

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

CENTRO TECNOLÓGICO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

GUSTAVO HENRIQUE JANSEN

**CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E DETERMINAÇÃO DE
PROPRIEDADES HIGROTÉRMICAS DE ARGAMASSAS COM
ADIÇÃO DE CINZAS PESADAS**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Celso Peres Fernandes

FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO DE 2007.

GUSTAVO HENRIQUE JANSEN

**CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E DETERMINAÇÃO DE
PROPRIEDADES HIGROTÉRMICAS DE ARGAMASSAS COM
ADIÇÃO DE CINZAS PESADAS**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina.

Prof.^a. Dr.^a. Ana Maria Maliska
Coordenadora do PGMAT
EMC/UFSC

Prof. Dr. Celso Peres Fernandes
Orientador
EMC/UFSC

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ing. Antônio Pedro Novaes de Oliveira
Presidente da Banca
EMC/UFSC

Prof.^a. Dr.^a. Janaíde Rocha Cavalcante
ECV/UFSC

Prof. Dr. Saulo Güths
EMC/UFSC

FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO DE 2007.

À todos que moram em meu coração e fazem dessa
vida muito mais que apenas uma passagem.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pelo maior dom da humanidade, a vida;

À Elisa Bertuol, apesar da distância imposta pela vida, conseguimos nos reencontrar e continuar nossa antiga amizade. Gostaria que soubesses que apesar de estarmos afastados durante a realização de grande parte do mestrado, sempre fizesse parte de minha vida, tendo uma importância muito grande dentro do meu coração.

Aos meus pais, Mário e Alzira, e irmãos, Andreza e Hugo, pela ajuda durante muitos momentos da vida;

À minha segunda família, Clézio, Zaira, Maicol e Alexandre, pela paciência em me suportar durante momentos insuportáveis.

Ao meu cunhado por ser essa pessoa sempre animadora.

Ao professor, orientador e amigo, Celso Peres Fernandes, pelo apoio durante a realização de toda a pesquisa.

À professora Janaíde Rocha Cavalcante, pela ajuda durante as etapas realizadas nas dependências do Departamento de Engenharia Civil;

Ao professor Saulo Güths, pela ajuda durante a montagem da sonda térmica, e pelo companheirismo em algumas trilhas percorridas;

Ao colega Daniel Fernandes Ramos, por ter colaborado durante algumas etapas do procedimento experimental realizado.

À todos os amigos do LMPT, pelas conversas, jogos, arquivos compartilhados e momentos vividos;

Aos amigos de graduação pelas conversas nos corredores do departamento;

À todos que de maneira direta e indireta apresentaram importância em minha vida, porém devido ao espaço aqui disponível, não puderam ter seus nomes citados.

“O maior prazer de um homem inteligente é bancar o
idiota diante de um idiota que banca o inteligente.”

(Confúcio)

RESUMO

Este trabalho objetiva analisar as propriedades de argamassas que, em sua formulação, apresentam resíduos de queima de carvão mineral, produzidos em usinas termoelétricas (cinza pesada). Trabalhou-se com três diferentes formulações de materiais: uma argamassa convencional, fabricada com cimento, cal e areia; uma argamassa com substituição parcial de areia por cinza pesada; e, uma onde toda a areia foi substituída por cinza pesada. As propriedades analisadas foram referentes à caracterização microestrutural das argamassas: massa seca, densidade aparente seca, conteúdo mássico de saturação e porosidade; e também às suas propriedades físicas macroscópicas, nesse caso analisou-se as propriedades de condutividade térmica e de permeabilidade ao vapor. Observou-se que a adição de cinza acarretou mudanças significativas nas propriedades analisadas.

ABSTRACT

This work aims to analyze the properties of mortars that, in their formulation, present waste burning of coal, produced in plants thermoelectrical (bottom ash). One worked there with three different formulations of materials: a conventional mortar, constructed with cement, lime and sand, a mortar with partial replacement of sand by bottom ash, and one where all the sand was replaced by bottom ash. The properties examined were related to the microestructural characterization of mortars: dry mass, density apparent drought, mass content of saturation and porosity, and also their physical properties macroscopic then examined are the properties of thermal conductivity and vapor permeability. It was observed that the addition of ash incurred significant changes in the properties analyzed.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Imagem da CZP obtida com o auxílio do MEV, aumento 50x. (EXTRAÍDO DE SANTOS (2006)).....	29
Figura 2 – Variação da relação volumétrica com a % CZP.....	34
Figura 3 – Massas dos CP na imersão em água.....	36
Figura 4 – Esquema ilustrando a penetração de mercúrio em um meio poroso.....	41
Figura 5 – Poro apresentando “gargalo”.....	42
Figura 6 – Intrusão de mercúrio para 0%CZP em função dos diâmetros porosos.	43
Figura 7 – Intrusão de mercúrio para 50% CZP em função dos diâmetros porosos.	44
Figura 8 – Intrusão de mercúrio para 100% CZP em função dos diâmetros porosos.	44
Figura 9 – Resultados de intrusão de mercúrio em função dos diâmetros porosos.....	45
Figura 10 – Superfície específica das amostras em função dos diâmetros porosos.	46
Figura 11 – Micrografia da argamassa (0% CZP) com aumento de 50X.....	52
Figura 12 – Argamassa (0% CZP) com aumento de 200X.	53
Figura 13 – Argamassa (0% CZP) com aumento de 500X.	53
Figura 14 – Argamassa com 50% CZP com aumento de 50X.....	54
Figura 15 – Argamassa com 50% CZP com 200 de aumento.	55
Figura 16 – Argamassa com 50% CZP com aumento de 500X.....	55
Figura 17 – Argamassa 50% CZP com 1000X de aumento.....	56
Figura 18 – Argamassa com 100% CZP com aumento de 100X.....	57
Figura 19 – Argamassa com 100% CZP com aumento de 200X.....	57
Figura 20 – Ilustração da camada de água fisicamente adsorvida na parede de um poro.	59
Figura 21 – Ilustração da água condensada capilarmente em um poro.	60
Figura 22 – Escoamento de fluido em meio poroso saturado devido a um gradiente de pressão.	62
Figura 23 – Ilustração do processo de difusão de vapor em materiais porosos entre dois ambientes a pressões parciais diferentes.....	64
Figura 24 – Esquema do ensaio realizado por Quenard.....	65
Figura 25 – Aparato utilizado por Alshamsi (EXTRAÍDO DE ALSHAMSI (2002)).....	66
Figura 26 – Corpos de prova utilizados por POSSER (EXTRAÍDO DE POSSER (2004))....	67
Figura 27 – Porta-amostra pronto para o ensaio.....	68
Figura 28 – Esquema do ensaio de permeabilidade ao vapor.....	68

Figura 29 – Preparação do porta-amostra para a medida de massa.....	69
Figura 30 – Medição de massa no ensaio de permeabilidade ao vapor.....	69
Figura 31 – Sondas utilizadas pelos sensores de temperatura e umidade.	70
Figura 32 – Hardware utilizado para a aquisição dos dados das sondas.	70
Figura 33 – Câmara de acrílico.....	71
Figura 34 – Experimento de permeabilidade ao vapor montado.....	71
Figura 35 – Evolução do fluxo de umidade acumulativo.....	72
Figura 36 – Evolução do fluxo de umidade não acumulativo.	73
Figura 37 – Esquema da sonda térmica utilizada por FERNANDES (1990).....	75
Figura 38 – Curva típica de evolução de temperatura na sonda.....	76
Figura 39 – Detalhes técnicos da sonda térmica. (medidas em mm).	78
Figura 40 – Sonda térmica utilizada.....	78
Figura 41 – Conjunto sonda térmica e amostra de argamassa.....	79
Figura 42 – Aparato experimental da sonda térmica.....	79
Figura 43 – Variação da temperatura em relação ao tempo.	81
Figura 44 – Região reta da variação da temperatura em relação ao tempo.....	82
Figura 45 – Permeabilidade ao vapor das amostras com 0% CZP.....	85
Figura 46 – Permeabilidade ao vapor das amostras com 50% CZP.....	86
Figura 47 – Permeabilidade ao vapor das amostras com 100% CZP.....	86
Figura 48 – Comparação entre as permeabilidades calculadas.	87
Figura 49 – Variação da condutividade térmica das amostras com 0% CZP.....	90
Figura 50 – Condutividade térmica das amostras com 50% CZP.....	90
Figura 51 – Condutividade térmica das amostras com 100% CZP.....	91
Figura 52 – Resultados de todos os ensaios de condutividade térmica.....	91
Figura 53 – Condutividade térmica das amostras secas.....	93
Figura 54 – Condutividade térmica das amostras saturadas.....	93
Figura A1 – da umidade relativa com a variação de temperatura.....	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características da comercialização da cinza gerada no complexo Jorge Lacerda (valores em toneladas).	19
Tabela 2 – Valores de densidade aparente e relação a/c de argamassas com adição de CZP. .	19
Tabela 3 – Propriedades mecânicas de argamassas com 28 dias de cura.....	20
Tabela 4 – Caracterização do cimento através de ensaios físicos.	25
Tabela 5 – Caracterização do cimento através de ensaios químicos.	25
Tabela 6 – Características da cal.	26
Tabela 7 – Análise granulométrica da areia. (EXTRAÍDO DE SANTOS (2006)).....	27
Tabela 8 – Características da areia utilizada. (EXTRAÍDO DE SANTOS (2006)).....	27
Tabela 9 – Análise granulométrica da CZP. (EXTRAÍDO DE SANTOS (2006)).....	28
Tabela 10 – Composição química da CZP. (EXTRAÍDO DE SANTOS (2006)).....	28
Tabela 11 – Análise granulométrica dos agregados.	29
Tabela 12 – Fração mássica utilizada na confecção da argamassa.....	31
Tabela 13 – Densidade Aparente das argamassas.	35
Tabela 14 – Conteúdo mássico de saturação das amostras.	37
Tabela 15 – Porosidade em função da % de CZP presente.	38
Tabela 16 – Diâmetro médio dos poros das argamassas em função do teor de cinza presente.	45
Tabela 17 – Porosidade aberta obtida durante o ensaio de intrusão de mercúrio.....	46
Tabela 18 – Soluções salinas e umidades relativas correspondentes.	72
Tabela 19 – Dados técnicos da pasta térmica.	80
Tabela 20 – Conteúdo mássico de umidade das amostras para o ensaio de condutividade térmica.	81
Tabela 21– Permeabilidade ao vapor (Kg/s.m.Pa).	84
Tabela 22 – Média dos valores de permeabilidade (Kg/s.m.Pa).	85
Tabela 23 – Valores de permeabilidade média para as argamassas (Kg/s.m.Pa).	88
Tabela 24 – Resultados dos ensaios de condutividade térmica.	89
Tabela 25 – Resumo de propriedades das argamassas em função da quantidade de CZP presente.	94
Tabela A1 – Propriedades mecânicas de argamassas com 28 dias de cura.....	101
Tabela B1 – resumo dos resultados das sondas de umidade e temperatura.	103
Tabela C1 – Dados do ensaio de condutividade térmica para amostras com 0% CZP.....	104

Tabela C2 – Dados do ensaio de condutividade térmica para amostras com 50% CZP.....	105
Tabela C1 – Dados do ensaio de condutividade térmica para amostras com 100% CZP.....	106

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;

a/c – Relação água-cimento;

ARI – Alta resistência inicial;

CASAN – Companhia Catarinense de Água e Saneamento;

CP – Corpo de prova;

CZL – Cinza leve;

CZP – Cinza pesada;

DV – Desvio padrão;

FRL – Fator de relação volumétrica;

HRm – Umidade relativa menor;

HRM – Umidade relativa maior;

LMPT – Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas;

MEV – Microscópio eletrônico de varredura;

MP – Matéri-prima;

NBR – Norma Brasileira de referência;

SI – Sistema Internacional de Unidades;

SP – São Paulo;

ValoRes – Valorização de Sub-Produtos Industriais e Desenvolvimento de Novos Materiais na Construção Civil;

LISTA DE SÍBOLOS

m_{CZP} – Massa de cinza pesada;

d_{CZP} – Densidade da cinza pesada;

d_{areia} – Densidade da areia;

m_{areia} – Massa de areia.

ρ_{ap} – densidade aparente seca (g/cm^3);

m_{seca} – massa seca (g);

V – volume da amostra (cm^3).

W_{sat} – conteúdo mássico de saturação (%);

m_{Sat} – massa da amostra saturada (g);

n – porosidade (%);

V_{poros} – Volume do espaço poroso (cm^3);

V_{total} – Volume total da amostra (cm^3).

ρ_l – densidade da água (g/cm^3).

D – diâmetro do poro (m)

γ – tensão superficial do líquido (N/m)

θ – ângulo de contato entre o líquido e o sólido (°)

P – pressão da fase mercúrio (N/m^2)

P_g – é a pressão na fase gasosa (Pa);

P_l – a pressão na fase líquida (Pa);

R_1 e R_2 – são os raios principais de curvatura da interface (m);

σ – é a tensão interfacial água-ar (N/m).

Q – Vazão volumétrica (m^3/s);

k – Permeabilidade intrínseca (m^2);

μ – Viscosidade do fluido (m^2/s);

Δp – Diferença de pressão entre a entrada (p_i) e a saída (p_f) do fluido (Pa);

A – Área da seção transversal da amostra (m^2)

l – Comprimento da amostra (m).

D_v – Difusividade do vapor de água na fase gás ($m^2 \cdot s^{-1}$);

P_v – Pressão parcial do vapor de água (Pa);

M – Massa molecular da água (mol);

R – Constante dos gases perfeitos (atm·l/mol·K);

T – Temperatura (K);

x – Coordenada espacial (m).

J_V – densidade do fluxo de vapor ($\text{Kg/s}\cdot\text{m}^2$);

f_V – fluxo de vapor (Kg);

t – tempo (s);

A – área da amostra (m^2).

Q – Potência emitida pela sonda por unidade de comprimento.

λ – condutividade térmica (W/mK);

Q – potência por unidade de comprimento do fio de constatação (W/m);

a – coeficiente angular;

i – intensidade de corrente elétrica (A)

Rm – resistência por unidade de comprimento do fio (Ω/m).

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	17
1.1 – Objetivos da dissertação	21
1.2 – Métodos utilizados.....	21
1.3 – Estrutura da dissertação.....	22
CAPÍTULO 2 – CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS, CONFECÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA DAS ARGAMASSAS	24
2.1 - Argamassa de revestimento.....	24
2.2 – Descrição das matérias-primas	25
2.2.1 – Cimento	25
2.2.2 – Cal.....	26
2.2.3 – Água	26
2.2.4 – Areia	27
2.2.5 – Cinza pesada.....	27
2.3 – Confeção dos corpos de prova.....	30
2.4 – Parâmetros Estruturais.....	32
2.4.1 – Massa seca	32
2.4.2 – Densidade aparente (ρ_{ap}).....	34
2.4.3 – Conteúdo mássico de saturação (W_{Sat})	35
2.4.4 – Porosidade	37
2.4.5 – Distribuição de tamanho de poros	38
2.4.5.1 – Porosimetria por intrusão de mercúrio	40
2.4.5.2 – Análise de imagens digitais	47
CAPÍTULO 3 – PROPRIEDADES FÍSICAS.....	58
3.1 – Fixação e transporte de umidade em materiais porosos	58
3.2 – Meios porosos saturados: permeabilidade intrínseca	61
3.2.1 – Lei de Darcy	61
3.3 – Meios porosos não-saturados: difusão de vapor de água na fase gasosa	62
3.3.1 – “Permeabilidade” ao vapor.....	63
3.3.2 – Medição da “permeabilidade” ao vapor: método das câmaras separadas	64
3.1.3 – Método utilizado.....	67
3.4 – Condutividade térmica efetiva.....	74

3.4.1 – Método da sonda térmica.....	74
3.4.2 – Evolução da temperatura com o tempo ma sonda térmica	75
3.4.3 – Método utilizado.....	77
3.4.3.1 – Princípio de medição	79
3.4.3.2 – Realização do ensaio	80
CAPÍTULO 4 – ANÁLISE DOS RESULTADOS	84
4.1 – “Permeabilidade” ao vapor.....	84
4.2 – Condutividade térmica efetiva.....	89
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES	94
5.1 – Sugestões para trabalhos futuros	96
CAPÍTULO 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
ANEXO A – SOLUÇÕES SALINAS.....	101
ANEXO B – DADOS DAS SONDAS DE UMIDADE RELATIVA E DE TEMPERATURA NO ENSAIO DE PERMEABILIDADE AO VAPOR	103
ANEXO C – CONDUTIVIDADE TÉRMICA	104

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A substituição das ferramentas pelas máquinas, da energia humana pela energia motriz e do modo de produção doméstico pelo sistema fabril constituiu a revolução industrial. Revolução em que se alterou a estrutura da sociedade, em um processo de transformação acompanhado por notável evolução tecnológica. A revolução industrial iniciou-se na Inglaterra na segunda metade do século XVIII.

Com as mudanças ocorridas após a revolução industrial, passou-se a interligar os conceitos de desenvolvimento e industrialização. Essa mudança de pensamento fez com que o crescimento das indústrias ocorresse de maneira acelerada. Porém não se pode pensar nesse crescimento isoladamente, a partir do momento em que ocorre o aumento do número de indústrias ou do tamanho das mesmas, ocorre de maneira paralela um aumento na demanda de energia, de matéria-prima e também um aumento na quantidade de resíduos gerados pelos processos produtivos.

Devido ao fato de que muitos processos utilizam-se de recursos não renováveis, tem sido crescente a preocupação em tornar os processos mais eficientes. Essa eficiência de maneira geral ocorre através de três maneiras:

- Utilização racional de matérias-primas e energia;
- Reciclagem e reutilização de resíduos;
- Substituição de matérias-primas.

Atualmente, reutilizam-se rejeitos industriais como forma de diminuir o impacto ambiental causado pela remoção de matérias-primas. Esse fato faz com que matérias-primas não renováveis, possam ter um ciclo de vida alongado.

O uso de resíduos industriais como insumo para materiais de construção tem crescido significativamente nas últimas décadas, motivado pela futura escassez dos recursos naturais e pela necessidade de se dar um destino adequado a materiais muitas vezes prejudiciais ao meio ambiente.

Para o caso específico de reutilização em materiais de construção civil, as cinzas geradas pela queima de combustível mineral em termoelétricas têm merecido destaque como um rejeito industrial que pode ser utilizado em outra cadeia produtiva como matéria prima.

Em relação à produção nacional de cinzas, Santa Catarina responde por 65% do total produzido e o setor responsável pela maior produção de cinzas é a geração de energia através de usinas termoelétricas, cujo combustível é o carvão mineral.

Nas termoelétricas, o carvão é moído e pulverizado dentro das caldeiras onde ocorre a sua queima e a geração de seus resíduos. Segundo POZZOBON (1999) após a queima os resíduos são resfriados rapidamente (1500°C para 200°C) solidificando-se normalmente como partículas vítreas e esféricas. Essas partículas ao se aglomerarem formam as chamadas cinzas pesadas (CZP) e são retiradas da caldeira por via úmida através de esteiras rolantes. Porém, nem todas as partículas sofrem o processo de aglomeração. Existem partículas que ao resfriarem, solidificam-se e não se unem a outras partículas, essas são denominadas de cinza leve ou volante (CZL) e são retiradas, por meio de fluxo de ar, do interior da caldeira.

Segundo SILVA et. al. (1980) apud POZZOBON (1999) as primeiras utilizações de CZL datam de 1936, sendo utilizado em alguns quilômetros de uma parede de contenção ao redor do lago de Michigan. No Brasil, GITAHY (1963); ABREU (1993) apud POZZOBON (1999) afirmam que, a primeira utilização de cinzas ocorreu na década de 1960 na construção de estruturas de concreto da hidroelétrica de Jupia.

GHAFOORI E BUCHOLC (1997); RANGANATH (1998) apud ANDRADE (2004) confirmam a utilização da CZP como substituto da areia para a produção de blocos de concreto e em alguns países a utilização de cinza como base em pavimentações de estradas.

POZZOBON et. al. (2000) avaliaram o cenário econômico envolvendo a comercialização de cinzas geradas pela queima de combustíveis fósseis na usina termoelétrica de Jorge Lacerda.

Observou-se que com a queima de 100 toneladas de carvão mineral, 42 toneladas de cinzas eram produzidas e dessas 29,4 toneladas correspondem à cinza leve enquanto que 12,6 à cinza pesada, ou seja, a produção de cinzas pesadas corresponde a 30% do total de cinzas produzidas. Referindo-se à venda da cinza gerada, a tabela 1 apresenta a quantidade de carvão consumida nos anos de 1996, 1997 e 1998, e a conseqüente produção de cinzas. É apresentada também a quantidade de cinza que foi comercializada nos referidos anos. Pode-se verificar que a comercialização de cinzas não possui uma demanda que absorva ao menos a parte referente à produção de cinzas leves. Atualmente, a produção anual de cinzas pesadas no complexo termoeletrico Jorge Lacerda corresponde a 240 mil toneladas.

Tabela 1 – Características da comercialização da cinza gerada no complexo Jorge Lacerda (valores em toneladas).

Ano	Carvão consumido	Cinza produzida (CZL / CZP)	Cinza comercializada
1996	1.620.504,25	476.428,24 / 204.183,54	197.936,31
1997	2.091.158,65	614.800,64 / 263.485,99	272.889,78
1998	1.948.533,72	572.868,91 / 245.515,25	247.523,44

POZZOBON et. al. (2000) ainda concluiu que apenas a fração de cinza leve apresenta comercialização e que essa comercialização deve-se totalmente as indústrias de produção de cimento da região da termoeletrica.

SANTOS et. al. (2004) avaliaram a densidade aparente das argamassas no estado fresco bem como a relação entre água e cimento (a/c) utilizada para a confecção das argamassas. A avaliação realizada foi frente à substituição parcial de areia por cinza pesada. A tabela 2 apresenta os resultados encontrados quando da substituição de 50% de areia por cinza pesada. Percebe-se que com a adição de CZP ocorreu um aumento considerável na relação a/c utilizada enquanto que a densidade aparente da argamassa teve seu valor diminuído. Essa alteração é explicada devido ao fato de a cinza possuir uma densidade menor que a da areia e um caráter higroscópico mais atenuado.

Tabela 2 – Valores de densidade aparente e relação a/c de argamassas com adição de CZP.

Traço	Densidade aparente (g/cm ³)	Relação a/c
Sem adição de CZP	2,21	2,08
Com adição de CZP	1,53	4,19

PIAZZA e RUI (1999) utilizaram cinzas provenientes da usina de Charqueadas situada no estado do Rio Grande do Sul e avaliaram a resistência mecânica de argamassas com substituição de areia por cinza de queima. As substituições realizadas foram totais, substituíram-se também quantidades de 15% e 30% de cinzas pesadas por cinzas leves para reduzir a quantidade de água necessária para a confecção da argamassa. Através do uso de cimento de alta resistência inicial (ARI) e de um traço de argamassa utilizado para a avaliação de comportamento mecânico, os autores avaliaram a possibilidade de se usar cinzas volantes ou pesadas em substituição à areia. A tabela 3 apresenta os resultados obtidos para os ensaios de compressão e de tração por flexão para argamassas com 28 dias de cura. Pode-se analisar que com o acréscimo da cinza as propriedades analisadas tiveram uma queda brusca, porém, essa queda pode ser amenizada com o auxílio da utilização de uma quantidade de cinza leve misturada a cinza pesada substituída.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas de argamassas com 28 dias de cura.

Argamassa	Resistência à compressão	Resistência a tração por flexão
Padrão	46 MPa	7,6 MPa
Cinza pesada	8,8 MPa	2,3 MPa
CZP + 15% CZL	14 MPa	3,8 MPa
CZP + 30% CZL	17 MPa	3,9 MPa

Por outro lado, é importante o conhecimento das propriedades físicas dos materiais de construção civil para a avaliação de seu comportamento nas edificações. No caso específico das propriedades associadas à transferência de calor e umidade (propriedades higrotérmicas), estas terão forte influência na durabilidade dos materiais e nas condições de conforto e de higiene nas edificações.

Desta forma, é fundamental a condução de estudos experimentais e/ou teóricos para o estabelecimento das propriedades físicas das argamassas com adição de cinzas pesadas, visando a sua adequada utilização como material de construção.

No presente trabalho serão abordadas as modificações nas propriedades físicas causadas pela substituição da areia por cinzas de queima como matéria-prima para a confecção de argamassas de revestimento. Serão levadas em consideração as características da microestrutura da argamassa bem como as suas propriedades de condutividade térmica e

“permeabilidade” ao vapor. Para apresentar o cenário envolvido na pesquisa sobre a reutilização de cinzas de queima como matéria-prima para produtos da construção civil serão apresentadas algumas pesquisas encontradas. Durante a apresentação dos mesmos, não será obedecida uma ordem cronológica dos trabalhos, a exposição será feita por ordem de necessidade de estudos para a implantação do uso de cinzas em argamassas.

1.1 – Objetivos da dissertação

O objetivo geral do presente trabalho é a avaliação da influência da substituição de areia natural por cinzas pesadas nas propriedades higrotérmicas de argamassas de revestimento.

Os objetivos específicos considerando-se as argamassas com diferentes teores de cinza pesada são:

- Caracterização de aspectos morfológicos da microestrutura;
- Determinação das propriedades físicas macroscópicas de “permeabilidade” ao vapor e de condutividade térmica aparente;
- Análise da modificação das propriedades físicas com base na caracterização microestrutural.

1.2 – Métodos utilizados

Para a realização das etapas da pesquisa utilizaram-se as dependências dos seguintes laboratórios da Universidade Federal de Santa Catarina: Laboratório de Materiais de Construção, Laboratório do Grupo ValoRes, Laboratório de Caracterização Microestrutural e do Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas. Os dois primeiros estão situados no Departamento de Engenharia Civil enquanto que os demais no Departamento de Engenharia Mecânica.

As etapas realizadas durante a pesquisa são listadas abaixo.

- Preparação das matérias-primas (MP):

Para esta etapa as MP foram secas, peneiradas e separadas de acordo com a massa necessária de cada MP para a preparação dos distintos traços de argamassa.

- Confeção das argamassas:

Nesta etapa a argamassa foi confeccionada e foram moldados os corpos de prova (CP).

- Montagem dos aparatos experimentais:

Nesta fase ocorreu o desenvolvimento e a montagem dos equipamentos necessários para a realização das medidas das propriedades das argamassas.

- Realização dos ensaios:

No decorrer dessa fase foram feitas as medidas das características desejadas.

- Análise dos resultados:

Para finalizar o estudo foram realizadas as análises dos dados obtidos.

1.3 – Estrutura da dissertação

A dissertação está estruturada nos seguintes capítulos:

- Capítulo 2 – Caracterização das matérias-primas e da microestrutura das argamassas;
- Capítulo 3 – Propriedades físicas;
- Capítulo 4 – Análise dos resultados;
- Capítulo 5 – Conclusões;
- Capítulo 6 – Referências bibliográficas;

O capítulo 2 aborda as principais caracterizações microestruturais realizadas, desde a caracterização das matérias-primas utilizadas, passando por encontrar a porosidade das argamassas, até a obtenção de imagens de sua microestrutura com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura.

No capítulo 3 serão apresentadas as propriedades físicas medidas, que são a condutividade térmica das argamassas e a sua “permeabilidade” ao vapor de água.

No capítulo 4 serão discutidas as análises dos dados obtidos para as propriedades de “permeabilidade” ao vapor e de condutividade térmica.

No capítulo 5 serão expostas as considerações finais sobre o projeto bem como algumas propostas para futuros trabalhos.

Para finalizar a dissertação o capítulo 6 apresentará as referências bibliográficas utilizadas no transcorrer da presente pesquisa.

CAPÍTULO 2

CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS, CONFECÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA DAS ARGAMASSAS

Neste capítulo apresenta-se o material objeto de estudo, as argamassas de revestimento com substituição parcial e total de areia por cinza pesada. Descrevem-se as matérias-primas utilizadas bem como os procedimentos de confecção das amostras do material. Adota-se um padrão de massa seca para o material de forma a se determinar experimentalmente o conteúdo mássico de saturação e a porosidade. Com a técnica de intrusão de mercúrio caracterizam-se as distribuições de tamanho de poros e de superfície específica das amostras. Por último apresentam-se os procedimentos para a preparação de amostras objetivando a obtenção de imagens de seções planas das argamassas com o auxílio de microscopia eletrônica de varredura.

2.1 – Argamassa de revestimento

Segundo a norma técnica ABNT/NBR 13529 (1995) uma argamassa de revestimento consiste em “uma mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento”.

No presente trabalho objetiva-se avaliar os efeitos causados pela adição de cinzas pesadas (CZP) nas propriedades microestruturais e físicas de argamassas de revestimento. Para tanto, foram utilizadas três composições distintas. A primeira composição da argamassa é formada por cimento, cal e areia. Esse traço é adotado como referência e suas propriedades como as propriedades padrões das argamassas. O traço padrão consiste em 10% em massa de cimento, 20% de cal e 70% de areia. Os outros dois traços foram confeccionados substituindo-se parcialmente e totalmente a areia por CZP.

2.2 – Caracterização das matérias-primas

2.2.1 – Cimento

O cimento utilizado na preparação das argamassas foi o cimento Portland – CP-II-F – da marca Itambé, lote 06/2001. Escolheu-se essa classe de cimento devido ao fato de não apresentar adições não inertes, tais como pozolanas e escórias, possibilitando dessa forma estudar a atividade pozolânica referente à cinza pesada. A tabela 4 apresenta as características do cimento fornecidas pelo fabricante ressaltando-se as propriedades de resistência nos diversos dias de cura e a massa específica do cimento. Na tabela 5 apresentam-se os resultados fornecidos pelo fabricante referentes aos ensaios químicos observando-se a predominância dos compostos óxido de cálcio (CaO) e dióxido de silício (SiO₂).

Tabela 4 – Caracterização do cimento através de ensaios físicos.

ENSAIOS FÍSICOS	MÉDIA / DESVIO
Peneira 200 (%)	2,69 / 0,28
Peneira 325 (%)	11,98 / 0,80
Início de pega (min)	186 / 10,20
Fim de pega (min)	248 / 8,90
Resistência 1 dia (MPa)	14,80 / 0,80
Resistência 3 dias (MPa)	25,30 / 1,30
Resistência 7 dias (MPa)	30,50 / 0,90

Tabela 5 – Caracterização do cimento através de ensaios químicos.

ENSAIOS QUÍMICOS	MÉDIA / DESVIO
Perda ao fogo (%)	5,01 / 0,33
SiO ₂ (%)	18,28 / 0,19
Al ₂ O ₃ (%)	4,20 / 0,08
Fe ₂ O ₃ (%)	2,38 / 0,05
CaO (%)	60,46 / 0,24
MgO (%)	4,94 / 0,08
CaO livre (%)	1,52 / 0,25
SiO ₃ (%)	2,87 / 0,07
Resíduo insolúvel (%)	1,24 / 0,22

2.2.2 – Cal

Utilizou-se a cal hidratada classificada como CH-III da marca Minercal. Essa cal foi produzida na unidade da Votorantin (SP), pertencendo ao lote referente ao mês de maio de 2002. A tabela 6 apresenta as principais características do lote de cal utilizado, como nos dados referentes ao cimento esses também foram fornecidos pela fabricante. Percebe-se a grande quantidade de óxidos presentes na cal e o seu grande valor de retenção de água.

Tabela 6 – Características da cal.

Ensaio	Resultados (%)
Perda ao fogo	28,40
CO ₂	11,80
Água combinada	16,50
Umidade	3,10
SiO ₂ + resíduos insolúveis	4,80
Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃	1,00
CaO	43,80
MgO	22,00
Óxidos totais	91,90
Óxidos não hidratados	5,80
Retenção de água	76,80

2.2.3 – Água

Para a confecção dos corpos de prova utilizou-se água fornecida pela Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN) para a rede hídrica local.

No presente trabalho utilizou-se as mesmas matérias primas e os mesmos traços de argamassa que os utilizados por SANTOS (2006). As caracterizações referentes à areia e à cinza pesada apresentadas a seguir foram obtidas por SANTOS (2006).

2.2.4 – Areia

A areia utilizada tem origem na região da grande Florianópolis, extraída de rio. Fez-se uso dessa areia devido ao fato dela representar de maneira significativa as areias da região. A tabela 7 apresenta as características granulométricas da areia utilizada, onde se verifica que na sua grande totalidade a areia apresenta grãos menores que 1,2 mm. A tabela 8 apresenta algumas características do lote de areia, podendo-se visualizar as características de massa específica, quantidade de matéria orgânica e a porcentagem de material extraído no ensaio de perda ao fogo.

Tabela 7 – Análise granulométrica da areia. (EXTRAÍDO DE SANTOS (2006))

Peneira (mm)	% retida	% retida acumulada
2,4	0	0
1,2	1	1
0,6	37	38
0,3	33	71
0,15	20	91
Passou	9	100

Tabela 8 – Características da areia utilizada. (EXTRAÍDO DE SANTOS (2006))

Característica	Média
Massa específica (kg/dm ³)	2,57
Matéria orgânica (ppm)	< 300
Perda ao fogo (%)	1,15

2.2.5 – Cinza pesada

A cinza pesada utilizada provém do complexo termoelétrico Jorge Lacerda, localizado no município de Capivari de Baixo, no estado de Santa Catarina. A tabela 9 apresenta uma análise granulométrica da CZP utilizada onde se verifica que até a peneira de 1,2 mm não foi retida nenhuma parcela de partículas de cinza pesada. Outra característica importante foi que 26% de CZP passou por todas as peneiras, esse valor é consideravelmente maior que a porcentagem de areia como pode ser verificado através da comparação com os valores da tabela 7.

Tabela 9 – Análise granulométrica da CZP. (EXTRAÍDO DE SANTOS (2006))

Peneira (mm)	% retida	% retida acumulada
2,4	0	0
1,2	0	0
0,6	12	12
0,3	24	26
0,15	38	74
Passou	26	100

Na tabela 10 encontra-se a composição química da CZP onde se percebe a predominância dos compostos, dióxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de potássio (K_2O), frente aos demais compostos presentes na amostra.

Tabela 10 – Composição química da CZP. (EXTRAÍDO DE SANTOS (2006))

Análise	(%)	Análise	(%)
SiO_2	41,789	SnO_2	0,046
Al_2O_3	38,209	V_2O_5	0,031
K_2O	9,043	SO_3	0,029
Fe_2O_3	4,366	MnO	0,026
TiO_2	0,81	ZnO	0,014
CaO	0,698	Y_2O_3	0,013
MgO	0,402	SrO	0,013
ZrO_2	0,071	CO_2	4,44

Para realizar uma caracterização visual do aspecto da cinza pesada, na figura 1 apresenta-se uma imagem, obtida com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura, de partículas de CZP. Observa-se que as partículas de CZP possuem formatos extremamente irregulares e uma significativa porosidade superficial.

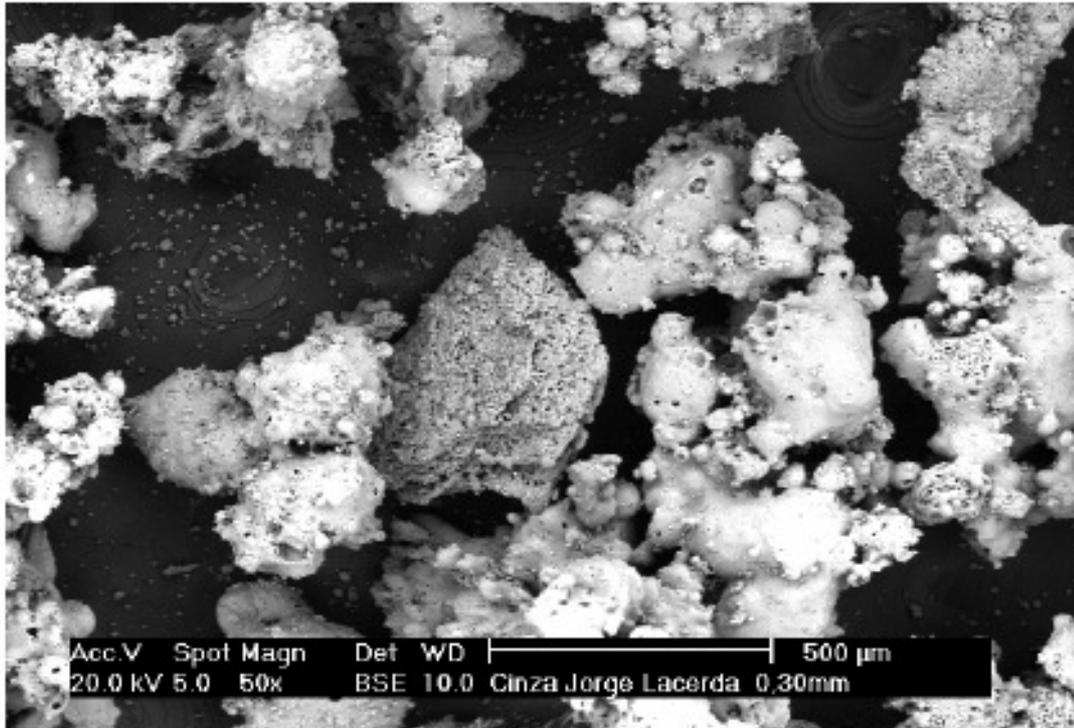


Figura 1 – Imagem da CZP obtida com o auxílio do MEV, aumento 50x. (EXTRAÍDO DE SANTOS (2006))

Para finalizar a caracterização dos agregados utilizados para a confecção das argamassas (areia e CZP), a tabela 11 apresenta as propriedades granulométricas da areia, da cinza pesada e de uma mistura de 50% areia e 50% cinza pesada. A porcentagem calculada está relacionada ao volume de cada agregado. Cabe ressaltar que os valores apresentados referem-se ao valor da porcentagem acumulada do material retido em cada peneira.

Tabela 11 – Análise granulométrica dos agregados.

Peneira (mm)	Areia (%)	CZP (%)	Mistura (%)
2,4	0	0	0
1,2	1	0	1
0,6	37	12	29
0,3	33	24	31
0,15	20	38	25
Passou	9	26	14

2.3 – Confeção dos corpos de prova

As amostras foram preparadas tendo-se como referência o traço base de 10% em massa de cimento, 20% em massa de cal e 70% em massa de areia. A confecção desse traço permitiu adotar uma referência das propriedades medidas, para a comparação entre amostras com e amostras sem adição de cinza pesada em sua constituição. A partir disso o traço base passou a denominar-se referência (0% CZP).

A substituição gradativa da areia pela CZP foi realizada obedecendo-se uma função volumétrica dos dois constituintes. Fizeram-se dois tipos de substituições da areia pela CZP: uma substituindo parcialmente (50% CZP) e outra fazendo uma substituição total (100% CZP). A base de cálculo utilizada para a dosagem substitutiva é apresentada segundo a equação 1, vê-se que:

$$m_{CZP} = \frac{d_{CZP}}{d_{areia}} \times m_{areia} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

m_{CZP} – Massa de cinza pesada;

d_{CZP} – Densidade da cinza pesada;

d_{areia} – Densidade da areia;

m_{areia} – Massa de areia.

Os traços utilizados para a preparação da argamassa estão apresentados na da tabela 12. Devido ao fato da densidade da CZP ser muito menor que a da areia, a porção mássica de areia é muito maior que a da CZP. A água é adicionada para fornecer a trabalhabilidade necessária ao material para a etapa de moldagem dos corpos de prova. A relação entre a quantidade de água e a quantidade de Cimento (a/c) é de 0,29.

Tabela 12 – Fração mássica utilizada na confecção da argamassa.

Traço	Cimento	Cal	Areia	CZP
0% CZP	1	2	7	0
50% CZP	1	2	3,50	1,50
100% CZP	1	2	0	3

Para a mistura das matérias-primas da argamassa utilizou-se um misturador mecânico com reservatório em aço inoxidável. O procedimento de manuseio do agitador foi:

- Colocou-se todos os materiais (cimento, cal, areia, CZP, água) juntos;
- Mistura em velocidade baixa por 1 minuto;
- Mistura em velocidade alta por 1 minuto;
- Incorporação do material segregado na lateral da cuba à argamassa;
- Mistura em velocidade alta por 1 minuto;
- Moldagem dos CP.

Para as análises propostas neste trabalho foram confeccionados CP cilíndricos de 5x10 cm e de 5x0,5 cm. Os CP com 10 cm de altura foram preenchidos em três camadas de argamassas sendo que a cada camada colocada, o molde era submetido a 15 ciclos em uma mesa de queda livre, os moldes menores eram preenchidos em apenas uma camada e submetidos a 5 ciclos de adensamento em mesa de queda livre, para o total preenchimento do molde.

Após esse procedimento os moldes foram isolados da atmosfera através de placas de vidro, com o intuito de evitar a evaporação da água da argamassa. Após 24 horas os CP já apresentaram uma boa resistência mecânica possibilitando assim a desmoldagem dos mesmos. Após a desmoldagem os CP foram embalados separadamente em filme plástico e após isso embalados também separadamente em papel alumínio, tudo isso para evitar ao máximo qualquer alteração que o ambiente poderia provocar na argamassa durante a cura dos corpos de prova. Depois de embalados os CP foram armazenados em uma sala com temperatura controlada em $23 \pm 1^\circ \text{C}$ e umidade controlada em $55 \pm 5\%$ por um período de 28 dias.

Após o período de cura de 28 dias as amostras foram desembaladas e acondicionadas em estufa com temperatura de 50°C . Esse procedimento foi realizado para retirar o restante da umidade presente no CP e evitar assim uma continuação no processo de cura da argamassa.

Diariamente realizavam-se medidas das massas dos CP a fim de se verificar quando a variação de massa dos mesmos não seria mais significativa e assim assumir que os mesmos estavam completamente secos.

No presente trabalho serão consideradas apenas as propriedades do material no estado endurecido, não se investigando suas propriedades no estado fresco.

2.4 – Parâmetros estruturais

2.4.1 – Massa seca

Para a caracterização de propriedades da argamassa como as apresentadas a seguir – densidade aparente, conteúdo mássico de saturação e porosidade – deve-se adotar um padrão de massa seca para as amostras. A massa seca da argamassa curada está associada à condição do material de não apresentar umidade condensada nos poros.

No presente trabalho, o estado seco do material é obtido dispondo-se as amostras em estufa com temperatura controlada e na presença de um agente dessecante. As amostras permanecem na estufa, realizando-se periodicamente a medida de suas massas, até a sua estabilização, definindo-se então os valores de suas massas secas.

Para a realização da secagem, utilizou-se como base os parâmetros adotados por MEROUANI (1987) e FERNANDES (1990). Fez-se uso de uma estufa com temperatura controlada em 75° C e com o uso de sílica-gel em seu interior. A sílica-gel é utilizada, pois é um excelente agente dessecante, responsável pela retirada da umidade do ar no interior da estufa.

Segundo FERNANDES (1990) um dos maiores problemas encontrados durante a etapa de secagem das amostras é o valor da temperatura no interior da estufa. Isso porque se a temperatura for elevada de maneira demasiada fará com que a matriz sólida da argamassa seja desidratada, alterando significativamente a microestrutura da argamassa. SANTOS (2006) afirma que alguns produtos resultantes da hidratação do cimento, tais como etringita e gipsita, iniciam suas desidratações nas faixas de 60° C e 80° C, respectivamente. Por outro lado, a

secagem em ambiente com valores baixos de temperatura não promove a retirada da água fisicamente adsorvida na superfície dos poros.

Para se chegar ao padrão de massa seca, diariamente mediam-se as massas dos corpos de prova e, quando medidas consecutivas não apresentavam variação significativa esse valor era adotado como massa seca.

As amostras levaram em média 25 dias para secarem (estabilização da massa) nas condições adotadas. Durante a secagem percebeu-se dois comportamentos importantes. O primeiro está no fato de que quanto maior o teor de CZP presente na argamassa maior foi o tempo necessário para se alcançar a massa seca da amostra, enquanto que o segundo é que quanto maior o teor de CZP menor a massa seca da argamassa para os mesmos volumes de corpos de prova.

Com o intuito de comparar a secagem da água de cura entre as argamassas utilizou-se o fator de relação volumétrica, que é o quociente entre o volume de água extraído das amostras durante a secagem e o volume das amostras.

A figura 2 apresenta a relação entre o fator de relação volumétrica (FRL) e a porcentagem de CZP presente nas argamassas. Percebe-se que ocorreu uma variação linear entre a FRL e a % CZP. O fato de o FRL estar variando com a adição de cinza pode ser explicado com o auxílio da porosidade encontrada na CZP, conforme figura 1, essa porosidade pode fazer com que a CZP apresente um comportamento higroscópico mais acentuado quando comparado com a areia. Esse comportamento faz com que ao se misturar todas as matérias-primas para a confecção das argamassas a cinza absorva certa quantidade de água, liberando-a somente quando submetido ao processo de secagem.

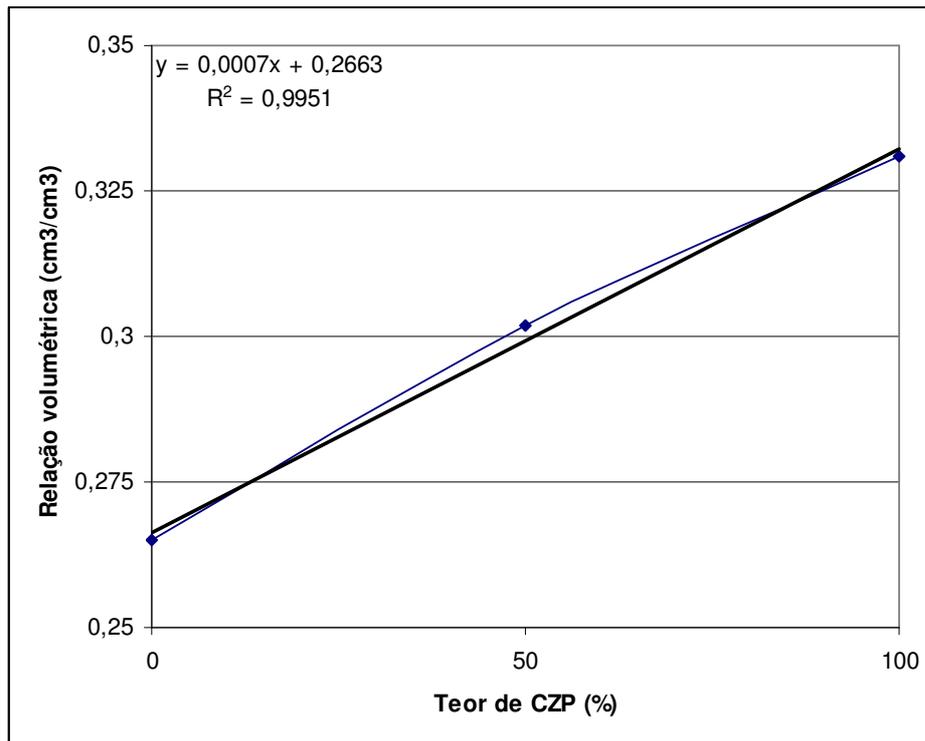


Figura 2 – Variação da relação volumétrica com a % de CZP.

2.4.2 – Densidade aparente (ρ_{ap})

A densidade aparente do material seco é definida como a razão entre a massa da amostra seca e o seu volume:

$$\rho_{ap} = \frac{m_{seca}}{V} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

ρ_{ap} – densidade aparente seca (g/cm^3);

m_{seca} – massa seca (g);

V – volume da amostra (cm^3).

Assim como definida, esta densidade é chamada de aparente, pois o volume em questão é o volume total da amostra o que inclui o volume associado à matriz sólida do material bem como o volume associado aos poros.

Para o cálculo da densidade aparente é necessária a medida do volume de amostras o que pode ser feito construindo-se amostras de forma geométrica definida como por exemplos cubos; FERNANDES (1990) confeccionou manualmente cubos de argamassa de lado igual 1 cm.

No desenvolvimento do presente trabalho o volume da amostra foi calculado com o auxílio de um líquido com elevada tensão superficial, fazendo com que assim ao mergulhar a amostra no líquido, sob pressão atmosférica, o mesmo não preencha os poros da amostra. O líquido em questão é o mercúrio. A técnica consiste em mergulhar a amostra no líquido e verificar a variação de volume do conjunto.

Os valores obtidos para a ρ_{ap} são apresentados na tabela 13. Percebe-se que com o aumento do teor de CZP nas argamassas a densidade aparente diminui. Isto advém do fato de os grãos de areia serem completamente sólidos e a cinza pesada ser bastante porosa.

Tabela 13 – Densidade Aparente das argamassas.

% CZP	ρ_{ap} (g/cm ³)
0	1,66
50	1,48
100	1,29

2.4.3 – Conteúdo mássico de saturação (W_{sat})

O conteúdo mássico de saturação é definido como sendo a razão entre a massa de água necessária para saturar os poros da argamassa de maneira completa pela massa seca da amostra. Como a massa de água de saturação é a diferença entre a massa da amostra saturada com água e a massa seca, escreve-se:

$$W_{sat} = \frac{m_{Sat} - m_{seca}}{m_{seca}} \times 100\% \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

W_{sat} – conteúdo mássico de saturação (%);

m_{Sat} – massa da amostra saturada (g);

m_{seca} – massa da amostra seca (g).

A principal dificuldade nessa técnica é o preenchimento completo dos poros da amostra com água, devido ao fato da água ir aprisionando o ar dentro da amostra. Para evitar que isso acontecesse, a amostra foi colocada sob vácuo por um período de três horas e então a água destilada era colocada no sistema sob vácuo. Outra técnica utilizada para evitar o aprisionamento do ar no interior da amostra é realizar um agitação mecânica na amostra quando essa esta mergulhada em água para que ocorresse a saturação.

Para se chegar ao valor da massa saturada as amostras ficaram mergulhadas em água destilada por um período de aproximadamente 10 dias. Sua massa era medida diariamente e no momento em que duas medidas de massa consecutivas não apresentassem variação significativa esse valor foi adotado como padrão de massa saturada.

Os dados coletados através da imersão dos corpos de prova (CP) em água são apresentados através da figura 3. Esses dados podem ser comparados com os resultados obtidos durante a secagem das amostras e pode ser explicado pelo mesmo princípio, o de que as CZP apresentam um comportamento higroscópico superior em relação à areia.

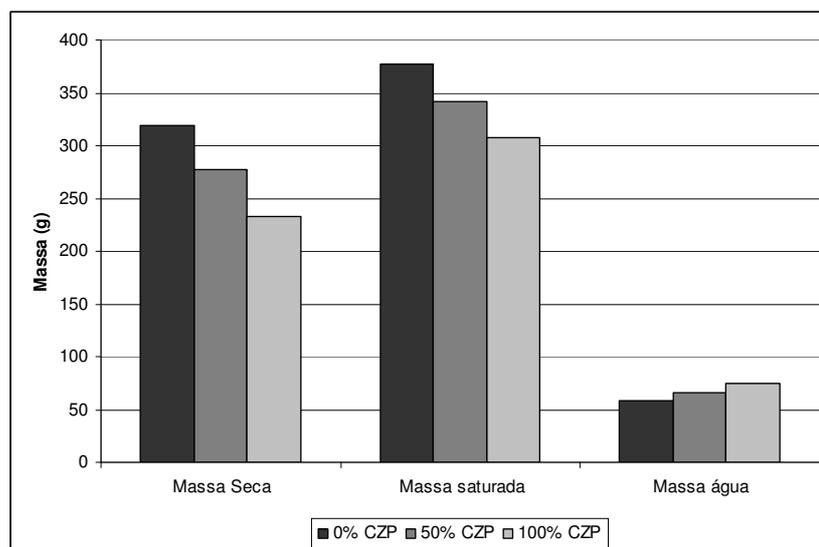


Figura 3 – Massas dos CP na imersão em água.

Os valores do conteúdo mássico de saturação estão listados na tabela 14 e foram calculados tendo como base a equação 3 e os valores da figura 3. Através da análise desses resultados observa-se que uma amostra contendo CZP em sua formulação necessita de uma quantidade

maior de água para saturar seus poros quando comparado com a mesma massa de amostra que apresenta areia em sua composição.

Tabela 14 – Conteúdo mássico de saturação das amostras.

% CZP	W _{Sat} (%)
0	18,3
50	23,6
100	31,8

2.4.4 – Porosidade

A porosidade de um material é definida como sendo a razão entre o volume ocupado pelos poros e o volume total da amostra. Essa razão está representada através da equação 4.

$$n = \frac{V_{poros}}{V_{total}} \times 100\% \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

n – porosidade (%);

V_{poros} – Volume do espaço poroso (cm³);

V_{total} – Volume total da amostra (cm³).

Podem ser observados dois tipos de porosidade: a total que é a razão entre o volume de todo o espaço vazio da amostra e o volume total ocupado pela amostra; a efetiva (ou aberta) que é a razão entre o espaço vazio interconectado da amostra pelo volume total ocupado pela amostra. A diferença entre as porosidades total e efetiva revela a quantidade de poros isolados, obtendo-se a porosidade não-efetiva (ou fechada). A porosidade aberta é a que importa nos fenômenos de migração de fluido no espaço poroso. No presente trabalho o uso do termo porosidade se refere à porosidade efetiva (aberta) do material.

A porosidade efetiva (ou aberta) n está relacionada com o conteúdo mássico de saturação W_{Sat} por:

$$n = W_{sat} \times \left(\frac{\rho_{ap}}{\rho_l} \right) \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

n – Porosidade;

W_{sat} – conteúdo mássico de saturação;

ρ_{ap} – densidade aparente do material (g/cm^3);

ρ_l – densidade da água (g/cm^3).

Os valores calculados da porosidade tomando-se como base a equação 5 estão listados na tabela 15.

Tabela 15 – Porosidade em função da % de CZP presente.

% CZP	Porosidade (%)
0	30.33
50	34.90
100	41.04

2.4.5 – Distribuição de tamanho de poros

A descrição quantitativa da geometria de espaços porosos envolve, em geral, parâmetros associados a três aspectos: quantia da fase poro (a porosidade), tamanho e forma dos poros e a organização espacial do espaço poroso. Em geral, todos estes três aspectos exercem influência nas propriedades físicas macroscópicas do material poroso, por exemplo, na permeabilidade intrínseca, na condutividade térmica, nas curvas de pressão capilar, etc. Um dos parâmetros microestruturais de maior importância é a distribuição de tamanho de poros. O termo porosimetria é bastante comum, sendo utilizado em referência à medição de parâmetros geométricos descritivos do espaço poroso em senso amplo: porosidade, distribuição de tamanho de poros, distribuição de superfície específica, parâmetros de conectividade, dentre muitos outros. Segundo SATO (1998) dentre as várias técnicas para a caracterização da estrutura porosa de materiais a base de cimento, as mais utilizadas são a porosimetria por intrusão de mercúrio e a adsorção de nitrogênio. Recentemente, várias outras técnicas têm sido incorporadas para a descrição do espaço poroso citando-se: ressonância nuclear magnética, difração de raios X e nêutrons além da microtomografia computadorizada. Para

muitos materiais porosos a descrição é feita a partir de imagens digitais que podem ser oriundas de diversas fontes de aquisição dentre as quais: microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura e mais recentemente a microtomografia de raios X. As duas primeiras técnicas permitem análise de seções planas (2-D) do material enquanto a última permite a análise de imagens tridimensionais.

O principal fator limitante à aplicação das técnicas de ressonância nuclear magnética, de microtomografia, e de difração de raios X e nêutrons é a necessidade de infra-estrutura sofisticada o que a torna pouco disponível. Além disso, para a aplicação em materiais cimentícios tem-se uma limitação inerente à técnica que é a resolução espacial. De fato, como será visto posteriormente as argamassas analisadas neste trabalho apresentam poros bastante pequenos os quais não são detectados por estas técnicas.

No caso de imagens obtidas com a microscopia eletrônica de varredura, operando em modo backscattering, o problema não é a resolução espacial, mas sim a preparação das amostras de modo a se conseguir imagens realmente planas (2-D). Esta técnica foi utilizada no presente trabalho e será descrita, incluindo as suas dificuldades associadas, posteriormente.

Freqüentemente, para a descrição de espaços porosos complexos, com tamanhos de poros em várias escalas, como é o caso das argamassas, utiliza-se mais de uma técnica, de forma complementar. Neste sentido, as imagens (microscopia óptica ou eletrônica de varredura) são mais adequadas para a descrição dos macroporos e de eventuais fissuras existentes no material; a porosimetria por intrusão de mercúrio para os mesoporos e a adsorção de gases para a microporosidade.

No presente trabalho, foram utilizadas duas técnicas distintas para a obtenção da porosidade e da distribuição do tamanho de poros, a intrusão de mercúrio e a análise de imagens adquiridas com o auxílio da microscopia eletrônica de varredura. Contudo, como será visto posteriormente, com esta última técnica não foi possível quantificar a geometria do espaço poroso.

2.4.5.1 – Porosimetria por intrusão de mercúrio

A porosimetria por intrusão de mercúrio é, provavelmente, a técnica mais utilizada para a descrição quantitativa da estrutura porosa de um sólido.

Essa técnica se desenvolveu a partir da observação de que o mercúrio não molha a maioria de superfícies sólidas. Da mesma forma, em um material poroso como a argamassa, sob pressão atmosférica, o mercúrio não penetra nos poros do material.

A porosimetria com mercúrio é baseada na equação de Young-Laplace que governa a penetração de líquido nos poros. Esta equação, para o caso de fluidos não molhantes como o mercúrio, se escreve:

$$D = \frac{-4\gamma \cos \theta}{P} \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

D – diâmetro do poro (m)

γ – tensão superficial do líquido (N/m)

θ – ângulo de contato entre o líquido e o sólido (°)

P – pressão da fase mercúrio (N/m²)

Nesta equação assumiu-se que o material poroso foi previamente evacuado, que os poros são de seção circular e que o mercúrio forma um menisco esférico. A figura 4 apresenta um modelo de poro circular invadido por um fluido não molhante. Observa-se que o diâmetro de poro onde o mercúrio penetra é inversamente proporcional a pressão aplicada no meio e diretamente proporcional a tensão superficial do líquido e ao ângulo de contato entre o líquido e o meio poroso.

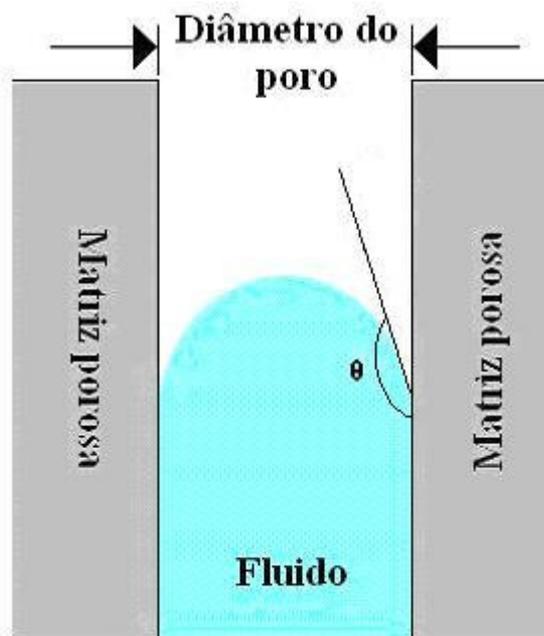


Figura 4 – Esquema ilustrando a penetração de mercúrio em um meio poroso.

Não sendo capaz de molhar a maioria dos sólidos conhecidos, o mercúrio só penetra nos poros dos materiais com aplicação de pressão, que será tão mais alta quanto menor for o diâmetro do poro. Como a tensão superficial do mercúrio é elevada faz com que o líquido tenha tendência em se contrair para uma forma de área específica mínima, como resultado de forças intermoleculares em sua superfície. Por essa razão, o mercúrio apresenta ângulos de contato muito altos com a maioria dos sólidos (em torno de 130°). Segundo WEBB (1997) todas essas características fazem com que o mercúrio seja o único líquido utilizado na porosimetria por intrusão.

Em um ensaio de intrusão de mercúrio a amostra de material poroso é previamente evacuada e a fase de mercúrio é submetida a pressões cada vez mais altas. Como visto pela equação 6, para pressões mais elevadas o mercúrio penetra em poros menores. Para cada valor de pressão aplicada, esta é medida, bem como o volume de mercúrio que penetrou nos poros do material. Com o uso da equação 6, para cada pressão, calcula-se o diâmetro de poro associado e desta forma o volume de mercúrio é associado ao volume dos poros com o dado diâmetro.

Uma primeira limitação associada à aplicação da equação 6 está no fato de os poros não serem normalmente circulares. Contudo, a principal limitação da técnica está relacionada ao fato de se assumir que para uma dada pressão P são preenchidos todos os poros de diâmetro D conforme a equação 6. Assim, não se leva em consideração a acessibilidade do mercúrio aos

poros de diâmetro D . De fato, considere-se uma configuração de espaço poroso como a apresentada na figura 5 onde uma “garganta” de raio r_g condiciona a entrada do mercúrio na “cavidade” de raio r_p . A “cavidade” será preenchida com mercúrio apenas quando a pressão for aquela associada à da garganta. Desta forma, na pressão associada ao raio de “garganta” r_g está será preenchida, bem como a “cavidade” de raio r_p , atribuindo todo o volume de mercúrio injetado a poro de raio r_g . Assim, a porosimetria com intrusão de mercúrio sobreestima o volume dos poros menores em detrimento ao dos maiores.

Observam-se ainda desvios devido à compressão tanto do mercúrio quanto da amostra nas pressões utilizadas. Algumas técnicas são empregadas com o objetivo de diminuir tais distorções. O ensaio em branco (onde é realizado o ensaio sem a amostra para se verificar a compressibilidade do mercúrio) pode ser usado para eliminar o efeito de compressão do mercúrio, enquanto que tratamentos matemáticos que levam em consideração o módulo de compressão da amostra melhoram os resultados distorcidos por esse fator.

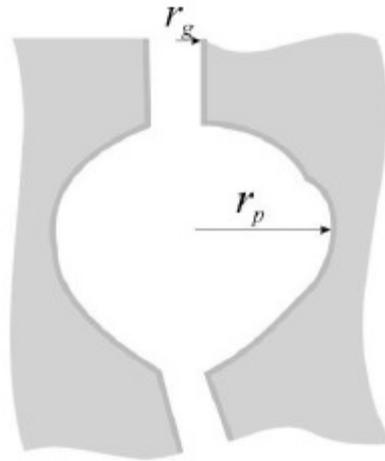


Figura 5 – Poro apresentando “gargalo”.

Para a realização do ensaio de intrusão de mercúrio, não houve necessidade de uma preparação das amostras devido ao fato de o teste ser realizado com pedaços de argamassa.

Os resultados obtidos no ensaio de intrusão de mercúrio são mostrados nas figuras 6, 7 e 8. Para realizar uma comparação mais clara entre os resultados das três argamassas a figura 9 apresenta todos os resultados de intrusão de mercúrio em apenas um gráfico. Quando comparado com a argamassa de referência (0% CZP), observa-se que a adição de cinza pesada à argamassa, diminuiu a fração volumétrica de poros na faixa de 0,1 a 1 μm enquanto

ocorre um aumento na fração de volume de poros pertencentes à região em torno de $0,01 \mu\text{m}$ de diâmetro. Como ilustrado na imagem mostrada na figura 1, isto é devido ao fato de que as partículas de cinza pesada apresentam uma microporosidade acentuada. Na tabela 16 são apresentados os diâmetros médios de poros das argamassas onde se nota que com o aumento do teor de cinza pesada ocorre um decréscimo do tamanho médio de poros.

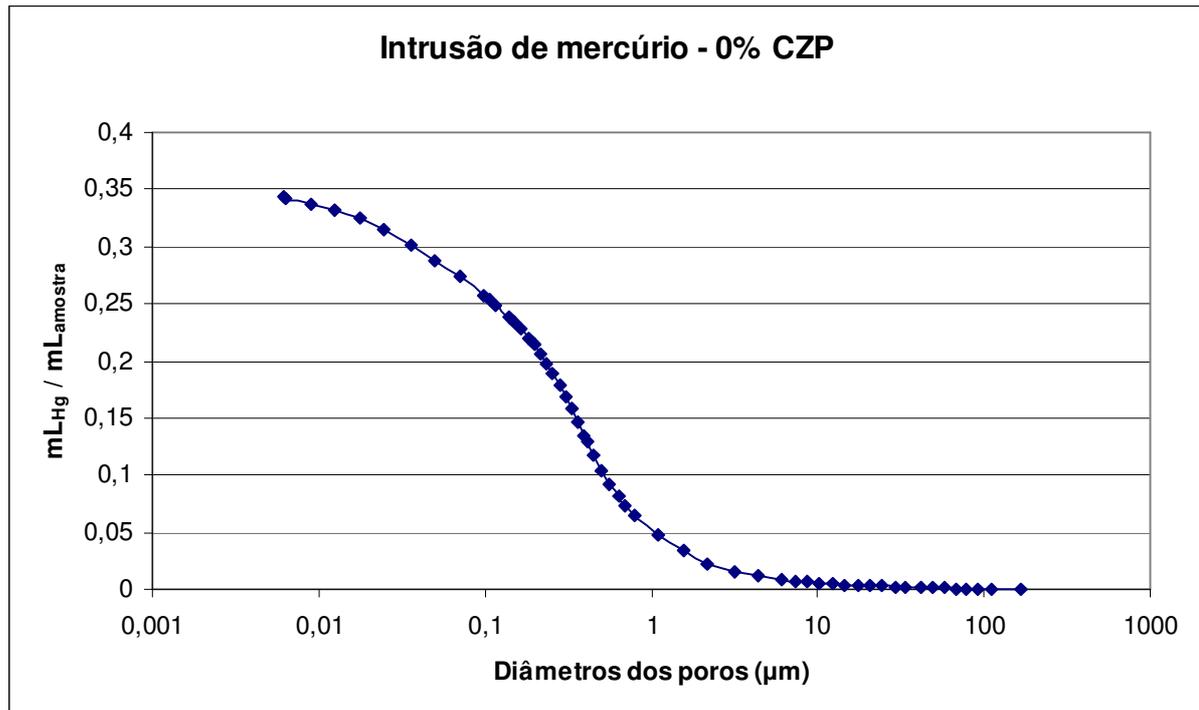


Figura 6 – Intrusão de mercúrio para 0% CZP em função dos diâmetros porosos.

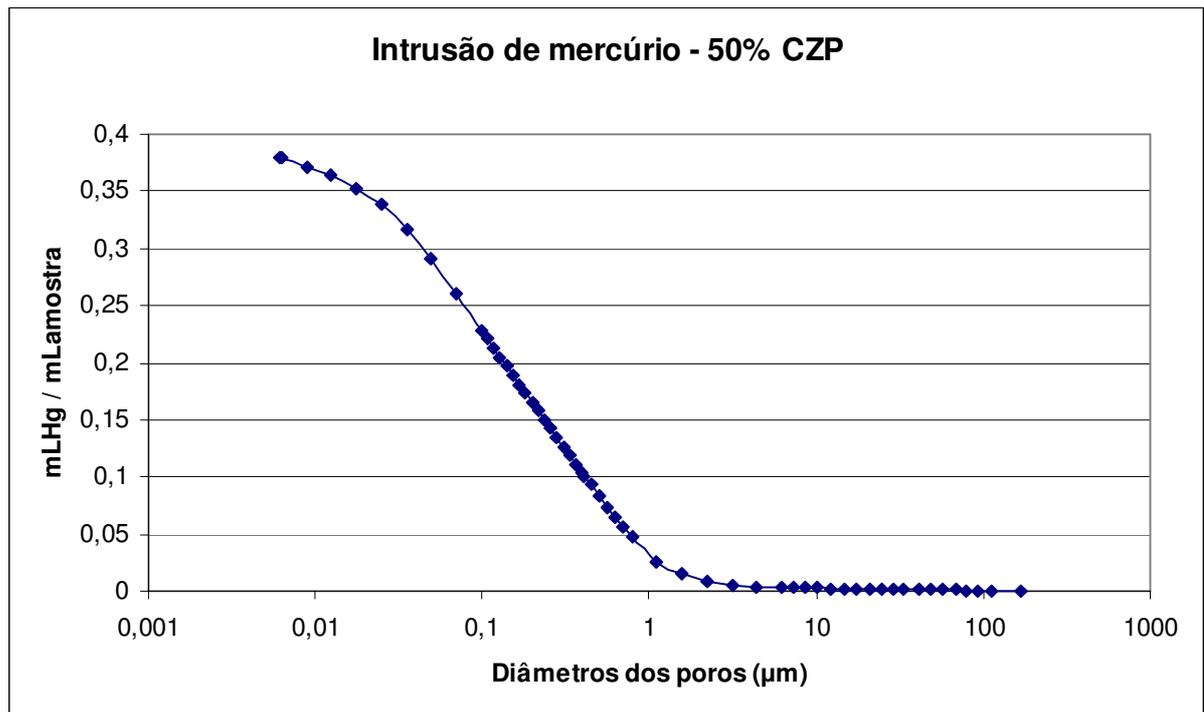


Figura 7 – Intrusão de mercúrio para 50% CZP em função dos diâmetros porosos.

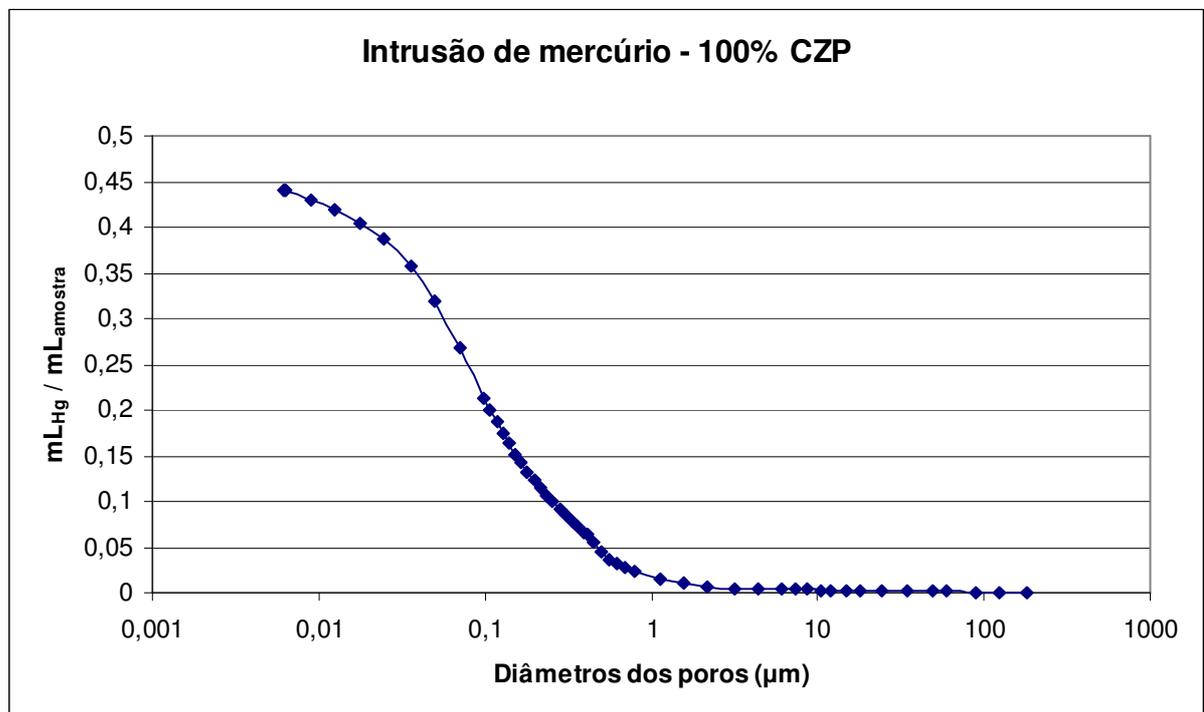


Figura 8 – Intrusão de mercúrio para 100% CZP em função dos diâmetros porosos.

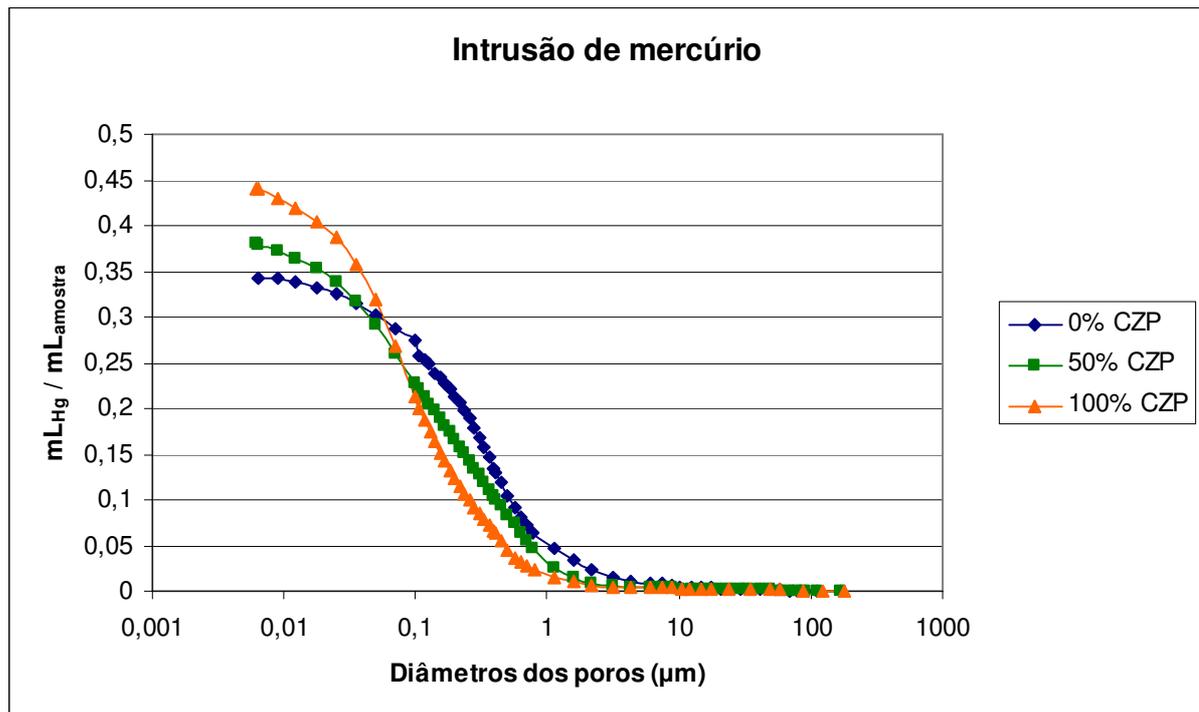


Figura 9 – Resultados de intrusão de mercúrio em função dos diâmetros porosos.

Tabela 16 – Diâmetro médio dos poros das argamassas em função do teor de cinza presente.

% CZP	Diâmetro médio (µm)
0	0,30
50	0,15
100	0,09

Com a hipótese de poros cilíndricos, a curva de intrusão de mercúrio permite a determinação da distribuição de superfície específica das amostras de argamassa. Na figura 10 apresenta-se o gráfico destas distribuições para os três traços de argamassas. Devido à presença importante de poros na faixa de diâmetros entre 0,01µm e 0,1µm nas partículas de cinza pesada observa-se um aumento significativo da superfície específica à medida que se aumenta o teor de cinza pesada na argamassa.

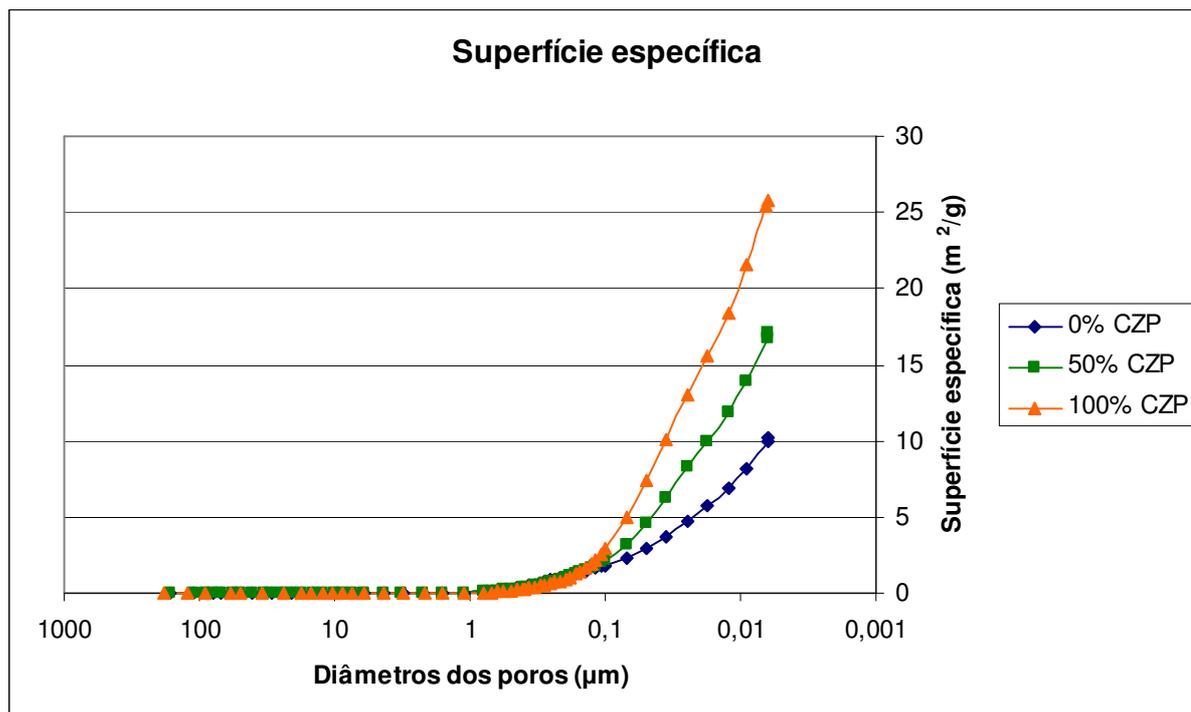


Figura 10 – Superfície específica das amostras em função dos diâmetros porosos.

Outro resultado importante obtido com a técnica da porosimetria por intrusão de mercúrio é a porosidade aberta de cada amostra. Estes valores de porosidade são mostrados na tabela 17. Eles são compatíveis com os valores de porosidade obtidos através do conteúdo mássico de saturação, apresentados na tabela 14. A diferença nos valores de porosidade para cada porcentagem de cinza presente pode ser explicada pela presença de ar residual aprisionado nos microporos das partículas de cinza que impedem a penetração de água capilar. Na técnica de intrusão de mercúrio, devido ao fato de estarmos trabalhando com pressões elevadas, os poros do material são preenchidos de maneira mais eficaz.

Tabela 17 – Porosidade aberta obtida durante o ensaio de intrusão de mercúrio.

% CZP	Porosidade (%)
0	34,36
50	38,04
100	44,13

2.4.5.2 – Análise de imagens digitais

A utilização de técnicas de processamento e análise de imagens digitais constitui, atualmente, uma das principais ferramentas para a caracterização da geometria e da organização espacial de microestruturas. De fato, ocorreu um grande avanço tecnológico em softwares e hardwares nas últimas décadas e hoje é usual a caracterização de microestruturas 2-D e 3-D de diversos materiais, em diferentes campos de aplicação. Como exemplo, cita-se a caracterização de rochas reservatório de petróleo a partir de imagens 2-D obtidas com microscopia óptica e eletrônica de varredura bem como de imagens 3-D obtidas com microtomografia de raios X, DAÏAN et al. (2004), APPOLONI et al. (2007).

Em materiais cimentícios, a obtenção de imagens 2-D adequadas, quer dizer, imagens de seções de fato planas passíveis de quantificação da geometria, se constitui, ao nosso conhecimento, um problema ainda em aberto. Um dos principais problemas reside no lixamento e polimento de amostras devido à diferença de dureza entre os grãos de areia e a matriz cimentícia. A obtenção de seções realmente planas é complicada uma vez que tais materiais podem apresentar poros bastante pequenos da ordem de Angstroms.

No presente trabalho foram obtidas imagens da microestrutura porosa das argamassas com o uso de microscopia eletrônica de varredura. Contudo, ainda que úteis para uma visualização e análise qualitativa, estas imagens não se mostram adequadas para uma quantificação da sua geometria. De fato, mesmo para aumentos microscópicos relativamente pequenos (como 200X e 500X) já se percebe a não planicidade das imagens. Além disto, as imagens apresentam um fraco contraste entre as fases presentes bem como a presença de bolhas de ar na resina. Em função destes problemas não foram feitas tentativas de aquisição de imagens em aumentos microscópicos maiores. A seguir, são descritos os procedimentos adotados, apresentando-se e descrevendo-se as imagens obtidas.

Preparação dos corpos de prova.

Segundo YUNES (1992), para a determinação da distribuição do tamanho de poros é necessário trabalhar com amostras que apresentem superfície polida, mas que conservem seus poros para permitir a formação de contraste no microscópio eletrônico de varredura.

Ele realizou as etapas descritas abaixo para a obtenção da superfície plana necessária para a obtenção das imagens no microscópio eletrônico de varredura.

1 – Impregnação das amostras:

A resina utilizada para a impregnação foi uma resina epóxi araldite XGY da Ciba Geigy diluída em 10 % de álcool etílico P.A.

Primeiramente as amostras foram secas em uma estufa sob uma temperatura de 120 °C durante um período de 48 horas. Logo após foram levadas a um dessecador ligado a um sistema de alto vácuo, onde permaneceram por uma hora sob a ação de uma pressão de 3 mm de Hg. Após esse período a resina era colocada no sistema não se permitindo a entrada de ar no dessecador.

Quando a amostra estava envolvida por resina, o dessecador era aberto para favorecer a entrada da resina nos poros, então era feito vácuo no sistema novamente para a retirada de possíveis bolhas decorrentes da evaporação do álcool.

Após a cura da resina, esta concedia à amostra resistência mecânica para a etapa posterior.

2 – Preparação ceramográfica:

A primeira etapa do desbaste foi retirar o excesso de resina até próximo da superfície da amostra. Essa etapa foi realizada utilizando-se lixa 600 de carbetto de silício e água como lubrificante.

Entre cada etapa da preparação metalográfica a amostra era submetida a uma fonte de ultrassom para retirar partículas dos pós-abrasivos das etapas anteriores.

Após a remoção dos pós-abrasivos deu-se início ao polimento propriamente dito. A primeira pasta de diamante utilizada foi de 15 μm por um período de 20 a 25 horas.

A granulometria seguinte foi de 9 μm por um período de tempo da ordem de 5 a 6 horas.

Na quarta etapa, com pasta de diamante de 6 μm trabalhou-se por aproximadamente 3 a 4 horas.

A granulometria utilizada na quinta etapa foi de 3 μm por um período de 3 a 4 horas. A partir desta etapa o polimento foi feito manualmente, procurando-se fazer movimentos em forma de 8 sobre o pano de polimento.

A sexta etapa foi realizada com pasta de diamante de 1 μm . Essa etapa foi realizada somente para dar brilho a superfície da resina sobre os poros, de maneira a obter mais contraste quando observado em microscópio ótico.

3 – Evaporação da resina:

Conforme o autor em questão, em função do princípio de operação do microscópio eletrônica de varredura, se faz necessário retirar a resina dos poros da amostras deixando a superfície com sua topografia exposta.

Para tanto, ele utilizou-se da evaporação da resina impregnada conforme o descrito a seguir. A amostra foi colocada em um tubo de quartzo acoplado a um sistema de alto vácuo. O tubo foi fixado sobre uma estrutura móvel e então posicionado dentro de um forno. Como parâmetros ideais utilizou-se pressão interna de 10 μm de mercúrio, temperatura do forno 350 °C e permanência de não mais de 15 minutos sob essa temperatura. Para se chegar a valores de pressão tão baixos fez-se necessário o uso de uma bomba difusora junto com a bomba de vácuo mecânica.

KJELLSSEN et. al. (1993) utilizaram uma técnica mais acessível do ponto de vista financeiro e de necessidade de equipamentos. Sua técnica de preparação de amostras para o MEV consiste em:

1 – Impregnação das amostras:

As amostras são secas para garantir que seus poros fiquem livres para receberem resina.

Após a secagem, as amostras são colocadas no impregnador à vácuo e é feito vácuo na câmara onde se encontra a amostra. Após um tempo considerável para se fazer vácuo nos poros da

amostra, a resina é colocada para dentro da amostra, fazendo com que os poros da amostra absorvam a resina e esta infiltre a amostra.

Após a impregnação, a amostra é deixada a temperatura ambiente por 4 horas e depois levada a uma estufa a 40° C por um período de 24 horas.

2 – Preparação ceramográfica:

Após a cura da resina a amostra está apta para ser preparada para obter uma superfície lisa, então ela é lixada e polida com agentes abrasivos cada vez mais finos. É importante ressaltar que entre as trocas de agente abrasivo a amostra deve permanecer em banho de ultrassom para limpar a superfície de possíveis detritos que possam causar imperfeições nas etapas seguintes.

Até a fase de preparação ceramográfica as duas técnicas exemplificadas são semelhantes, impregnar os poros do material com resina para dar resistência mecânica suficiente para a preparação ceramográfica, porém YUNES (1992) adotou uma etapa de retirada da resina impregnada 350° C.

É nesse ponto que ocorre uma diferença de método entre os dois pesquisadores, pois Yunes expôs sua amostra a temperaturas elevadas enquanto que Kjellsen afirma em seu trabalho que amostras de produtos derivados de cimento não podem ser expostas à temperaturas superiores a 100° C devido ao fato de acima dessa temperatura a microestrutura da argamassa sofrer alterações irreversíveis. Tais alterações podem ser atribuídas à evaporação de água de constituintes da argamassa, a fissuras geradas na amostra devido à diferença de dilatação entre o cimento e os agregados.

Levando-se em consideração essas afirmações deu-se preferência à preparação de amostras utilizada por Kjellsen, devido ao fato de que ao prepararmos amostras segundo Yunes pode-se estar adquirindo dados que não condizem com a realidade das propriedades observadas nas argamassas. As etapas utilizadas para realizar a preparação dos corpos de prova para a obtenção de imagens no microscópio eletrônico de varredura serão descritas de maneira detalhada a partir desse momento.

Para realizar a etapa de impregnação fez-se o uso de uma impregnadora a vácuo e de resina epóxi. Fez-se o uso desse tipo de resina devido à facilidade que ela possui de ser manuseada

durante a impregnação e também devido às suas características após a cura, facilitando a etapa de preparação ceramográfica.

Para iniciar o processo de desbaste da amostra impregnada utilizou-se lixa 600 de carbetto de silício até quase chegar à superfície livre da amostra. Então, começou-se o processo de polimento da amostra. Utilizou-se com agente abrasivo, spray de diamante com granulometria de 9 μm , essa foi a etapa mais demorada do polimento pois exigiu que uma parte da resina que ainda ficava sobre a superfície da amostra fosse retirada e ainda fosse iniciado o processo de obtenção de uma superfície lisa na amostra. Essa etapa levou aproximadamente 30 minutos.

A etapa seguinte, que foi o polimento com spray de diamante de 6 μm , foi realizada de maneira mais rápida e levou aproximadamente 5 minutos para ser concluída.

Finalmente foi realizada a etapa de polimento com spray de diamante de 3 μm . Essa etapa foi feita para se chegar a uma superfície isenta de riscos para uma adequada visualização da superfície no MEV. Assim como a etapa anterior, essa etapa foi realizada em aproximadamente 5 minutos.

A cada etapa transcorrida durante o desbaste e polimento, a amostra era limpa com o auxílio de ultra-som para retirar possíveis resíduos de agentes de desbaste da granulometria anterior. Entre cada etapa também era realizado um ajuste na bancada politriz com o intuito de se reduzir a força aplicada sobre a amostra, assim, durante o lixamento foi realizada uma força significativa sobre a amostra enquanto que no polimento com 3 μm a força aplicada foi branda.

Imagens obtidas com o auxílio do MEV

Nas figuras 11, 12 e 13 apresentam-se as imagens de argamassas sem a adição de CZP em sua constituição; elas estão dispostas segundo o aumento utilizado no microscópio. Na figura 11 visualizam-se os grãos de areia e as regiões de pasta de cimento da argamassa. Observa-se também que durante a etapa de confecção das amostras alguns espaços podem ter ficado sem preenchimento da resina e com bolhas de ar, o que pode ser evidenciado pela região circular localizada no canto superior direito da figura. Em imagens do MEV a resina epóxi apresenta

uma tonalidade mais escura quando comparada com os outros constituintes da argamassa. Através da visualização da micrografia apresentada na figura 12, observam-se regiões mais escuras, que são os poros da argamassa. Já na figura 13 pode-se observar que a própria matriz da argamassa também apresenta certa porosidade. Nos aumentos microscópicos de 200X e 500X fica evidente que durante o polimento das amostras, as regiões referentes à pasta de ligantes sofre um desgaste maior que os grãos de areia levando à obtenção de imagens cuja topografia não apresente uma planicidade adequada para a técnica de análise de imagens digitais.

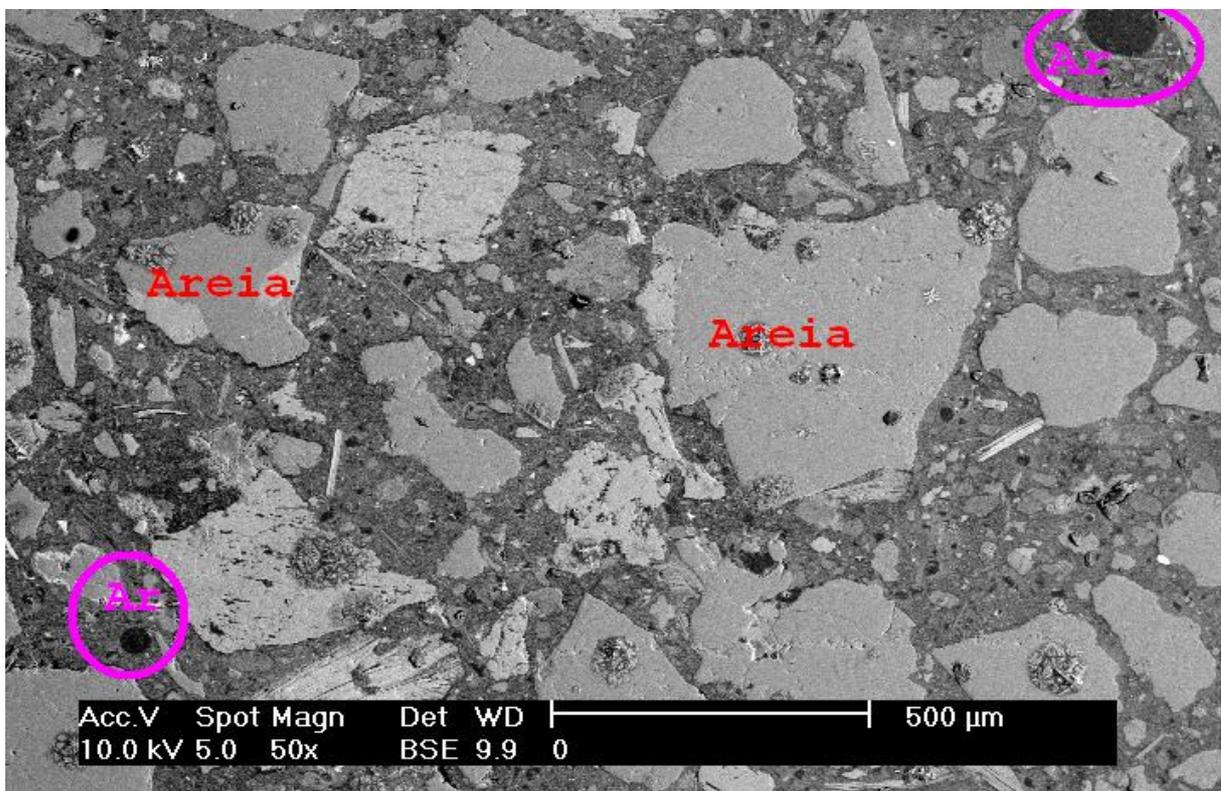


Figura 11 – Micrografia da argamassa (0% CZP) com aumento de 50X.

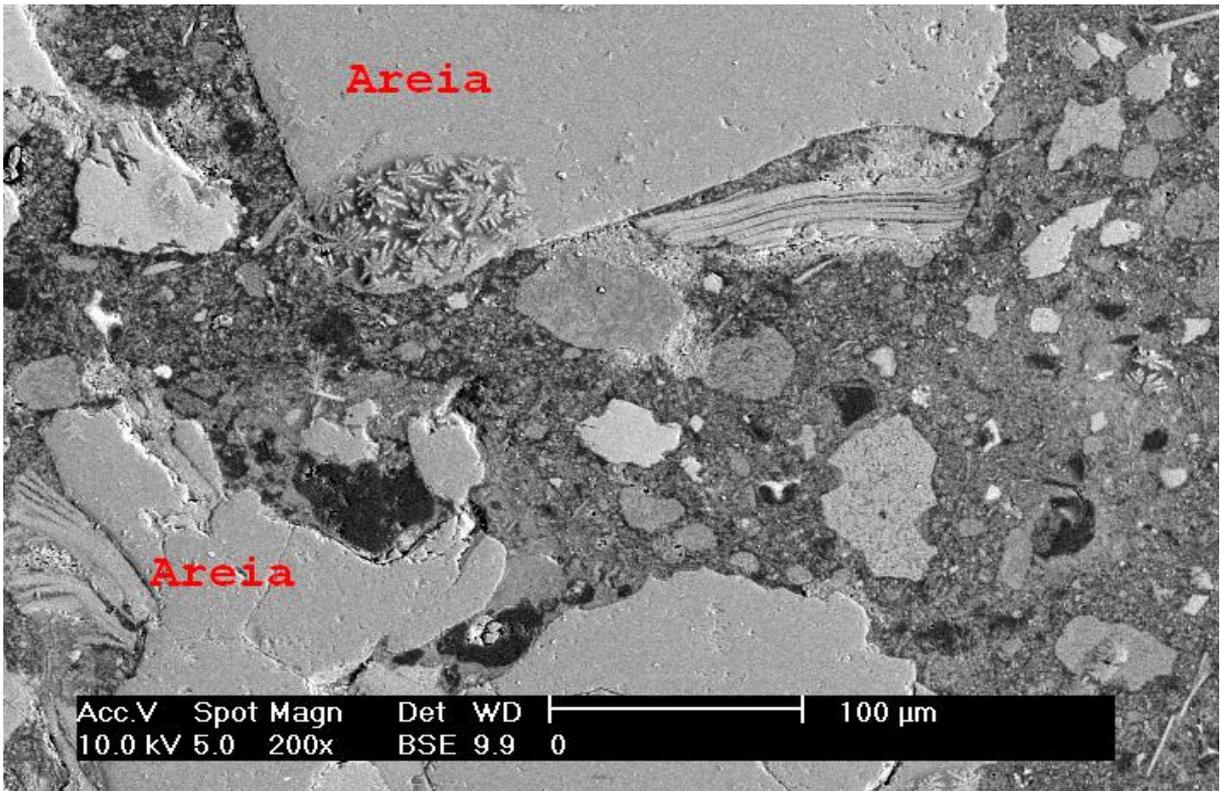


Figura 12 – Argamassa (0% CZP) com aumento de 200X.

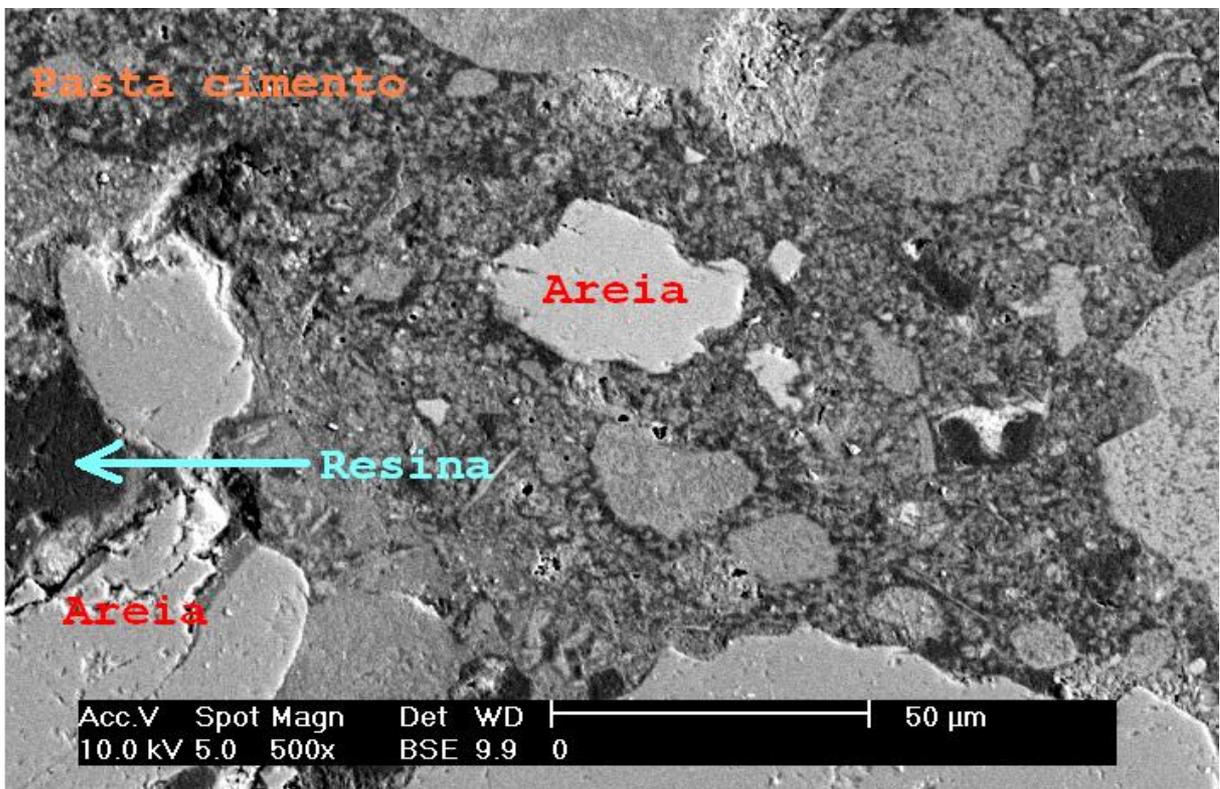


Figura 13 – Argamassa (0% CZP) com aumento de 500X.

As figuras 14, 15, 16 e 17 apresentam as micrografias de amostras com substituição parcial de areia por CZP, dispostas conforme o aumento de aquisição das imagens. Nas figuras 14 e 15 percebe-se a porosidade da amostra através da resina impregnada, região mais escura. Na figura 16 evidencia-se a porosidade da matriz do material poroso, região escura, e também a porosidade da cinza, região superior e aproximadamente no meio da imagem. Através da análise da figura 17 percebe-se de maneira acentuada os poros da pasta de cimento.

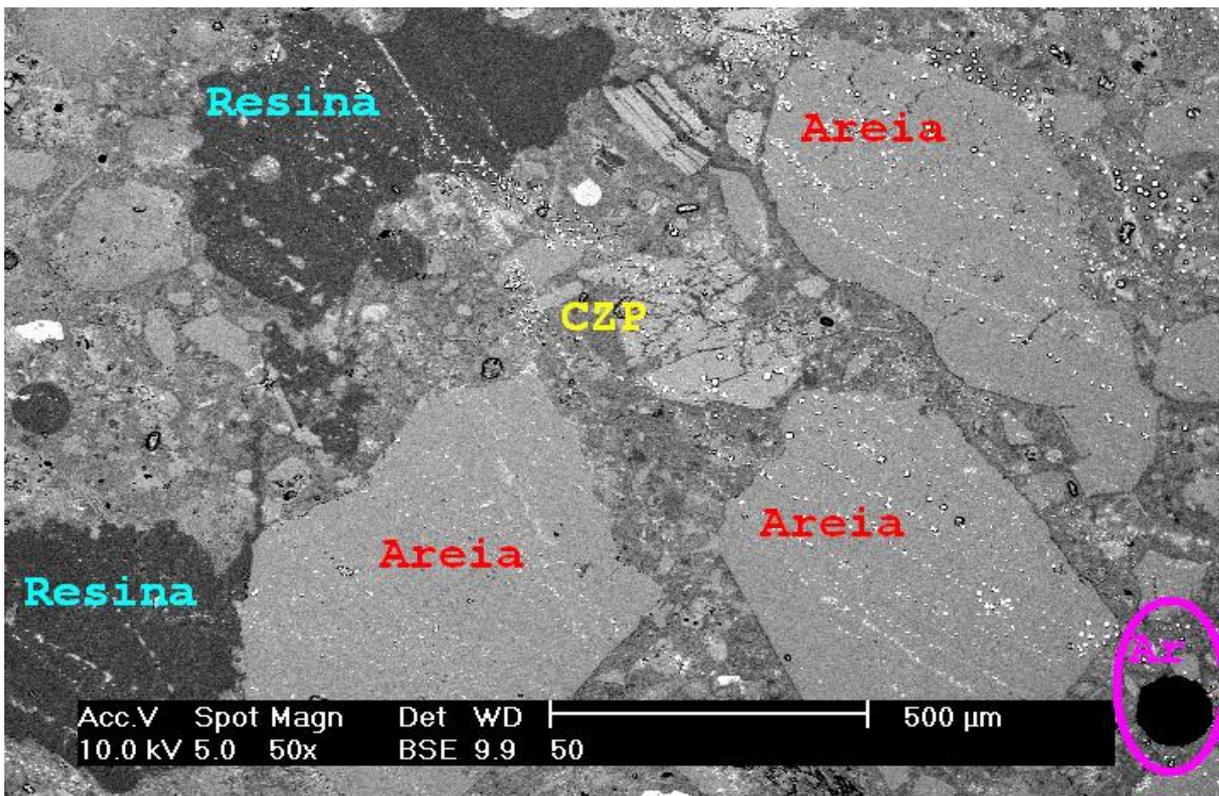


Figura 14 – Argamassa com 50% CZP com aumento de 50X

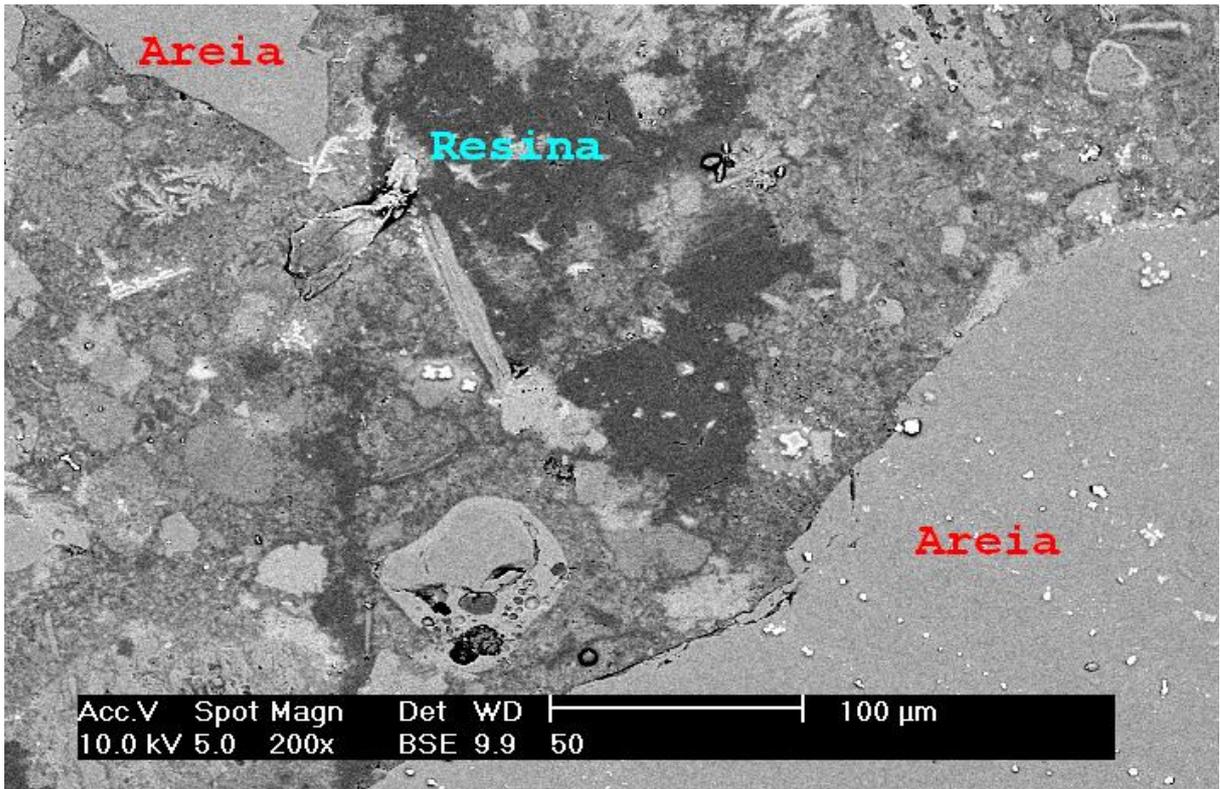


Figura 15 – Argamassa com 50% CZP com 200 de aumento.

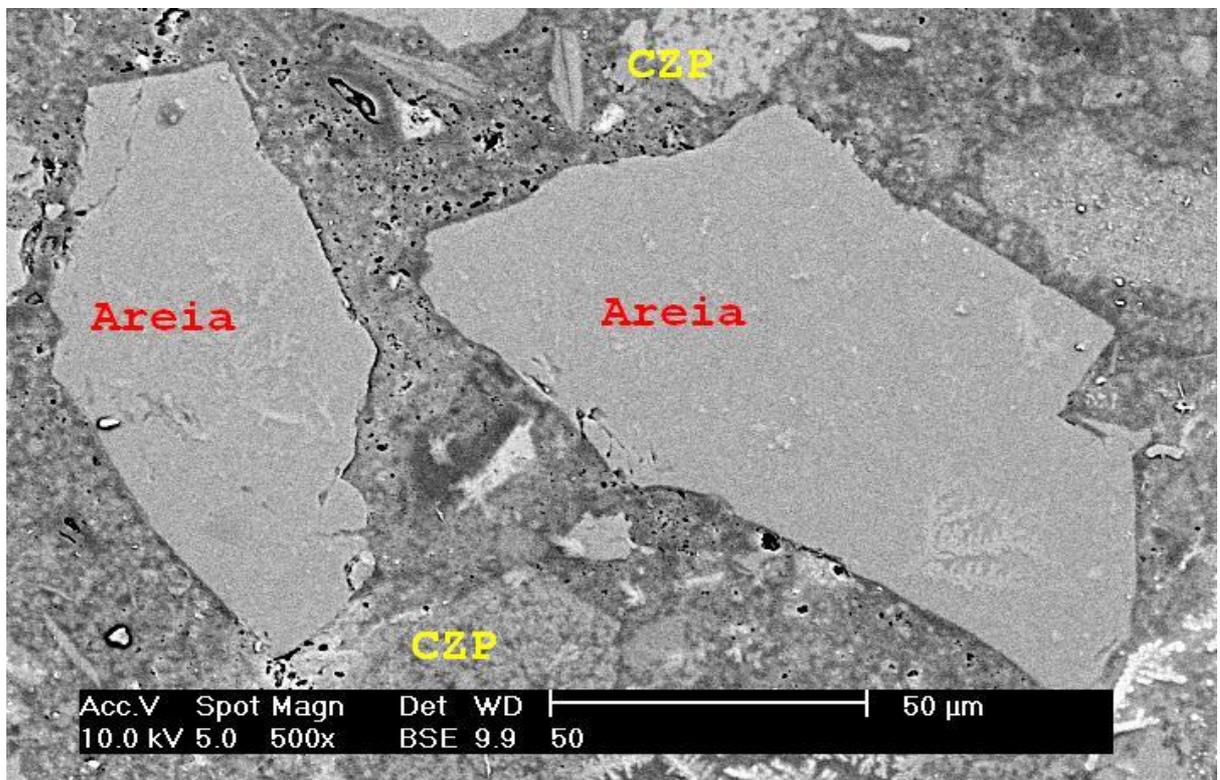


Figura 16 – Argamassa com 50% CZP com aumento de 500X.

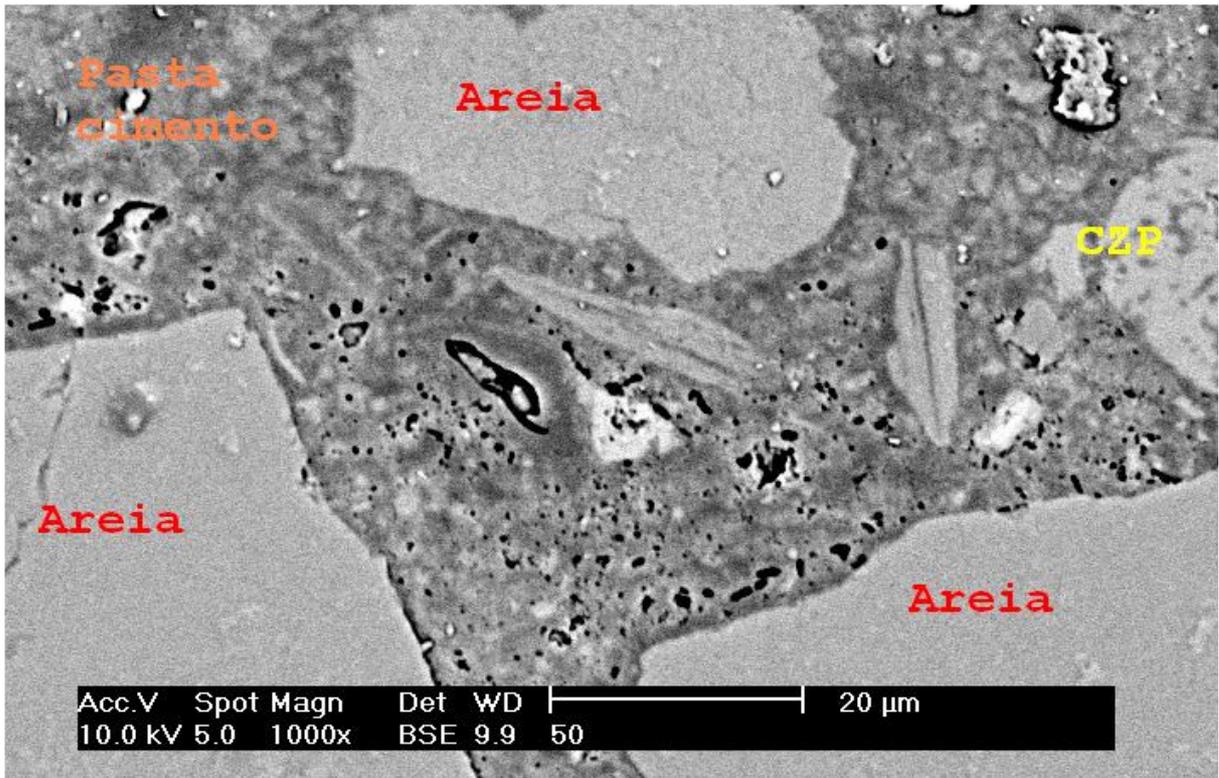


Figura 17 – Argamassa 50% CZP com 1000X de aumento.

As figuras 18 e 19 apresentam imagens de amostras com 100% CZP, dispostas conforma o aumento utilizado. A figura 18 reforça a idéia da porosidade da CZP através da visualização de um grão de cinza que apresenta uma superfície completamente irregular. A figura 19 apresenta a porosidade do meio em questão.

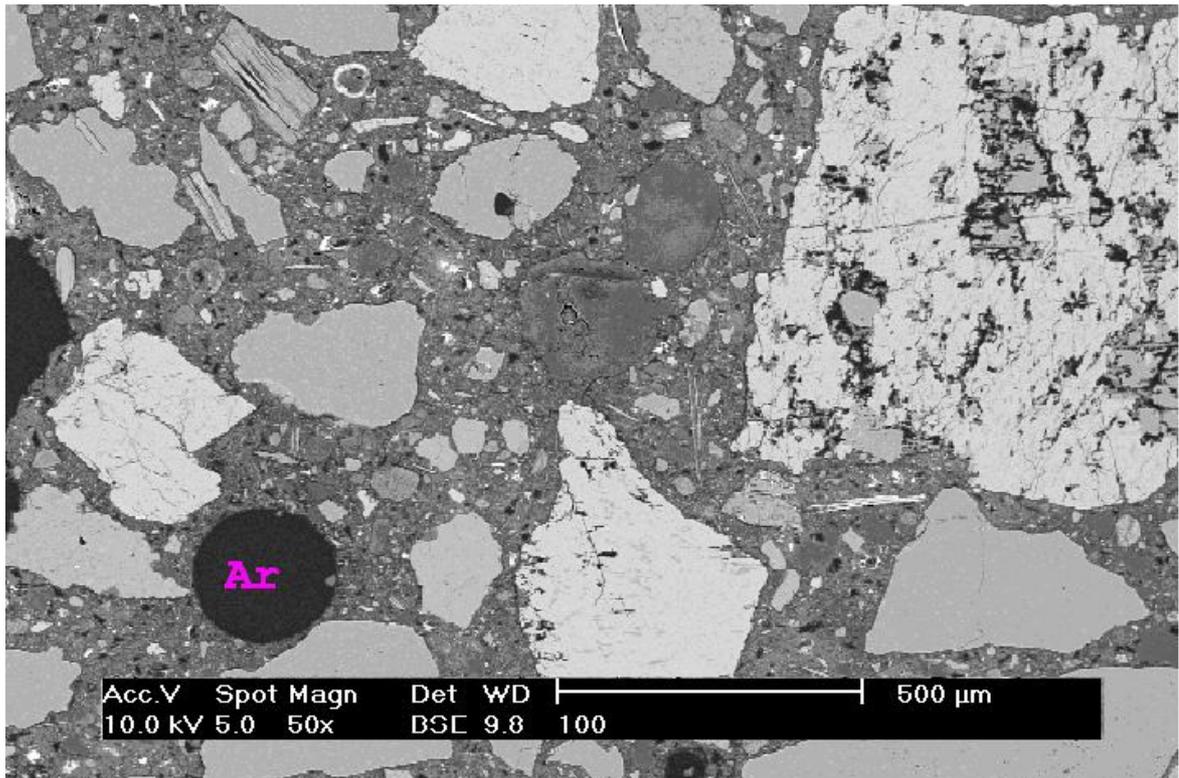


Figura 18 – Argamassa com 100% CZP com aumento de 100X.

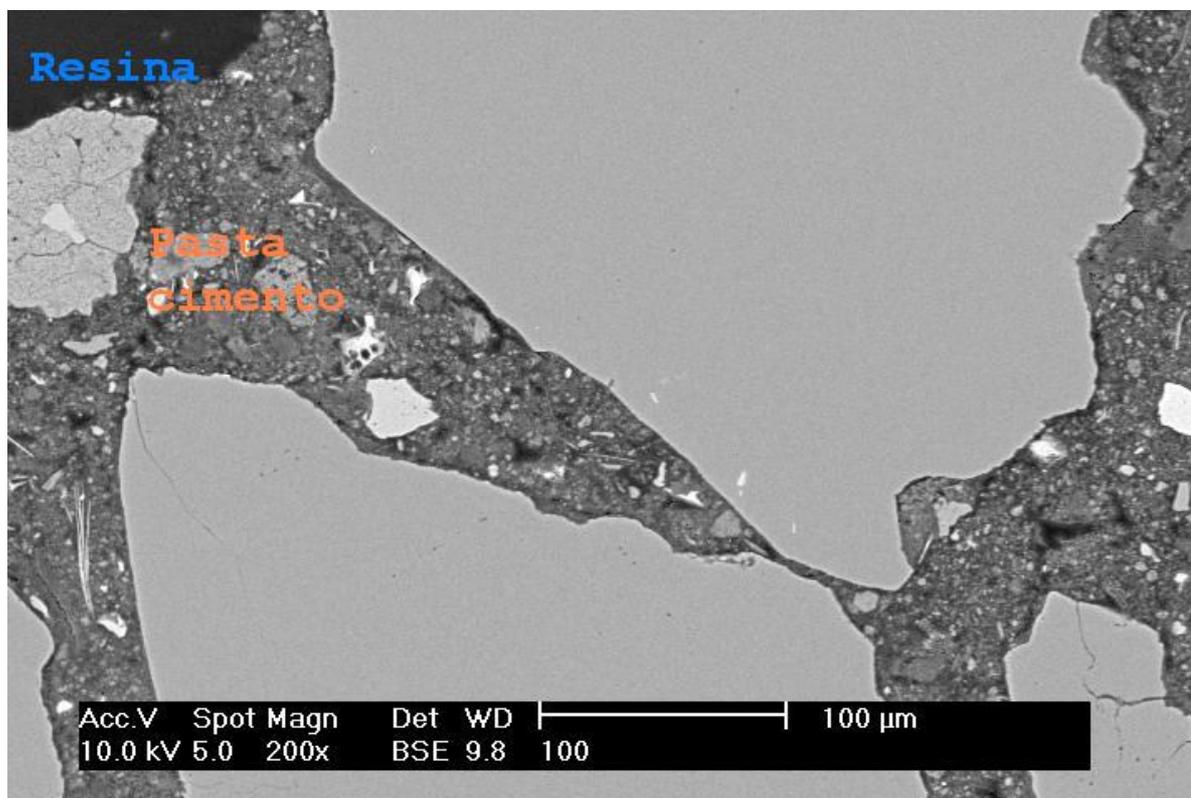


Figura 19 – Argamassa com 100% CZP com aumento de 200X.

CAPÍTULO 3

PROPRIEDADES FÍSICAS

Este capítulo trata da obtenção experimental das propriedades físicas de “permeabilidade” ao vapor de água e de condutividade térmica efetiva das argamassas para os três traços adotados. Inicialmente, será feita uma breve revisão acerca dos aspectos teóricos envolvendo as propriedades físicas de interesse. Não se pretende, no presente trabalho, uma análise teórica detalhada dos fenômenos de condensação e migração de água em meios porosos, mas somente a apresentação das idéias fundamentais, citando-se os trabalhos onde estas idéias são aprofundadas. Em seguida, são descritos os aparatos experimentais utilizados bem como os procedimentos adotados nos ensaios. No capítulo seguinte, são apresentados os resultados obtidos, procedendo-se sua análise à luz de aspectos microestruturais das argamassas.

3.1 – Fixação e transporte de umidade em materiais porosos

Em um material poroso, como as argamassas estudadas no presente trabalho, ocorrem fenômenos de condensação/evaporação bem como de migração de água. Os fenômenos de condensação de água são analisados em presença da fase vapor, na condição de equilíbrio termodinâmico, onde as entalpias livres (por unidade de massa) são iguais, ou ainda, onde são iguais os chamados potenciais matriciais das fases, água condensada e seu vapor (DAÏAN, 1986).

A água condensada pode se apresentar de duas formas nos poros de um material: a água fisicamente adsorvida e a água capilar. A água adsorvida é constituída de camadas de moléculas que são depositadas sobre a superfície da matriz sólida, veja-se uma ilustração na figura 20. Na condição de equilíbrio termodinâmico, sua quantidade é função da superfície específica do material, das condições higrotérmicas reinantes (temperatura e pressão de vapor) e da afinidade entre o vapor e a matriz sólida, MEROUANI (1987).

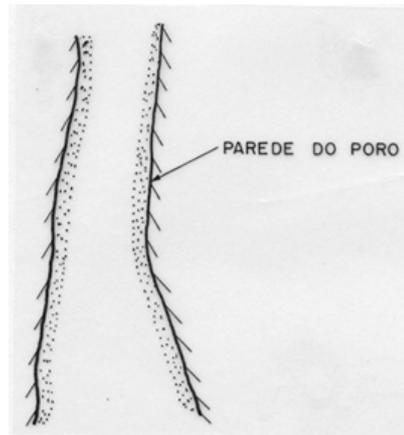


Figura 20 – Ilustração da camada de água fisicamente adsorvida na parede de um poro.

A água capilar, veja-se ilustração na figura 21, representa a fase líquida que preenche totalmente determinados poros do material e pode formar ilhas de líquido mais ou menos extensas no espaço poroso. Na interface curva entre a água capilar e a fase gasosa (ar mais vapor de água) ocorre uma descontinuidade de pressão que é dada pela equação de Young-Laplace:

$$P_g - P_l = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

P_g – é a pressão na fase gasosa (Pa);

P_l – a pressão na fase líquida (Pa);

R_1 e R_2 – são os raios principais de curvatura da interface (m);

σ – é a tensão interfacial água-ar (N/m).

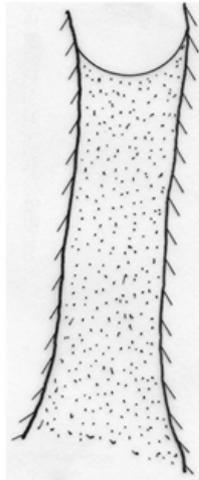


Figura 21 – Ilustração da água condensada capilarmente em um poro.

O equilíbrio termodinâmico resulta da uniformidade espacial de grandezas como temperatura e pressão de cada fase, ou de um ponto de vista geral, da igualdade do potencial matricial.

Quando não há esta uniformidade, ocorrem fenômenos de migração de umidade no espaço poroso do material, através de diversos mecanismos tais como: migração capilar de líquido, migração da água adsorvida, difusão e efusão de vapor, fenômenos de condensação, evaporação nas interfaces de água capilar, etc, MEROUANI (1987). Todos estes fenômenos são fortemente dependentes da geometria da microestrutura porosa, em seus aspectos de tamanho e forma dos poros e da organização espacial entre os poros.

Dois são os pontos de vista para o estudo destes fenômenos de migração: microscópico e macroscópico. Em uma escala microscópica, os diferentes fenômenos podem ser estudados separadamente, independentes uns dos outros. Na escala macroscópica, a separação dos fenômenos se torna difícil, e geralmente são definidos coeficientes de transporte globais, responsáveis pela descrição conjunta de diversos fenômenos.

A descrição de processos de condensação (equilíbrio termodinâmico) e de migração de água é feita com base em vários conceitos e diversas teorias foram propostas. No tocante ao processo de migração de água, do ponto de vista macroscópico, as principais teorias propostas são as de PHILIP e DE VRIES (1957, 1958) e a de LUIKOV (1966).

No domínio de materiais de construção civil, os problemas de transferência de umidade são, em geral, abordados em duas categorias: o modelo de PHILIP e DE VRIES (ou de LUIKOV)

e a utilização da Lei de Fick generalizada aos materiais porosos. A equação associada a esta Lei constitui a base teórica para o chamado “Método das Câmaras Separadas” para a determinação da propriedade denominada de “permeabilidade” ao vapor, que será descrita mais adiante. A “permeabilidade” ao vapor de materiais de construção é um parâmetro bastante utilizado para os problemas de condensação de vapor em paredes.

Como dito, no presente trabalho não será feita uma apresentação geral das teorias de transporte de umidade, somente será descrita a permeabilidade intrínseca e a “permeabilidade” ao vapor, sendo que esta última será objeto de estudo experimental, seção 3.2.

3.2 – Meios porosos saturados: permeabilidade intrínseca

Uma das principais características de um meio poroso é a sua permeabilidade. Esta propriedade está associada à capacidade de um meio poroso permitir o fluxo de fluidos. Quando apenas um fluido preenche completamente o espaço poroso (meio poroso saturado) tem-se a definição da permeabilidade intrínseca. No caso de dois ou mais fluidos coexistirem no espaço poroso definem-se as permeabilidades relativas a cada fluido, BEAR (1984), DULLIEN(19979).

3.2.1 – Lei de Darcy

Em 1856 o engenheiro francês Henry Darcy, propôs uma relação empírica para a permeabilidade intrínseca onde a vazão volumétrica no meio poroso é proporcional à área transversal da amostra e ao potencial hidráulico, e inversamente proporcional ao comprimento da amostra. O potencial hidráulico corresponde à soma da energia potencial e da energia de pressão.

Considere-se uma amostra de meio poroso na horizontal com comprimento l e área da seção transversal A , conforme ilustração presente na figura 22. Com a hipótese de escoamento unidirecional a baixas velocidades, a lei de Darcy assume a seguinte forma:

$$Q = \frac{kA}{\mu} \left(\frac{\Delta p}{l} \right) \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:

Q – Vazão volumétrica (m^3/s);

k – Permeabilidade intrínseca (m^2);

μ – Viscosidade do fluido (m^2/s);

Δp – Diferença de pressão entre a entrada (p_i) e a saída (p_f) do fluido (Pa);

A – Área da seção transversal da amostra (m^2)

l – Comprimento da amostra (m).

A permeabilidade intrínseca é uma propriedade que independe das características do fluido que preenche o espaço poroso. De fato, ela é dependente somente das características geométricas da microestrutura porosa.

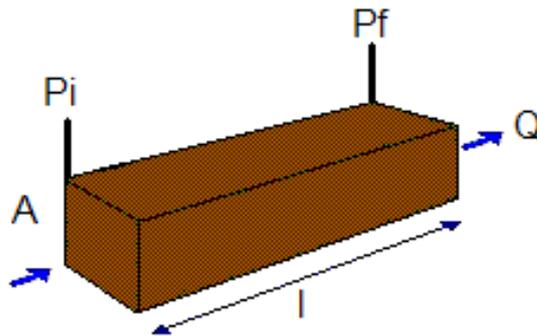


Figura 22 – Escoamento de fluido em meio poroso saturado devido a um gradiente de pressão.

No Sistema Internacional de unidades (SI) a permeabilidade é medida em metros quadrados (m^2), contudo, usualmente utiliza-se a unidade chamada Darcy (D). A relação numérica entre Darcy e m^2 é de $0.987 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ para cada D.

3.3 – Meios porosos não-saturados: difusão de vapor de água na fase gasosa

Em um meio poroso saturado o fluxo de água líquida é ocasionado por gradientes de pressão externos e regido pela Lei de Darcy (equação 8). Em um meio poroso não saturado, onde coexistem água líquida e vapor de água no ar (fase gás), o vapor migra por um processo de difusão causado por gradiente de concentração de vapor. Desta forma, a Lei de Fick descreve

o fluxo de vapor de água, na presença da fase gás (ar e vapor de água) na estrutura porosa. Para escoamentos em meios porosos, no caso unidimensional, esta Lei é escrita como:

$$J_v = -D_v \frac{M}{RT} \frac{dP_v}{dx} \quad (\text{Equação 9})$$

Onde:

J_v – Fluxo mássico de vapor de água ($\text{Kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$);

D_v – Difusividade do vapor de água na fase gás ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$);

P_v – Pressão parcial do vapor de água (Pa);

M – Massa molecular da água (mol);

R – Constante dos gases perfeitos (atm.l/mol.K);

T – Temperatura (K);

x – Coordenada espacial (m).

3.3.1 – “Permeabilidade” ao vapor

A “permeabilidade” ao vapor de um material de construção, a uma dada temperatura, é um conceito utilizado com a finalidade de avaliar os problemas de condensação sobre paredes de edificações, BAROGHIEL-BOUNY (1994). Contudo, o termo permeabilidade não é adequado, uma vez que o parâmetro está associado a processos de difusão (de vapor de água) na estrutura porosa. Em função do termo “permeabilidade” ao vapor ser de uso corrente na literatura o presente trabalho também o utilizará, não fazendo proposição de um novo termo para o parâmetro em questão.

Seja um material poroso de espessura (e) que divide dois ambientes 1 e 2 à mesma temperatura (T) mas com pressões parciais de vapor diferentes, respectivamente, P_{v1} e P_{v2} com $P_{v2} > P_{v1}$, veja-se figura 23. Em regime permanente será estabelecido um fluxo mássico de vapor de água (J_v) indo do ambiente 2 ao 1. A “permeabilidade” ao vapor (k_v) do material a uma pressão parcial de vapor P_{v1} é definida como:

$$k_v = \lim_{P_{v2} \rightarrow P_{v1}} \left(\frac{J_v e}{P_{v2} - P_{v1}} \right) \quad (\text{Equação 10})$$

A “permeabilidade” k_v varia com a pressão parcial de vapor P_{v1} , aumentando com o aumento da pressão parcial.

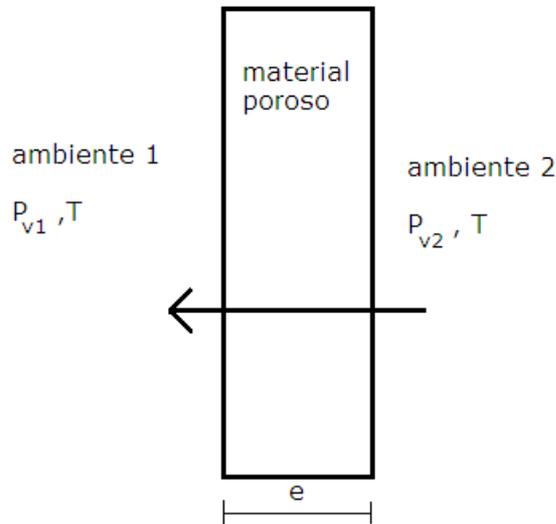


Figura 23 – Ilustração do processo de difusão de vapor em materiais porosos entre dois ambientes a pressões parciais diferentes.

3.3.2 – Medição da “permeabilidade” ao vapor: método das câmaras separadas

Para a medição experimental da “permeabilidade” ao vapor, é comum a utilização do método das câmaras separadas (méthode de la coupelle), QUENARD (1989), BAROGHIEL-BOUNY (1994). A figura 24 ilustra o ensaio utilizado por QUENARD (1989) onde uma amostra do material poroso é disposta entre dois ambientes, à mesma temperatura, com umidades relativas diferentes (pressões parciais de vapor diferentes). No esquema da figura 24, HRM e HRm designam as umidades relativas maior e menor, respectivamente. As umidades relativas são controladas através de soluções salinas supersaturadas, Anexo A. Essa diferença de pressões parciais de vapor entre as duas faces da amostra torna-se a força motriz para que o vapor de água transponha os poros do material.

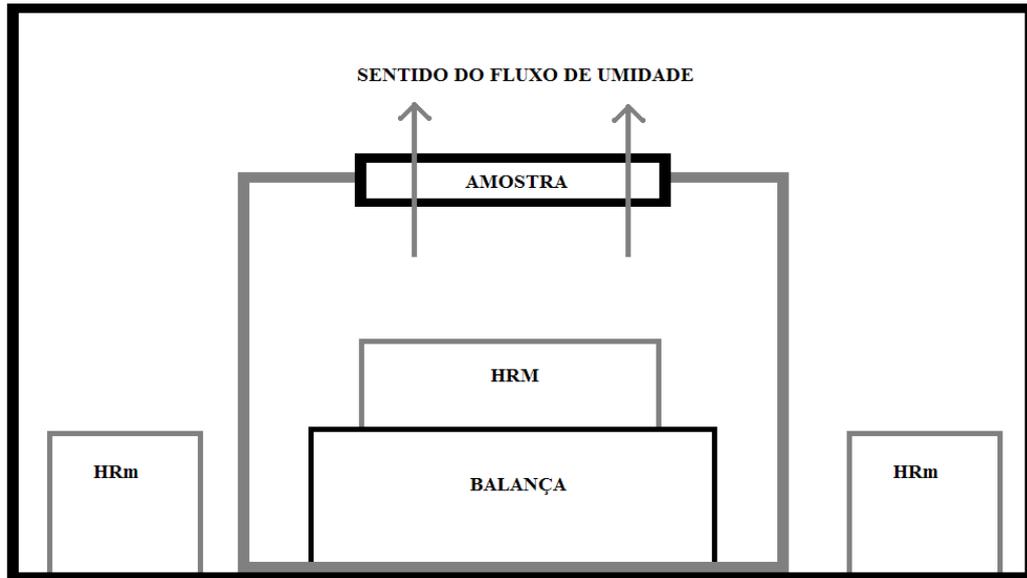


Figura 24 – Esquema do ensaio realizado por Quenard.

A medida do fluxo mássico de vapor é feita pelo método gravimétrico, medindo-se com uma balança a massa que deixa o ambiente à umidade relativa HRM em função do tempo. Para o cálculo da “permeabilidade” k_v a equação 10 é aproximada para:

$$k_v = \frac{J_v \times e}{P_{v2} - P_{v1}} \quad (\text{Equação 11})$$

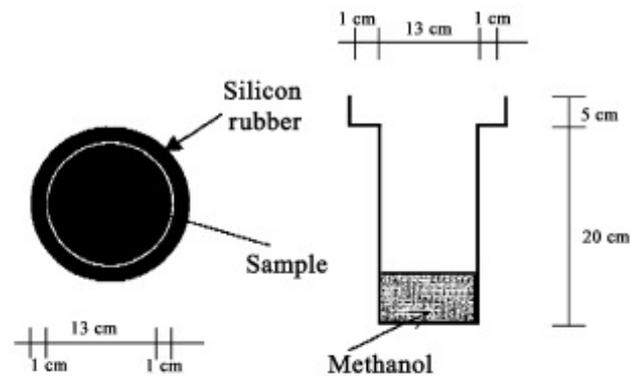
Deve ser observado, comparando-se esta equação com a equação 9 que a relação entre o coeficiente k_v com D_v é dada por:

$$k_v = D_v \frac{M}{RT} \quad (\text{Equação 12})$$

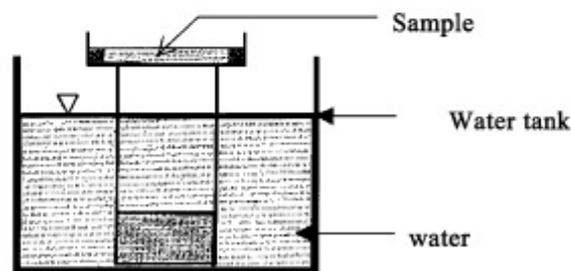
O método das câmaras separadas foi proposto originalmente pelo Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (França). Outros métodos, com modificações em relação ao método original foram sugeridos.

ALSHAMSI et al. (2002) testou um aparato para medir permeabilidade ao vapor onde no interior da câmara era colocado metanol. A figura 25 ilustra esquematicamente este método. O conjunto (recipiente com metanol e amostra porosa) é colocado no interior de um banho de água, com o intuito de se controlar a sua temperatura. A evolução da perda de massa do

conjunto é medida no tempo e com base nisso pode-se calcular a permeabilidade da amostra. Ele demonstrou através de seus estudos que o aparato é viável, podendo-se variar o tamanho da amostra, alterar o metanol por outro líquido, além de poderem ser ensaiados quaisquer tipos de materiais porosos.



(a): Cell and sample details



(b): Setup details

Figura 25 – Aparato utilizado por Alshamsi (EXTRAÍDO DE ALSHAMSI (2002)).

Uma pequena variação dos ensaios anteriores foi utilizada por POSSER (2004), porém ela ao invés de utilizar soluções salinas para controlar a umidade, como QUENARD, utilizou um pequeno frasco com sílica-gel para manter o seu interior a uma umidade relativamente baixa e dispôs os frascos em uma sala com controle de umidade e temperatura. A figura 26 apresenta as amostras de Posser sendo ensaiadas.



Figura 26 – Corpos de prova utilizados por POSSER (EXTRAÍDO DE POSSER (2004)).

Como nos métodos vistos anteriormente, acompanhou-se a evolução da massa do sistema para se determinar a propriedade desejada.

3.1.3 – Método utilizado

Para a realização do ensaio de “permeabilidade” ao vapor, confeccionou-se uma caixa de acrílico estanque onde seriam dispostas as amostras para a realização do ensaio.

Levando-se em consideração o controle de umidade utilizou-se de dois artifícios diferentes, primeiramente desenvolveu-se um porta-amostra em que a amostra fosse a única fronteira permeável entre o seu interior e a região externa. Antes de se realizar a vedação do porta-amostra em seu interior foi disposta sílica-gel, conhecida por ser um excelente agente dessecante. Isto fez com que a umidade no interior do porta-amostra ficasse muito baixa. A figura 27 apresenta um imagem do porta-amostra vedado e pronto para realizar o ensaio de permeabilidade ao vapor.



Figura 27 – Porta-amostra pronto para o ensaio.

O segundo artifício para o controle de umidade foi adotar que no fundo da câmara de acrílico seria disposta uma solução salina saturada e com corpo de fundo, esse fator faz com que essa solução salina mantenha a câmara em uma determinada umidade relativa. A figura 28 apresenta um esquema simples de como ocorre a migração de umidade no interior da câmara através da amostra porosa inicialmente seca.



Figura 28 – Esquema do ensaio de permeabilidade ao vapor.

Para a medição da massa do conjunto porta-amostra foram feitos furos na tampa da caixa de acrílico passando-se um cordão, conectando-o a balança. Na figura 29 mostra-se uma fotografia desta preparação. A figura 30 apresenta uma imagem da balança no momento em que era realizada uma medição de massa.

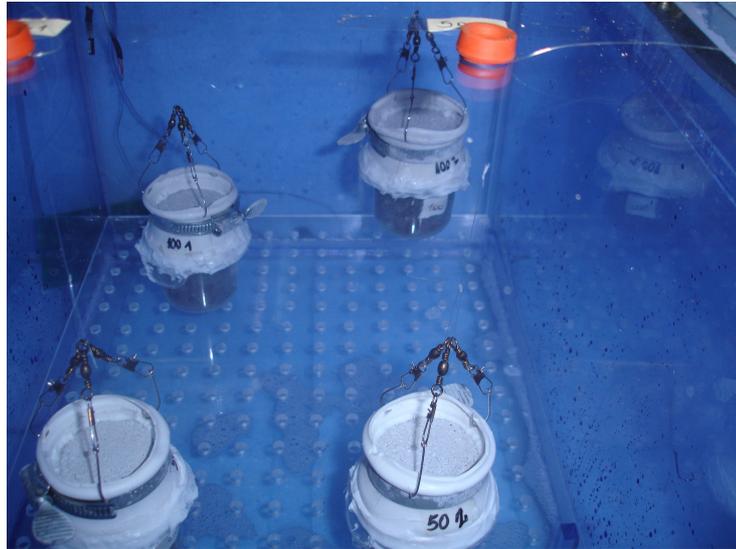


Figura 29 – Preparação do porta-amostra para a medida de massa.



Figura 30 – Medição de massa no ensaio de permeabilidade ao vapor.

Com o intuito de se controlar a temperatura e a umidade relativa no interior da câmara acrílica acoplou-se a ela um sensor desenvolvido pelo setor de eletrônica do Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas (LMPT) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina. A figura 31 apresenta as sondas utilizadas e a figura

32 o hardware para a aquisição de sinais. Um resumo dos dados obtidos através dos sensores de umidade e temperatura está disposto no anexo B.



Figura 31 – Sondas utilizadas pelos sensores de temperatura e umidade.

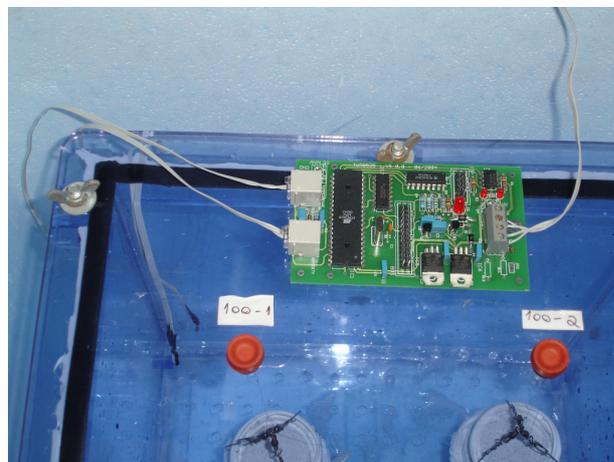


Figura 32 – Hardware utilizado para a aquisição dos dados das sondas.

Para facilitar o andamento do trabalho a câmara estanque foi projetada para a medida da propriedade de 6 amostras simultâneas por ensaio realizado. A figura 33 apresenta a câmara pronta para a realização do ensaio.

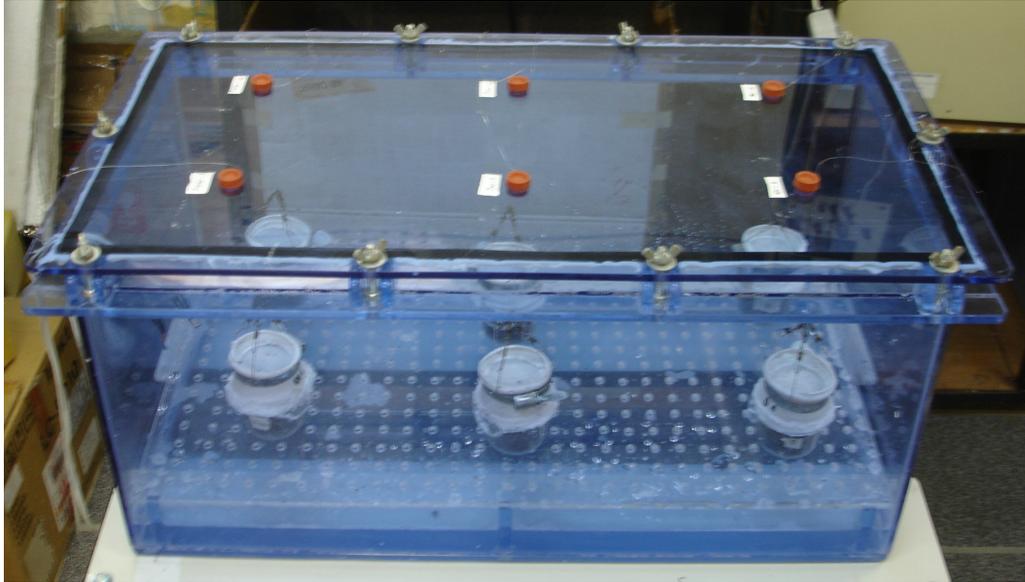


Figura 33 – Câmara de acrílico.

Finalmente após a preparação de todo o material, a câmara montada foi colocada em uma caixa de isopor a fim de se evitar variações na temperatura de realização do ensaio, visto que essa variação poderia ser prejudicial ao andamento do trabalho. A figura 34 apresenta a configuração final do ensaio de “permeabilidade” ao vapor.



Figura 34 – Experimento de permeabilidade ao vapor montado.

Tratando-se da parte de realização do ensaio, repetiu-se o mesmo para quatro diferentes soluções salinas, conseqüentemente quatro umidades relativas diferentes. A temperatura média de realização dos ensaios foi de aproximadamente 25°C. O tempo médio para cada ensaio foi de 45 dias. A tabela 18 apresenta as soluções salinas utilizadas e suas respectivas umidades relativas geradas, levando-se em consideração a temperatura do ensaio.

Tabela 18 – Soluções salinas e umidades relativas correspondentes.

Solução salina	Umidade relativa (%)
Acetato de Potássio	25
Bicromato de Sódio	47
Cloreto de Sódio	75
Sulfato de Potássio	96

Como a amostra era a barreira entre duas regiões com umidades relativas diferentes, naturalmente ocorreu migração de umidade através dos poros da argamassa. Para acompanhar a evolução da migração de umidade o conjunto porta-amostra e corpo de prova tinha sua massa medida diariamente. A partir dessa evolução a permeabilidade pode ser calculada. As figuras 35 e 36 apresentam curvas padrões do fluxo mássico de vapor, respectivamente acumulativo e não acumulativo.

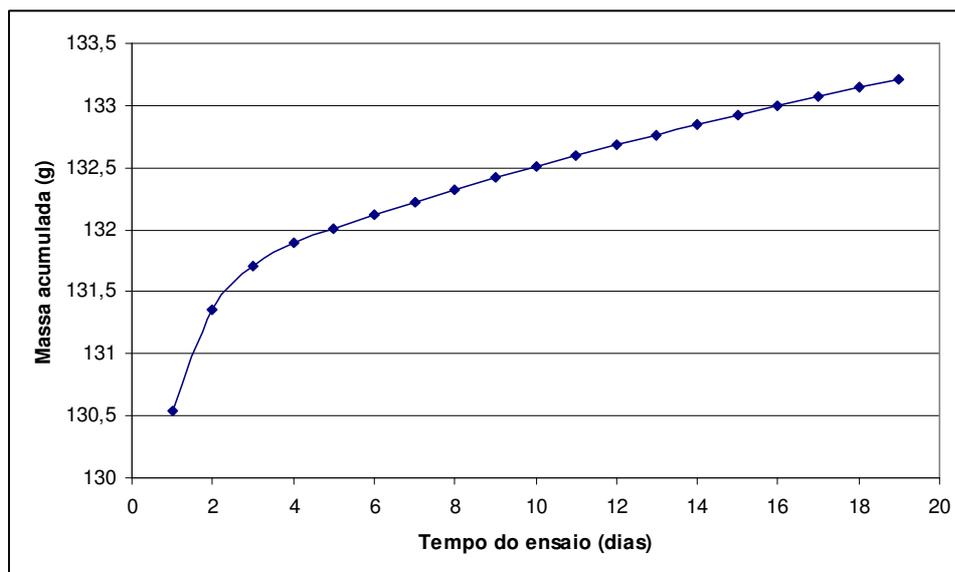


Figura 35 – Evolução do fluxo de umidade acumulativo.

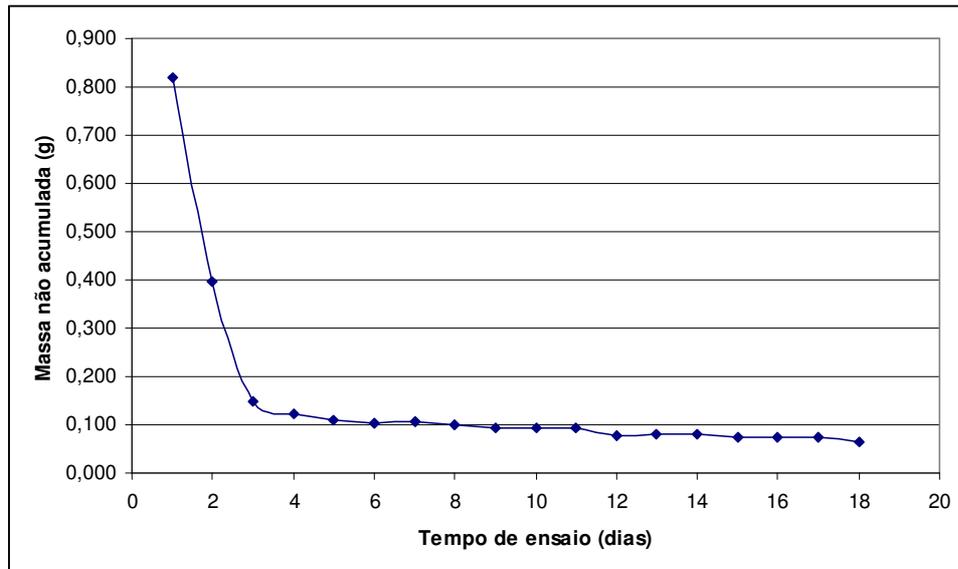


Figura 36 – Evolução do fluxo de umidade não acumulativo.

Através da análise dos gráficos das figuras 35 e 65 percebe-se, para os tempos iniciais, o decaimento no fluxo de mássico de vapor. Isso ocorre devido ao fato de que no início do experimento a amostra está completamente seca, então esses valores de fluxo correspondem não só à migração de vapor através da amostra como também à condensação de umidade (água adsorvida e capilar, seção 3.1) nos poros da argamassa.

Percebe-se através da visualização da figura 35 que o fluxo de umidade tende a apresentar uma estabilização, alçando-se o regime permanente. Quando isso ocorre tem-se o valor do fluxo utilizado para calcular a “permeabilidade” ao vapor e assim utiliza-se a equação 11 para relacionar o fluxo de umidade encontrado com a “permeabilidade” ao vapor do meio poroso.

A densidade do fluxo de vapor é dada por:

$$J_v = \frac{(f_v/t)}{A} \quad (\text{Equação 13})$$

Onde:

J_v – densidade do fluxo de vapor ($\text{Kg/s}\cdot\text{m}^2$);

f_v – fluxo de vapor (Kg);

t – tempo (s);

A – área da amostra (m^2).

3.4 – Condutividade térmica efetiva

O conhecimento da condutividade térmica efetiva de materiais de construção civil, vinculado ao conteúdo de umidade dos materiais, é fundamental para o estudo dos fenômenos acoplados de transporte de calor e umidade na estrutura porosa. Chamamos a condutividade térmica de efetiva uma vez que o material engloba a matriz sólida e o espaço poroso onde podem co-existir água adsorvida e condensada capilarmente bem como ar úmido.

Para a medição da condutividade térmica de materiais de construção civil, vários métodos foram propostos destacando-se: o método da caixa quente protegida (GÜTHS, 1990) o método fluximétrico (GÜTHS, 2002) e o método da sonda térmica (FERNANDES, 1990).

Em função da simplicidade do aparato experimental e da pequena perturbação na amostra, essencialmente no tocante à migração de umidade por gradientes de temperatura, o presente trabalho adotou o método da sonda térmica para a medição da condutividade térmica efetiva em função do conteúdo de umidade a uma dada temperatura.

3.4.1 – Método da sonda térmica

O método da sonda térmica para a medição da condutividade térmica de materiais porosos tem sido utilizado por diversos autores dentre os quais citam-se: ZARCONI ET AL. (1982), LAURENT (1986), PERRIN & JAVELAS (1983) E FERNANDES (1990). Embora o método apresente variações, é comum o uso de uma única sonda, composta de um elemento dissipador de calor e de um termopar para o registro da evolução da temperatura da sonda com o tempo. Os cálculos teóricos que fornecem a equação da evolução da temperatura com o tempo foram desenvolvidos originalmente por CARSLAW & JAEGER (1959). A figura 39 apresenta um esquema da sonda térmica utilizada por FERNANDES (1990) em estudos envolvendo uma argamassa de cal e cimento.

A sonda térmica, veja-se a figura 37, é constituída de um tubo de aço inoxidável sendo dispostos, em seu interior, um fio de constantan e um termopar. O fio de constantan é conectado a uma fonte de tensão e o termopar a um multímetro. Quando a fonte é ligada uma corrente elétrica percorre o fio de constantan e, através do efeito Joule é gerado calor. A sonda é colocada no interior do material a ser analisado, para que o calor gerado pelo fio de

constantan seja dissipado para a amostra medindo-se a evolução da temperatura da sonda com tempo. A condutividade térmica do material é determinada a partir da equação matemática que a relaciona com a evolução de temperatura na amostra, equação esta a ser apresentada mais adiante. Para a inserção da sonda nas amostras de argamassa é feito um furo na argamassa com raio de aproximadamente 1,5 mm e o espaço vazio é preenchido com uma pasta térmica cuja função é atenuar a resistência térmica de contato sonda-argamassa.

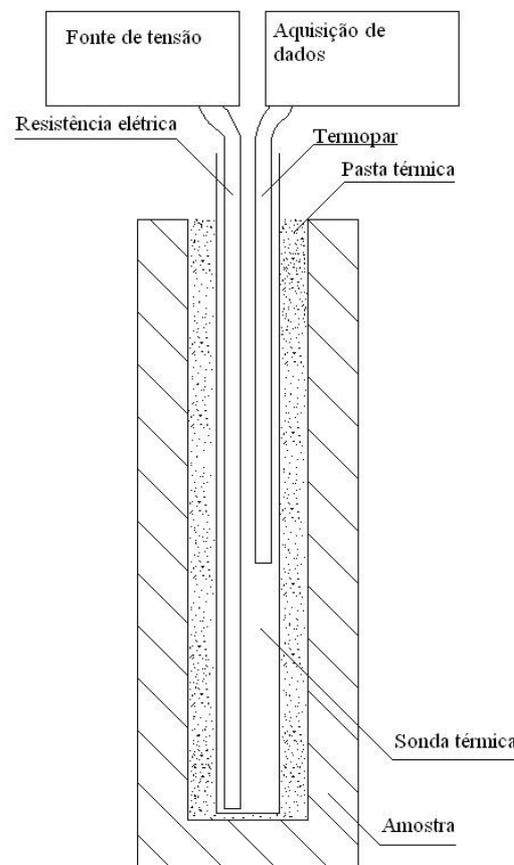


Figura 37 – Esquema da sonda térmica utilizada por FERNANDES (1990).

3.4.2 – Evolução da temperatura com o tempo na sonda térmica

PERRIN (1985) resolveu o problema de difusão de calor para o sistema sonda-argamassa esquematizado na figura 36 adotando as seguintes hipóteses:

- i) taxa de calor constante e uniforme na sonda;
- ii) temperatura uniforme na sonda;
- iii) fluxo de calor por condução radial;

- iv) no instante inicial $t = 0$ todo o sistema se encontra à mesma temperatura;
- v) meio infinito

A equação obtida por PERRIN (1985), veja-se também FERNANDES (1990), para a temperatura da sonda em função do tempo, $T_s(t)$, pode ser escrita como:

$$T_s(t) = A_1 \ln t + A_2 + \frac{A_3}{t} (\ln t + A_4) \quad (\text{Equação 14})$$

Onde A_1, A_2, A_3 e A_4 são parâmetros dependentes de propriedades térmicas da argamassa, da pasta térmica no furo e da própria sonda bem como da geometria do sistema.

A resistência térmica de contato sonda-argamassa e a capacidade térmica da sonda são dadas pelo terceiro termo do lado direito da equação 14 e são proporcionais a t^{-1} . Após tempos suficientemente longos a contribuição deste termo não é importante e a equação assume a forma linear:

$$T_s(t) = A_1 \ln t + A_2 \quad (\text{Equação 15})$$

Na figura 38 mostra-se uma curva típica de evolução de temperatura da sonda térmica com o tempo.

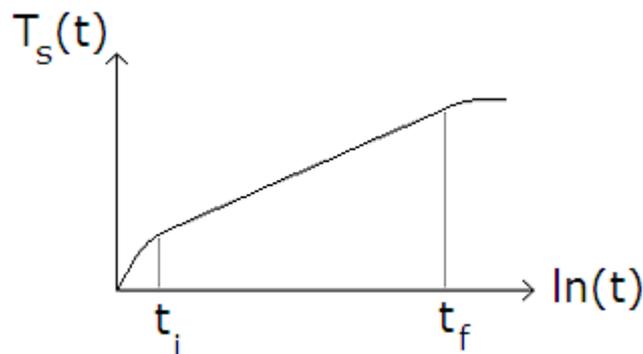


Figura 38 – Curva típica de evolução de temperatura na sonda.

Para tempos $t < t_i$ a evolução da temperatura está condicionada à resistência térmica de contato sonda-argamassa bem como pela capacidade térmica da sonda (parâmetros A_3 e A_4)

da equação 14. Para tempos $t > t_f$ têm-se efeitos de borda, o contorno modificando a evolução de temperatura.

A partir da declividade da reta para os tempos onde $t_i < t < t_f$ calcula-se a condutividade térmica λ do material uma vez que tem-se:

$$A_1 = \frac{Q}{4\pi\lambda} \quad (\text{Equação 16})$$

Onde:

Q – Potência emitida pela sonda por unidade de comprimento.

3.4.3 – Método utilizado

A confecção do aparato experimental envolvendo a sonda térmica é relativamente simples e seguiu-se os mesmos procedimentos adotados por FERNANDES (1990). Todo o experimento é constituído da sonda térmica, como descrita acima, uma fonte de tensão e um multímetro.

A sonda propriamente dita é constituída de um tubo de aço inoxidável onde em seu interior são dispostos um fio de constantan, funcionando como uma resistência elétrica para a geração de calor, e um termopar, responsável pela medida da evolução da temperatura da sonda. As dimensões da sonda são mostradas na figura 39. A resistência elétrica constitui-se de um fio de constantan de 0,07 mm de diâmetro com isolamento elétrico de teflon (fio vermelho). O termopar utilizado é de cobre-Constantan, (marca comercial *Omega Engineering Inc*) também com 0,07 mm de diâmetro e isolamento elétrico de teflon. Os espaços vazios existentes no interior do corpo da sonda foram preenchidos com pasta térmica e o fundo da sonda térmica foi tapado com uma resina epóxi.

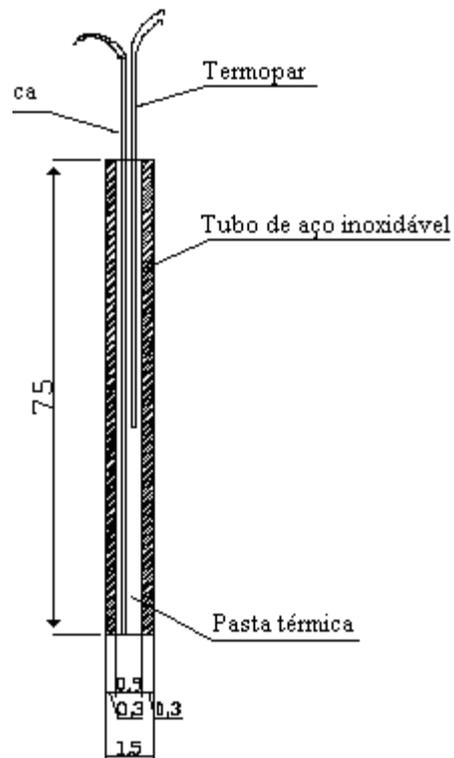


Figura 39 – Detalhes técnicos da sonda térmica. (medidas em mm).

Na figura 40 mostra-se uma fotografia da sonda térmica construída e utilizada no presente trabalho.

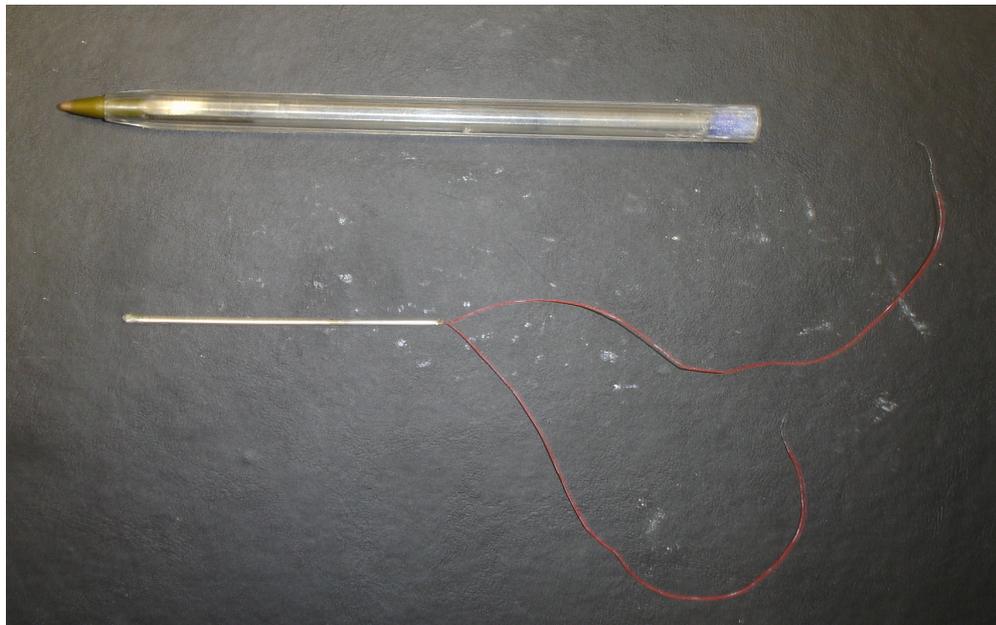


Figura 40 – Sonda térmica utilizada.

3.4.3.1 – Princípio de medição

Para a realização das medidas de condutividade térmica, utilizaram-se amostras de argamassa em formato cilíndrico, com dimensões de 100 mm de comprimento por 50 mm de diâmetro.

No centro de uma das bases da amostra fez-se um furo circular de 50 mm de profundidade e de 3mm de diâmetro. A figura 41 mostra o conjunto da sonda com o corpo de prova e a figura 42 apresenta todo o aparato experimental do ensaio de condutividade térmica



Figura 41 – Conjunto sonda térmica e amostra de argamassa.



Figura 42 – Aparato experimental da sonda térmica.

Como o diâmetro do furo feito na amostra é maior que o diâmetro da sonda, o espaço vazio foi preenchido com um material condutor térmico, visando atenuar a resistência térmica de contacto e evitar a convecção do ar contido entre a amostra e a sonda. O meio condutor térmico escolhido foi uma pasta térmica da marca *Implastec* comumente utilizada em microinformática para a melhor dissipação de calor de processadores.

A tabela 19 demonstra as características básicas da pasta térmica utilizada, segundo dados do próprio fabricante.

Tabela 19 – Dados técnicos da pasta térmica.

Propriedade	Característica
Cor	Branca
Consistência	Pastosa
Componente básico	Silicone de alto peso molecular
Temperatura de trabalho	-40 a 200°C
Condutividade térmica	2 W/mK

Após a inserção da pasta e da sonda no furo da amostra o fio de constatação foi conectado a fonte de tensão e o termopar a um multímetro. A fonte de tensão era então ligada, gerando uma tensão de aproximadamente 6V (Volts) e o multímetro realizava as medições da diferença de potencial gerada pelo termopar.

3.4.3.2 – Realização do ensaio

Objetiva-se no presente trabalho a análise da influência do conteúdo de umidade na condutividade térmica das argamassas. Assim, amostras de argamassa dos diferentes traços foram umidificadas com diferentes conteúdos de umidade, desde a condição de amostra seca até a condição de amostras completamente saturadas. Na tabela 20 são apresentados os valores de conteúdo de umidade (em base mássica) adotados para cada traço de argamassa.

Tabela 20 – Conteúdo mássico de umidade das amostras para o ensaio de condutividade térmica.

Traço	Umidade (%)
0 / 50 / 100	0
0 / 50 / 100	3
0 / 50 / 100	6
0 / 50 / 100	9
0 / 50 / 100	12
0 / 50 / 100	15
0 / 50 / 100	18
50 / 100	21
50 / 100	24
100	27
100	30
100	34

Para cada corpo de prova foram realizadas três repetições do ensaio de condutividade. Um gráfico padrão para o ensaio de condutividade térmica pode ser observado através da figura 43. Pode-se perceber que a partir de aproximadamente 2 segundos o gráfico da tensão em função do logaritmo natural do tempo torna-se uma reta.

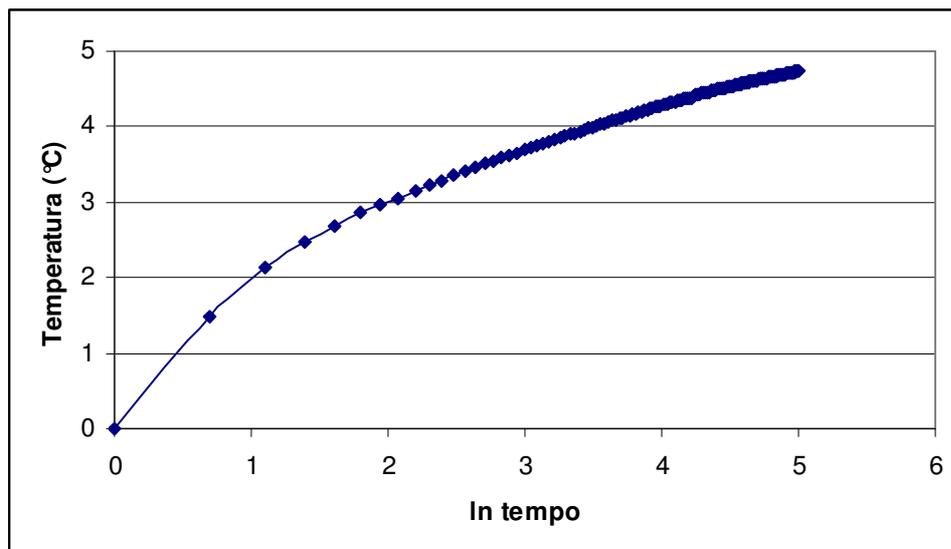


Figura 43 – Variação da temperatura em relação ao tempo.

A região reta pode ser visualizada com maior facilidade através da figura 44. No canto superior esquerdo da figura percebe-se a equação da reta que representa os pontos adquiridos no ensaio da sonda térmica. Percebe-se que a equação da reta representa de maneira satisfatória os resultados do ensaio em questão.

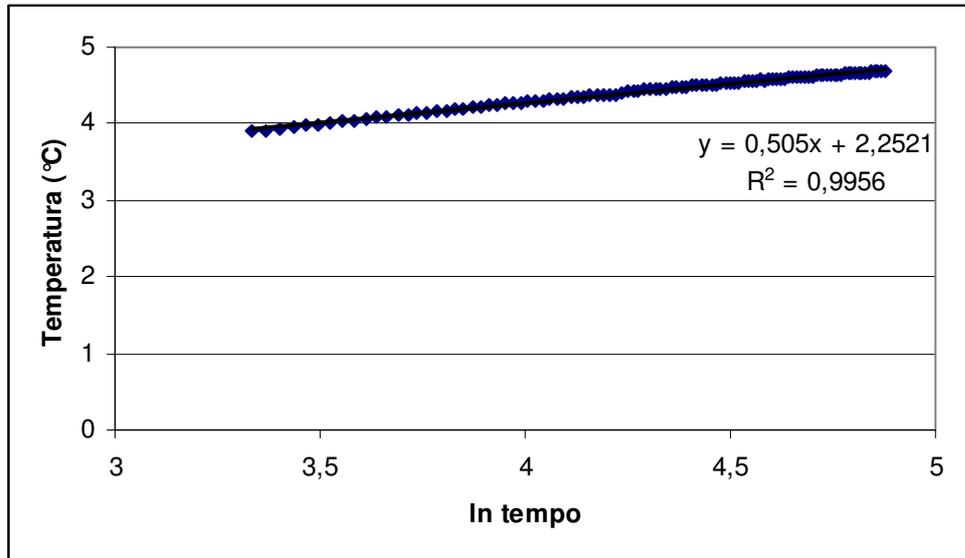


Figura 44 – Região reta da variação da temperatura em relação ao tempo.

O coeficiente angular da reta está apresentado na fórmula de tendência calculada, esse coeficiente é o termo da equação que acompanha o valor de x. A partir desse momento realiza-se a parte final da análise. A equação 17 apresenta a relação utilizada para calcular a condutividade térmica das argamassas em função do coeficiente angular encontrado. Nota-se, que a condutividade térmica é diretamente proporcional à potência por unidade de comprimento do fio de constantan e inversamente proporcional ao coeficiente angular encontrado para a reta que representa os pontos experimentais.

$$\lambda = \frac{Q}{4 \times a \times \pi} \quad (\text{Equação 17})$$

Onde:

λ – condutividade térmica (W/mK);

Q – potência por unidade de comprimento do fio de constantan (W/m);

a – coeficiente angular;

Para calcular-se a potência por unidade de comprimento do fio de constatam deve-se simplesmente utilizar a equação 18.

$$Q = 2 \times i \times R_m \quad (\text{Equação 18})$$

Onde:

Q – potência por unidade de comprimento do fio (W/m);

i – intensidade de corrente elétrica (A)

Rm – resistência por unidade de comprimento do fio (Ω/m).

Capítulo 4

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados de “permeabilidade” ao vapor e condutividade térmica das argamassas obtidos com a utilização dos métodos experimentais descritos no capítulo anterior. Os resultados são analisados procurando-se relacionar o comportamento das propriedades físicas macroscópicas com as propriedades geométricas da microestrutura das argamassas. No próximo capítulo são tecidas as considerações finais deste trabalho.

4.1 – “Permeabilidade” ao vapor

Na tabela 21 apresentam-se os resultados obtidos de permeabilidade ao vapor para os três traços de argamassa onde foram utilizadas, para cada umidade relativa, duas amostras de cada traço de argamassa. Deve ser lembrado que os valores de umidade relativa apresentados se referem a uma das câmaras estando a outra câmara com umidade relativa próxima de zero (sílica-gel). Os valores médios (para cada duas amostras) de permeabilidade são mostrados na tabela 22.

Tabela 21– Permeabilidade ao vapor (Kg/s.m.Pa).

% CZP	Umidade Relativa do Experimento			
	25%	47%	75%	96%
0	$4,69 \times 10^{-13}$	$5,15 \times 10^{-13}$	$5,21 \times 10^{-13}$	$6,14 \times 10^{-13}$
0	$3,76 \times 10^{-13}$	$4,62 \times 10^{-13}$	$5,11 \times 10^{-13}$	$6,46 \times 10^{-13}$
50	$3,23 \times 10^{-13}$	$4,51 \times 10^{-13}$	$4,48 \times 10^{-13}$	$6,15 \times 10^{-13}$
50	$3,87 \times 10^{-13}$	$3,95 \times 10^{-13}$	$4,73 \times 10^{-13}$	$5,60 \times 10^{-13}$
100	$2,27 \times 10^{-13}$	$3,74 \times 10^{-13}$	$4,16 \times 10^{-13}$	$5,20 \times 10^{-13}$
100	$3,65 \times 10^{-13}$	$3,79 \times 10^{-13}$	$4,12 \times 10^{-13}$	$5,28 \times 10^{-13}$

Tabela 22 – Média dos valores de permeabilidade (Kg/s.m.Pa).

% CZP	Umidade Relativa do Experimento			
	25%	47%	75%	96%
0	$4,23 \times 10^{-13}$	$4,88 \times 10^{-13}$	$5,16 \times 10^{-13}$	$6,30 \times 10^{-13}$
50	$3,55 \times 10^{-13}$	$4,23 \times 10^{-13}$	$4,61 \times 10^{-13}$	$5,87 \times 10^{-13}$
100	$2,96 \times 10^{-13}$	$3,76 \times 10^{-13}$	$4,14 \times 10^{-13}$	$5,24 \times 10^{-13}$

Estes resultados de permeabilidade média em função da umidade relativa (para cada traço de argamassa) são mostrados graficamente nas Figuras 45, 46 e 47. Na Figura 48 mostra-se um gráfico comparativo para os três traços de argamassa.

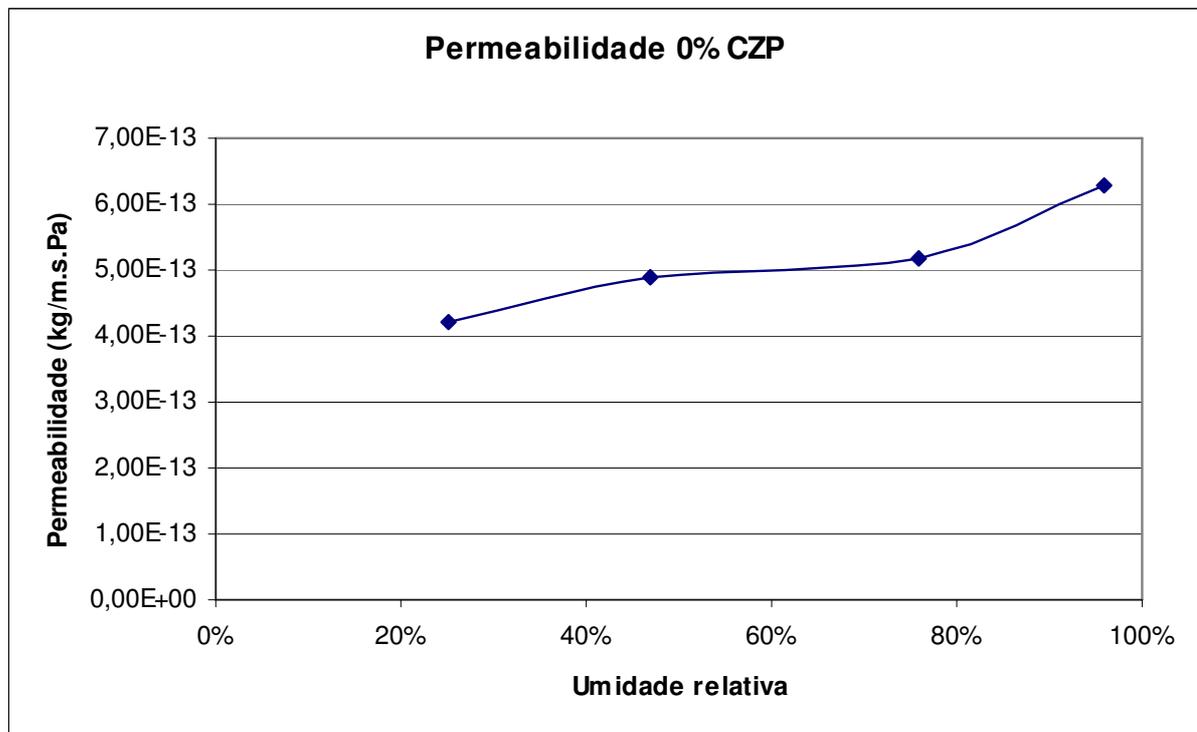


Figura 45 – Permeabilidade ao vapor das amostras com 0% CZP.

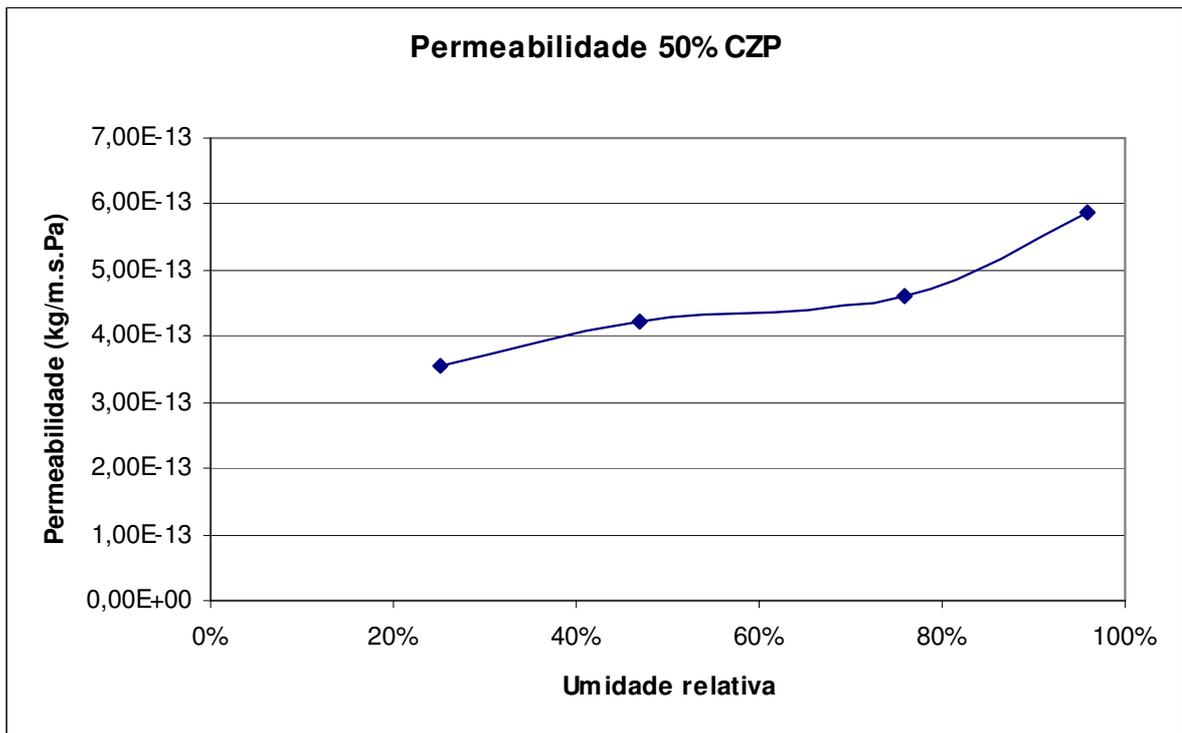


Figura 46 – Permeabilidade ao vapor das amostras com 50% CZP.

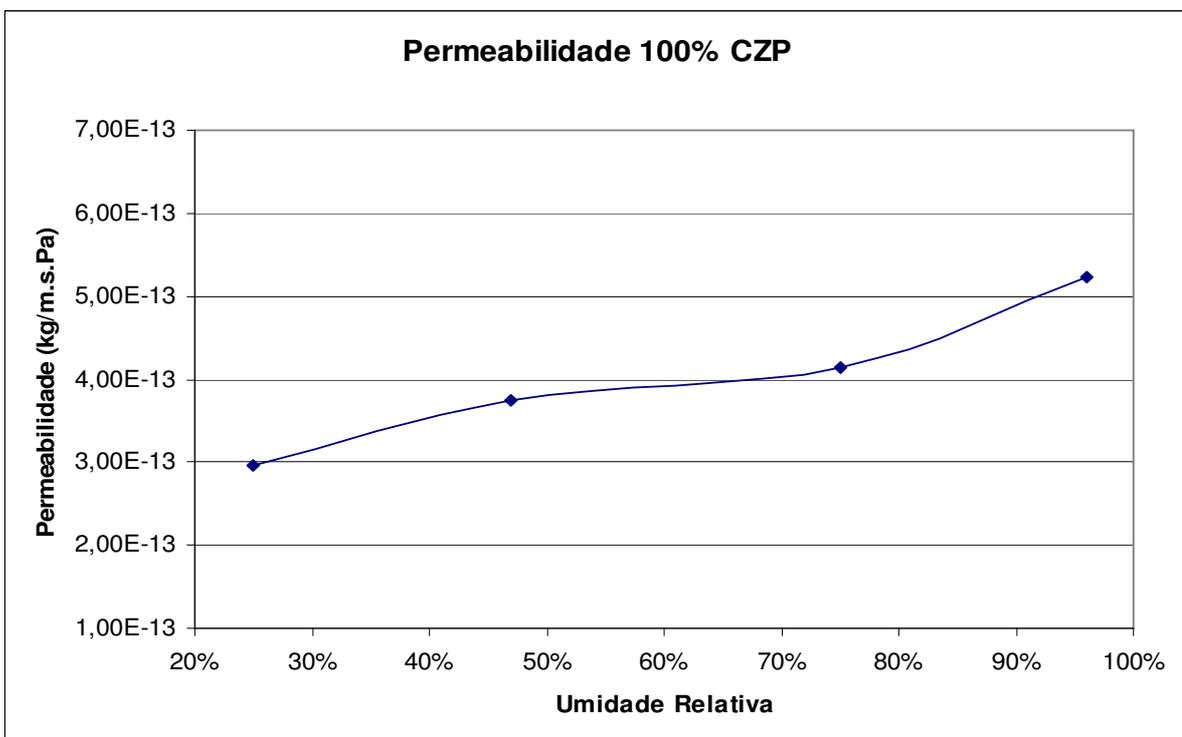


Figura 47 – Permeabilidade ao vapor das amostras com 100% CZP.

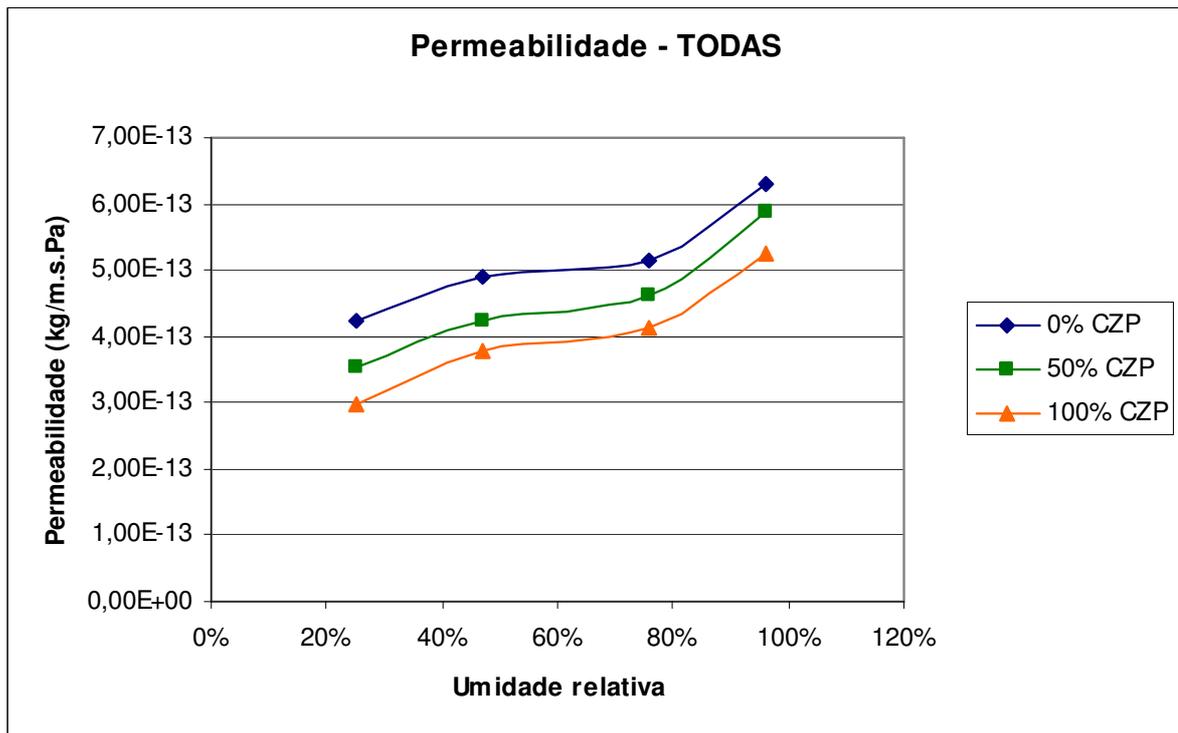


Figura 48 – Comparação entre as permeabilidades calculadas.

Os resultados mostrados nas figuras acima evidenciam um mesmo comportamento de variação da permeabilidade com a umidade relativa para os três traços de argamassa. A permeabilidade ao vapor aumenta com o aumento da umidade relativa. Isto ocorre devido ao fenômeno físico de condensação capilar nos poros da argamassa. Como previsto teoricamente, veja-se MEROUANI (1987) e FERNANDES (1990), para uma dada temperatura e umidade relativa, existe um diâmetro limite de poro no material para a condensação capilar. Os poros com diâmetros maiores que esse limite apresentam somente a camada de água fisicamente adsorvida; nos poros menores que este diâmetro co-existe a água adsorvida e a água capilar que preenche totalmente estes poros. Desta forma, à medida que se aumenta a umidade relativa mais e mais poros são preenchidos com água capilar, formando ilhas de água condensada no espaço poroso. Nos poros preenchidos com água capilar o vapor migra por processos de condensação-evaporação nos meniscos água-ar úmido como previsto pela teoria de PHILIPPI & DE VRIES.

Para fins comparativos entre os traços de argamassas, pode-se definir um valor médio de permeabilidade, representativo das várias umidades relativas envolvidas.

Para tanto, define-se uma permeabilidade média k_{vm} por:

$$J_v = k_{vm} \frac{P_{v2} - P_{v1}}{e} \quad (\text{Equação 19})$$

onde P_{v1} é constante e igual a aproximadamente zero, referente ao ambiente com sílica-gel; P_{v2} é variável e igual à pressão de vapor na câmara com solução salina. Em termos da umidade relativa hr temos uma curva $k_v = f(hr)$ e a permeabilidade média k_{vm} é calculada a partir de:

$$k_{vm} = \frac{1}{hr_2 - hr_1} \int_{hr_1}^{hr_2} k_v(hr) d(hr) \quad (\text{Equação 20})$$

Esta definição foi utilizada e os resultados obtidos para a permeabilidade média em função do teor de cinza nas argamassas são apresentados na tabela 23.

Tabela 23 – Valores de permeabilidade média para as argamassas (Kg/s.m.Pa).

% CZP	Permeabilidade Média
0	$5,08 \times 10^{-13}$
50	$4,49 \times 10^{-13}$
100	$3,98 \times 10^{-13}$

Os resultados obtidos mostram que a permeabilidade ao vapor diminui à medida que se aumenta o teor de cinza pesada presente na argamassa. Isto pode ser explicado com base na distribuição de tamanho de poros obtida pela técnica de intrusão de mercúrio, veja-se a figura 9 do capítulo 2. Em relação à argamassa de referência, as argamassas com cinza pesada em sua microestrutura, têm uma menor fração de volume de poros na faixa de diâmetros de 1 a $0,1 \mu\text{m}$ e uma maior fração na faixa de $0,1$ a $0,01 \mu\text{m}$. Como dito, para uma dada umidade relativa tem-se um diâmetro crítico de poro abaixo do qual os poros são preenchidos com água capilar e acima do qual os poros apresentam apenas a camada de água adsorvida. Assim, ainda que ocorram processos de condensação-evaporação nos meniscos dos poros com água condensada, a difusão de vapor é facilitada nos poros que contêm apenas água adsorvida (“maiores” poros) que é o caso das argamassas com menor teor de cinza pesada.

4.2 – Condutividade térmica efetiva

Os valores experimentais de condutividade térmica em função da quantidade de CZP presente na argamassa e do conteúdo mássico de umidade são apresentados na tabela 24. Esses valores são referentes a média de três medidas realizadas para cada conjunto conteúdo de umidade/% CZP, as colunas DV são os desvios padrões das médias calculadas. No anexo C está disposta a tabela com as medidas de todas as condutividades térmicas. Nas figuras 49 a 51 apresentam-se, respectivamente, as curvas de variação da condutividade térmica em função do conteúdo de umidade para as argamassas com 0% CZP, 50% CZP e 100% CZP. Na Figura 52 apresenta-se uma comparação entre os valores encontrados de condutividade térmica para os diferentes traços. Esses ensaios foram realizados em uma sala climatizada com uma temperatura de aproximadamente 25° C.

Tabela 24 – Resultados dos ensaios de condutividade térmica.

W_{Sat} (%)	0% CZP	DV	50% CZP	DV	100% CZP	DV
0	0,56	3,60x10 ⁻³	0,40	5,30x10 ⁻³	0,36	9,78x10 ⁻⁴
3	0,68	1,84x10 ⁻²	0,43	2,02x10 ⁻³	0,38	8,13x10 ⁻⁴
6	0,84	1,70x10 ⁻²	0,46	2,26x10 ⁻³	0,40	3,70x10 ⁻³
9	0,93	1,62x10 ⁻²	0,52	2,00x10 ⁻³	0,44	9,12x10 ⁻⁴
12	1,11	2,79x10 ⁻²	0,59	2,37x10 ⁻²	0,47	7,96x10 ⁻³
15	1,22	1,09x10 ⁻²	0,70	1,73x10 ⁻²	0,51	3,77x10 ⁻³
18	1,40	9,64x10 ⁻³	0,90	3,58x10 ⁻³	0,60	2,89x10 ⁻³
21	—		1,05	9,30x10 ⁻³	0,67	9,13x10 ⁻³
24	—		1,30	1,69x10 ⁻²	0,75	1,87x10 ⁻²
27	—		—		0,86	5,30x10 ⁻³
30	—		—		1,04	2,32x10 ⁻²
32	—		—		1,21	3,47x10 ⁻²

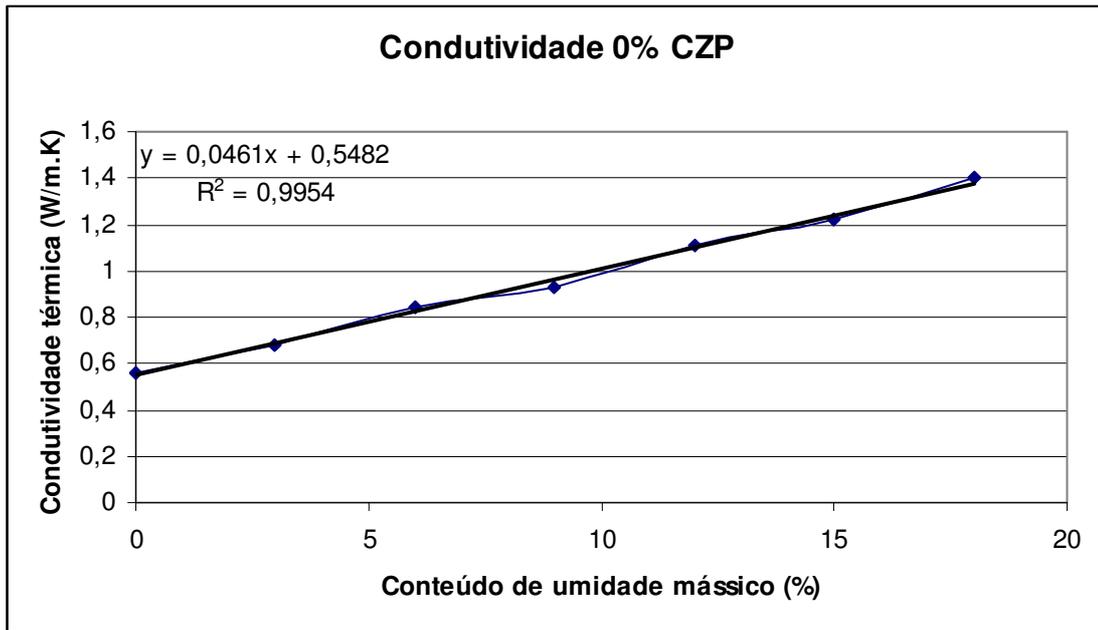


Figura 49 – Variação da condutividade térmica das amostras com 0% CZP.

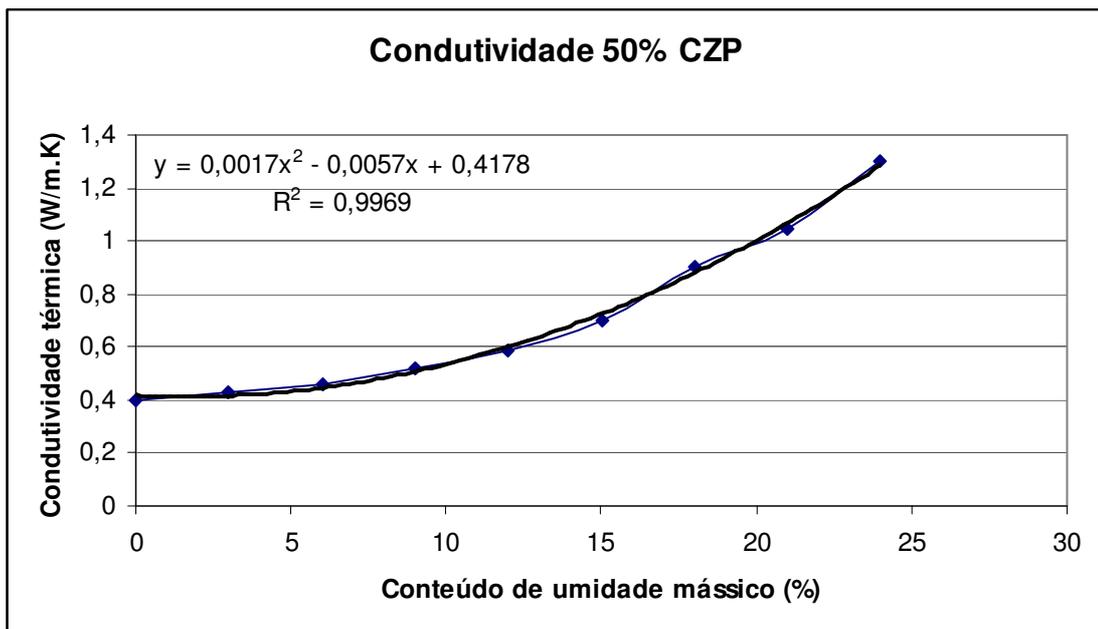


Figura 50 – Condutividade térmica das amostras com 50% CZP.

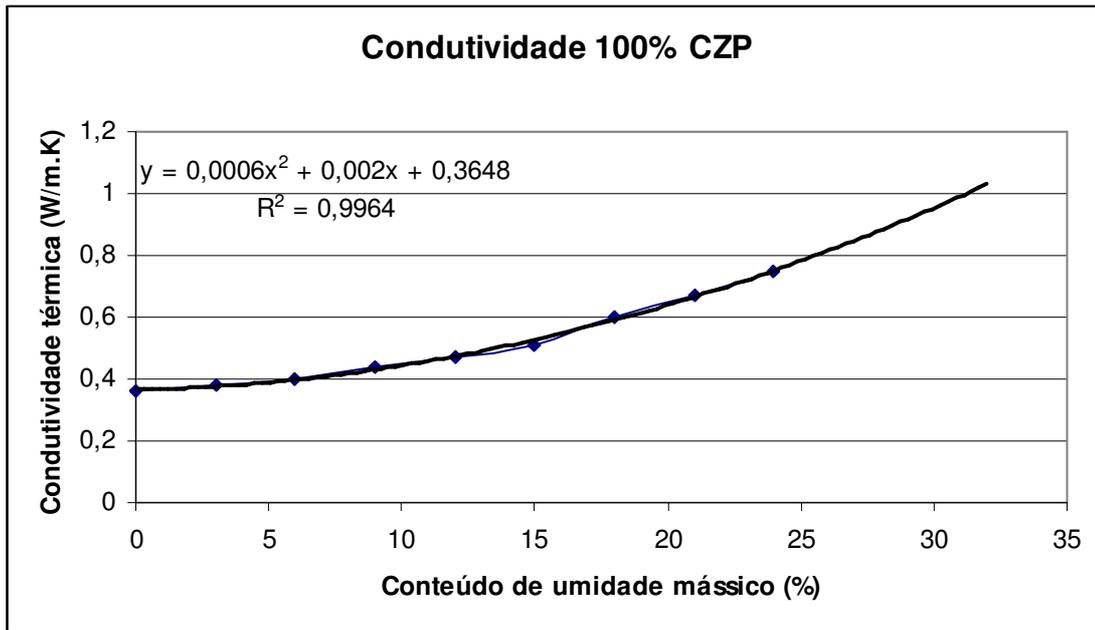


Figura 51 – Condutividade térmica das amostras com 100% CZP.

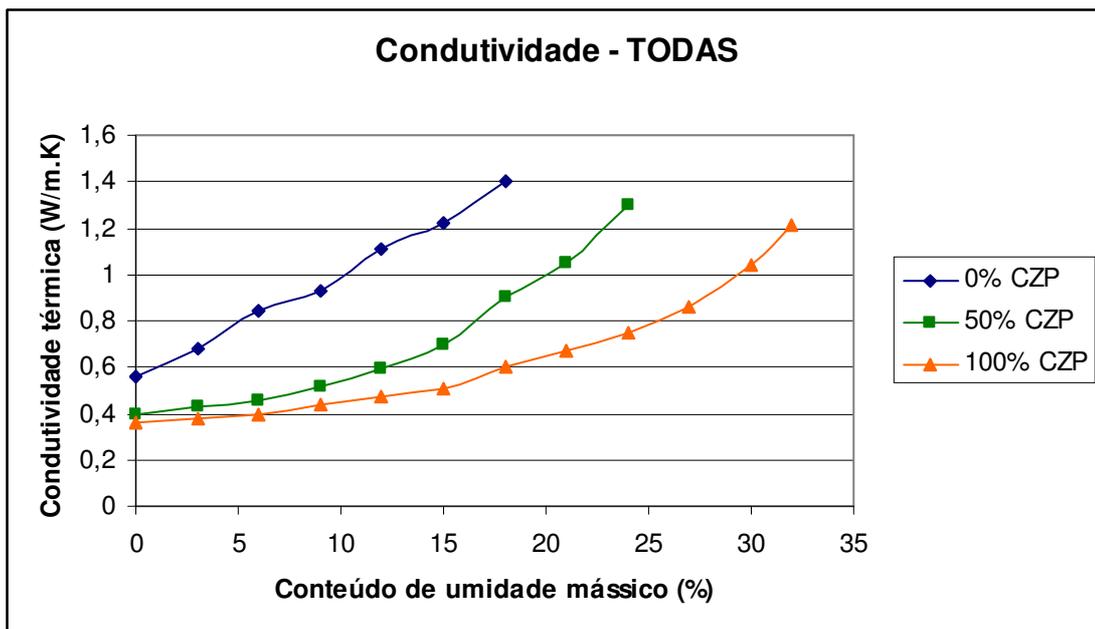


Figura 52 – Resultados de todos os ensaios de condutividade térmica.

Através da análise dos resultados percebe-se que, para um mesmo conteúdo mássico de umidade, com o aumento do teor de CZP na argamassa tem-se menores valores de condutividade térmica. Isto pode ser explicado pelo fato de os grãos de areia serem completamente sólidos (sem poros) e as partículas de cinza apresentarem uma importante porosidade, como visualizado na Figura 1 do Capítulo 2 e nas curvas de distribuição de tamanho de poros, Figura 9 do Capítulo 2. Como a condutividade térmica dos grãos de areia e

da fase sólida das partículas de cinzas são maiores que a condutividade do ar e da água, a presença destes fluidos nos poros das partículas de cinza faz com que diminua a sua condutividade efetiva.

Observa-se ainda que para a argamassa padrão (0% CZP) tem-se um comportamento linear da curva de condutividade térmica em função do conteúdo de umidade. Contudo, a adição de cinzas pesadas nas argamassas acarreta uma mudança nesse comportamento, fazendo com que a curva de condutividade obedeça a um regime quadrático. SANTOS (2006) em seus estudos experimentais analisou os mesmos traços de argamassa do presente trabalho e com o método da sonda térmica para a medição da condutividade térmica efetiva obteve um comportamento linear para as argamassas com adição de cinzas pesadas. Sugere-se aqui a realização intensiva de outros experimentos para a definição do comportamento da curva de condutividade para as argamassas com cinzas pesadas.

STEIGER et al. (1978) apud DEMIBORGA (2003) estudou a influência da umidade presente em argamassas na condutividade térmica. Ele afirma que com o aumento de 1% em massa de água a condutividade térmica do material aumenta em média 5%. Levando-se em consideração a adição de cinza de queima, DEMIRBOGA (2003) adicionou uma porcentagem máxima em relação à massa de cimento de até 30% e percebeu que a cinza reduz de maneira acentuada a condutividade térmica das amostras. Adicionando-se 30% de cinza às amostras, houve uma redução de 18,6% na condutividade térmica das mesmas.

Finalizando o presente capítulo, nas figuras 53 e 54 apresentam-se os valores de condutividade térmica das argamassas respectivamente, no estado seco e saturado, em função do grau de substituição de areia por cinza pesada.

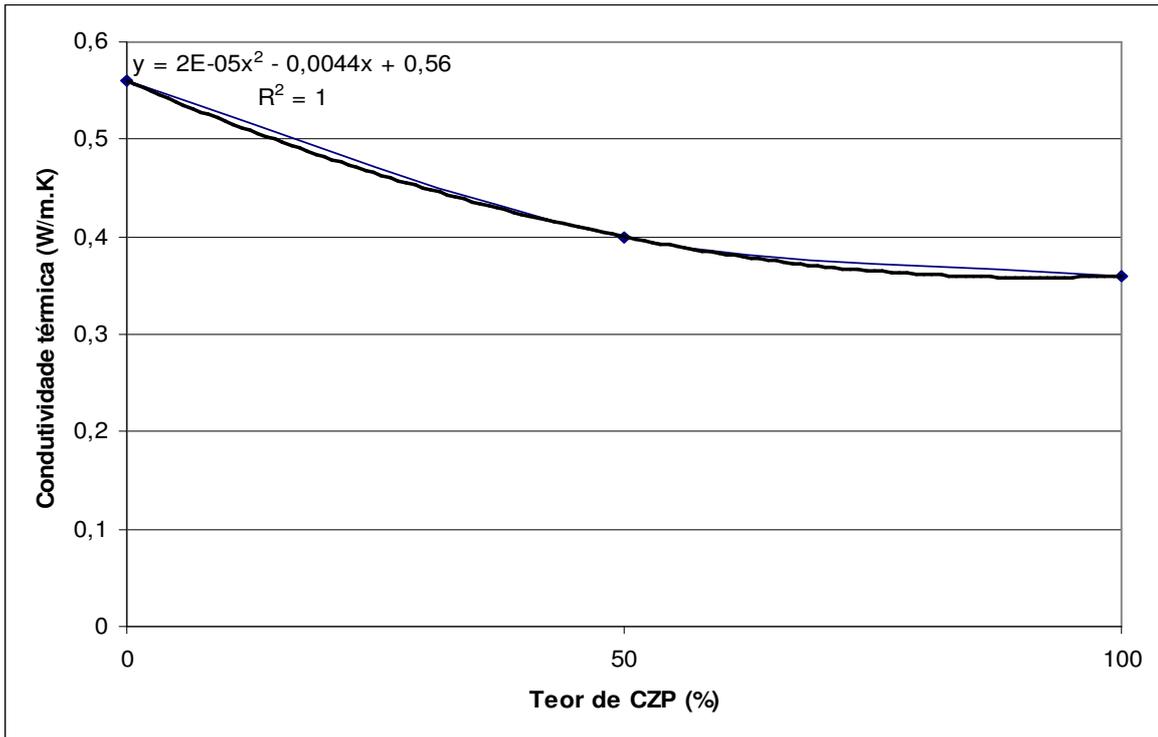


Figura 53 – Condutividade térmica das amostras secas.

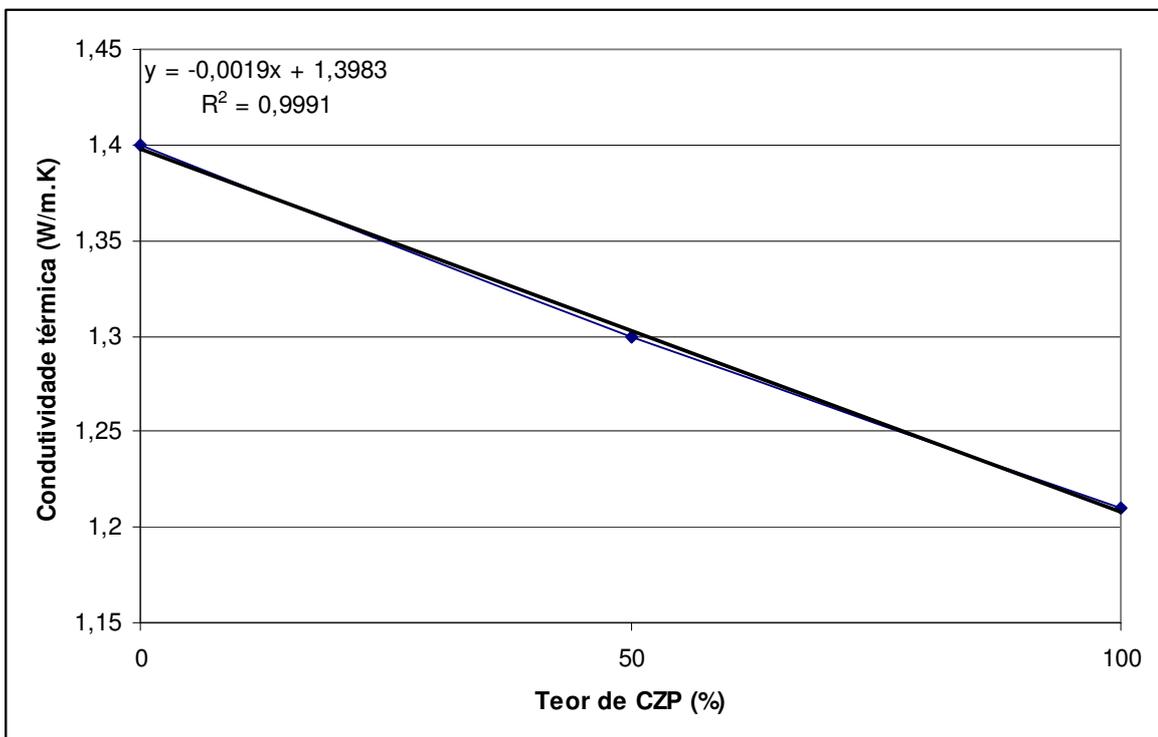


Figura 54 – Condutividade térmica das amostras saturadas.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

O presente trabalho tratou da caracterização da geometria da microestrutura e de propriedades físicas macroscópicas de argamassas com adição de cinza pesada (CZP), oriundas do processo de queima de carvão mineral em usinas termoeletricas. A determinação experimental de propriedades físicas como as analisadas no presente trabalho, “permeabilidade” ao vapor e condutividade térmica, são importantes para o estudo dos fenômenos acoplados de transporte de calor e umidade em materiais de construção civil. Estes fenômenos são importantes pois estão associados com vários problemas relevantes das edificações: conforto térmico e higiene no ambiente edificado, durabilidade dos materiais, uso racional de energia e materiais, etc.

Foram confeccionadas amostras com argamassa de revestimento padrão e amostras com substituição parcial e total da areia por cinza pesada. A cinza foi adicionada à argamassa em relação volumétrica à areia retirada de sua constituição. Através das análises realizadas observou-se que a cinza pesada influencia de maneira significativa nas propriedades da argamassa.

Foi analisada a influência da adição de cinza pesada nos parâmetros de densidade aparente, conteúdo mássico de saturação, porosidade, distribuição de tamanho de poros e de superfícies específicas. Na tabela 25 apresenta-se um resumo dos resultados obtidos para estes três primeiros parâmetros.

Tabela 25 – Resumo de propriedades das argamassas em função da quantidade de CZP presente.

Parâmetro Microestrutural	0% CZP	50% CZP	100% CZP
Densidade aparente	1,66 g/cm ³	1,48 g/cm ³	1,29 g/cm ³
Conteúdo mássico de saturação (W_{sat})	18,27 %	23,58%	31,81%
Porosidade (a partir de W_{sat})	30,33 %	34,90 %	41,04 %
Porosidade (intrusão de Hg)	34,36 %	38,04 %	44,13 %

Através da análise da tabela 25 observa-se que a incorporação de CZP no traço da argamassa fez com que todas as propriedades analisadas fossem alteradas. Todas estas alterações podem

ser explicadas pelo fato de os grãos de areia individualmente não apresentarem poros (são impermeáveis) enquanto que as partículas de cinza apresentam uma porosidade importante. Desta forma, a substituição da areia pela cinza provoca a diminuição da densidade aparente e o aumento do conteúdo mássico de saturação bem como da porosidade aberta total da argamassa.

Com relação às distribuições de tamanho de poros, obtidas pela técnica de intrusão de mercúrio, observa-se que a adição de cinza pesada à argamassa, diminui a fração volumétrica de poros na faixa de 0,1 a 1 μm aumentando os poros pertencentes à região de 0,01 μm de diâmetro. Provavelmente, grande parte do volume destes poros na faixa de tamanho de 0,01 μm de diâmetro pertencem às partículas de cinza. Como resultado, o diâmetro médio de poro das argamassas diminui com o aumento do teor de cinza pesada.

Também, devido à presença importante de poros na faixa de diâmetros entre 0,01 μm e 0,1 μm atribuídos às partículas de cinza pesada observa-se um aumento significativo da superfície específica à medida que se aumenta o teor de cinza pesada na argamassa.

A substituição de areia por cinza pesada apresentou modificações no comportamento das propriedades físicas macroscópicas das argamassas. Como efeito final, o aumento do teor de cinza nas argamassas diminuiu a condutividade térmica efetiva (para um mesmo conteúdo mássico de umidade) assim como diminuiu a permeabilidade média ao vapor.

Estas modificações no comportamento macroscópico podem ser explicadas levando-se em conta as alterações microestruturais provocadas pela substituição da areia pela cinza pesada. Para a permeabilidade ao vapor, a difusão do vapor de água é facilitada nas argamassas com menor teor de cinza uma vez que estas apresentam uma fração volumétrica maior de poros maiores onde se tem apenas a camada de água adsorvida (sem condensação capilar).

No tocante à condutividade térmica efetiva, como os grãos de areia são completamente sólidos (sem poros) e as partículas de cinza apresentam uma importante porosidade, a presença de água ou ar nos poros destas partículas faz com que ocorra a diminuição da condutividade da argamassa.

Também, a argamassa padrão (0% CZP) apresentou um comportamento linear da curva de condutividade térmica em função do conteúdo de umidade da mesma forma como obtido por FERNANDES (1990). Contudo, a adição de cinzas pesadas nas argamassas acarretou uma mudança nesse comportamento, fazendo com que a curva de condutividade se tornasse quadrática.

5.1 – Sugestões para trabalhos futuros

Para o prosseguimento dos estudos realizados no presente trabalho colocam-se os seguintes tópicos como sugestões para futuras pesquisas:

- O estudo de propriedades das argamassas com um maior número de teor de substituição de areia por CZP;
- O estudo das propriedades microestruturais e físicas da cinza pesada isoladamente;
- A confirmação experimental do comportamento quadrático para a curva de condutividade térmica em função do conteúdo de umidade; a construção de modelos matemáticos para a predição destas curvas;
- A extensão do presente estudo, levando-se em consideração outras propriedades físicas de transporte de calor e massa das argamassas.

CAPÍTULO 6

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, T. **Particle size Measurement**. 4.ed. London: Chapman and Hall, 1990.

ALSHAMSI, A. M., et al. **Development of a permeability apparatus for concret and mortar**. Cement and Concret Research 32, p. 923-929, 2002.

ANDRADE, L. B. **Metodologia de avaliação para uso de cinzas pesadas de termelétricas como agregado natural para concreto**. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

APPOLONI, C. R., Fernandes, C.P., Rodrigues. C.R.O. **X-ray microtomography study of a sandstone reservoir rock**. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment Volume 580, Issue 1, 21 September 2007, Pages 629-632

BAROGHIEL-BOUNY, V. **Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons: methods, analyse, interprétrations**. Laboratoire Central des Pont et Chaussées – Section des Publications, 1994

BEAR, J., BACHMAT, Y. **Transport phenomena in porous media. Basic equations in fundamentals of transport phenomena in porous media**. Martinus Nijhoff Publishers, 1984.

CARLSLAW H. S., JAEGER, C. **Conduction of heat in solids**. Oxford University, Press., New York, 1959.

DAÏAN, J. F. **Processus de condensation et de transfert d'eau dans en matériau meso et macroporeux – Etude expérimentale du mortier de ciment**. Tese de doutorado, L'Institute National Polytechnique de Grenoble, França 1986.

DAIAN, J. F., Fernandes, C. P., Philippi P. C., Neto, J. A. B. C., **3D reconstitution of porous media from image processing data using a multiscale percolation system.** Journal of Petroleum Science and Engineering, 42/1,15-28, 2004.

DEMIBORGA, R., GÜL, R. **The effects of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concret.** Cement and Concret Research 33, p. 723-727, 2003.

DE VRIES, D. A. **Simultaneous transfer of heat and moisture in porous media.** Transactions of the American of Geophysical Union, Vol. 39, p. 909-916, 1958.

DULLIEN, F. A. L. **Porous media.** Academic press, New York, 1979

FERNANDES, C. P. **Estudo do processo de condensação e migração de umidade em meios porosos consolidados. Análise experientnal de uma argamassa de cal e cimento.** Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1990.

FERNANDES, C. P. **Engenharia de microestruturas: análise quantitativa de imagens e simulação de processos físicos.** Monografia para o Concurso de Professor Adjunto de Depto de eng. Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

JOSS, M., et al. **Permeability and difusivity of concret as function of temperature.** Cement and Concret Research 32, p. 1497-1504, 2002.

KJELLEN, K. O., et al. **Preparation of flat-polished specimens for SEM-backscattered alectron imaging and X-ray microanalysis – importance of epoxy impregnation.** Cement and Concrete Researsh 33, p. 611-6, 2003.

LAURENT, J. P. **Contribution à la caractérisation thermique des milieux poreux granulaires: Optimisation d’outils de mesures in-situ” des paraèters thermiques. Application à l’étude des propriétés thermiques du matériau terre.** Tese de doutorado, L’Institute National Polytechnique de Grenoble, França 1986.

LOOSVELDT, H., et al. **Experimental study of gas and liquid permeability of a mortar.** Cement and Concret Research 32, p. 1357-1363, 2002.

LUIKOV, A. V. **Heat and mass transfer in capillary porous bodies.** Pergamon Press. Edition, 1966

MERROUANI, L. **Phénomènes de sorption et de transfert d'humidité dans des matériaux du bâtiment.** Tese de doutorado, L'Institute National Polytechnique de Grenoble, França, 1987

PERRIN, B. **Etude des transferts couples de chaleur et de masse dans de materiaux poreux consolidés non saturés utilisés em genie civil.** Tese de doutorado, Université Paul Sabatier de Toulouse, França, 1985

PERRIN, B., Foures, J. C., JAVELAS, R. **Détermination du coefficient de diffusion isotherme de l'humidité dans les matériaux de constructions.** Matériaux et constructions, Vol. 16, n° 191, 1983.

PHILIP, J. R., DE VRIES, D. A. **Moisture movement in porous materials under temperature gradients.** Transactions of the American of Geophysical Union, V. 38, p. 222-232, 1957.

PIAZZA, J. L., RUI, V. **comportamento das cinzas pesadas de carvão mineral como substituto da areia quartzosa em argamassas.** Simpósio Brasileiro de Tecnologia em Argamassas, Vitória-ES, p.389-401 1999.

POSSER, N. D. **Proporcionamento de argamassa para reboco de recuperação.** Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

POZZOBON, C. E. **Aplicações tecnológicas para a cinza de carvão mineral produzida no complexo termelétrico Jorge Lacerda.** Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

POZZOBON, C. E., et. al. **Cinza do carvão mineral produzida no complexo termoeletrico Jorge Lacerda**. 8º ENTAC, Salvador-BA, Vol. 1, p.261-268, 2000.

QUENARD, D. **Adsorption et transfert d'humidite dans les materiaux hygroscopiques**. Tese de Doutorado, Institut National Polytechnique de Toulouse, 1989.

SATO, N. M. N., **Análise da Porosidade e das Propriedades de Transporte de Massa de Concretos com Vistas à Avaliação de suas Durabilidades**. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

SANTOS, F. I. G., et. al. **Avaliação de resíduos para uso em argamassas – Estudo com cinza pesada**. Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável, São Paulo-SP, 2004

SANTOS, F. I. G., **Avaliação das propriedades higrotérmicas das argamassas: estudo de caso com as cinzas pesadas**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

STEIGER, R. W., HURD, M. K., **Lightweight concret for floors and roof decks**. Concret Construction 23, p. 411-422, 1978

YUNES, S. **Explanation and Application of the Physisorption and the Chemisorption Techniques in the Characterization of Solids in General and Catalysts in Particular**. Norcross: Micromeritics Instruments Corp., 1998.

WEBB, P. A. **Analytical Methods in Fine Particle Technology**. Norcross: Micromeritics Instruments Corp., 1997.

ZARCONE, et. al. **Mesure des caractéristiques termophysiques en milieux poreux par la méthode dès chocs thermiques**. Colloque transfert de chaleur et de masse em milieu poreux non sature. Lausanne Février, 1982.

ANEXO A

SOLUÇÕES SALINAS

A tabela A1 apresenta os valores de umidade relativa mantidas por soluções salinas saturadas. Os dados visualizados na tabela foram retirados de FERNANDES (1990) apud MERROUANI (1987). Esses valores são referentes à temperatura de 25° C e obedecem a norma francesa NF X 15-014

Tabela A1 – Propriedades mecânicas de argamassas com 28 dias de cura.

Solução salina	Umidade relativa a 25° C (%)
Hidróxido de potássio	8
Acetato de potássio	22
Cloreto de magnésio	33
Carbonato de potássio	43
Bicromato de sódio	54
Nitrito de sódio	65
Cloreto de sódio	75
Sulfato de amônio	80
Sulfato de potássio	97

Para acompanhar a evolução da umidade relativa mantida pelas soluções salinas em função da temperatura do experimento faz-se o uso dos dados contidos na figura A1, também retirado de FERNANDES (1990). Percebe-se que as soluções salinas de sulfato de potássio, sulfato de amônio e cloreto de sódio, não apresentam uma variação significativa da umidade relativa com a variação da temperatura.

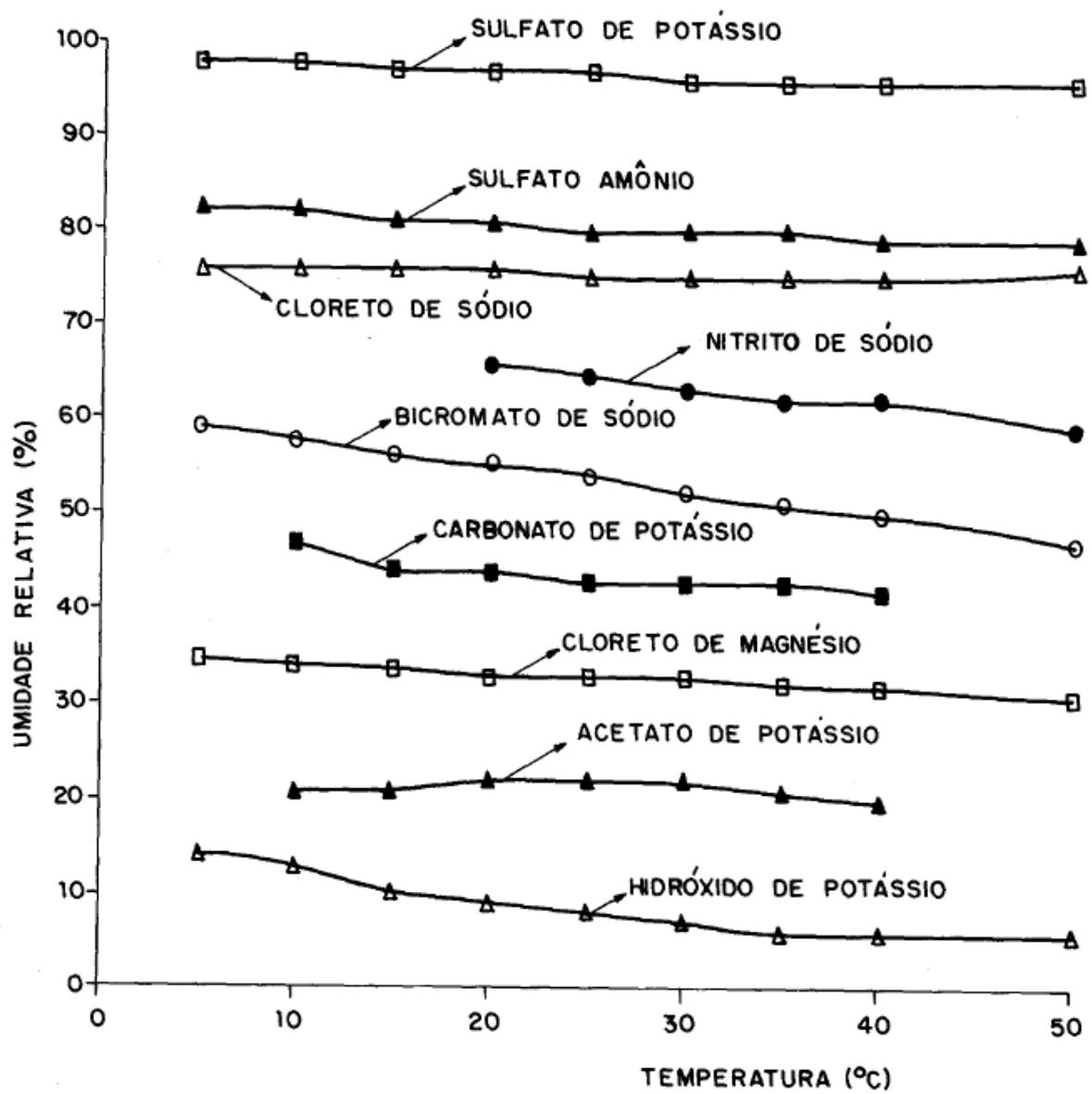


Figura A1 – Evolução da umidade relativa com a variação de temperatura.

ANEXO B

DADOS DAS SONDAS DE UMIDADE RELATIVA E DE TEMPERATURA NO ENSAIO DE PERMEABILIDADE AO VAPOR

As sondas utilizadas para fazerem o acompanhamento da umidade relativa e da temperatura no ensaio de permeabilidade ao vapor realizavam uma leitura de cada parâmetro a cada 5 segundos. A cada hora completada de ensaio um dado é gerado permitindo assim facilitar a análise dos resultados obtidos.

Devido ao fato de que cada ensaio de permeabilidade levou em média 45 dias, apresenta-se na tabela B1 um resumo, com as médias dos valores, dos parâmetros analisados através do uso da sonda de temperatura e da sonda de umidade.

Tabela B1 – resumo dos resultados das sondas de umidade e temperatura.

Solução salina	Umidade (Norma NF X 15-014)	Temperatura (°C)	Umidade (%)
Acetato de potássio	22	$24,6 \pm 1,3$ °C	$24 \pm 0,9$
Bicromato de sódio	54	$26,4 \pm 1,5$ °C	$47 \pm 2,3$
Cloreto de sódio	75	$22,5 \pm 0,9$ °C	$74 \pm 1,2$
Sulfato de potássio	97	$24,9 \pm 0,6$ °C	$96 \pm 0,8$

ANEXO C

CONDUTIVIDADE TÉRMICA

As tabelas C1, C2 e C3 apresentam os valores dos coeficientes angulares das retas, bem como os valores de condutividade térmica para as três medidas realizadas e o valor médio com seu respectivo desvio padrão, respectivamente para as amostras 0% CZP, 50% CZP e 100% CZP. O parâmetro A corresponde ao coeficiente angular da reta e DV ao desvio padrão.

Tabela C1 – Dados do ensaio de condutividade térmica para amostras com 0% CZP.

Conteúdo de umidade (%)	a	Condut.	Condut. média	DV
0	0,69	0,55	0,56	3,60E-03
	0,69	0,56		
	0,68	0,56		
3	0,58	0,66	0,68	1,84E-02
	0,56	0,69		
	0,55	0,70		
6	0,46	0,84	0,84	1,70E-02
	0,47	0,82		
	0,45	0,85		
9	0,40	0,95	0,93	1,62E-02
	0,41	0,93		
	0,42	0,92		
12	0,34	1,13	1,11	2,79E-02
	0,36	1,08		
	0,34	1,12		
15	0,31	1,23	1,22	1,09E-02
	0,32	1,21		
	0,31	1,22		
18	0,27	1,41	1,40	9,64E-03
	0,28	1,39		
	0,27	1,40		

Tabela C2 – Dados do ensaio de condutividade térmica para amostras com 50% CZP.

Conteúdo de umidade (%)	a	Condut.	Condut. média	DV
0	0,93	0,41	0,41	5,30E-03
	0,91	0,42		
	0,93	0,41		
3	0,86	0,45	0,45	2,02E-03
	0,85	0,45		
	0,86	0,45		
6	0,80	0,48	0,48	2,26E-03
	0,79	0,49		
	0,79	0,48		
9	0,71	0,54	0,54	2,00E-03
	0,72	0,53		
	0,72	0,54		
12	0,69	0,56	0,58	2,37E-02
	0,64	0,60		
	0,64	0,60		
15	0,58	0,66	0,68	1,73E-02
	0,55	0,69		
	0,55	0,69		
18	0,47	0,81	0,81	3,58E-03
	0,47	0,82		
	0,47	0,82		
21	0,40	0,96	0,95	9,30E-03
	0,41	0,94		
	0,40	0,95		
24	0,33	1,16	1,18	1,69E-02
	0,32	1,19		
	0,32	1,19		

Tabela C3 - Dados do ensaio de condutividade térmica para amostras com 100% CZP.

Conteúdo de umidade (%)	a	Condut.	Condut. média	DV
0	1,07	0,36	0,36	9,78E-04
	1,07	0,36		
	1,07	0,36		
3	1,01	0,38	0,38	8,13E-04
	1,01	0,38		
	1,01	0,38		
6	0,95	0,40	0,40	3,70E-03
	0,96	0,40		
	0,94	0,41		
9	0,87	0,44	0,44	9,12E-04
	0,87	0,44		
	0,87	0,44		
12	0,83	0,46	0,47	7,96E-03
	0,83	0,46		
	0,81	0,48		
15	0,76	0,50	0,51	3,77E-03
	0,75	0,51		
	0,75	0,51		
18	0,65	0,59	0,59	2,89E-03
	0,65	0,59		
	0,64	0,60		
21	0,57	0,68	0,67	9,13E-03
	0,58	0,66		
	0,56	0,68		
24	0,51	0,75	0,73	1,87E-02
	0,54	0,71		
	0,53	0,73		
27	0,45	0,86	0,86	5,30E-03
	0,45	0,86		
	0,44	0,87		
30	0,36	1,06	1,07	2,32E-02
	0,37	1,05		
	0,35	1,09		
34	0,29	1,33	1,36	3,47E-02
	0,27	1,40		
	0,29	1,35		