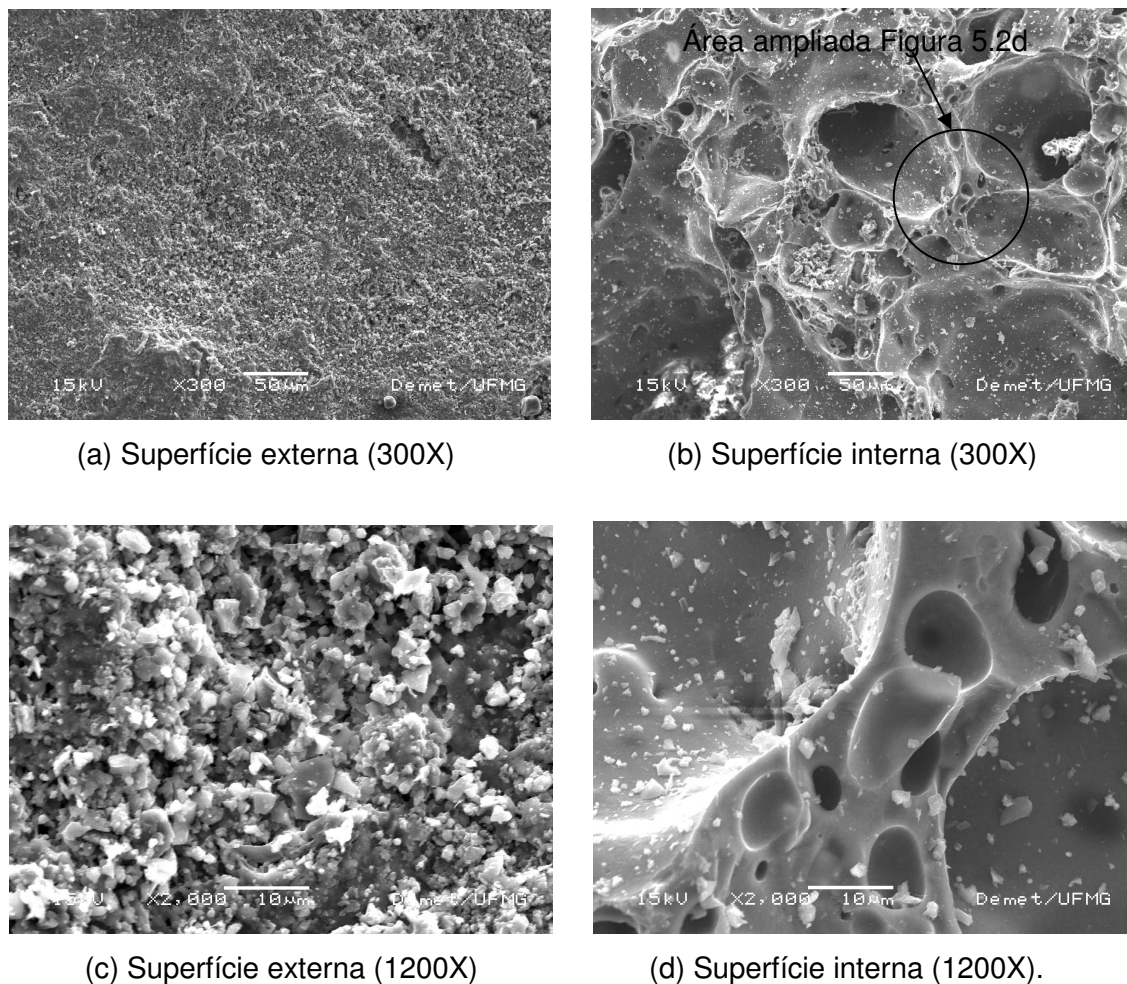


Figura 5. 2 - Micrografias (MEV) - morfologia da superfície externa e interna, para duas ampliações da argila expandida.

Verifica-se que a superfície externa da argila expandida apresenta textura mais lisa (Figuras 5.2a e 5.2c) que a superfície interna da amostra (Figuras 5.2b e 5.2d). Visualiza-se que a superfície interna apresenta maior quantidade de poros, não ocorrendo a interconectividade dos mesmos. A maior porosidade da superfície interna está relacionada ao surgimento de bolhas de gases originados no processo de fabricação da argila expandida.

A Tabela V.5, apresenta a composição química média presente nas áreas das Figuras 5.2a e 5.2b, analisadas por EDS (energy dispersive spectrometry).

Tabela V. 5 – Composição química das áreas analisadas por microscopia eletrônica

Óxidos	Superfície externa %	Superfície interna %
SiO <sub>2</sub>	53,07	56,47
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,47	7,97
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,73	23,42
K <sub>2</sub> O	6,18	4,96
Na <sub>2</sub> O	0,80	0,63
MgO	4,02	2,95
TiO <sub>2</sub>	1,36	1,40
CaO	1,37	2,20

A análise química elementar, expressa a porcentagem dos elementos químicos na forma do óxido mais estável. Verifica-se maiores teores dos óxidos de silício, óxido de ferro e óxido de alumínio tanto na superfície interna quanto externa.

Na Tabela V.6, são apresentados os resultados do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio para o agregado leve.

Tabela V. 6 - Porosimetria por intrusão de mercúrio para a argila expandida.

Área Total de Poros (m <sup>2</sup> /g)	Diâmetro Médio de Poros (µm)	Porosidade Aparente (%)
3116	0,22	18,54

Os resultados mostram que a argila expandida apresenta uma alta porosidade aparente, fato este que corrobora com a alta absorção do agregado.

## 5.5 PROPORÇÕES DOS CONSTITUINTES DOS CONCRETOS

A Tabela V.7 apresenta o consumo dos materiais por metro cúbico de concreto, para cada tipo de traço.

Tabela V. 7 - consumo dos materiais por metro cúbico de concreto

Consumo por metro cúbico de concreto					Fator A/C
Traço	Tipo	Cimento Portland (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado Miúdo (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado Graúdo (kg/m <sup>3</sup> )	
Pobre	Leve	531,75	1060,32	350,95	0,55
	Ref.			1191,11	
Médio	Leve	661,90	928,57	330,95	0,48
	Ref.			1191,43	
Rico	Leve	888,89	706,35	328,89	0,42
	Ref.			1191,11	

A Tabela V.8 apresenta os traços adotados para os concretos analisados e os resultados obtidos no teste de abatimento de tronco de cone (slump teste).

Tabela V. 8 – Traços dos concretos e resultados do slump teste.

Proporções					Fator A/C	Slump (mm)
Traço	Tipo	Cimento Portland (kg)	Agregado Miúdo (kg)	Agregado Graúdo (kg)		
Pobre	Leve	1,00	1,99	0,66	0,55	85
	Ref.			2,24		75
Médio	Leve	1,00	1,40	0,50	0,48	140
	Ref.			1,80		165
Rico	Leve	1,00	0,79	0,37	0,42	165
	Ref.			1,34		170

No geral, a consistência do concreto leve foi maior (menos fluida) que a obtida para o concreto convencional. Conforme descrito no item 3.4.1, esperava-se uma diferença maior entre os valores de consistência dos dois tipos de concreto. No entanto, os valores obtidos no teste de abatimento de tronco de cone do concreto leve se aproximaram dos



valores encontrados para o concreto de referência. Isto pode ser atribuído à forma arredondada da argila expandida, que proporcionou maior trabalhabilidade e maior fluidez aos concretos leve, e a pré-umidificação desse agregado, que contribuiu para evitar que ele absorvesse a água necessária à trabalhabilidade do concreto.

A granulometria fina da areia proporcionou maior consistência ao concreto o que contribuiu para uma menor segregação da argila expandida.

## 5.6 PROPRIEDADES DOS CONCRETOS

### 5.6.1 No estado endurecido

Na Tabela V.9 são apresentados os valores da massa específica dos concretos de referência e dos concretos leves, para coos traços pobre, médio e rico, nas idades 3, 7 e 28 dias.

Tabela V. 9 – Massa específica dos concretos analisados.

Massa específica do concreto (kg/m <sup>3</sup> )				
Traço	Concreto	Idade (dias)		
		3	7	28
Pobre	Ref.	2324,8	2293,0	2293,0
	Leve	1571,1	1634,8	1603,0
Médio	Ref.	2346,1	2367,3	2409,8
	Leve	1613,6	1645,4	1645,4
Rico	Ref.	2388,5	2377,9	2409,8
	Leve	1730,4	1677,3	1719,7

Observou-se que os traços com maior consumo de cimento proporcionaram concretos com maior massa específica.

Os concretos leves analisados podem ser classificados como estruturais, pois apresentaram valores de massa específica entre  $1.400 \text{ kg/m}^3$  e  $1800 \text{ kg/m}^3$ , limites estabelecidos segundo a norma ASTM C 330-77 (1991).

Os resultados da resistência à compressão axial dos concreto, avaliada para as idades de 3, 7 e 28 dias, estão relacionados nas Tabela V.10. O controle tecnológico representa o valor máximo obtido, em laboratório, para cada exemplar.

Tabela V. 10 - Resultados da resistência à compressão axial dos concreto.

Traço	Concreto	Resistência à Compressão (MPa)					
		$f_{c_3}$	Controle Tecnológ.	$f_{c_7}$	Controle Tecnológ.	$f_{c_{28}}$	Controle Tecnológ.
Pobre	Ref.	18,2	19,0	20,0	21,5	23,1	23,1
		18,5		20,2		22,0	
		19,0		21,5		23,0	
	Leve	12,5	14,5	17,1	17,1	15,5	19,3
		8,7		14,9		19,3	
		14,5		17,0		18,0	
Médio	Ref.	21,2	21,2	22,3	23,1	26,3	26,4
		21,0		21,9		26,4	
		20,4		23,1		25,2	
	Leve	14,9	15,5	16,6	18,6	18,4	20,1
		15,5		18,6		18,2	
		15,0		17,5		20,1	
Rico	Ref.	24,3	24,3	26,1	28,3	28,6	30,4
		23,6		28,3		25,3	
		24,0		26,8		30,4	
	Leve	13,4	17,3	12,3	21,6	20,5	23,3
		17,3		18,2		21,7	
		9,0		21,6		23,3	

Há uma relação diretamente proporcional entre a massa específica e a resistência à compressão dos concretos.

Para o traço médio, o concreto leve apresentou uma redução de 20% a 27% da resistência à compressão em relação ao concreto de referência. Percebe-se que essa queda da resistência do concreto leve é maior para o traço rico (29%) e menor para o traço pobre (17%). A maior queda da resistência à compressão, apresentada no traço rico, pode ser explicada pela menor resistência da argila expandida.

Segundo a norma americana ASTM C 330-77, o concreto leve estrutural deve ter uma resistência à compressão maior que 17 MPa aos 28 dias de idade, determinada por ruptura à compressão axial do corpo de prova cilíndrico. No entanto, a norma brasileira NBR 6118 prevê valores mínimos de 20 MPa para concretos estruturais, não mencionando o caso do concreto leve. Observa-se que, apesar da queda de resistência mecânica, o concreto leve atingiu a resistência especificada pelas normas americana e brasileira, estando esta resistência um pouco abaixo somente para o concreto dosado para o traço pobre.

A Figura 5.3, apresenta os gráficos com os resultados de resistência à compressão axial, em função da idade dos corpos de prova, para concretos com traços pobre, médio e rico, respectivamente.

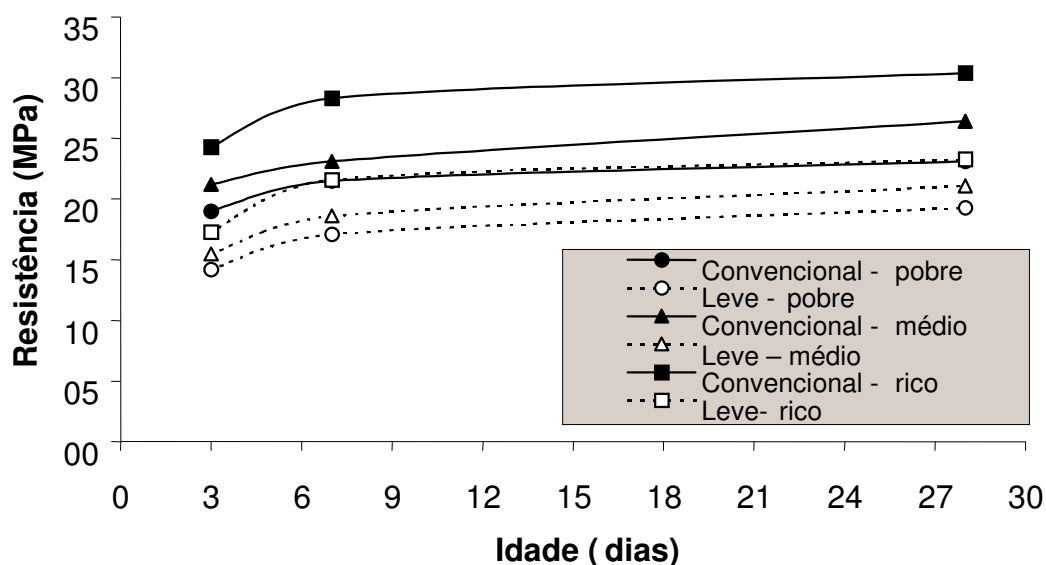


Figura 5. 3 - Resistência à compressão dos concretos analisados.

Verificou-se que a queda de resistência do concreto leve em relação ao concreto de referência, esta mais relacionada com a menor resistência da argila expandida do que, com a correção de água e conseqüente aumento do fator água/cimento.

Pode-se observar a partir do gráfico, que o concreto leve com traço rico apresentou valores de resistência à compressão muito próximos do concreto convencional com traço pobre. Conclui-se, a partir das dosagens desses traços que, para o concreto leve atingir o mesmo valor de resistência à compressão do concreto de referência (20 MPa), seria necessário um aumento de 35% no consumo de cimento. No entanto, teríamos um consumo de areia 30% menor e uma redução média no peso da estrutura de 625 kg/m<sup>3</sup>.

A Figura 5.4 apresenta a Curva de Abrams com os valores de resistência à compressão axial em função do fator água/cimento, aos 28 dias de idade, para os dois tipos de concreto.

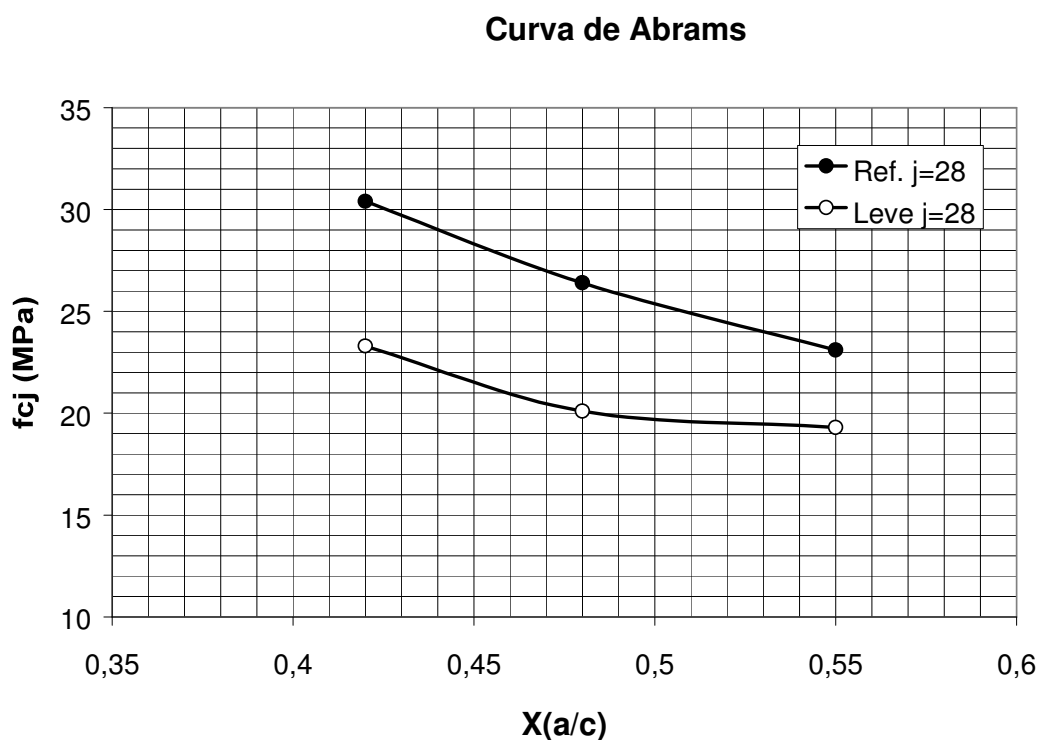


Figura 5. 4 - Curva de Abrams do concreto leve e do concreto de referência.

Observa-se que a inclinação da curva para o concreto leve é mais suave, indicando menor influência do fator água/cimento na resistência à compressão deste concreto em relação ao concreto de referência.

Com o objetivo de avaliar a influência do pó que acompanhava a argila expandida na resistência à compressão do concreto leve, foi dosado um traço médio, sem a pré-umidificação do agregado leve, de forma a evitar a retirada deste material pulverulento. Foi obtido um resultado médio para a resistência à compressão de 19 MPa, enquanto que a resistência à compressão para o concreto leve de mesmo traço, sem o pó, foi de 20 MPa. Concluiu-se, portanto, que o pó que acompanha a argila expandida não influencia na resistência mecânica do concreto.

Na Tabela V.11 são apresentados os valores médios dos módulos de elasticidade estático e dinâmico obtido por frequência de ressonância, para três corpos de prova de cada tipo de concreto.

Tabela V. 11 – Módulo de elasticidade estático e dinâmico dos concretos analisados.

Traço	Concreto	Módulo de elasticidade médio (GPa)	
		Estático (28 dias)	Dinâmico (150dias)
Pobre	Ref.	23,0	44,5
	Leve	15,1	16,2
Médio	Ref.	25,1	41,6
	Leve	16,0	19,6
Rico	Ref.	27,8	43,6
	Leve	16,6	34,4

Os valores encontrados para o módulo de elasticidade estático do concreto leve estão na faixa entre 15000 MPa e 17000 MPa, confirmando valores sugeridos por SCHDELER apud NEVILLE (1982), descritos no item 3.4.4.

Verificou-se que os valores dos módulos de elasticidade estático do concreto leve estão no terço médio dos valores obtidos para o concreto de referência. Esses resultados assemelham-se aos obtidos por SHORT e KINNIBURGH (1963), conforme citado no item 3.4.4.

#### 4.4 AVALIAÇÃO MICROESTRUTURAL DO CONCRETO

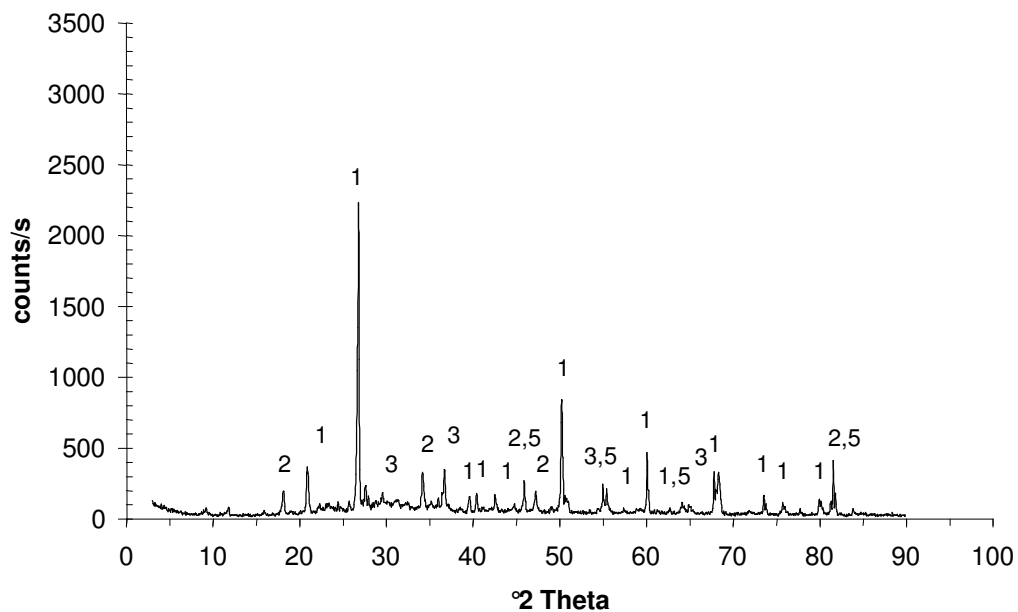
Na Tabela V.12, encontram-se os resultados obtidos na análise química dos concretos leve e de referência.

Tabela V. 12 - Percentagem de óxidos presentes nos concretos (traço médio).

Óxidos	Concreto Leve	Concreto Convencional
SiO <sub>2</sub>	52,52	31,32
CaO	18,44	35,13
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,86	2,83
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,44	0,84
K <sub>2</sub> O	2,06	0,89
Na <sub>2</sub> O	0,23	0,09
MgO	0,82	0,27
PPC	13,20	26,21

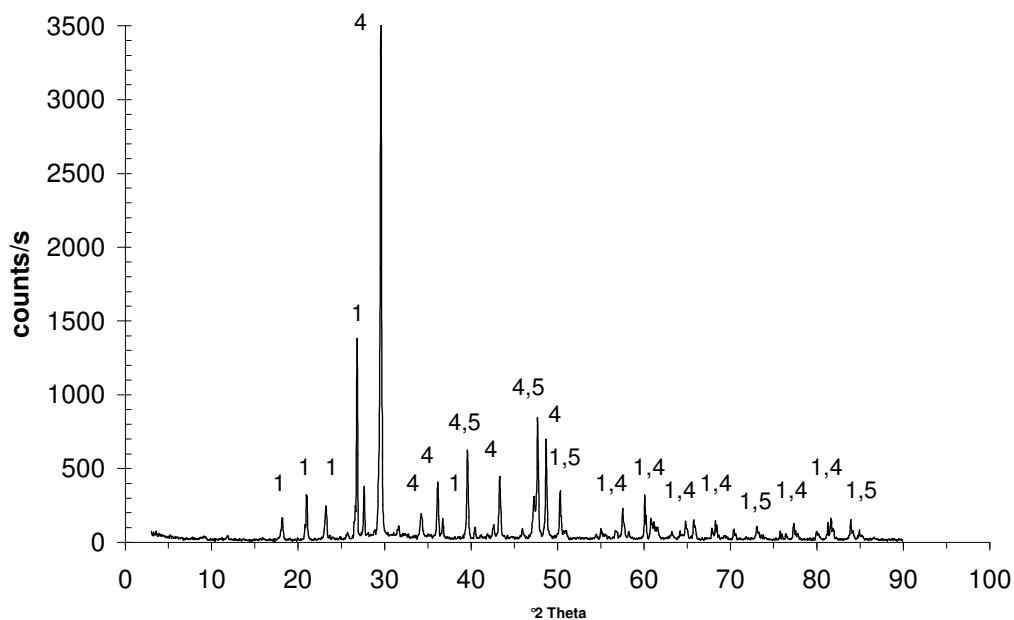
Os resultados mostram teores mais altos de SiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> para o concreto leve devido à argila expandida enquanto que o concreto de referência apresenta porcentagens de CaO maiores devido à brita calcária.

As Figuras 5.5, 5.6, 5.7 e 5.8 apresentam os difratogramas e os principais compostos presentes no concretos leve e convencional, respectivamente para os traços pobre e rico.



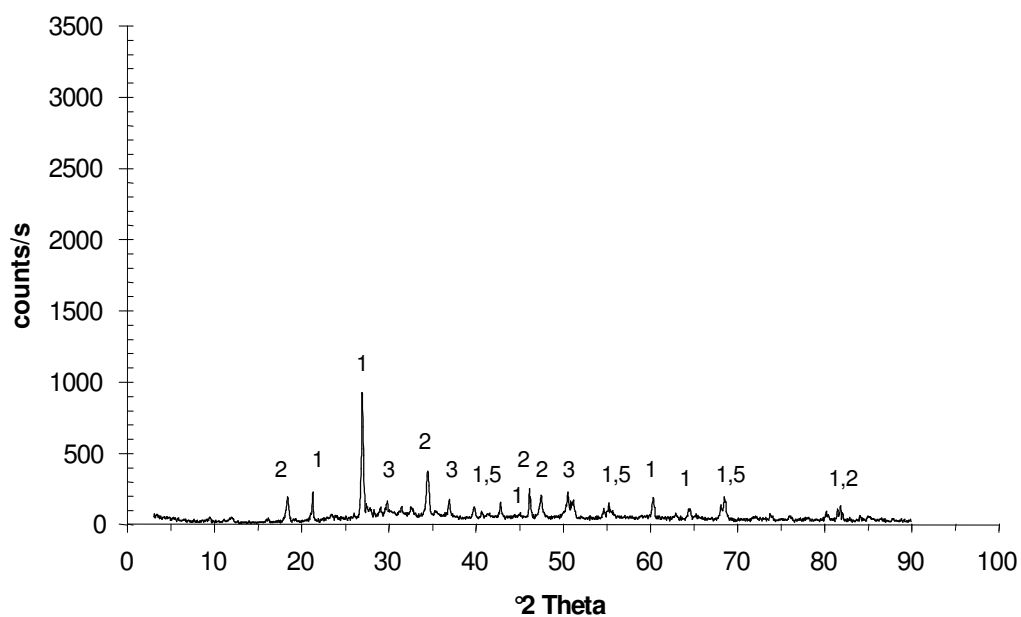
- 1 -  $\text{SiO}_2$  (Dióxido de Silício);
- 2 -  $\text{Ca(OH)}_2$  (Hidróxido de Cálcio);
- 3 -  $\text{Mg Al}_2\text{O}_4$  (Óxido de Alumínio e Magnésio).
- 5 -  $\text{Ca SiO}_4 \cdot 0,3\text{H}_2\text{O}$  (Silicato de Cálcio Hidratado).

Figura 5. 5 – Difratograma do concreto leve – traço pobre.



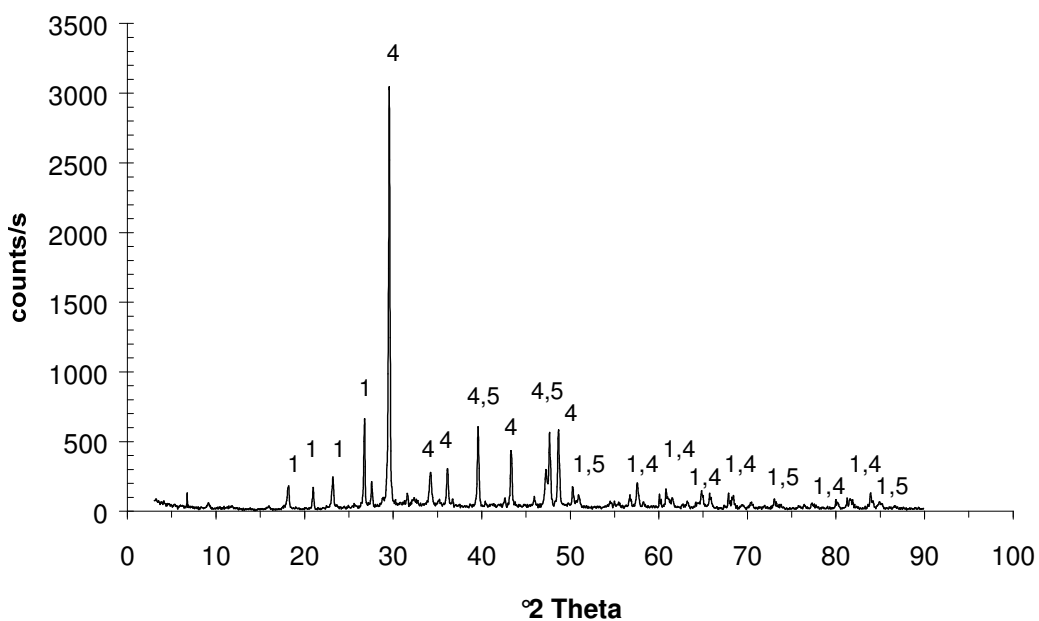
- 1 -  $\text{SiO}_2$  (Dióxido de Silício);
- 4 -  $\text{CaCO}_3$  (Carbonato de cálcio);
- 5 -  $\text{Ca SiO}_4 \cdot 0,3\text{H}_2\text{O}$  (Silicato de Cálcio Hidratado).

Figura 5. 6 – Difratograma do concreto de referência – traço pobre.



- 1 -  $\text{SiO}_2$  (Dióxido de Silício);  
 2 -  $\text{Ca(OH)}_2$  (Hidróxido de Cálcio);  
 3 -  $\text{Mg Al}_2\text{O}_4$  (Óxido de Alumínio e Magnésio).  
 5 -  $\text{Ca SiO}_4 \cdot 0,3\text{H}_2\text{O}$  (Silicato de Cálcio Hidratado).

Figura 5. 7 – Difratoograma do concreto leve – traço rico.



- 1 -  $\text{SiO}_2$  (Dióxido de Silício);  
 4 -  $\text{CaCO}_3$  (Carbonato de cálcio);  
 5 -  $\text{Ca SiO}_4 \cdot 0,3\text{H}_2\text{O}$  (Silicato de Cálcio Hidratado).

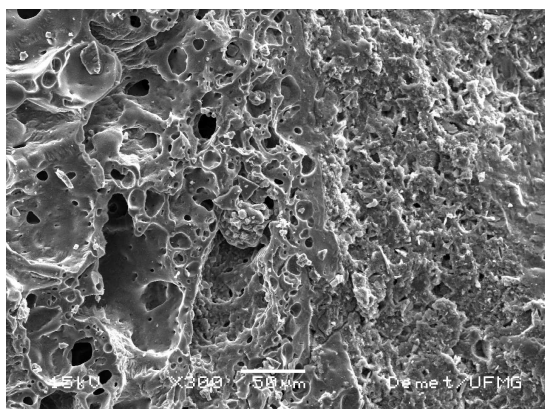
Figura 5. 8 – Difratoograma do concreto de referencia – traço rico.



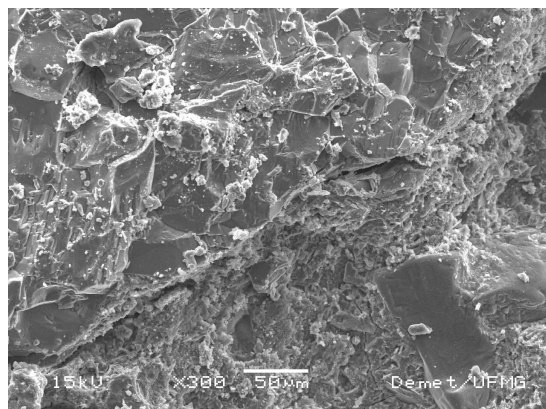
De acordo com as Figuras 5.5 e 5.7, as principais fases encontradas no concreto leve foram: dióxido de silício, hidróxido de cálcio e óxido de alumínio e magnésio. Esta última fase provem da argila expandida. Já para o concreto de referência (Figuras 5.6 e 5.8), as principais fases encontradas foram: dióxido de silício, carbonato de cálcio e silicato de cálcio hidratado. A calcita (carbonato de cálcio) provem do agregado convencional de rochas calcárias.

Para os traços com maior consumo de cimento, pode-se observar qualitativamente, a partir dos difratogramas dos concretos, que a sílica ( $\text{SiO}_2$ ) tornou-se menos predominante. Observou-se também, que para o mesmo consumo de cimento (mesmo traço) o concreto leve apresentou maior predominância de sílica e domos de amorfização característicos de fase amorfa.

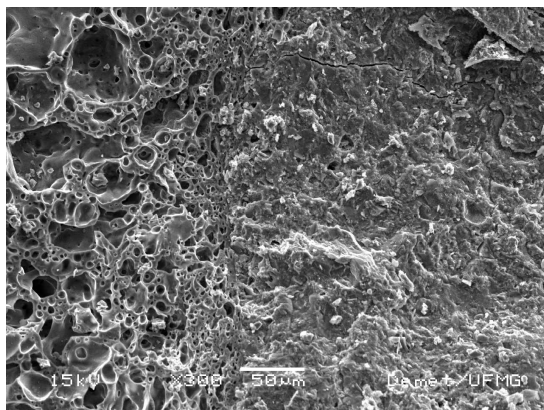
A Figura 5.9 apresenta as micrografias (aumento de 300X) obtidas por microscopia eletrônica de varredura, ilustrando a morfologia da zona de transição dos concretos dosados com traços pobre e rico.



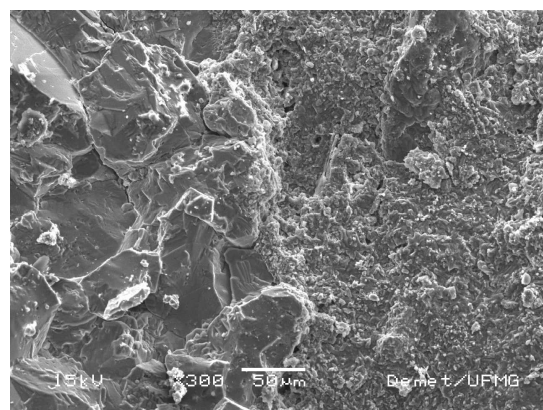
(a) Concreto leve – traço pobre (300X)



(b) Concreto referência – traço pobre (300X)



(c) Concreto leve – traço rico (300X)

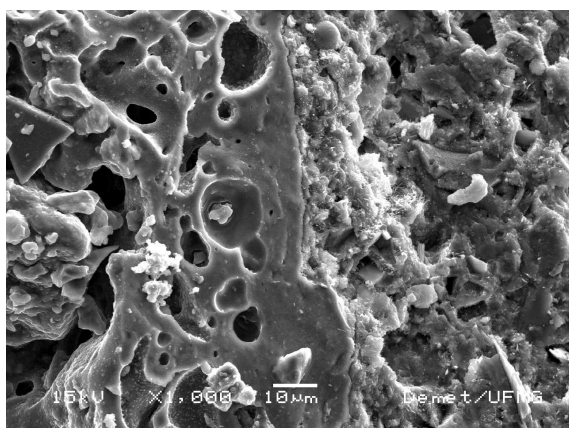


(d) Concreto referência – traço rico (300X)

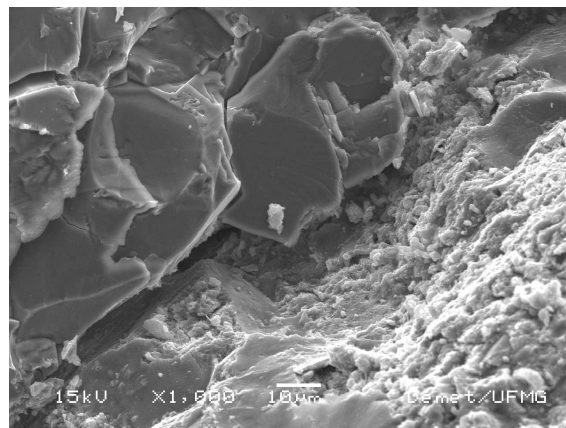
Figura 5. 9 - Micrografias (MEV) - morfologia da zona de transição dos concretos (300X)

Como era de se esperar, a matriz de cimento para o concreto leve dosado com traço pobre (Fig. 5.9a), apresenta-se mais porosa quando comparada ao concreto leve dosado com traço rico (Fig. 5.9c). Observa-se, também, que para os concretos leves (Figuras. 5.9a, 5.9c) não podemos distinguir nitidamente a interface como no concreto de referência (Figuras. 5.8b, 5.8d), caracterizando uma melhor aderência entre o agregado graúdo e a matriz de cimento no concreto leve.

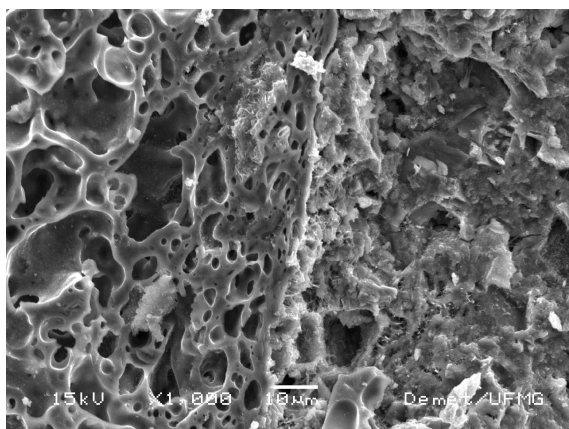
A Figura 5.10 apresenta as micrografias para um aumento de 1000X, facilitando a visualização das interfaces entre os agregados e a matriz de cimento para o concreto leve e concreto convencional.



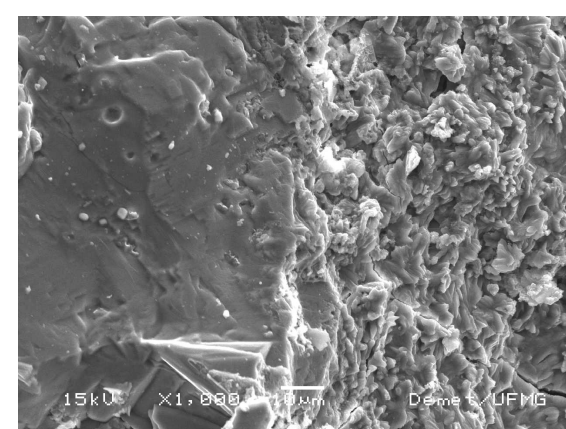
(a) Concreto leve – traço pobre (1000X)



(b) Concreto referência – traço pobre (1000X)



(c) Concreto leve – traço rico (1000X)



(d) Concreto referência – traço rico (1000X)

Figura 5. 10 - Micrografias (MEV) - morfologia zona de transição dos concretos (1000X)

Pode-se observar, qualitativamente, que no concreto leve (Figuras. 5.10a, 5.10c) ocorre uma melhor aderência entre a argila expandida e a matriz de cimento, quando comparamos com a interface entre a brita calcária e a matriz de cimento (Fig. 5.9b)

A Figura 5.11 apresenta com detalhes (ampliação de 2000X), a penetração da pasta de cimento no agregado de argila expandida.

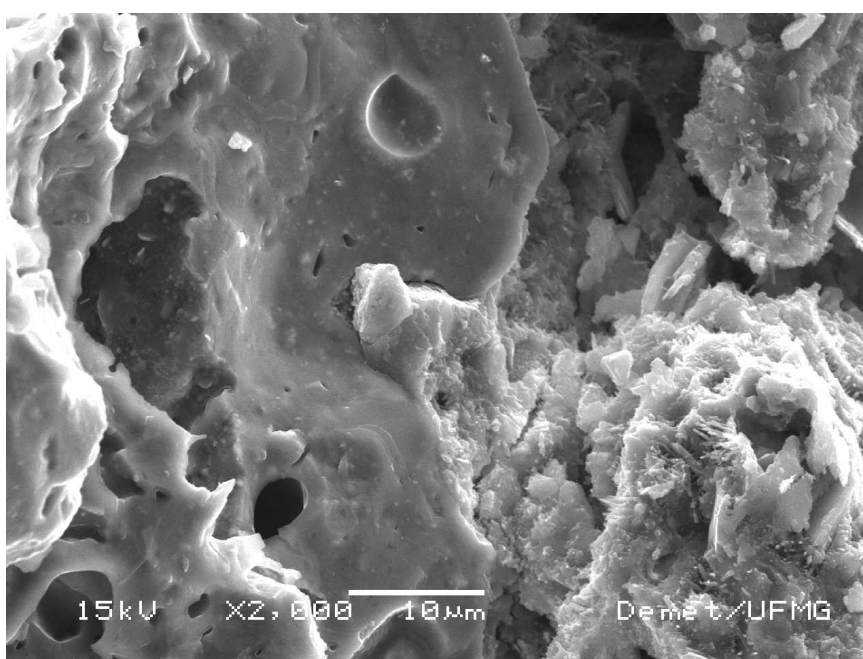
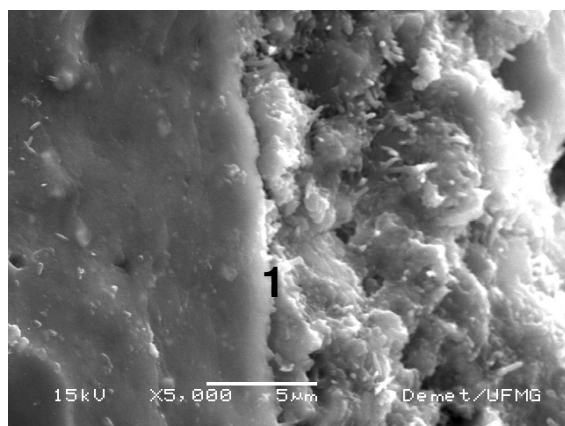


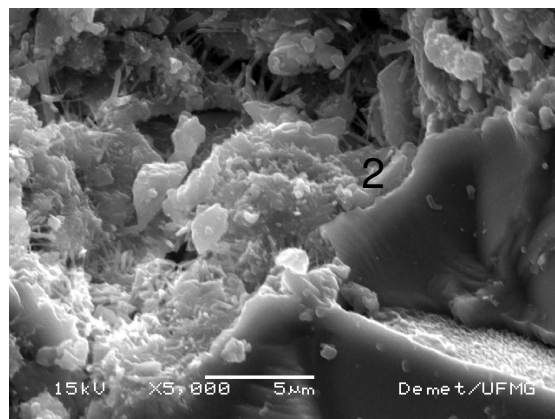
Figura 5. 11 - Micrografia (MEV) - zona de transição do concreto leve (2000X)

Verificamos no concreto leve que, devido à alta porosidade superficial da argila expandida, ocorre uma absorção da pasta de cimento por parte do agregado, promovendo uma interligação mecânica que contribui para o aumento da aderência entre o agregado de argila expandida e a matriz de cimento.

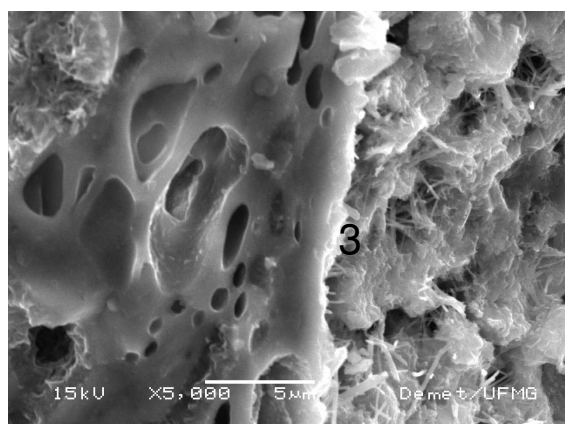
As Figuras 5.12a, 5.12b, 5.12c e 5.12d apresentam micrografias do concreto leve e do concreto de referência com um aumento de 5000X, e na Tabela V.13 encontram-se as composições químicas presentes nas áreas indicadas nas figuras, analisadas por EDS (Espectroscopia por energia dispersiva).



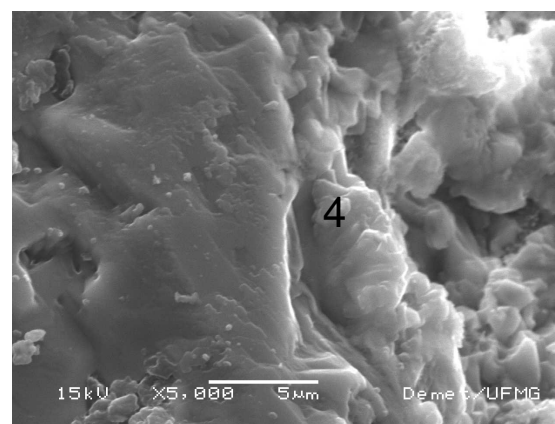
(a) Concreto leve – traço pobre (5000X)



(b) Concreto referência – traço pobre (5000X)



(c) Concreto leve – traço rico (5000X)



(d) Concreto referência – traço rico (5000X)

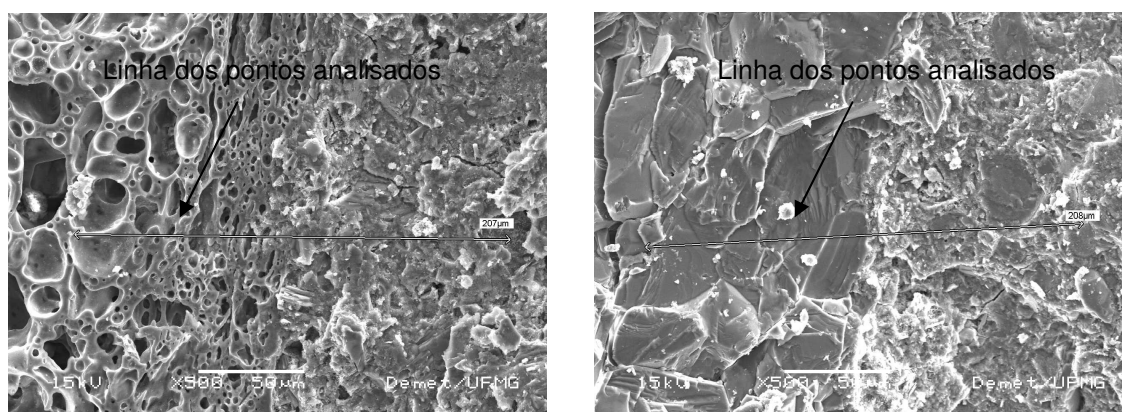
Figura 5. 12 - Micrografias (MEV) - morfologia da zona de transição dos concretos (5000X).

Tabela V. 13 - Composições químicas das áreas indicadas analisadas por EDS.

Interface	Concreto Leve		Concreto Referência	
	Ponto 1	Ponto 3	Ponto 2	Ponto 4
Na <sub>2</sub> O	0,56	0,77	1,33	0,80
MgO	2,52	1,77	1,83	1,54
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,69	9,27	3,49	2,16
SiO <sub>2</sub>	26,32	28,72	8,93	6,45
SO <sub>3</sub>	4,35	4,95	2,75	1,27
K <sub>2</sub> O	1,67	5,32	1,78	1,01
CaO	43,87	44,10	78,93	85,93
TiO <sub>2</sub>	0,23	0,26	0,59	0,33
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,78	4,84	0,38	0,51

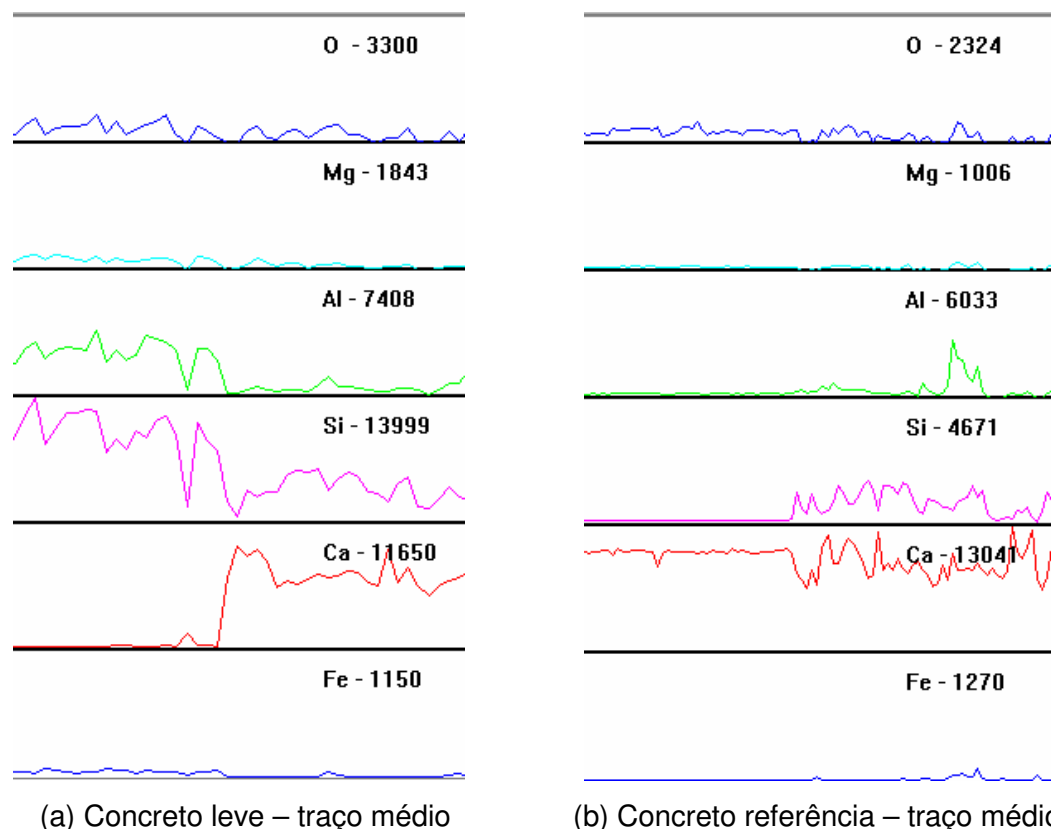
No geral, a análise química evidenciou uma redução dos teores de óxido de cálcio e um aumento dos teores de óxido de silício (sílica), óxido de alumínio (alumina) e óxido de ferro (hematita), na interface entre a argila expandida e matriz de cimento em relação à formada entre a brita e a matriz de cimento.

Na Figura 5.13 são apresentadas micrografias dos dois tipos de concreto, indicando linhas ao longo das quais foi feita uma análise química elementar, cujos gráficos estão apresentados na Figura. 5.14a e 5.14b.



(a) Concreto leve – traço médio (500X) (b) Concreto referência – traço médio (500X)

Figura 5.13 - Micrografias (MEV) - linhas onde foram feitas análises químicas elementares.



(a) Concreto leve – traço médio

(b) Concreto referência – traço médio

Figura 5.14 – Gráficos indicando os teores dos elementos ao longo da linhas.

A análise química elementar (MEV) na zona de transição, ao longo das linhas entre o agregado e a matriz de cimento para os dois tipos de concreto, confirmou evidências anteriores de que para o concreto leve analisado, à medida que passamos do agregado leve para a matriz de cimento, ocorre uma redução dos teores de silício e alumínio e um aumento dos teores de cálcio. Para o concreto de referência, o que ocorre é o oposto do observado para o concreto leve, ou seja, redução do teor de cálcio e aumento dos teores de silício e alumínio.

#### **4.5 ANÁLISES TÉRMICAS**

O estudo das propriedades térmicas do concreto é importante para que possamos conhecer, compreender e prever o comportamento deste material com a variação de temperatura.

A termogravimetria (TG) baseia-se no estudo da variação de massa de uma amostra, resultante de uma transformação física (sublimação, evaporação, condensação) ou química (degradação, decomposição, oxidação) em função da temperatura (MOTHÉ e DAMICO, 2002; SHIMADZU, 1989).

Para uma melhor avaliação e visualização das curvas TG, foram desenvolvidos instrumentos capazes de registrarem a derivada das curvas de TG, curvas de termogravimetria derivada (DTG).

A Análise Térmica Diferencial (DTA) é uma técnica térmica em que se mede a mudança de temperatura (reações endotérmicas ou exotérmicas) entre a amostra e uma substância inerte, quando ambas são submetidas ao aquecimento ou resfriamento. Desta forma, a técnica pode ser utilizada na identificação de compostos (MOTHÉ e DAMICO, 2002; SHIMADZU, 1989).

As Figuras 5.15 e 5.16 apresentam as termoanálises obtidas pelas curvas de termogravimetria (TG), termogravimetria derivada (DTG) e análise térmica diferencial (DTA) para os concretos analisados.

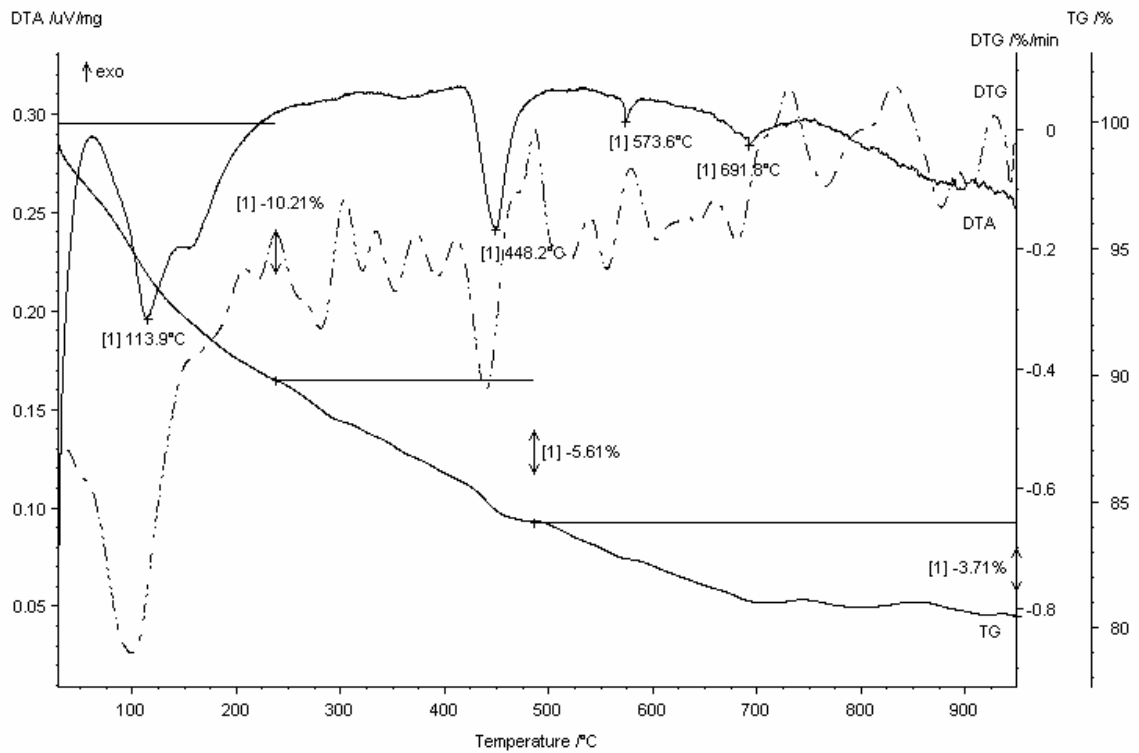


Figura 5. 15 – Termograma do concreto leve

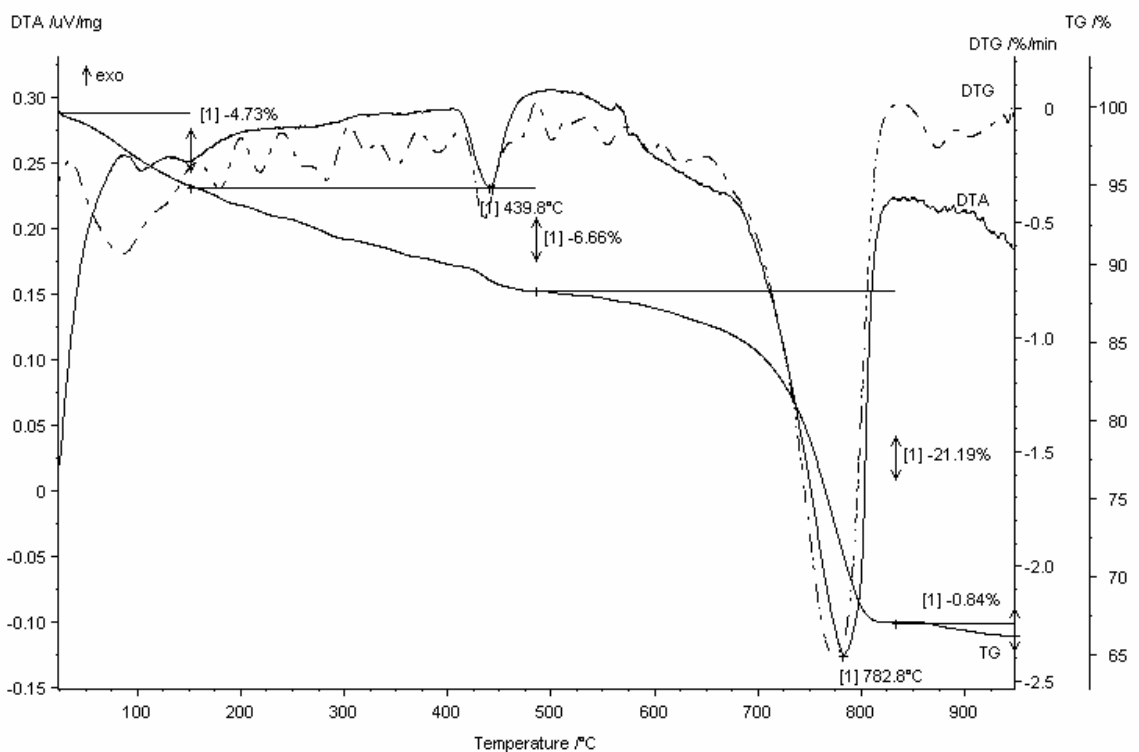


Figura 5. 16 – Termograma do concreto de referência

Pelas Figuras 5.14 a 5.15, pode-se observar que as curvas DTG e DTA apresentaram picos endotérmicos, característicos da decomposição de fases presentes nos concretos. As Tabelas V.14 e V.15, resumem os resultados das termoanálises apresentadas nas Figuras 5.14 a 5.15, para os dois tipos de concreto. As perdas de massa e os intervalos de temperatura foram obtidas pelas curvas de TG, enquanto que as temperaturas de pico foram identificadas nas curvas de DTA.

Tabela V. 14 – Resultados das termoanálises do concreto leve

Concreto leve – traço médio			
Fases Analisadas	Intervalo de temperatura (°C)	Temperatura de pico (°C)	Perda de Massa (%)
H <sub>2</sub> O livre	25 – 237	114	10,21
Ca(OH) <sub>2</sub>	237 – 488	448	5,60
β-quartzo/α-Quartzo	537 – 580	574	-
CaCO <sub>3</sub>	654- 725	692	0,6
Outras perdas	488 – 950	-	3,11
Total			19,52

Tabela V. 15 – Resultados das termoanálises do concreto de referência

Concreto de referencia - traço médio			
Fases Analisadas	Intervalo de temperatura (°C)	Temperatura de pico (°C)	Perda de Massa (%)
H <sub>2</sub> O livre	25 – 150	103	4,72
Ca(OH) <sub>2</sub>	150 – 485	440	6,66
CaCO <sub>3</sub>	485 – 829	783	21,19
Outras perdas	829 – 950	-	0,84
Total			33,41

A partir dos resultados apresentados nas Tabelas V.14 e V.15, verifica-se que a perda de massa total do concreto leve em relação ao concreto de referência, foi menor. Desta forma, o concreto leve apresentou uma curva com maior estabilidade térmica que o concreto de referência, quando submetido a uma varredura de temperatura até 950°C. Conclui-se portanto, que o concreto leve apresenta maior resistência térmica em relação aos mesmos traços do concreto convencional.



Os resultados das análises térmicas de algumas fases dos concretos analisados, são similares aos obtidos por RAMACHADRAN (1969), HLAVÁČ (1983) e GUMIERI (2002).

Na Tabela V.16 são apresentados os valores da condutividade térmica dos concretos de referência e dos concretos leves, para os traços pobre, médio e rico, para a idade de 150 dias.

Tabela V. 16 - Condutividade térmica dos concretos analisados aos 150 dias

Condutividade Térmica (W/m K) ou (J/m s °C)					
Traço	Concreto	Massa do CP (kg)	1ª Leitura	2ª Leitura	Média
Pobre	Ref.	3,60	2,680	2,677	2,679
	Leve	2,45	0,992	0,997	0,995
Médio	Ref.	3,65	2,557	2,519	2,538
	Leve	2,60	1,121	1,140	1,131
Rico	Ref.	3,80	2,110	2,143	2,127
	Leve	2,70	1,247	1,240	1,244

Pode-se observar que os valores encontrados para a condutividade térmica dos concretos convencionais, estão na faixa entre 1,4 e 3,6 J/m s °C conforme sugerido por NEVILLE (1982), enquanto que os valores de condutividade térmica obtidos para o concreto leve analisado, superaram os valores indicados na Tabela III.6 do item 3.4.6.1.

Observou-se que para o mesmo tipo de concreto, não houve uma variação muito grande da condutividade térmica. No entanto, verificou-se que, à medida que o peso do corpo de prova aumentava, ao contrário do que se esperava, a condutividade térmica diminuía para o concreto de referência. Isso pode ser explicado, pela redução da quantidade de agregado graúdo no traço e redução dos teores de agregado miúdo (areia), que possui alta cristalinidade<sup>1</sup>.

Verifica-se ainda, a partir dos valores apresentados na Tabela V.16, que o concreto convencional conduz mais calor quando comparado ao concreto leve. Esse último, apresentou um valor médio de 1,12 W/m K para a condutividade térmica, correspondendo a 45% do valor médio (2,44 W/m K) encontrado para a condutividade do concreto de referência. Essa grande diferença, pode ser explicada pela baixa condutividade térmica do ar presente nos poros do agregado leve.

<sup>1</sup> - Grau de orientação dos cristais dos compostos químicos.

## 6 CONCLUSÕES

O agregado miúdo utilizado nesta pesquisa pode ser classificado como areia fina, o que proporcionou uma maior consistência ao concreto leve, contribuindo para uma menor segregação da argila expandida.

A massa unitária obtida para a brita foi de  $1638 \text{ kg/m}^3$ , enquanto que para a argila expandida o valor encontrado foi de  $460 \text{ kg/m}^3$ , evidenciando a grande diferença de densidade entre esses agregados.

Não foi possível classificar granulometricamente o agregado graúdo de argila expandida, disponível comercialmente, de acordo com as especificações da Norma NBR 7211. Portanto, foi feita uma composição granulométrica do agregado graúdo convencional (brita calcária) para que este correspondesse à granulometria da argila expandida. A dimensão máxima característica encontrada para esses agregados foi igual a 19 mm.

A argila expandida apresenta alta porosidade em relação aos agregados convencionais, devido à estrutura porosa dos seus grãos, o que também aumenta sua absorção. Esta elevada absorção de água, quando não prevista, pode ser prejudicial ao concreto, reduzindo sua trabalhabilidade. Além disso, parte da água necessária para a hidratação dos compostos do cimento seria absorvida por este agregado, reduzindo, a resistência mecânica do mesmo. Como solução, recomenda-se a saturação do agregado, uma pré-umidificação ou a correção do teor de água utilizada na dosagem do traço de concreto.

A argila expandida apresenta basicamente  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , em sua composição química. Na análise por DRX, o difratograma da amostra apresenta um halo de amorfismo, evidenciando a presença de fases amorfas formadas durante o processo de fabricação da argila expandida.

A superfície interna da argila expandida apresenta textura mais rugosa que a superfície externa, apresentando maior quantidade de poros não interligados. Essa porosidade, está relacionada ao surgimento de bolhas de gás originadas no processo de fabricação da argila expandida. A área total de poros foi de 3116 m<sup>2</sup>/g, com diâmetro médio de 0,22 µm, correspondendo a uma porosidade aparente de aproximadamente 19%, fato este, que corrobora com a alta absorção do agregado.

Ao contrário do que se esperava, os valores obtidos no teste de abatimento de tronco de cone do concreto leve, se aproximaram dos valores encontrados para o concreto de referência. Isto pode ser atribuído à forma arredondada da argila expandida, que proporcionou maior plasticidade e maior fluidez aos concretos leves, e a pré-umidificação desse agregado, que contribuiu para evitar que ele absorvesse água necessária à trabalhabilidade do concreto.

Os valores encontrados para o módulo de elasticidade estático do concreto leve estão na faixa entre 15000 MPa e 17000 MPa, encontrando-se no terço médio dos valores obtidos para o concreto de referência.

O concreto leve apresentou uma redução de 20% a 27% da resistência à compressão, em relação ao concreto de referência, para o traço médio. Pode-se observar ainda, que essa queda da resistência do concreto leve é maior para o traço rico (29%) e menor para o traço pobre (17%). A maior queda da resistência à compressão, apresentada no traço rico, pode ser explicada pela menor resistência do agregado leve.

O concreto leve com traço rico, apresentou valores de resistência à compressão muito próximos do concreto convencional com traço pobre. Conclui-se a partir das dosagens desses traços que, para o concreto leve atingir o mesmo valor de resistência à compressão do concreto de referência (20MPa), é necessário um aumento de 35% no consumo de cimento. No entanto, esse traço de concreto leve, apresentou consumo de areia 30% menor e uma redução de 625 kg/m<sup>3</sup> de concreto.

Quando se produz concretos com agregados leves, é necessário acrescentar mais água na mistura, comparando com um mesmo traço feito com agregado natural, devido à alta absorção do agregado leve. Dependendo da quantidade de água acrescentada na mistura, haverá um aumento do fator a/c e conseqüentemente uma redução da resistência mecânica. Assim, para manter a resistência haverá a necessidade de aumentar o consumo de cimento, o que implica no aumento do custo do concreto.

O concreto de referência apresentou massa específica média igual a  $2356 \text{ kg/m}^3$ , enquanto que o valor médio obtido para o concreto leve foi de  $1648 \text{ kg/m}^3$ . Conclui-se, portanto, que os concretos leves analisados podem ser classificados como estruturais, pois apresentaram valores de massa específica entre  $1.400 \text{ kg/m}^3$  e  $1800 \text{ kg/m}^3$ , e resistência à compressão aos 28 dias de idade maior que 17 MPa, limites estabelecidos segundo a norma ASTM C 330-77 (1991).

Concluiu-se que o pó da argila expandida utilizada neste trabalho não influenciou na resistência à compressão do concreto leve pois, para o traço médio, dosado com e sem a pré-umidificação desse agregado, foram obtidos valores de resistência à compressão muito próximos.

As principais fases encontradas no concreto leve foram o dióxido de silício, o hidróxido de cálcio, o óxido de alumínio e magnésio, e o silicato de cálcio hidratado, enquanto que para o concreto de referência, as principais fases encontradas foram o dióxido de silício, o carbonato de cálcio e o silicato de cálcio hidratado.

Pode-se concluir, qualitativamente, que a interface agregado graúdo - matriz de cimento é menos evidenciada para os concretos leves, caracterizando a maior aderência entre este agregado a matriz de cimento. Para agregados porosos ou com uma superfície rugosa, a pasta de cimento ou produtos de sua hidratação podem penetrar nas cavidades ou poros da superfície desse agregado, aumentando a aderência através de uma interligação mecânica.

A análise química elementar, no geral, evidenciou, qualitativamente, uma redução dos teores de cálcio e um aumento dos teores de sílica na interface entre a argila expandida e a matriz de cimento em relação àquela formada entre a brita e a matriz de cimento. Acredita-se que isto pode reduzir a formação do composto hidróxido de cálcio e corroborar para a formação do silicato de cálcio hidratado, promovendo uma densificação da zona de transição.

O concreto leve apresentou maior estabilidade térmica que o concreto de referência, quando submetido à temperatura de até 950°C. Conclui-se portanto, que o concreto leve apresenta maior resistência térmica em relação aos mesmos traços do concreto convencional.

O conhecimento da condutividade térmica dos concretos aplica-se na determinação de suas propriedades isolantes. Pode-se concluir, para um mesmo traço, que o concreto leve apresentou uma redução de 55% da condução de calor em relação ao concreto de referência. Essa grande diferença, pode ser explicada pela baixa condutividade térmica do ar presente nos poros do agregado leve.

Verificou-se que, para o mesmo tipo de concreto, não houve uma variação muito grande da condutividade térmica. No entanto, para o concreto de referência observou-se que, à medida que a massa do corpo de prova aumentava, ao contrário do que se esperava, a condutividade térmica diminuía.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Do ponto de vista microestrutural dos concretos leves, sugere-se alguns estudos:

1. Continuar o estudo das relações entre microestrutura e propriedades do concreto, procurando estabelecer correlações matemáticas, com base em um planejamento estatístico de experimentos e/ou técnicas de modelagem.
2. Pesquisar relações entre a microestrutura do concreto leve e as propriedades tais como permeabilidade e durabilidade.
3. Verificar as propriedades do concreto leve utilizando outros tipos de cimento e acrescentando aditivos aos traços.
4. Estudar a mecânica da fratura para concreto leve.
5. Avaliar a resistência mecânica à tração para concreto leve.
6. Pozolanicidade.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete: reported by ACI 213R-03. Farmington hills, Michigan, 2003, 38 p.***

**AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete. ASTM C 330 – 77. Philadelphia, 1991.***

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP) – *A Versatilidade do Cimento Brasileiro*. Disponível em:

<[http://www.abcp.org.br/imp\\_versat\\_cimento\\_brasil.html](http://www.abcp.org.br/imp_versat_cimento_brasil.html)>.

Citado em fev. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS (ABM) – *Produção de Aço a Oxigênio no Século 21*.

Disponível em: <[http://www.abcp.org.br/imp\\_versat\\_cimento\\_brasil.html](http://www.abcp.org.br/imp_versat_cimento_brasil.html)>.

Citado em fev. 2000.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NM 23 – *Cimento Portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica* ABNT, Rio de Janeiro, 2000.**

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NM 67 – *Concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone* ABNT, Rio de Janeiro, 1998, 8 p.**

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 11579 *Cimento Portland - determinação da finura por meio da peneira # 75  $\mu$ m (nº 200)*. ABNT, Rio de Janeiro, 1991, 3 p.**

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 5733 *Cimento Portland de alta resistência inicial - Especificação*. ABNT, Rio de Janeiro, 1991.**

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 5738 – *Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto - procedimento.*** ABNT, Rio de Janeiro, 1994, 9 p.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 5739 – *Concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.*** ABNT, Rio de Janeiro, 1994, 4 p.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6118 – *Projeto de estruturas de concreto - procedimento.*** ABNT, Rio de Janeiro, 2004, 221 p.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7211 - *Agregados para concreto.*** ABNT, Rio de Janeiro, 1987, 5 p.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7215 - *Cimento Portland – determinação da resistência à compressão.*** ABNT, Rio de Janeiro, 1992, 8 p.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7217 - *Agregados – determinação da composição granulométrica.*** ABNT, Rio de Janeiro, 1987, 3 p.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7251, *Agregado em estado solto – determinação da massa unitária.*** ABNT, Rio de Janeiro, 1982, 3 p.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 8522 – *Concreto – determinação do módulo de deformação estática e diagrama – Tensão-Deformação.*** ABNT, Rio de Janeiro, 1984 , 9 p.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 9776 – *Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman.*** ABNT, Rio de Janeiro, 1986, 3 p.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 9778 – *Argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica.*** ABNT, Rio de Janeiro, 1986, 3 p.



**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 9937 – *Agregados – determinação da absorção e massa específica do agregado graúdo.*** ABNT, Rio de Janeiro, 1987, 6 p.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 11560 – *Água destinada ao amassamento do concreto para estruturas classe I, em centrais nucleoeletricas - Qualidade e controle.*** ABNT, Rio de Janeiro, 1990.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 11581 – *Cimento Portland - determinação dos tempos de pega.*** ABNT, Rio de Janeiro, 1991, 3 p.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 12815 – *Concreto endurecido – Determinação do coeficiente de dilatação térmica linear.*** ABNT, Rio de Janeiro, 1993, 2 p.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 12817 – *Concreto endurecido – Determinação do calor específico.*** ABNT, Rio de Janeiro, 1993, 9 p.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 12655, *Preparo, controle e recebimento.*** ABNT, Rio de Janeiro, 1996, 7 p.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 12820 *Determinação da condutividade térmica.*** ABNT, Rio de Janeiro, 1993 7 p.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 12821, *Preparação de concreto em laboratório.*** ABNT, Rio de Janeiro, 1993 5 p.

BAUER, L.A.F., *Materiais de construção I.* Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1979. 529 p.

CALIXTO, J. M.; GOMES, L. C.; PIMENTA, R. J.; MONTEIRO, R. C.; MELO, C.; ROCHA, G. G. *Concreto Estrutural Leve: Exemplo de aplicação.* IBRACON, 2001. 14 P.

COMÉRCIO, INDÚSTRIA E EXPORTAÇÃO DE MINÉRIOS LTDA. (CIEMIL) – *Diatomita*. Disponível em: <<http://www.ciemil.com.br/diatomita.htm>>.

Citado em fev. 2004.

COSTA, R.M. *Estudo da Durabilidade das Estruturas de Concreto Armado*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1999. 224p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia de Estruturas).

COUTINHO, A. de S. *Fabrico e Propriedades do Betão*. 3.ed. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC, 1997. Volume I.

CULLITY, B. D. *Elements of X-Ray Diffraction*. 2<sup>ª</sup> ed. London: Addison-Wesley Publishing Company, 1956. 511 p.

FURNAS Concreto: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades. São Paulo: Walton Pacelli de Andrade – PINI, 1987. Paginação irregular.

GUMIERI, A. G. *Estudo da Viabilidade Técnica da Utilização de Escórias de Aciaria do processo LD como Adição em Cimentos*. Porto Alegre: Escola de Engenharia da UFRGS, 2002. 226 p. (tese, Doutorado em Engenharia Civil).

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. *Manual de dosagem e controle do concreto*. São Paulo: PINI, 1992. 349 p.

HLAVAC, J., *The Tecnology of Glass and Ceramics: na introdution.*, 1983. Elsevier, p. 11-55

LEITE, M. B. *Avaliação de Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição*. Porto Alegre: Escola de Engenharia da UFRGS, 2001. 270 p. (tese, Doutorado em Engenharia Civil).

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. *Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais*. 1.ed. São Paulo: PINI, 1994. 581p.

MONTEIRO, P. K. M., A. *Microstructure of Concrete and its Influence on the Mechanical Properties*. University of California, 1985. 153 p. (Thesis, Doctor of Philosophy in Civil Engineering).

MOTHÉ, C.G.; AZEVEDO, A.D., *Análise Térmica de Materiais*. São Paulo: editora, 2002. 300p.

NEVILLE, A. M. *Propriedades do Concreto*. 2.ed. São Paulo: PINI, 1982. 828p.

RAMACHANDRAN, V.S.; Sc., M.; PHIL.,D., *Applications of Differential Thermal Analysis in Cement Chemistry*. New York: Chemical Publishing Company, 1969. 308p.

RIBEIRO, C. C.; PINTO, J. D. S.; STARLING, T. *Materiais de Construção Civil*. 2 ed. Belo Horizonte. Escola de Engenharia da UFMG, 2002. 101 p.

RIGO DA SILVA, C. A. *Desenvolvimento e Aplicação de uma Metodologia para Caracterização e Análise Estrutural de Concretos de Cimento Portland*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1998. 410 p. (tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

SOBRAL, H.S. *Concretos Leves, Tipos e Comportamento Estrutural*. 3 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 1996. 59 p.

SCANLON, J. M.; McDONALD J. E. *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials; Thermal Properties*. 4 ed. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1999. P 229-239.

SHIMADZU CORPORATION. Instruction manual DTA-50, differential thermal analyser, Kyoto 1989.

SHIMADZU CORPORATION. Instruction manual TGA-50, thermogravimetric analyser, Kyoto 1989.

SHORT, A. e KINNIBURGH, W. *Lighthweight Concrete*. 1.ed. London: C.R. Books Limited, 1963. 368p.

TAYLOR, H. F. W. *Cement Chemistry* 2<sup>nd</sup> ed. London: Thomas Telford, 1997. 459 p.

WASSERMAN, R.; Bentur, A. *Interfacial Interactions in Lightweight Aggregate Concretes and Their Influence on the Concrete Strength*. *Cement & Concrete Composites* (18), p. 67-76, 1996.

ZHANG, M. H.; GJØRV, O. E. *Microstructure of the Interfacial Zone Between Lightweight Aggregate and Cement Paste*. *Cement and Concrete Research* (20), p. 610-618, 1990.

ZHANG, M. H.; GJØRV, O. E. *Pozzolanic Reactivity of Lightweight Aggregates*. *Cement and Concrete Research* (20), p. 884-890, 1990.