# UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

# ESTUDO DA EMANAÇÃO DE RADÔNIO EM AMOSTRAS DE CONCRETO COM COMPOSIÇÕES DIFERENTES

Aline Katiuscia Mateus Joaquim Burke

UNICAMP BIBLIOTECA CENTRAL SEÇÃO CIRCULANTE

## Campinas 2002

UNICAMP

## UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

# ESTUDO DA EMANAÇÃO DE RADÔNIO EM AMOSTRAS DE CONCRETO COM COMPOSIÇÕES DIFERENTES

Aline Katiuscia Mateus Joaquim Burke

Orientador: Prof. Dr. Vladimir Antonio Paulon

Dissertação de Mestrado apresentada à Comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Edificações.

Compined S	Atesto que esia é a versão definitiva
vampinas, s	Aa dissadaranin dasa
2002	20,05,02
	Prot. Dr. V. Chulsy
	Matrícula:

UNIDADE <u>]</u> Nº CHAMADA <u>T/UNICA M</u> P R 917 €
and a set of the set o
V EX
TOMBO BC/ 50779
PROC-16-837102
c DX
PRECO -RS11,00
DATA 11/09/02
Nº CPD

CM00173046-9

BIB 10 256537

## FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

1

B917e	Burke, Aline Katiuscia Mateus Joaquim Estudo da emanação de radônio em amostras de concreto com composições diferentes / Aline Katiuscia Mateus Joaquim BurkeCampinas, SP: [s.n.], 2002.
	Orientador: Vladimir Antonio Paulon. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil.
	1. Concreto. 2. Radon. 3. Concreto - Transporte. 4. Detectores nucleares. I. Paulon, Vladimir Antonio. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil. III. Título.

## UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

# ESTUDO DA EMANAÇÃO DE RADÔNIO EM AMOSTRAS DE CONCRETO COM COMPOSIÇÕES DIFERENTES

Aline Katiuscia Mateus Joaquim Burke

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por

Prof. Dr. Vladimir Antonio Paulon Presidente e Orientador/UNICAMP

Profa Dra. Gladis Camarini NICAMP

Profa. Dra. Elisabeth Mateus Yoshimura USP



Campinas, 20 de maio de 2002

### À minha querida avó, Catarina.

Por seu amor, ternura, carinhoe valiosos ensinamentos. Por ajudar na minha educação e formação, incentivar os meus estudos e sempre acreditar em mim.

### À minha grande mãe, Inéia.

Que nunca deixou que a distância que um dia existiu entre nós pudesse de alguma maneira nos afastar. Por seu amor e sua compreensão e pela ajuda nos momentos difíceis. Por incansável estímulo para eu me tornar uma pessoa sempre melhor.

#### Ao meu pai Tarciso

Por seu apoio, carinho e por toda ajuda dispensada em minhas jornadas.

#### Aos meus irmãos Julieta e Juninho

Pela calorosa e incansável torcida. Por compreenderem que mesmo com minha ausência sempre existirá um elo de companheirismo que nos manterá unidos.

#### Ao meu Anjo Barroco

Simplesmente por sua existência...

### AGRADECIMENTOS

Este projeto experimental é fruto da colaboração de várias pessoas. Se não foram citadas, ficam aqui registrados os meus sinceros agradecimentos.

Agradeço ao professor Dr. Vladimir Antonio Paulon pela orientação, auxílio dispensado e pelas importantes informações que contribuíram fundamentalmente para a realização deste trabalho.

Ao professor Dr. Julio Cesar Hadler Neto que, apesar de seu nome não constar na orientação deste trabalho, atuou como co-orientador e sua participação foi de essencial importância para o desenvolvimento da dissertação.

À Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP, pela oportunidade de ingressar no mestrado e pelo apoio durante o seu desenvolvimento através de funcionários e laboratórios. Aos professores do mestrado em Engenharia Civil que muito contribuíram para a minha formação profissional. Ao Departamento de Raios Cósmicos e Cronologia do Instituto de Física Gleb Wataghin da UNICAMP, onde grande parte do programa experimental foi realizado.

À professora Dra. Gladis Camarini pela atenção dispensada, valiosas sugestões e pela oportunidade de cursar as disciplinas Aglomerantes I e II, pois os trabalhos de laboratório destas disciplinas permitiram a verificação da estanqueidade das campânulas (estudo da emanação de radônio em amostras de gesso, cimento e sílica dopadas e não dopadas com <sup>238</sup>U), familiarização

com o método e interpretação de seus resultados (estudo da emanação de radônio em pastas de cimento).

Aos técnicos do Laboratório de Estruturas e Construção Civil (FEC-UNICAMP) Ademir, Antônio Carlos, José Reinaldo Marçal, Luciano, Marcelo e Rodolfo, pelo auxílio na preparação das amostras de concreto e execução de alguns ensaios.

Aos técnicos do Laboratório de Solos e Estradas (FEC-UNICAMP), Luiz Eduardo Meyer e Reinaldo B. Leite Silva pelo apoio nos testes com o primeiro modelo de campânula, pelas sugestões que resultaram na elaboração do novo modelo e pela oportunidade da utilização desse laboratório para a execução do ensaio de absorção e ascensão capilar.

À Oficina Mecânica da Física (IFGW-UNICAMP) pela confecção das campânulas empregadas na determinação da emanação de radônio.

Ao Laboratório de Escoamento e Meios Porosos (Departamento de Engenharia de Petróleo FEM-UNICAMP), onde foram realizados ensaios que fizeram parte dos trabalhos disciplinares do curso de mestrado.

Ao professor Eng. Matoso da Faculdade de Engenharia Civil de Araraquara pelo auxílio em questões da etapa experimental.

Ao Eng. Paulo Aquino do EPT pelo apoio técnico, pela caracterização física dos cimentos desta pesquisa e pela oportunidade da utilização do laboratório dessa empresa para a preparação das amostras empregadas na determinação do teor de rádio.

Agradeço em especial, ao meu amigo Sandro Guedes que sempre estava disposto em ajudar, principalmente quando meus conhecimentos em Física se mostraram limitados. Pelo seu fundamental apoio, sem o qual, dificilmente, seria possível a realização desta dissertação.

vi

Às minhas amigas Mirian e Gisleiva pela amizade sincera, estímulo e torcida.

Aos meus tios Luzia e Ezequiel que me acolherem como filha quando cheguei a Campinas.

Ao Eng. Aloísio da Concrebras pelo auxílio em questões da etapa experimental e pela doação da areia e do pó de pedra empregados na confecção das amostras.

Ao Almy Anacleto da Silva pelo apoio técnico e pela doação dos detectores LR-115 empregados na determinação da emanação de radônio

A Fosroc na pessoa do Eng. Cláudio Ourives pela doação dos aditivos utilizados na confecção dos concretos.

Às empresas Cimento Itambé, Cimentos Mauá e Cimentos Votorantan pela doação dos cimentos empregados nesta pesquisa.

À DNC Industrial Campinas Ltda. pela doação do adesivo empregado na colagem das campânulas utilizadas nesta pesquisa.

À empresa Van Leer Embalagens pela doação dos garrafões de água mineral empregados nos testes inicias.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pela concessão de bolsa de mestrado e de reserva técnica para o financiamento deste trabalho.

vii

"Todos os dias recebemos pedras. Mas o que construímos com elas? Uma ponte, ou um muro"

Denise

"O único homem que não erra é aquele que nunca faz nada" Roosevelt

"Nem sempre podemos viver com os pés no chão. Às vezes temos que voar para ultrapassar os obstáculos.

Táyna Oliveira

# SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE TABELAS	
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	
RESUMO	xxiii
ABSTRACT	xxiv
INTRODUÇÃO	
CONCRETO	
2.1 Histórico	5
2.2 Componentes do concreto	8
2.2.1 Cimento Portland	8
2.2.1.1 Composição química do cimento Portland	9
2.2.1.2 Composição potencial do cimento Portland	10
2.2.1.3 Hidratação do cimento Portland	
2.2.2 Agregados	
2.2.3 Água	
2.3 Zona da transição	
2.4 Propriedades do concreto	
2.4.1 Propriedades do concreto no estado fresco	
2.4.2 Propriedades do concreto endurecido	
2.4.2.1 Resistência mecânica	
2.4.2.2 Porosidade	

2.4.2.3 Permeabilidade	24
2.4.2.4 Absorção capilar	27
<b>3 RADÔNIO: UMA VISÃO GLOBAL</b>	30
3.1 Descoberta do radônio	30
3.2 Propriedades fisicas e químicas do radônio	31
3.3 O radônio nas edificações	32
3.4 Formação e emanação do radônio	33
3.4.1 Transporte de radônio nos materiais de construção	34
3.4.2 Radônio no concreto	36
3.5 Sistemas de detecção do radônio	37
3.5.1 Detecção ativa de radônio e filhos	38
3.5.2 Detecção passiva de radônio e filhos	38
3.6 URÂNIO	40
3.6.1 Urânio na crosta terrestre	41
3.6.2 Urânio nas rochas ígneas	44
3.6.3 Urânio nos minerais acessórios	45
3.6.4 Urânio no solo	46
3.6.5 Urânio em sedimentos	47
3.6.6 Urânio em materiais orgânicos.	47
3.6.7 Urânio no Brasil	48
3.6.7.1 Geologia das regiões onde estão localizadas as fábricas de cimento	50
4 MATERIAIS E MÉTODOS.	51
4.1 Materiais e métodos empregados na fabricação e caracterização dos concretos	51
4.1.1 Cimentos	51
4.1.1.1 Caracterização física dos cimentos	52
4.1.2 Agregados	54
4.1.3 Aditivos	56
4.1.4 Concretos	57
4.1.5 Moldagem das amostras	58
4.1.6 Condições de cura	59

4.1.7 Ensaios	59
4.1.7.1 Resistência à compressão axial	59
4.1.7.2 Absorção capilar	60
4.1.7.3 Permeabilidade ao ar	61
4.1.7.4 Porosidade por intrusão de mercúrio (PIM)	64
4.2 Materiais e métodos empregados na determinação da emanação de radônio	66
4.2.1 Detector sólido de traços nucleares	66
4.2.1.1 Formação de traços no detector	68
4.2.1.2 Critério de contagem	68
4.2.1.3 Ataque químico	71
4.2.1.4 Curva de ataque	72
4.2.2 Campânula	75
4.2.2.1 Testes iniciais.	76
4.2.2.2 Nova campânula	77
4.2.2.3 Teste de estanqueidade	78
4.2.2.4 Geometria de detecção	79
4.2.3 Determinação da emanação de radônio	81
4.2.3.1 Proteção superficial	84
4.2.4 Determinação da atividade específica de <sup>226</sup> Ra	84
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	87
5.1 Propriedades do concreto	87
5.1.1 Resistência à compressão	87
5.1.2 Absorção capilar	88
5.1.3 Permeabilidade ao ar	91
5.1.4 Porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM)	92
5.2 Parâmetros relacionados à emanação de radônio	95
5.2.1 Teor de <sup>226</sup> Ra	95
5.2.2 Emanação de radônio	96
5.2.3 Coeficiente de emanação	99

5.3 Correlações entre as propriedades do concreto e o coeficiente de emanação	
de radônio	100
5.3.1 Correlação entre o coeficiente de emanação e a resistência à compressão	101
5.3.2 Correlação entre o coeficiente de emanação e o coeficiente de absorção	
capilar	102
5.3.3 Correlação entre o coeficiente de emanação e a ascensão capilar	103
5.3.4 Correlação entre a coeficiente de emanação e o coeficiente de	
permeabilidade ao ar	104
5.3.5 Correlação entre o coeficiente de emanação e o diâmetro médio de poros	105
6 CONCLUSÕES	107
7 SUGESTÕES PARA PROSSEGUIMENTO DA PESQUISA	109
ANEXOS	11(
ANEXO A	11
ANEXO B	113
ANEXO C	115
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	117

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Representação esquemática da hidratação do cimento Portland comum
(Jawed et al., 1983)
Figura 2.2. Representação esquemática da curva de Abrams, onde k1 e k2 são constantes
empíricas (Neville, 1997)20
Figura 2.3. Influência da cura úmida na resistência do concreto (Levy & Helene, 1996)21
Figura 2.4. Grau de hidratação no qual os poros capilares tornam-se descontínuos em função
da relação a/c (Cook & Hover, 1999)
Figura 2.5. Porosidade em função da relação a/c (Cook & Hover, 1999)
Figura 2.6. Porosidade da pasta para diferentes tempos de cura em função do diâmetro
equivalente (Cook & Hover, 1999)
Figura 2.7. Porosidade da pasta de diferentes relações a/c em função do tempo de cura
(Cook & Hover, 1999)24
Figura 2.8. Esquema do ensaio de absorção sem escala
Figura 2.9. Ângulo de contato, $\theta$ , formado no ponto onde a interface fluido-fluido encontra
um sólido (Martys & Ferratis, 1997)
Figura 3.1. Série de decaimento radioativo do <sup>238</sup> U, onde as setas inclinadas indicam o
decaimento $\alpha$ e as setas horizontais indicam o decaimento $\beta$ . O número indicado
abaixo dos elementos representa a sua meia-vida (Durrani & Ilic, 1997)31
Figura 3.2. Princípios da emanação de radônio proveniente de um grão mineral (Tanner, 1980),
quando o rádio decai, um átomo de radônio e uma partícula alfa são formados33

Figura 3.3. Emanação de radônio em materiais de construção comumente empregados	
(Khan et al., 1992)	35
Figura 3.4. Localização da jazidas e reservas de urânio no território brasileiro	
(Schobbenhaus & Coelho, 1985)	49
Figura 4.1. Curva granulométrica da areia	55
Figura 4.2. Curva granulométrica do pó de pedra	55
Figura 4.3. Curva granulométrica da brita 1	56
Figura 4.4. Esquema do ensaio de absorção sem escala.	60
Figura 4.5. Esquema da aparelhagem para determinação da permeabilidade ao ar	
(medidas em cm) (De Milito, 2001)	62
Figura 4.6. Eficiência do LR-115 (ɛ) como função da energia da partícula alfa para ângulos de	
incidência $\theta = 30^{\circ}$ , $40^{\circ}$ , $50^{\circ}$ , $55^{\circ}$ e $60^{\circ}$ (do externo para o interno)	
(Marocco & Bochicchio, 2001)	67
Figura 4.7. Densidade de traços em função da energia das partículas alfa da fonte de <sup>241</sup> Am	
(Silva, 2000)	76
Figura 4.8. Traços: a. traço simétrico que não perfura o detector; b. traços assimétricos que	
não perfuram o detector; c. traços que perfuram o detector	70
Figura 4.9. Figuras de ataque: a. figura de ataque semelhante ao traço assimétrico não	
perfurado; b. figura de ataque semelhante ao traço simétrico não perfurado; c.	
figura de ataque fácil de ser identificada	70
Figura 4.10. Figuras de ataque no fundo do detector LR-115	70
Figura 4.11. Curva de ataque inicial, não é observado o patamar característico.	
A contagem foi realizada em 400 campos de 0.0391 mm <sup>2</sup>	74
Figura 4.12. Curva de ataque após a reavaliação do critério de contagem, pode ser observado	
o patamar característico. A contagem foi realizada em 400 campos de 0,0391 mm <sup>2</sup>	75
Figura 4.13. Esquema do garrafão utilizado como campânula.	76
Figura 4.14. Esquema da campânula	78

Figura 4.15. Esquema da região onde estão situados os átomos que emitirão partículas alfas	
que serão detectadas. Onde a representa o intervalo de distancia e b e c são as	
distancias mínimas e máximas que os três emissores alfa podem estar do detector,	
para que as partículas alfa emitidas por eles sejam registradas	.80
Figura 4.16. Esquema da sobreposição dos limites de detecção para o <sup>222</sup> Rn, <sup>248</sup> Po e <sup>214</sup> Po	.81
Figura 5.1. Resistência à compressão em função da relação a/c para os concretos de cimento	
IM, BN, CG, SH e CB.	.88
Figura 5.2. Variação da massa das amostras de concreto de cimento IM em função da raiz	
quadrada do tempo	.88
Figura 5.3. Variação da massa das amostras de concreto de cimento BN em função da raiz	
quadrada do tempo	.88
Figura 5.4. Variação da massa das amostras de concreto de cimento CG em função da raiz	
quadrada do tempo	.89
Figura 5.5. Variação da massa das amostras de concreto de cimento SH em função da raiz	
quadrada do tempo	.89
Figura 5.6. Variação da massa das amostras de concreto de cimento CB em função da raiz	
quadrada do tempo	89
Figura 5.7. Coeficiente de absorção capilar em função da relação a/c para os concretos de	
cimento IM, BN, CG, SH e CB	90
Figura 5.8. Ascensão capilar em função da relação a/c para os concretos de cimento IM, BN,	
CG, SH e CB	90
Figura 5.9. Coeficiente de permeabilidade ao ar em função da relação a/c para os concretos	
de cimento IM, BN, CG, SH e CB do concreto de cimento	91
Figura 5.10. Volume de poros do concreto de cimento IM obtida por PIM	
(volume acumulado em função do diâmetro de poro)	92
Figura 5.11. Distribuição do tamanho de poros do concreto de cimento IM obtida por PIM	
(volume incremental em função do diâmetro de poro)	92
Figura 5.12. Volume de poros do concreto de cimento BN obtida por PIM	
(volume acumulado em função do diâmetro de poro)	92
Figura 5.13. Distribuição do tamanho de poros do concreto de cimento BN obtida por PIM	

XV

(volume incremental em função do diâmetro de poro)
Figura 5.14. Volume de poros concreto de cimento CG obtida por PIM
(volume acumulado em função do diâmetro de poro)
Figura 5.15. Distribuição do tamanho de poros do concreto de cimento CG obtida por PIM
(volume incremental em função do diâmetro de poro)93
Figura 5.16. Volume de poros concreto de cimento SH obtida por PIM
(volume acumulado em função do diâmetro de poro)
Figura 5.17. Distribuição do tamanho de poros do concreto de cimento SH obtida por PIM
(volume incremental em função do diâmetro de poro)
Figura 5.18. Volume de poros concreto de cimento CB obtida por PIM
(volume acumulado em função do diâmetro de poro)
Figura 5.19. Distribuição do tamanho de poros do concreto de cimento CB obtida por PIM
(volume incremental em função do diâmetro de poro)94
Figura 5.20. Densidade superficial de traços por tempo de exposição e pela atividade de <sup>226</sup> Ra
em função da relação a/c para os concretos de cimento CP II-F96
Figura 5.21. Densidade superficial de traços por tempo de exposição e pela atividade de <sup>226</sup> Ra
em função da relação a/c para s concretos de cimento com escória de alto-forno96
Figura 5.22. Densidade superficial de traços por tempo de exposição em função da atividade
específica de <sup>226</sup> Ra97
Figura 5.23. Densidade superficial de traços por tempo de exposição experimental e teórica
em função da atividade específica de <sup>226</sup> Ra97
Figura 5.24. Coeficiente de emanação em função da relação a/c para concretos de cimentos
CPII-F
Figura 5.25. Coeficiente de emanação em função da relação a/c para concretos de cimentos
com escória
Figura 5.26. Coeficiente de emanação de <sup>222</sup> Rn em função resistência à compressão para os
concretos de cimento CP II-F
Figura 5.27. Coeficiente de emanação de <sup>222</sup> Rn em função resistência à compressão para os
concretos de cimento com escória de alto-forno101

	Figura 5.28. Coeficiente de emanação de <sup>222</sup> Rn em função do coeficiente de absorção	
	capilar para os concretos de cimento CP II-F.	102
	Figura 5.29. Coeficiente de emanação de <sup>222</sup> Rn em função do coeficiente de absorção	
	capilar para os concretos de cimento com escória de alto-forno.	102
	Figura 5.30. Coeficiente de emanação de <sup>222</sup> Rn em função da ascensão capilar para os	
	concretos de cimento CP II-F	103
	Figura 5.31. Coeficiente de emanação de <sup>222</sup> Rn em função da ascensão capilar para os	
	concretos de cimento com escória de alto-forno	103
	Figura 5.32. Coeficiente de emanação de <sup>222</sup> Rn em função do coeficiente de permeabilidade	
	ao ar para os concretos de cimento CP II-F	104
	Figura 5.33. Coeficiente de emanação de <sup>222</sup> Rn em função do coeficiente de permeabilidade	
	ao ar para os concretos de cimento com escória de alto-forno	104
	Figura 5.34. Coeficiente de emanação de 222Rn em função do diâmetro médio dos poros	
	para os concretos de cimento CP II-F	105
	Figura 5.35. Coeficiente de emanação de <sup>222</sup> Rn em função do diâmetro médio dos poros	
······································	para os concretos de cimento com escória de alto-forno	105
	Figura 5.36. Detalhe da geometria da amostra mostrando a diagonal AB (medidas em cm)	106
	Figura C.1. Permeabilimetro.	115
	Figura C.2. Detalhe do porta-amostra	115
	Figura C.3. Amostra inserida no porta-amostra	115
	Figura C.4. Bandeja com os corpos-de-prova imersos 1,0 cm para o ensaio de	
	absorção capilar	116
	Figura C.5. Determinação da massa da amostra	116
	Figura C.6. Amostra rompida para a determinação da altura de penetração	116
	Figura C.7. Abrasão Los Angeles	116
	Figura C.8. Abertura para a colocação e retirada das amostras	116
	Figura C.9. Vista superior da campânula.	116
	Figura C.10. Vista lateral da campânula	116

# LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Abreviação dos principais óxidos do cimento Portland	
(Taylor, 1992 e Camarini, 2000)	10
Tabela 2.2. Compostos potenciais do cimento Portland (Lea, 1971 e Taylor, 1992)	
Tabela 2.3. Características dos principais componentes do cimento Portland	
(Mehta & Monteiro, 1994)	
 Tabela 3.1. Teor de urânio das rochas ígneas (Voto, 1978)	
 Tabela 3.2. Teor de urânio nos minerais acessórios (minerais do sudoeste da Califórnia,	
Voto, 1978)	46
Tabela 4.1. Características fisicas do cimento Portland CP II-F 32 (IM)	
Tabela 4.2. Características fisicas do cimento Portland CP II-F 32 (BN)	53
Tabela 4.3. Características físicas do cimento Portland CP II-F 32 (CG)	53
Tabela 4.4. Características físicas do cimento Portland CP II-E 32 (SH)	53
Tabela 4.5. Características fisicas do cimento Portland CP-III 32 (CB)	54
Tabela 4.6. Granulometria da areia	5
Tabela 4.7. Granulometria do pó de pedra	55
Tabela 4.8. Granulometria da brita1	56
Tabela 4.9. Características dos aditivos plastificante e superplastificante fornecidas	
pelo fabricante	
Tabela 4.10. Valores da concentração de emissões alfa para os concretos e	
para a radiação de fundo	77
<b>Tabela 4.11.</b> Valores da densidade superficial de traços ( $\rho_{\alpha}$ ) para as misturas	

Tabela 5.1. Teores de <sup>226</sup> Ra das amostras de concreto	95
Tabela 5.2. Peso das propriedades quando são testados os valores de coeficiente de	
permeabilidade ao ar, diâmetro médio de poros e a porosidade total	99
Tabela 5.3. Peso das propriedades quando são testados os valores de ascensão capilar, c	oeficiente
de permeabilidade ao ar e diâmetro médio de poros	
Tabela 5.3. Peso das propriedades quando são testados os valores de ascensão capilar,	
coeficiente de permeabilidade ao ar e diâmetro médio de poros	99
Tabela 5.4. Peso das propriedades quando são testados os valores de ascensão capilar,	
coeficiente de permeabilidade ao ar e porosidade total	
Tabela 5.5. Peso das propriedades quando são testados os valores de ascensão capilar,	
coeficiente de permeabilidade ao ar e coeficiente de absorção capilar	99
Tabela A.1. Resistência à compressão aos 28 dias para os concretos de cimento IM,	
BN, CG, SH e CB	111
BN, CG, SH e CB Tabela A.2. Valores do coeficiente de absorção capilar e ascensão capilar para os concre	111 rtos
<ul> <li>BN, CG, SH e CB</li> <li>Tabela A.2. Valores do coeficiente de absorção capilar e ascensão capilar para os concre estudados</li> </ul>	111 xtos 111
<ul> <li>BN, CG, SH e CB</li> <li>Tabela A.2. Valores do coeficiente de absorção capilar e ascensão capilar para os concreestudados</li> <li>Tabela A.3. Média da variação da massa dos corpos-de-prova</li> </ul>	111 tos 111 112
<ul> <li>BN, CG, SH e CB</li> <li>Tabela A.2. Valores do coeficiente de absorção capilar e ascensão capilar para os concre estudados</li> <li>Tabela A.3. Média da variação da massa dos corpos-de-prova</li> <li>Tabela A.4. Coeficiente de permeabilidade ao ar (m<sup>2</sup>) para os diferentes concretos</li> </ul>	111 ttos 111 112 112
<ul> <li>BN, CG, SH e CB</li> <li>Tabela A.2. Valores do coeficiente de absorção capilar e ascensão capilar para os concre estudados</li> <li>Tabela A.3. Média da variação da massa dos corpos-de-prova</li> <li>Tabela A.4. Coeficiente de permeabilidade ao ar (m<sup>2</sup>) para os diferentes concretos</li> <li>Tabela A.5. Valores da porosidade total e do diâmetro médio de poros para os concretos</li> </ul>	111 etos 111 112 112 s
<ul> <li>BN, CG, SH e CB</li> <li>Tabela A.2. Valores do coeficiente de absorção capilar e ascensão capilar para os concre estudados</li> <li>Tabela A.3. Média da variação da massa dos corpos-de-prova</li> <li>Tabela A.4. Coeficiente de permeabilidade ao ar (m<sup>2</sup>) para os diferentes concretos</li> <li>Tabela A.5. Valores da porosidade total e do diâmetro médio de poros para os concretos estudados</li> </ul>	111 etos 111 112 112 s 112
<ul> <li>BN, CG, SH e CB.</li> <li>Tabela A.2. Valores do coeficiente de absorção capilar e ascensão capilar para os concre estudados.</li> <li>Tabela A.3. Média da variação da massa dos corpos-de-prova.</li> <li>Tabela A.4. Coeficiente de permeabilidade ao ar (m<sup>2</sup>) para os diferentes concretos.</li> <li>Tabela A.5. Valores da porosidade total e do diâmetro médio de poros para os concretos estudados.</li> <li>Tabela B.1. Teores de <sup>226</sup>Ra, <sup>228</sup>Ra e <sup>40</sup>K das amostras de concreto.</li> </ul>	111 etos 111 112 112 s 112 112 113
<ul> <li>BN, CG, SH e CB</li> <li>Tabela A.2. Valores do coeficiente de absorção capilar e ascensão capilar para os concre estudados</li> <li>Tabela A.3. Média da variação da massa dos corpos-de-prova</li> <li>Tabela A.4. Coeficiente de permeabilidade ao ar (m<sup>2</sup>) para os diferentes concretos</li> <li>Tabela A.5. Valores da porosidade total e do diâmetro médio de poros para os concreto estudados</li> <li>Tabela B.1. Teores de <sup>226</sup>Ra, <sup>228</sup>Ra e <sup>40</sup>K das amostras de concreto</li> <li>Tabela B. 2. Densidade superficial de traços por tempo de exposição e pela atividade</li> </ul>	111 rtos 111 112 112 s 112 s 112 113
<ul> <li>BN, CG, SH e CB</li> <li>Tabela A.2. Valores do coeficiente de absorção capilar e ascensão capilar para os concre estudados</li></ul>	111 rtos 111 112 112 s 112 113
<ul> <li>BN, CG, SH e CB.</li> <li>Tabela A.2. Valores do coeficiente de absorção capilar e ascensão capilar para os concre estudados.</li> <li>Tabela A.3. Média da variação da massa dos corpos-de-prova.</li> <li>Tabela A.4. Coeficiente de permeabilidade ao ar (m<sup>2</sup>) para os diferentes concretos.</li> <li>Tabela A.5. Valores da porosidade total e do diâmetro médio de poros para os concreto estudados.</li> <li>Tabela B.1. Teores de <sup>226</sup>Ra, <sup>228</sup>Ra e <sup>40</sup>K das amostras de concreto.</li> <li>Tabela B. 2. Densidade superficial de traços por tempo de exposição e pela atividade de <sup>226</sup>Ra.</li> <li>Tabela B. 3. Coeficiente de emanação de radônio.</li> </ul>	111 ttos 111 112 112 s 112 s 113 113 114

# LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A: área;

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas;

a/c: água/cimento;

AF<sub>m</sub>: monossulfoaluminato de cálcio;

AFt: trissulfoaluminato de cálcio;

 $a_i$ : peso das propriedades;

BN: Balsa Nova (cimento CP II-F proveniente de Balsa Nova);

C: concentração de emissões alfa no interior da campânula;

C-1: concreto tipo 1;

C-2: concreto tipo 2;

C<sub>2</sub>A: aluminato tricálcio;

C<sub>2</sub>S: silicato dicálcio;

C-3: concreto tipo 3;

C<sub>3</sub>S: silicato tricálcio;

CB: Cubatão (cimento CP III proveniente de Cubatão);

C.C.: concreto convencional;

CH: hidróxido de cálcio;

CG: Cantagalo (cimento CP II-F proveniente de Cantagalo);

C.P.: concreto poroso;

CP II-E: cimento Portland composto com escória de alto forno;

CP II-F: cimento Portland composto com filer calcário;

CP III: cimento Portland de alto-forno;

d: diâmetro;

 $\Delta P$ : diferença de pressão;

 $\Delta t$ : tempo de exposição;

dP/dZ: gradiente de pressão;

f: taxa de produção de radônio no volume intersticial de poros;

 $\phi$ : porosidade;

f<sub>c</sub>: resistência mecânica;

φ<sub>máx</sub>: dimensão máxima característica;

 $\phi_{méd}$ : diâmetro médio de poros

g: aceleração da gravidade;

G: constante característica do gás;

 $\gamma$  tensão superficial;

 $\eta$ : coeficiente de emanação;

ho: altura inicial;

ht: altura superior;

I: teor de <sup>226</sup>Ra;

IM: Itaú de Minas (cimento CP II-F proveniente de Itaú de Minas);

K: coeficiente de permeabilidade;

k: curvatura média da interface;

k1 e k2: constantes empíricas;

 $k_{abs}$ : coeficiente de absorção capilar;

 $K_{perm}$ : coeficiente de permeabilidade ao ar;

*l*: comprimento;

 $\mu$ : viscosidade;

 $\lambda$ : constante de decaimento;

LR-115: detector sólido de partículas alfa composto de polímero a base de nitrato de celulose;

M6: mistura 6;

M7: mistura 7;

M10: mistura 10;

 $N_t$ : número de traços de partículas alfa contados;

N<sub>c</sub>: número de campos analisados no detector;

P: pressão;

p': valores obtidos nos ensaios da determinação das propriedades do concreto escalonados;

Q: vazão;

r: raio;

 $\rho_{\alpha}$ : densidade superficial de traços de partículas alfa;

 $\rho_{conc}$ : massa específica aparente do concreto;

 $\rho_{\Delta t}$ : densidade superficial de traços de partículas alfa por tempo de exposição;

 $\rho_{exp}$ : densidade superficial de traços de partículas alfa por tempo de exposição experimental;

- $\rho_o$ : diferença relativa entre densidade superficial de traços de partículas alfa por tempo de exposição teórica e experimental;
- $\rho_o$ ': diferença relativa entre densidade superficial de traços de partículas alfa por tempo de exposição teórica e experimental escalonada;

 $\rho_{teo}$ : densidade superficial de traços de partículas alfa por tempo de exposição teórica;

 $\rho_{w}$ : massa específica aparente da água;

s: seção transversal do tubo capilar;

S: ascensão capilar;

SH: Santa Helena (cimento CP II-E proveniente de Santa Helena);

t: tempo;

T: temperatura;

 $\theta$  ângulo;

V: velocidade;

Wo: massa inicial;

Wt: massa no tempo t;

z: altura de penetração de água;

Z: altura do corpo-de-prova.

### RESUMO

Burke, Aline Katiuscia. Estudo da emanação de radônio em amostras de concreto com composições diferentes. 126 pp. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 2002. Dissertação de Mestrado.

O radônio-222 é um gás nobre e radioativo presente na cadeia de decaimento do urânio-238. Os componentes do concreto (cimento e agregados) têm suas matérias-primas extraídas da crosta terrestre que contêm o urânio como impureza. O <sup>238</sup>U presente nesses componentes irá decair segundo a sua série radioativa até o <sup>206</sup>Pb, passando pelo radônio que pode difundir-se para o interior das edificações. A emanação de <sup>222</sup>Rn proveniente do concreto depende de dois fatores: do teor de <sup>226</sup>Ra e do comprimento de difusão do radônio no material. O presente trabalho teve por objetivo avaliar a influência das propriedades do concreto na emanação de radônio. Para tal, efetuou-se um estudo sistemático sobre a emanação de radônio em amostras de concreto com tipos de cimento e composições diferentes. A emanação de <sup>222</sup>Rn foi determinada em campânulas plásticas vedadas empregando detetores sólidos de traços nucleares (LR-115). Para obtenção de informações relativas ao comprimento de difusão do concreto determinou-se sua resistência mecânica, absorção e ascensão capilar, porosidade e permeabilidade. O teor de <sup>226</sup>Ra também foi determinado. Os resultados indicaram correlações positivas entre o coeficiente de emanação de radônio e absorção e ascensão capilar, permeabilidade e diâmetro de poros; e negativas entre o coeficiente de emanação de radônio e a resistência à compressão. Analisando-se os resultados obtidos concluiu-se que a ordem hierárquica das propriedades que afetam a emanação de radônio é: permeabilidade, diâmetro de poros, porosidade total e por fim, a absorção e ascensão capilar.

Palavras-chave: concreto, radônio, sistema de transporte, LR-115.

### ABSTRACT

Burke, Aline Katiuscia. Study of radon emanation from concrete samples with different mix proportions. 126 pp. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 2002. Master thesis.

The radon-222 is a noble radioactivity gas present in uranium-238 decay chain. The concrete components (cement and aggregates) have their raw materials extracted from crust that contains uranium as impurity. The <sup>238</sup>U contained in these components will decay following its decay chain until <sup>206</sup>Pb, passing by radon that can diffuse to indoor air of dwellings. The <sup>222</sup>Rn emanation from concrete depends upon two factors: <sup>226</sup>Ra content and diffusion length. The main objective of this work was to assess the influence of the concrete proprieties in radon emanation. For this purpose, it was carried out a systematic study about radon emanation from concrete samples that have different mix proportions and that were produced with different cement types. The <sup>222</sup>Rn concentration was determined in sealed plastic chamber employing solid state nuclear track detectors (LR-115). The mechanical strength, water absorption, sorptivity, porosity and air permeability of concrete were determined to obtain information about diffusion length. The <sup>226</sup>Ra concentration was also determined. The results indicated positive correlation between radon emanation coefficient and water absorption, sorptivity, air permeability and pore diameter; and negative between radon emanation coefficient and compressive strength. After the result analysis, it is concluded that the hierarchical order of the properties that affected the radon emanation is: air permeability, pore diameter, porosity, and finally water absorption and sorptivity.

Keywords: concrete, radon, transport properties, LR-115

## **1 INTRODUÇÃO E OBJETIVO**

O radônio-222 (<sup>222</sup>Rn) é um gás nobre e radioativo presente na cadeia de decaimento do urânio-238. O estudo das propriedades de emanação deste gás em materiais porosos de ocorrência natural (solo e rochas) e nos materiais produzidos a partir deles, tais como resíduos de mineração e, principalmente, nos materiais de construção, originou inúmeros trabalhos nos últimos 40 anos. Entretanto, o interesse pela radioatividade nos materiais de construção tem aumentado significativamente, conseqüência de sua utilização em locais com ventilação deficiente, possibilitando o aumento da concentração de radônio e seus produtos de decaimento (filhos) (Jonassen, 1983)

Por ser um gás nobre, o <sup>222</sup>Rn não fica retido nas vias respiratórias durante o processo de respiração. Por outro lado, seus filhos de meia-vida curta, <sup>218</sup>Po, <sup>214</sup>Pb, <sup>214</sup>Bi e <sup>214</sup>Po, constituem isótopos de elementos químicos metálicos que têm facilidade de estabelecer ligações químicas, podendo aderir às paredes das vias respiratórias, acarretando danos à saúde humana (Khan, 2000).

O radônio é produto de decaimento do rádio-226, sua fonte direta. No entanto, sua fonte primária é o <sup>238</sup>U. A crosta terrestre, bem como os materiais de construção produzidos a partir de matéria-prima extraída do solo apresentam na sua constituição o urânio. Ele irá decair segundo a sua série radioativa até o <sup>222</sup>Rn. Entretanto, o radônio, por ser um gás inerte apresenta mobilidade, podendo difundir-se para a superfície ou para ambientes internos das edificações (Durrani & Ilic, 1997).

Estudos sobre o comportamento do radônio em materiais de construção se dividem basicamente em duas linhas de pesquisa: a primeira estabelece que o solo é a principal fonte de radônio para as edificações e que os materiais que as compõem barram a entrada do <sup>222</sup>Rn externo. A segunda linha considera os materiais de construção como a principal fonte de emanação de radônio.

As pesquisas da primeira estão direcionadas em determinar a quantidade de radônio que consegue transpor as paredes e principalmente o piso e as fundações (concreto) (Gadd & Borak, 1995 e Singh *et al.*, 1999). O método comumente empregado é a exposição do material a uma fonte de radônio forçando a sua passagem através do mesmo. Mede-se a concentração de radônio antes e depois da amostra (Renken & Rosenberg, 1995). Neste caso, despreza-se o radônio emanado pelo material e calcula-se parâmetros relacionados à difusão deste gás. Um outro tipo de estudo nessa linha refere-se à determinação das propriedades de transporte do material pelo cálculo do coeficiente de difusão do radônio (Klink *et al.*, 1999).

As pesquisas da segunda linha consideram os materiais de construção como a principal fonte de emanação de radônio, que é determinada usando técnicas de detecção ativa e passiva (De Mets, 1990; Zikovsky, 1992; Khan *et al.*, 1992 e Kumar *et al.*, 1999). Estas pesquisas relacionam esta grandeza com o tipo e propriedades dos materiais.

Quando o material analisado é o concreto, objetiva-se entender a influência de fatores como: dosagem, cura, resistência, idade e fissuração na emanação de radônio (Yu *et al.*, 1996; Man e Yeung, 1996 a & b; Jong *et al.*, 1996; Chao *et al.*, 1997; Yu *et al.*, 1997 e Yu *et al.*, 2000). Estes estudos indicam que o concreto é uma importante fonte de contaminação em ambientes mal ventilados. Por exemplo, em um estudo experimental realizado em uma residência na cidade de Barcelona observou-se que o concreto é a mais relevante fonte de radônio em comparação com os outros materiais empregados na construção da mesma, sendo que a contribuição do solo foi considerada desprezível nas condições em que o estudo foi realizado (Font *et al.*, 1999).

2

Do ponto de vista de um material como o concreto, a emanação de radônio proveniente do mesmo depende de dois fatores básicos: da concentração de <sup>226</sup>Ra e do comprimento de difusão do radônio no material, que é definido como a distância média que o átomo de radônio percorre no interior do material antes de decair (Durrani & Ilic, 1997).

A concentração da fonte de radônio está diretamente ligada às matérias-primas empregadas na fabricação destes materiais. Dependendo da localização e do tipo de formação geológica do local onde se situam as jazidas de extração mineral para obtenção de matéria-prima, o solo pode conter altos níveis de urânio como constituinte. O comprimento de difusão está relacionado com a facilidade do radônio de difundir-se no interior da amostra, ou seja, com a sua microestrutura, sua porosidade, sua permeabilidade e seu sistema capilar.

O objetivo deste trabalho é obter uma melhor compreensão dos mecanismos que influenciam a emanação de radônio no concreto, ou seja, verificar o comportamento da emanação de radônio do concreto quando se modificam as propriedades relacionadas ao seu sistema de transporte. Para tal, efetuou-se um estudo sistemático sobre a emanação de radônio em amostras de concreto com composições diferentes. Tendo em vista os dois parâmetros que afetam a emanação, concentração de <sup>226</sup>Ra e comprimento de difusão, confeccionaram-se concretos com proporções de mistura semelhantes, diferindo apenas na relação água/cimento (a/c), minimizando, assim, a variação da fonte e modificando o sistema de transporte dos mesmos. Para a proporção de mistura adotada empregaram-se cimentos de tipos e localidades diferentes, sem alteração do tipo e origem do agregado, com o intuito de modificar a concentração de <sup>226</sup>Ra das amostras.

A emanação de radônio foi determinada expondo detetores sólidos de traços nucleares (LR-115) às partículas alfa emitidas pelo radônio emanado das amostras e seus produtos de decaimento em campânulas plásticas vedadas. Posteriormente, os detectores foram atacados quimicamente e com auxílio de um microscópio óptico a densidade superficial de traços por tempo de exposição, que é proporcional a concentração de radônio no ar, foi determinada visualmente. O método escolhido estava sujeito a um certo grau de subjetividade por envolver observação ao

3

microscópio. Portanto, um estudo sobre eficiência em função de critério de contagem e variação dos parâmetros de ataque químico, fez parte deste trabalho experimental (Capítulo 3).

Como o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência de suas propriedades na emanação de radônio, a caracterização das amostras, de forma que fornecesse informações relacionadas ao comprimento de difusão de radônio no concreto, foi essencial para embasar as conclusões. Desta forma, determinou-se sua resistência mecânica, absorção e ascensão capilar, porosidade, diâmetro de poros, e permeabilidade. A atividade específica de <sup>226</sup>Ra foi determinada, pois esta medida possibilitou que os resultados de emanação fossem expressos de forma específica.

Com o intuito de propiciar um melhor entendimento deste trabalho, visto que ele integra duas áreas distintas: a Física Nuclear e a Engenharia Civil, descreveu-se as principais propriedades e comportamento tanto do concreto como do radônio (Capítulo 2 e 3, respectivamente). Os materiais e métodos foram detalhados em capítulo próprio e a análise dos resultados foi feita em conjunto com sua apresentação. No final do trabalho, foram apresentadas as conclusões e foram feitas algumas sugestões para prosseguimento da pesquisa.

### **2 CONCRETO**

Visando um melhor entendimento do comportamento do concreto, material estudado neste trabalho, este capítulo apresenta um breve histórico e descreve seus principais componentes e propriedades.

## 2.1 Histórico

A palavra concreto provém do latim *concretus* que significa desenvolver junto, sólido, ou seja, a união de partes separadas para formar um todo. O emprego do concreto como material de construção data de milhares de anos, da época dos egípcios, fenícios, gregos e romanos. Alguns pesquisadores, como o francês Dadidovits, dizem que os egípcios foram os inventores do concreto, já que acreditam que o concreto foi utilizado na construção das partes internas das pirâmides. Acredita-se que no seu interior foram usados blocos feitos de um tipo de cimento denominado "geopolímero", que era composto de pedra britada, silte do Rio Nilo e resíduos das minas de cobre da área do Monte Sinai. Apenas os blocos externos das pirâmides seriam feitos de pedra natural. Entretanto, há pesquisadores que contestam esta idéia (Dumet & Pinheiro, 2000).

Alguns arqueólogos acreditam que o concreto veio do Oriente Médio, ou dos fenícios ou ainda dos gregos, todos antes dos romanos. Embora os romanos não sejam considerados inventores do concreto pela maioria dos pesquisadores, eles foram sem dúvida, os primeiros que o usaram de forma eficaz e em larga escala (Dumet & Pinheiro, 2000).

Os romanos já usavam uma mistura de pedra com cinzas vulcânicas do Vesúvio, encontradas na cidade de Puzzoli, daí a origem do nome pozolana. Eles conheciam o efeito de aditivos nas misturas, como o sangue, que funcionava como um incorporador de ar nas argamassas. Na construção do Panteão de Roma, uma das obras mais impressionantes do Império Romano e testemunha da durabilidade deste material, foram empregados sete tipos diferentes de concreto, do mais pesado ao mais leve, à medida que se aproximava do topo da cúpula, obtido a partir da utilização de agregados leves (pedra-pomes). Esta obra foi realizada há praticamente dezenove séculos (Dumet & Pinheiro, 2000).

Com exceção do período Norman, quando estruturas tais como Reading Abbey e as fundações da catedral de Salisbury foram construídas em concreto, houve pouco desenvolvimento adicional até o século XVIII. Em 1791, Smeaton reconstruiu o farol Eddystone, em Cornwall, utilizando uma mistura de pedra e argila, que resiste até os dias de hoje. Com o desenvolvimento das pesquisas na área do cimento, em 1824, Joseph Aspdin registrou a patente do cimento Portland, que era fabricado aquecendo-se uma mistura de argila finamente dividida e calcário duro num forno até eliminar o CO<sub>2</sub>. O termo Portland refere-se a Portlandstone, devido à semelhança de cor e qualidade do cimento com um calcário muito usado na região de Portland, na Inglaterra. Quase que paralelamente a Aspdin, Vicat, na França, também chega ao cimento Portland, e a partir daí o cimento passa a ser produzido em escala industrial. Em 1845, Johnson desenvolve o cimento como o utilizamos hoje (Dumet & Pinheiro, 2000).

Em 1849, data oficial do surgimento do concreto, o francês Lambot desenvolveu um barco de argamassa armada, chamada na época de "cimento armado". O objetivo de Lambot foi construir um barco que não deteriorasse com o tempo, como os barcos de madeira. Lambot apresentou seu experimento na Exposição Universal de Paris (1885). Também neste ano foi montada a primeira fábrica de cimento na Alemanha (Dumet & Pinheiro, 2000).

O grande responsável pela difusão do concreto armado na Europa, e em seguida na América, foi o horticultor e paisagista francês Monier, que após conhecer o barco de Lambot, passou a fabricar vasos de argamassa armada. A partir de 1861, Monier começou a fazer outros objetos e patenteá-los. Estes objetos eram vendidos pela Europa, difundindo o concreto armado. (Dumet & Pinheiro, 2000). E em 1897, Hennebique construiu o primeiro prédio com estrutura composta de concreto armado na Grã-Bretanha. É interessante notar que um dos barcos produzidos por Lambot apresenta boas condições mesmo após sofrer as intempéries do ambiente marinho. Infelizmente, o mesmo não pode ser dito a respeito da primeira ponte em concreto armado produzida por Hennebique que em 1932 apresentava diversas patologias. Entretanto, trabalhos de recuperação prolongaram sua vida útil até os dias de hoje (Mays, 1992).

No Brasil, o uso do concreto iniciou no começo do século XX e vem se aperfeiçoando com o passar dos anos. O concreto armado foi aplicado à construção de casas e sobrados no Rio de Janeiro, pelo engenheiro Carlos Poma, a partir de 1892. Em 1901, foi executada a substituição de uma galeria provisória de madeira por uma de concreto armado na Estrada de Ferro Central (Serra da Mantiqueira) (Vasconcelos, 1992).

As obras de saneamento realizadas pelo engenheiro Saturnino de Brito em Santos são famosas e resultaram destes trabalhos as primeiras tentativas de normalização em engenharia com as Cadernetas de Instruções e Especificações para a Construção dos Esgotos. Uma obra que se pode destacar é a ponte na rua Senador Feijó com 5,4 m de vão e laje de 15 cm de espessura (Vasconcelos, 1992).

Segundo o prof. Sydney Santos, as primeiras estruturas de concreto armado no Brasil são de Carlos Euler e de seu auxiliar Mario de Andre Martins Costa, que projetaram a ponte sobre o Rio Maracanã antes de 1908. No entanto, tem-se conhecimento de uma ponte executada no Rio de Janeiro, em 1908, pela empreiteira "Proença, Echeverria & Comp.", com 9 m de vão que teria sido calculada por Hennebique. O primeiro edifício em concreto armado do Brasil foi construído em São Paulo, à rua Direita nº 7 pelo arquiteto Francesco Notaroberto, provavelmente entre 1907 e 1908 (Vasconcelos, 1992).

O concreto passou por vários avanços tecnológicos no Brasil e no mundo, principalmente no período da segunda guerra mundial, incluindo o edificio de Mulberry Harbours. Principalmente nos últimos anos, a introdução de produtos como polímeros e sílica ativa, proporcionou o desenvolvimento de diversas propriedades como resistência, impermeabilidade e trabalhabilidade deste material.

O concreto é o material mais largamente empregado na construção, por diversas razões, como: facilidade de ser moldado, resistência a esforços e à água e custo, entre outros (Mays, 1992). Para compreender o comportamento e fatores que influenciam as propriedades deste material é necessário conhecer seus principais componentes, sua estrutura e propriedades.

### 2.2 Componentes do concreto

O concreto é composto basicamente de aglomerante e de agregados. O aglomerante é o material ligante que reage em presença de água. O cimento Portland é o tipo mais comumente empregado. Os agregados são normalmente subdivididos em miúdo e graúdo, para melhor fechamento do pacote granulométrico.

### 2.2.1 Cimento Portland

Pode ser considerado aglomerante qualquer material com propriedades adesivas e coesivas, capaz de ligar fragmentos de minerais entre si de modo a formar um todo compacto. O termo cimento é proveniente do latim, "*caementum*", que é derivado do verbo *caedere*, cujo significado é reduzir o tamanho. Este termo está relacionado ao uso de argamassas compostas de fragmentos de pedras com propriedades coesivas e adesivas.

O cimento Portland é constituído de uma mistura de materiais calcários e argilosos. A fabricação pode ser por via úmida ou seca. Após a extração das matérias-primas, argila e calcário,

elas são submetidas às etapas de britagem e pré-homogenização. Posteriormente, através de dosagens controladas e preestabelecidas são conduzidas a um moinho de bolas, onde a sua granulometria é adequadamente reduzida formando a "farinha", que é armazenada em grandes quantidades em silos verticais. Com um processo térmico adequado e devidamente controlado, em forno rotativo a uma temperatura de 1450°C, a farinha é transformada no clínquer, principal componente do cimento (Taylor, 1992).

Na produção dos cimentos Portland, além do clínquer, são utilizados adições de sulfato de cálcio (gipsita), filer calcário, escórias de alto-forno e pozolanas. Esses materiais são moídos em um moinho de bolas ou barras juntamente (ou não) com o clínquer e são armazenados nos silos de estocagem até a expedição em sacos ou a granel (Taylor, 1992).

O cimento Portland endurece rapidamente, atingindo resistências elevadas aos 28 dias. Estas características se devem fundamentalmente a uma combinação de cal e sílica: o silicato tricálcico ( $C_3S - 3CaOSiO_2$ ), que constitui o silicato mais rico em cal possível de se obter (Czernin, 1963).

Em 1887, o químico francês Henri Le Chatelier publicou sua tese sobre a química do cimento Portland. Ele estabelecia as proporções em óxidos dos materiais para produzir o cimento Portland. Atualmente, a composição típica do clínquer apresenta, em valores aproximados, 67% de CaO (óxido de cálcio), 22% de SiO<sub>2</sub> (sílica), 5% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (alumina), 3% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (óxido de ferro) e 3% de outros componentes, sendo eles: MgO, Na<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, TiO<sub>2</sub>, sulfatos e outros elementos em menor quantidade (Taylor, 1992).

### 2.2.1.1 Composição química do cimento Portland

Os elementos presentes no cimento são formados pela interação durante a calcinação dos compostos de cal, sílica, alumina e óxido de ferro que constituem o volume da mistura, junto com

vários componentes de menor proporção, tais como óxido magnésio e os álcalis. O cimento Portland é composto de mais de 90% de cal, alumina e sílica, porque os óxidos que podem ser formados a partir destes componentes são os de maior importância (Lea, 1971). O elemento mais abundante no cimento Portland é a cal (CaO), constituinte da fase do silicato (silicato tricálcico e silicato dicálcico) e intersticial (aluminato tricálcico e ferroaluminato tetracálcico). A sílica e a alumina aparecem em menor quantidade. A primeira faz parte da fase do silicato e, a segunda, da fase intersticial. O óxido férrico, presente no ferroaluminato tetracálcico, é o constituinte de menor quantidade (Czernin, 1963). Têm-se ainda impurezas, tais como magnésio, sódio, potássio e enxofre.

### 2.2.1.2 Composição potencial do cimento Portland

Uma nomenclatura diferenciada é utilizada usualmente no estudo da química do cimento. Por exemplo, o silicato tricálcico,  $Ca_3SiO_5$ , é escrito  $3CaO.SiO_2$ , não ocorrendo a separação dos constituintes ou a variação da sua estrutura. Os óxidos são abreviados por letras Por exemplo, o óxido de cálcio (CaO) é igual a C e o óxido de silício (SiO<sub>2</sub>) é igual a S, portanto, o silicato tricálcico é indicado como C<sub>3</sub>S. As abreviações procuram tornar mais simples esse estudo. As mais empregadas são indicadas na tabela abaixo (Taylor, 1992).

Tabela 2.1. Abreviação dos principais oxidos do cimento Portiand (Taylor, 1992 e Camarini, 2000).					
Óxido	Compostos	Abreviação	Teor (%)		
CaO	Óxido de cálcio	С	60-67		
SiO <sub>2</sub>	Sílica	S	17-25		
$Al_2O_3$	Alumina	Α	3-8		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de ferro	F	0,5-6,0		
Mgo	Óxido de magnésio	Μ	0,1-40		
$K_2O$	Álcalis	K	0,2-3,0		
$Na_2O$	Álcalis	N	0,2-3,0		
SO <sub>3</sub>	Trióxido de enxofre	$\overline{S}$	1-3		
$CO_2$	Dióxido de carbono	C	-		
H <sub>2</sub> O	Água	Н	-		

Considerando-se que as propriedades do cimento Portland são relacionadas ao teor dos compostos potenciais, é difícil extrair quaisquer conclusões a partir da análise do cimento expressa em óxidos. É prática comum na industria de cimento, calcular o teor destes compostos usando a fórmula de R.H. Bogue. A determinação direta desses compostos potenciais, que requer habilidade e equipamentos especiais, não é necessária para o controle de qualidade de rotina (Mehta & Monteiro, 1994).

Na Tabela 2.2 são mostrados os compostos potenciais do cimento Portland, abreviação, porcentagem, teor no cimento.

Tabela 2.2. Compostos potenciais do cimento Portland (Lea, 1971 e Taylor, 1992).

Composto	Composição em óxidos	Abreviação	Teor (%)
Silicato tricálcico	3 CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S	50-70
Silicato dicálcico	2 CaO.SiO <sub>2</sub>	$C_2S$	15-30
Aluminato tricálcico	3 CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A	5-10
Ferroaluminato tetracálcico	4 CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C₄AF	5-15

Cada um destes compostos irá contribuir de maneira diferente para as propriedades finais do cimento. Elementos presentes em menor quantidade, como o magnésio e a cal livre também podem ter influência significativa sobre as propriedades do cimento. Na Tabela 2.3 são mostradas algumas das características dos componentes principais do cimento Portland.

Composto	Resistência Mecânica Inicial	Resistência Mecânica Final	Calor de Hidratação	Velocidade de Hidratação	Sistema Cristalino
C₃S	Boa	Boa	Médio	Média	Monoclínico
$C_2S$	Pequena	Excelente	Baixo	Lenta	Monoclínico
C <sub>3</sub> A	Boa	Média	Elevado	Rápida	Cúbico
C <sub>4</sub> AF	Boa	Média	Médio	Média	Monoclínico

Tabela 2.3. Características dos principais componentes do cimento Portland (Mehta & Monteiro, 1994).
#### 2.2.1.3 Hidratação do cimento Portland

A hidratação do cimento Portland pode ocorrer de duas formas: a hidratação por dissolução-precipitação e por processo topoquímico ou hidratação da fase sólida (difusão iônica). O progresso das reações de hidratação do cimento é observável através das curvas de desenvolvimento de calor. Na Figura 2.1 é apresentada a representação esquemática característica da hidratação do cimento Portland comum.



TEMPO DE HIDRATAÇÃO

Figura 2.1. Representação esquemática da hidratação do cimento Portland comum (Jawed et al., 1983).

O mecanismo de dissolução-precipitação envolve a dissolução dos compostos anidros em seus constituintes iônicos e a formação de hidratos na solução. Visando uma completa reorganização dos constituintes dos componentes originais durante a hidratação do cimento (Lea, 1971).

No processo topoquímico ou hidratação da fase sólida as reações ocorrem diretamente na superfície dos componentes do cimento anidro sem entrarem em solução. Isso ocorre em estágios avançados quando a mobilidade iônica na solução se torna restrita (Mehta & Monteiro, 1994).

Durante a hidratação a consistência da pasta vai se modificando até a formação de um sólido rígido. As reações que ocorrem são exotérmicas e podem ser estudadas por calorimetria ou pela microscopia ou por análise da fase líquida.

No início da hidratação, logo após o contato com a água, nota-se o aparecimento de uma camada gelatinosa na superficie do grão anidro de cimento. Há uma troca iônica entre os sólidos e a fase líquida pelo processo de dissolução. Grande quantidade de calor desenvolve-se, à medida que os produtos hidratados são formados (principalmente o  $C_3A$  e o  $C_3S$ ) (Scrivener, 1989).

A seguir, percebe-se uma diminuição do desenvolvimento do calor devido à formação da camada impermeável ao redor do  $C_3S$  e a formação da etringita ao redor do  $C_3A$ . Este período corresponde ao período de indução. No final deste período, inicia-se a cristalização do CH e formação do C-S-H<sub>(s)</sub> (estável). A camada de C-S-H formada em torno do grão desprende-se e afasta-se, permitindo que a água atinja a região anidra do grão, dando continuidade à hidratação, num processo de dissolução-precipitação. Inicia-se um novo pico de calor de hidratação e o entrelaçamento do C-S-H entre os grãos causa o endurecimento da pasta e a sua pega (Scrivener, 1989).

A medida que a hidratação continua, a camada de C-S-H torna-se mais densa e a taxa de emissão de calor diminui significativamente. A desaceleração da hidratação deve-se, provavelmente, à dificuldade da água atingir o núcleo anidro. A esta altura, uma grande quantidade de C<sub>3</sub>A já reagiu com os sulfatos produzindo a etringita. Entretanto, se existirem quantidades menores de sulfatos disponíveis, a etringita se dissolve e reage com o Al(OH)<sup>-4</sup>, produzindo o monosulfoaluminato de cálcio hidratado (AF<sub>m</sub>). Esta reação depende da disponibilidade de íons sulfato e alumínio na fase líquida da pasta (Camarini, 1995).

O silicato de cálcio hidratado é o constituinte mais abundante na pasta de cimento hidratado, aproximadamente 50 a 60% dos sólidos. O C-S-H é um gel de baixa cristalinidade, sua composição é incerta e possivelmente variável, com relação C/S entre 1,7 e 2. Sua morfologia é variável podendo, em idades mais avançadas, estar em forma de fibras nas primeiras idades ou em estruturas mais compactas, reticuladas. Ele apresenta uma elevada superficie específica que lhe proporciona uma grande capacidade de adesão aos demais constituintes do concreto e por isso é tido como o grande responsável pela resistência mecânica da pasta (Scrivener, 1989).

13

O segundo composto mais comum na pasta de cimento hidratado é o hidróxido de cálcio, ocupando aproximadamente 20 % do volume de sólidos. Ele possui uma estrutura cristalina bastante definida de grandes cristais hexagonais, o que lhe confere baixa área superficial e, consequentemente, baixa resistência mecânica.

Aproximadamente 15 a 20 % dos sólidos da pasta de cimento são sulfoaluminatos de cálcio, de composição morfológica variável, de acordo com a composição do cimento e a etapa de hidratação em que se formaram. Nos primeiros estágios da hidratação, é comum a formação de etringita (trissulfoaluminato hidratado), em forma de cristais prismáticos aciculares (AFt). A etringita pode transformar-se em monossulfato hidratado (AFm), na forma de placas hexagonais. (Mehta & Monteiro, 1994).

A hidratação do cimento será influenciada por alguns fatores tais como: tipo e finura do cimento, umidade de saturação.

Cada composto do cimento tem reatividade característica quando em contato com água. Uma modificação na proporção dos compostos no cimento mudará o comportamento do produto final. A partir do conhecimento das reatividades relativas e seus produtos de hidratação, é possível produzir cimentos com características especiais, afetando a resistência e o calor de hidratação dos mesmos.

As adições empregadas nos cimentos também modificam o seu comportamento. Estudos mostram que as escórias e pozolanas contribuem para diminuir a taxa de liberação de calor de hidratação, assim como têm influência direta na resistência final da pasta e na durabilidade do concreto.

A finura do cimento influencia a sua reação com água, a velocidade de hidratação e o consequente ganho de resistência. Considera-se geralmente que as partículas de cimento maiores que 45 µm são dificeis de hidratar e aquelas maiores do que 75 µm nunca se hidratam completamente. Geralmente, quanto mais fino o cimento, mais rápido ele reagirá. Entretanto, se

ele for demasiadamente fino, suas propriedades podem ser prejudicadas por uma pré-hidratação sob a umidade ambiente, por geração excessiva de calor de hidratação nas primeiras horas após a mistura com água de amassamento, ou por uma diminuição do tempo de trabalhabilidade devido à conseqüente aceleração da pega (Mehta & Monteiro, 1994).

## 2.2.2 Agregados

Os agregados são comumente classificados quanto ao seu tamanho, à sua origem e à sua densidade. Quanto ao tamanho podem ser miúdos e graúdos. Agregados miúdos são as partículas menores que 4,8 mm e maiores que 75 µm. Agregados graúdos são as partículas maiores que 4,8 mm. A origem pode ser natural ou artificial. Os naturais são encontrados na natureza na forma em que são utilizados. Artificiais são aqueles que necessitam de beneficiamento, pela ação do homem, a fim de se tornarem adequados para serem empregados como agregados. Quanto à densidade, são divididos em leves, normais e pesados (NBR 7211/83).

Os agregados desempenham um importante papel nas argamassas e concretos, tanto do ponto de vista econômico, como do ponto de vista técnico, influenciando propriedades do concreto no estado fresco e endurecido. A porosidade ou massa específica, a composição granulométrica, a forma e a textura superficial dos agregados determinam a coesão, trabalhabilidade e o consumo de água. Agregados lisos e com forma próxima à da esfera proporcionam um menor consumo de água para alcançar a trabalhabilidade desejada. Entretanto, agregados mais ásperos favorecem a formação de uma aderência mecânica forte com a pasta de cimento. Os agregados muito finos necessitam de mais pasta para envolvê-los e facilitam, consequentemente, a fissuração do concreto (Neville, 1997).

As propriedades relevantes são sanidade, porosidade, permeabilidade, resistência mecânica, estrutura cristalina, expansibilidade térmica, dureza e composição química. Elas atuam na resistência mecânica, módulo de elasticidade e durabilidade do concreto.

15

A escolha de agregados adequados é fundamental para assegurar o desempenho requerido do concreto. Agregados reativos causam a reação álcali-agregado, podendo ser considerado potencialmente reativo em função da natureza da rocha e de seus minerais constituintes. A presença de impurezas orgânicas e de material pulverulento exercem uma ação prejudicial à pega, ao endurecimento e à resistência do concreto. A presença de chumbo e zinco em excesso pode causar problemas relacionados à pega. Sulfetos de ferro podem causar reações expansivas. No entanto, são observadas algumas reações benéficas entre componentes da pasta e do agregado, especialmente no caso de agregados calcários, resultando em aumento de aderência entre as fases (Paulon, 1995).

As características dos agregados são derivadas das propriedades da rocha matriz (formação mineralógica), do processo de obtenção ou das condições de exposição do material. Os agregados miúdos podem ser extraídos em leito de rio, em cava seca ou submersa, em solo de alteração ou ser produzidos por moagem. O tipo mais utilizado é areia de origem natural. Agregados graúdos adequados para uso em concretos são raramente encontrados em forma natural, sendo a maioria obtida por britagem (pedra britada).

# 2.2.3 Água

A água é essencial para promover plasticidade ao concreto fresco e para as reações de hidratação. A quantidade de água adicionada à mistura está intimamente ligada com o desempenho do concreto dosado. Considerando que o volume total de uma mistura cimento-água permanece praticamente inalterado durante o processo de hidratação, a água não consumida nesse processo migrará para a superficie e depois evaporará, formando os vazios capilares. Estes vazios são prejudiciais à resistência mecânica, à porosidade e à permeabilidade do concreto (Neville, 1997).

Ela pode estar disposta de várias formas no concreto. A água livre está presente em poros grandes, de diâmetro maior que 50 nm, e a água retida por tensão capilar em poros

pequenos (5 a 50 nm). É considerada como adsorvida quando está próxima à superficie dos sólidos retida por pontes de hidrogênio e como interlamelar quando está associada à estrutura do C-S-H. Água quimicamente combinada é parte integrante da estrutura de vários produtos hidratados do cimento. Esta água não é perdida na secagem, é liberada quando os produtos hidratados são decompostos por aquecimento (Mehta & Monteiro, 1994).

### 2.3 Zona da transição

Até cerca de duas décadas atrás, considerava-se que o concreto era formado de duas fases, sendo a do agregado normalmente a mais resistente. Pesquisas mais direcionadas à interface matriz-agregado (utilizando a microscopia) levaram à descoberta da existência de uma zona de transição com características próprias. Na pasta existe a formação de uma auréola em torno do agregado, onde a cristalização dos hidratos é diferente da existente na mesma pasta fora dessa zona. Devido ao fato que a relação a/c é muito maior e a coesão é menor, os cristais de hidróxido de cálcio em placas tendem a ser maiores e a formar-se em camadas orientadas com o eixo cristalográfico c perpendicular à superficie do agregado (Mindess, 1989).

As principais hipóteses sobre o mecanismo de formação da zona de transição estabelecem que, quando é efetuada a mistura, os agregados tornam-se cobertos por um filme de água de vários micrômetros de espessura no qual há uma pequena quantidade e grãos de cimento anidro. A concentração do cimento anidro aumenta progressivamente quando se aproxima da matriz cimentícia. Posteriormente, os íons dissolvidos com maior mobilidade (sódio, potássio, alumínio, sulfato e cálcio) irão se propagar formando a etringita e o  $Ca(OH)_2$ . Devido à inexistência de barreiras ao seu crescimento, eles desenvolvem um tamanho considerável, formando uma rede porosa. Esses vazios são progressivamente preenchidos por íons menos móveis (silício e alumínio) e em seguida pelo C-S-H e cristais menores de Ca(OH)<sub>2</sub> e etringita (Paulon, 1995). A fragilidade da zona de transição devido à porosidade elevada em conjunto com a orientação e grande tamanho dos cristais torna esta região susceptível à formação e à propagação de fissuras no concreto endurecido. Iniciada a fissuração, esta se propaga de uma zona de transição para outra. Estas fissuras promovem interconexões entre os poros capilares e as microfissuras, aumentando a permeabilidade do concreto e tornando-o assim mais frágil ao ataque de agentes agressivos (Paulon, 1995).

## 2.4 Propriedades do concreto

O concreto apresenta dois estágios distintos. O primeiro compreende o período desde a mistura dos materiais até a pega, designado estado fresco. Pega é definida como a passagem de um estado fluido para um estado rígido. Após este período, o concreto apresenta-se no estado endurecido (Mehta & Monteiro, 1994).

#### 2.4.1 Propriedades do concreto no estado fresco

A principal propriedade do concreto no estado fresco é a sua trabalhabilidade. O concreto dito trabalhável possui consistência adequada para a aplicação a que foi designado. Esta propriedade está diretamente relacionada à fluidez e coesão do concreto.

Outra propriedade importante é o tempo de pega, pois o concreto deve ser manipulado somente até o início de pega. Após este período, o concreto tende a perder trabalhabilidade. O final de pega representa aproximadamente o tempo após o qual inicia-se o desenvolvimento da resistência a uma taxa significativa (Mehta & Monteiro, 1994).

Um fenômeno prejudicial ao concreto fresco é a segregação. Ela é definida como a separação dos componentes do concreto fresco de tal forma que a sua distribuição não é mais uniforme. Há duas formas de segregação. Na primeira, característica de misturas mais secas, as partículas mais grossas tendem a se separar das partículas mais finas, devido, principalmente, a um lançamento ou vibração inadequados. A segunda forma de segregação, denominada exsudação, é característica de misturas mais fluidas, onde ocorre a separação da água da mistura, que tende a subir à superfície do concreto recém aplicado. A água ao subir à superfície pode carrear partículas mais finas de cimento, formando uma nata. Ela possui uma elevada relação a/c, apresentando-se, portanto porosa e fraca. Outro efeito nocivo da exsudação consiste no acúmulo de água sob as armaduras e os agregados, acarretando na diminuição da aderência dos mesmos com a matriz cimentícia (enfraquecimento da zona de transição pasta-agregado) (Neville, 1997).

## 2.4.2 Propriedades do concreto endurecido

O concreto como material deve atender às especificações para as quais é designado quando empregado na construção civil, ou seja, resistir aos esforços aplicados sem deformações excessivas e manter-se íntegro no período que corresponde à sua vida útil. Portanto, as propriedades do concreto estão intimamente ligadas com a aplicação destinada ao mesmo.

#### 2.4.2.1 Resistência mecânica

A resistência é uma propriedade fundamental do concreto no estado endurecido, pois representa a medida da tensão exigida para romper o material<sup>1</sup>. O concreto tem maior capacidade de suportar esforços de compressão, por esta razão o concreto normalmente é caracterizado pela

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> É expressa normalmente em unidades de pressão (MPa). No entanto, como as dimensões das amostras são padronizadas de acordo com o tipo de material analisado, costuma-se empregar o termo tensão ao invés de pressão.

resistência à compressão que ele obtém aos 28 dias. A resistência à tração é da ordem de 10% da resistência à compressão. A razão desta grande diferença é atribuída à estrutura complexa e heterogênea deste material.

A resistência está relacionada à parte sólida de um material, portanto, a resistência mecânica do concreto está intimamente ligada à evolução das reações de hidratação e seus compostos resultantes. Em determinada idade e sob determinadas condições de cura, pode-se assumir que a relação a/c e a compactação do concreto são seus principais determinantes, por estabelecerem a relação entre o volume de produtos sólidos de hidratação e o espaço a ser ocupado (Neville, 1997).

A lei de Abrams estabelece que, no campo dos concretos trabalháveis quanto menor a relação a/c, maior será a resistência do concreto (Figura 2.2). O efeito benéfico da redução da relação pode ser atribuído tanto à redução de poros quanto à diminuição do tamanho dos cristais de hidróxido de cálcio formados na zona de transição, que são fatores de enfraquecimento dessa região (Paulon, 1995).



Figura 2.2. Representação esquemática da curva de Abrams, onde k1 e k2 são constantes empíricas (Neville, 1997).

A cura compreende o conjunto de procedimentos tomados para evitar a perda precoce da umidade e para controlar a temperatura do concreto durante um período suficiente para alcançar certo nível de hidratação. Consequentemente, o procedimento adotado influenciará na resistência obtida, o que pode ser observado na Figura 2.3, onde é mostrado o efeito do período de cura úmida na evolução da resistência à compressão de concretos com relação a/c 0,50. Há grande

ganho de resistência quando se compara o concreto curado sem cuidados especiais com o concreto submetido à cura úmida por três dias. Após este período, os incrementos são cada vez menores com aumento do tempo de cura, até que não se nota ganho substancial com o prolongamento da cura por mais de 14 dias (Levy & Helene, 1996).



Figura 2.3. Influência da cura úmida na resistência do concreto (Levy & Helene, 1996).

#### 2.4.2.2 Porosidade

A estrutura dos poros afeta a maior parte das propriedades físicas dos materiais sólidos. O concreto é um material heterogêneo e poroso, formado de agregados unidos com a pasta de cimento. Considerando que os agregados pouco porosos, a pasta de cimento é responsável pela porosidade do material.

A estrutura de poros dos materiais é determinada pelas matérias-primas utilizadas, suas proporções e pelas condições de fabricação dos mesmos. A estrutura de poros dos sólidos está relacionada à porosidade, volume de poros dividido pelo volume total do material; e pela distribuição do tamanho e interconexão entre os poros. A estrutura de poros influenciará as propriedades físicas do material, como resistência e permeabilidade (Pereira *et al.*, 1989).

A pasta de cimento possui dois sistemas de poros: os poros capilares originados primariamente pela evaporação da água; e os poros do gel que representam a porosidade dos produtos de hidratação (Neville, 1997).

Os poros do gel possuem diâmetro nominal de 2 nm ou 3 nm, e ocupam aproximadamente 28% do volume total. Este tamanho de poro é muito pequeno para ter efeito desfavorável sobre a resistência e a permeabilidade da pasta. No entanto, a água nestes pequenos poros pode ser retida por pontes de hidrogênio, e a sua remoção sob determinadas condições pode contribuir para retração por secagem e para a fluência (Mehta & Monteiro, 1994).

Os poros capilares representam o espaço não preenchido pelos componentes sólidos da pasta. Em pastas bem hidratadas e de baixa relação a/c, os poros capilares podem variar entre 10 e 50 nm; em pastas de relação a/c elevada, nas primeiras idades de hidratação, os poros capilares podem atingir de 3 a 5 µm. Sugere-se que a distribuição de tamanhos de poros, e não a porosidade capilar, seja o melhor critério para a avaliação das características de poros capilares maiores do que 50 nm de uma pasta. Referidos na literatura atual como macroporos, são admitidos como prejudiciais à resistência e a impermeabilidade. Esses poros intercomunicáveis são os principais responsáveis pela permeabilidade da pasta de cimento endurecida e pela sua vulnerabilidade a agentes agressores. Enquanto os poros menores que 50 nm, os microporos, são admitidos como mais importantes para retração por secagem e para a fluência (Mehta & Monteiro, 1994).

Os poros de ar incorporado são geralmente esféricos, com diâmetro variando de 50 a 200  $\mu$ m. Os poros de ar aprisionado podem chegar a 3mm. Consequentemente, os poros do ar aprisionado e do ar incorporado na pasta são muito maiores do que os poros capilares, capazes de afetar negativamente a sua resistência e impermeabilidade (Mehta & Monteiro, 1994).

A porosidade do concreto é afetada por diversos fatores, tais como cura, adensamento, relação água/cimento e grau de hidratação. As pastas mais hidratadas possuem valores de porosidade menor. Com o processo de hidratação os produtos formados se expandem no interior dos poros, diminuindo assim o seu tamanho e a sua interconexão. Isso pode ser visto na Figura

22

2.4, que apresenta o grau de hidratação no qual os poros capilares tornam-se descontínuos em função da relação a/c. As linhas cheia e tracejada correspondem ao estudo realizado por Powers *et al.* (1959) e a as barras são referentes aos valores obtidos por Cook & Hover (1999).



Considerando que o volume total de uma mistura cimento-água permanece inalterado durante o processo de hidratação, a água não consumida neste processo irá evaporar e no seu lugar ficarão os poros capilares (Neville, 1997). Portanto, quanto maior for a quantidade de água adicionada à pasta, maior será a porosidade da mesma. O que pode ser observado no gráfico da Figura 2.5, que apresenta a influência da relação a/c na porosidade de pastas de cimento.



Figura 2.5. Porosidade em função da relação a/c (Cook & Hover, 1999).

Um processo adequado de cura é vital para assegurar um bom desenvolvimento da hidratação. A perda excessiva de água provocará um aumento na porosidade e fissuras decorrentes da retração por secagem. As Figuras 2.6 e 2.7 apresentam a porosidade de pastas em função do tempo de cura úmida (as amostras foram imersas em água).



### 2.4.2.3 Permeabilidade

A permeabilidade é definida como a propriedade que governa a taxa de fluxo de um fluido para o interior de um sólido poroso. Para um fluxo laminar, o que normalmente ocorre em concretos devido à baixa vazão dos fluidos no interior do mesmo, o coeficiente de permeabilidade K pode ser calculado pela equação de Darcy (Olliver & Massat, 1992):

$$Q = -\frac{K}{\mu} A \frac{dP}{dZ}$$
(2.1)

Onde: Q: vazão do fluido (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>); A: Área perpendicular à direção do fluxo (m<sup>2</sup>);  $\mu$ : viscosidade do fluido (kg.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>); dP/dZ: gradiente de pressão (Pa.m<sup>-1</sup>).

Quando a permeabilidade em pastas de cimento é considerada, o tamanho e a continuidade dos poros em qualquer ponto durante o processo de hidratação irão controlar o valor do coeficiente de permeabilidade. Com o prosseguimento do processo de hidratação há uma diminuição na porosidade capilar e também na permeabilidade da pasta. Entretanto, não há uma correlação direta entre a porosidade e a permeabilidade, sendo que vários autores citam que a permeabilidade é função da distribuição do tamanho de poros e de uma larga variedade de parâmetros relacionados ao diâmetro do poro (raio hidráulico, diâmetro crítico e raio máximo de poro contínuo) (Bágel & Zivica, 1997).

Na formulação dos modelos de porosidade, o poro é considerado um cilindro (Olliver & Massat, 1992 e El-Deb & Hooton, 1994) e na matriz da pasta ele possui forma e direção aleatórias. Mudanças na "largura" e no sentido do poro provocam modificações na vazão do fluido que passa no seu interior, principalmente nas interconexões dos poros. Segundo Mehta & Monteiro (1994), tipicamente, as interconexões entre os poros de uma pasta com cerca de 30 % de porosidade capilar já se tornaram tão tortuosas, que um decréscimo adicional na porosidade não é acompanhado por um decréscimo substancial no coeficiente de permeabilidade.

Com a adição de agregados de baixa permeabilidade na pasta de cimento, espera-se que a permeabilidade da argamassa ou do concreto diminua. Entretanto, não é isso que é observado. A permeabilidade de argamassas e concretos é normalmente maior que a da pasta correspondente. Este fato deve-se à presença da zona de transição entre a matriz e o agregado. A zona de transição é mais porosa e fraca que a matriz de cimento hidratado, possuindo cristais maiores e com uma orientação preferencial, o que é um aspecto favorável à propagação de fissuras (Paulon, 1995). Estas fissuras possuem largura maior que a maioria dos poros capilares presentes na matriz da pasta de cimento e, portanto, capazes de estabelecer interconexões que aumentam a permeabilidade do sistema (Mehta & Monteiro, 1994).

A permeabilidade é afetada pelo tipo e tamanho de agregado e o emprego de adições. Quanto maior o tamanho do agregado, mais permeável será o concreto obtido, pois maior será probabilidade de acúmulo de água próximo à sua superfície, enfraquecendo assim a região de contato entre o mesmo e a matriz cimentícia. A zona de transição varia conforme o tipo de agregado. Quando as reações de interface são mais eficientes, o concreto obtido tende a ser menos poroso (Mehta & Monteiro, 1994).

O concreto fabricado empregando-se cimentos com adição de materiais cimentantes e pozolânicos possui, normalmente, coeficiente de permeabilidade menor do que o concreto feito com cimento sem adições. Na reação pozolânica o Ca(OH)<sub>2</sub> (frágil) reage com o material pozolânico produzindo o C-S-H. Já na reação de hidratação da escória de alto-forno, ela é ativada pelo Ca(OH)<sub>2</sub> formando o C-S-H. Nos dois casos o composto formado atuará preenchendo espaços e aglutinando outras formas cristalinas (Neville, 1997).

A permeabilidade está relacionada à porosidade capilar do concreto. Reduzindo-se o volume dos poros capilares grandes (>100 nm) na matriz, a permeabilidade da mesma se reduzirá (Mehta & Monteiro, 1994). Portanto, os fatores que afetam a porosidade do concreto também terão influência no coeficiente de permeabilidade, entre eles: cura, adensamento, relação água/cimento e grau de hidratação, citados no item anterior.

A determinação do coeficiente de permeabilidade é feita, comumente, utilizando permeabilímetros. Entretanto, eles diferem bastante em sua concepção e operação. Quanto ao tipo de fluido empregado, ele pode ser: água, soluções salinas, óleos, ar, oxigênio, dióxido de carbono, nitrogênio, hélio, vapor d'água , entre outros. A desvantagem do uso de água ou soluções aquosas é a possibilidade de reação com o sólido, reduzindo o coeficiente de permeabilidade calculado. Por outro lado, ensaios empregando gases são muito dependentes do teor de umidade da amostra e portanto, o concreto é usualmente pré-condicionado. Este processo envolve a secagem prévia da amostra, que pode alterar o resultado final do ensaio. Logo, a determinação da permeabilidade com a utilização de gases é muito mais delicada do que o ensaio com água (Sanjuán & Martialay, 1995).

Com o intuito de obter informações mais realistas sobre o transporte de radônio (gás nobre) no concreto, optou-se pela determinação da permeabilidade ao gás (ar).

#### 2.4.2.4 Absorção capilar

Recentemente, diversas pesquisas têm proposto o uso deste parâmetro como um importante fator para a determinação da durabilidade do concreto (Lockington *et al.*, 1999). A absorção capilar é uma das propriedades que regem o transporte dos íons no interior do concreto. Ele define a taxa de ascensão de água através de um material poroso quando exposto a uma fonte de água.

O método de ensaio é relativamente simples. As amostras são previamente secas e têm suas laterais impermeabilizadas. Posteriormente uma face é exposta à água (Figura 2.8). A determinação da ascensão capilar baseia-se no modelo de capilaridade dos tubos retos paralelos.



Figura 2.8. Esquema do ensaio de absorção sem escala.

Quando dois materiais diferentes, como fluidos imiscíveis ou um fluido e um sólido, são colocados em contato, forças de tensão superficial aumentam devido à energia necessária para formar uma interface. O ângulo de contato,  $\theta$ , formado no ponto onde a interface fluido-fluido encontra um sólido, é definido pelos planos tangentes nas interfaces fluido-fluido e sólido-fluido (Figura 2.9). Quando o sistema está em equilíbrio, um ângulo estático de contato pode ser obtido através da equação de Young:

$$\gamma_{bs} - \gamma_{as} = \gamma_{ab} \cdot \cos\theta. \tag{2.2}$$

Onde:  $\gamma_{ab}$ : tensão superficial entre dois fluidos (N.m<sup>-1</sup>);  $\gamma_{as}$ : tensão superficial entre um fluido *a* e um sólido (N.m<sup>-1</sup>);  $\gamma_{bs}$ : tensão superficial entre um fluido *b* e um sólido (N.m<sup>-1</sup>).



Figura 2.9. Ângulo de contato,  $\theta$ , formado no ponto onde a interface fluido-fluido encontra um sólido (Martys & Ferratis, 1997):

Forças de tensão superficial podem criar uma diferença de pressão  $\Delta P$  na interface entre os dois fluidos imiscíveis descrita pela Lei de Laplace:

$$\Delta P = \gamma . k \tag{2.3}$$

Onde:  $\gamma$ : tensão superficial (N.m<sup>-1</sup>); k : curvatura média da interface (m<sup>-1</sup>).

Em um tudo de raio r (m), a forma da interface se aproxima de uma calota esférica, rescrevendo a equação, tem-se:

$$\Delta P = 2\gamma \cos\theta / r \tag{2.4}$$

No entanto, o transporte capilar resulta em sistema dinâmico. Aplicando-se a lei de Darcy, pode-se calcular a velocidade  $V(m.s^{-1})$  do fluido no meio poroso:

$$V = -\frac{K\Delta P}{l\mu}$$
(2.5)

Onde: K : permeabilidade (m<sup>2</sup>);  $\mu$  : viscosidade (kg.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>); I (m): comprimento no qual a diferença de pressão,  $\Delta P$  (Pa), é medida.

Para um tubo capilar  $K = r^2/8$  e ignorando a gravidade (assumindo um tubo horizontal) e os detalhes do mecanismo da linha de contato formada, tem-se:

$$V = \frac{r}{4\mu . l} \gamma \cos \theta. \tag{2.6}$$

Devido ao fato que V diminui com o raio do tubo, meios porosos com poros de menor diâmetro absorverão um líquido mais lentamente. Considerando V = dl/dt, e efetuando a integral, obtém-se a ascensão capilar, S:

$$l = \sqrt{\frac{rt\gamma\cos\theta}{2\mu}} \equiv St^{1/2} \tag{2.7}$$

Assumindo um modelo de tubos paralelos retos em um meio poroso, logo uma aproximação similar pode ser aplicada para estimar a ascensão capilar da água. Portanto, para estágios iniciais da absorção (antes da saturação da amostra), a água absorvida pode ser descrita como

$$\frac{l}{\sqrt{t}} = S \tag{2.9}$$

Evidentemente que um material como o concreto, não pode ser precisamente modelado como uma coleção de tubos. Entretanto, o a rede de poros do concreto é caracterizada por um número de capilares interconectados, com dimensões e formas variáveis que tornam a determinação da sua estrutura porosa demasiadamente difícil justificando o emprego deste modelo simplificado. Lembrando, que a teoria de sucção capilar citada acima se aplica no caso de poros inicialmente secos (Martys & Ferraris, 1997):

# **3 RADÔNIO: UMA VISÃO GLOBAL**

Este capítulo destina-se a abordar as propriedades e características do gás radônio, a emanação do mesmo dos materiais de construção e particularmente do concreto e métodos de detecção empregados. É abordada também a ocorrência do elemento urânio na crosta terrestre.

### 3.1 Descoberta do radônio

O radônio foi primeiramente identificado como substância única em 1900, quatro anos após a descoberta da radioatividade por Henry Becquerel em Paris e após a descoberta do rádio por Marie Curie no mesmo ano. Ernest Rutherford, no início de 1900, enquanto trabalhava com óxido de tório, verificou que, em adição à ionização das radiações alfa e beta, havia um gás ionizante difundindo-se de camadas espessas dos componentes de tório. Alguns meses depois, ainda em 1900, Fritz Dorn observou um gás radioativo similar enquanto estudava sais de rádio, e o chamou de emanação de rádio. Mais tarde, em 1923, este gás passou a ser chamado de radônio (Wilkening, 1990).

### 3.2 Propriedades físicas e químicas do radônio

O radônio é um gás nobre e radioativo. Por ser um gás nobre (número atômico 86) possui mobilidade e não reage quimicamente com outros elementos a temperaturas normais. Ele está presente na cadeia de decaimento do <sup>238</sup>U e decai emitindo partículas alfa. Considerando-se o equilíbrio secular, a fonte primária do radônio é o <sup>238</sup>U. A série de decaimento do <sup>238</sup>U é apresentada na figura abaixo (Durrani & Ilic, 1997).



Cadeia de decaimento do 238U

Figura 3.1. Série de decaimento radioativo do <sup>238</sup>U. As setas inclinadas indicam o decaimento  $\alpha$  e as setas horizontais indicam o decaimento  $\beta$ . O número indicado abaixo dos elementos é a sua meia-vida (Durrani & Ilic, 1997).

Os produtos de decaimento do radônio são: polônio (<sup>218</sup>Po), chumbo (<sup>214</sup>Pb), bismuto (<sup>214</sup>Bi), polônio (<sup>214</sup>Po), chumbo (<sup>210</sup>Pb), bismuto (<sup>210</sup>Bi) e polônio (<sup>210</sup>Po) e finalmente chumbo

(<sup>206</sup>Pb) que é o elemento estável da cadeia do urânio. Estes elementos são, comumente, chamados de filhos. Eles são isótopos de elementos químicos que têm facilidade de estabelecer ligações químicas (átomos metálicos). Os possíveis danos causados à saúde não são primariamente devido ao radônio, pois ao ser inalado, este não fica retido no sistema respiratório. No entanto, seus filhos ligam-se a aerossóis em suspensão no ar, podendo ser inalados e posteriormente se depositam no aparelho respiratório dos seres humanos, e ao decair expõem os tecidos à radiação alfa, possibilitando o desenvolvimento de células cancerígenas (câncer de pulmão) (Khan, 2000).

De acordo com dados da UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects on the Atomic Radiation) de 1993, 50 % da dose de radiação natural a que os seres humanos estão sujeitos é proveniente de radônio e seus produtos de decaimento.

## 3.3 O radônio nas edificações

A crosta terrestre, bem como os materiais de construção produzidos a partir de matériaprima extraída do solo apresentam o urânio na sua constituição. O <sup>238</sup>U irá decair até o <sup>206</sup>Pb, passando pelo <sup>222</sup>Rn. Entretanto, o radônio, por ser um gás inerte apresenta uma maior mobilidade, podendo se difundir para a superfície ou para ambientes internos das edificações. Portanto, as principais fontes deste gás nas edificações são o solo e os materiais utilizados. Estudos recentes indicam que os materiais de construção, principalmente o concreto, são importantes fontes deste tipo de contaminação em ambientes fechados (Font *et al.*, 1999, Guedes et al., 1999 e Jong *et al.*, 1996).

A concentração de radônio nos ambientes construídos depende do tipo e características dos materiais utilizados e da ventilação presente. O uso de determinados materiais em locais com ventilação deficiente pode aumentar o nível de concentração de radônio. Outro parâmetro a ser considerado diz respeito ao tipo de revestimento empregado nas edificações. A utilização de papéis de parede e materiais cerâmicos pode diminuir a concentração do gás (Yu, 1993).

## 3.4 Formação e emanação do radônio

Quando o <sup>226</sup>Ra desintegra-se, um átomo de radônio e uma partícula alfa são formados, e são ejetados em sentido oposto um da outra. Isto pode expulsar o átomo de radônio do local na estrutura mineral ou molecular em que o átomo de rádio estava. A distância que o átomo de radônio pode se movimentar em uma grão mineral de densidade normal é próxima de 0,02-0,07 µm. Este é o principal mecanismo que permite ao átomo de radônio emanar do grão mineral (Durrani & Ilic, 1997).



A Figura 3.2 ilustra a emanação de radônio no interior dos materiais.



Nos materiais porosos, quando um átomo de radônio é formado, ele poderá ter diversos destinos dentro do material, o que irá depender da posição em que é formado e das características do meio através do qual ele irá se difundir. Ele pode permanecer no grão onde foi formado (caso 2), ou difundir-se para grãos adjacentes, ou ainda (caso 1), alcançar uma microfissura e em seguida a rede de capilares do material (caso 3). Em seguida, o transporte dentro do sistema capilar será por difusão (Durrani & Ilic, 1997).

Outras teorias assumem que a emanação de radônio proveniente do grão do mineral seria através de difusão no interior da estrutura mineral ou por lixiviação, quando o radônio é conduzido em um fluido (água líquida ou no estado de vapor ou ar) dentro dos poros intersticiais do material (transporte por fluxo) (Nazaroff & Nero, 1988).

### 3.4.1 Transporte de radônio nos materiais de construção

Nos materiais de construção a emanação de radônio está relacionada a dois fatores básicos: a fonte e o comprimento de difusão do radônio no material. A concentração de <sup>238</sup>U está diretamente ligada à matéria-prima empregada na fabricação destes materiais. Dependendo da localização e do tipo de formação geológica do local onde se situam as jazidas de extração mineral para obtenção de matéria-prima, o solo pode conter altos níveis de urânio como constituinte. A utilização de resíduos industriais e seus subprodutos empregados como substituição de produtos naturais e na produção ou confecção de materiais de construção, também pode elevar a concentração de radônio emanada devido à grande quantidade de radionuclídeos que eles podem conter. (Kumar *et al.*, 1999)

A presença de umidade influencia a emanação do radônio nos materiais porosos. Segundo Yu *et al.* (1997) quanto maior o teor de umidade, menor será a emanação de radônio. No entanto, Nazaroff & Nero (1988) estabeleceram que a umidade contribui para aumentar a emanação de <sup>222</sup>Rn. Através da análise do estudo feito por Khan *et al.* (1992) pode ser observado o comportamento da emanação de radônio para os diferentes materiais de construção utilizados na Índia. O gráfico da Figura 3.3 apresenta os valores de emanação obtidos para os diferentes materiais estudados.



Figura 3.3. Emanação de radônio em materiais de construção comumente empregados (Khan et al., 1992).

Nota-se claramente uma variação do valor da taxa de emanação em função dos diferentes materiais, ou seja, a emanação depende das características inerentes de cada material. Observa-se também que os dois principais materiais empregados nas edificações: o tijolo (queimado ou não) e o concreto são os que apresentaram os maiores valores.

### 3.4.2 Radônio no concreto

O concreto é um material heterogêneo formado por aglomerante (cimento) e agregados. Os agregados podem ser utilizados na forma em que são encontrados na natureza (areia natural e seixo rolado) ou são obtidos da britagem de uma matriz de rocha (areia artificial e pedra britada). A concentração de <sup>238</sup>U desses materiais dependerá do tipo da rocha, da localização e das características geológicas da jazida e também da possibilidade de sua contaminação por resíduos que contenham altos teores de urânio.

O cimento é formado por materiais calcários e argilosos, gipsita e adições minerais. O calcário, a argila e a gipsita também são extraídos do solo. Entretanto, a substituição da gipsita natural pelo fosfogesso (subproduto da fabricação do ácido fosfórico), pode causar um aumento na concentração de <sup>238</sup>U do cimento, devido às elevadas concentrações de urânio do fosfogesso (Mazzilli *et al.*, 2000).

As adições empregadas no cimento são geralmente subprodutos provenientes da combustão de carvão e de indústrias metalúrgicas ou siderúrgicas. Estes subprodutos podem conter radionuclídeos que contribuem para o aumento da concentração de fonte de radônio do cimento. Como exemplo pode ser citada a cinza volante, constituinte de cimentos de Hong Kong, com alto teor de <sup>226</sup>Ra. (Yu, 1994).

O <sup>238</sup>U presente nos materiais constituintes do concreto irá decair seguindo sua série radioativa (Figura 3.1), passando pelo <sup>226</sup>Ra e pelo <sup>222</sup>Rn. A quantidade de radônio emanada que conseguirá deixar o concreto dependerá da facilidade do mesmo em difundir-se no interior do material, ou seja, do seu comprimento de difusão. Este parâmetro está relacionado com a geometria interna do material.

Alguns fatores podem afetar a mobilidade do radônio no interior do concreto. Menor será a capacidade do gás difundir-se quanto maior for a densidade de sólidos do material.

O sistema de poros também influenciará significativamente a difusão do radônio dentro do material. Maior será sua mobilidade num meio mais poroso e com poros maiores. A rede de capilares também deve ser levada em conta. Um sistema com poros intercomunicáveis e com a presença de microfissuras facilita a mobilidade do gás dentro da amostra e consequentemente seu escape para a superficie.

Em suma, a emanação de radônio dependerá da concentração de <sup>238</sup>U do material e da capacidade do concreto em blindar a emanação, que está relacionado com as características inerentes do mesmo e com as suas propriedades, tais como: resistência mecânica, capacidade de absorção, porosidade e permeabilidade.

#### 3.5 Sistemas de detecção do radônio

Várias são as técnicas de detecção empregadas na determinação da atividade<sup>1</sup> de <sup>222</sup>Rn. Essas técnicas podem ser agrupadas, de acordo com os procedimentos de medida, em dois grupos básicos: detecção ativa e passiva.

Na detecção ativa, há uma coleta de ar, forçando a passagem de <sup>222</sup>Rn pelos detectores através de bombeamento. Para medidas por detecção passiva o detector é posicionado no local onde será determinada a concentração de <sup>222</sup>Rn (ambiente aberto ou controlado), permanecendo lá durante um tempo de exposição preestabelecido.

A escolha da técnica de detecção a ser empregada baseia-se em qual informação é requerida, concentração de radônio e filhos ou só de radônio ou só de filhos, no tempo de exposição, na sensibilidade e disponibilidade dos instrumentos e nos custos do projeto (Campos, 1994).

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Conceito que se aplica a núcleos radioativos. Expressa uma certa quantidade de decaimentos por unidade de tempo (Kaplan, 1978), normalmente expressa em Bequerel (Bq), que representa um decaimento por segundo.

## 3.5.1 Detecção ativa de radônio e filhos

Durante a detecção ativa do radônio, uma determinada quantidade de ar é coletada, por bombeamento, do ambiente a ser analisado. Para a extração dos filhos do radônio que estejam presentes, a amostra é deixada em repouso durante aproximadamente 3 a 4 horas para que eles decaiam ou ela é filtrada para retirada dos átomos metálicos. Após este procedimento, a amostra de ar contém, somente, o radônio e filhos produzidos após a coleta de ar. Posteriormente, a amostra é disposta em um sistema ativo de detecção, sendo os mais comuns células de Lucas e câmaras de ionização. Sabendo-se a eficiência, o volume de ar coletado e a fração de átomos de radônio que decaem no intervalo de tempo entre a coleta e a medida, pode-se estabelecer uma relação entre a atividade medida e atividade de radônio no ar (George, 1996).

Para a determinação dos produtos de decaimento do radônio, empregam-se filtros que os retêm durante o processo de bombeamento de ar. Estes filtros são analisados em um sistema de detecção adequado, normalmente um espectrômetro gama, determinando assim, atividade alfa dos filhos de radônio da amostra (Marlow, 1988).

### 3.5.2 Detecção passiva de radônio e filhos

A detecção passiva de radônio pode ser executada de diversas maneiras, dependendo do ambiente ou material a ser analisado. Uma das técnicas empregadas é o uso do carvão ativado. A detecção do radônio em ambientes e de materiais é similar. No primeiro caso, ele permanece no ambiente a ser medido e no segundo é aderido à amostra empregando-se um selante, evitando assim o escape de radônio. O período de exposição é relativamente curto, normalmente alguns dias. Durante este período o carvão ativado absorve os átomos de radônio devido à sua elevada área específica. Posteriormente, é levado a um espectrômetro gama onde são verificadas as emissões gama dos produtos de decaimento do radônio (Yu *et al.*, 2000). Esta técnica permite uma detecção rápida e com facilidade de uso. No entanto, a dependência do carvão ativado nas condições ambientais e na superficie da amostra analisada e o alto custo de um espectrômetro gama de alta resolução são pontos desfavoráveis.

Uma das técnicas de monitoração de radônio mais utilizadas baseia-se no uso de detectores sólidos de traços nucleares. Esta técnica é relativamente simples e de baixo custo (Nazaroff & Nero, 1988).

Quando empregada na determinação do <sup>222</sup>Rn em ambientes, os detectores são dispostos no interior da edificação durante um grande período de tempo (meses). Em seguida, os detectores são atacados quimicamente e os traços produzidos pelas partículas alfa são analisados visualmente com o auxílio de um microscópio óptico ou através de sistemas automáticos de contagem (Khatibeh *et al.*, 1997; Vukovic *et al.*, 1997 e Font *et al.*, 1999). A quantificação é feita relacionando-se a quantidade de traços produzidos com a concentração de radônio e filhos no ar.

Os detectores podem ser usados nus ou em dispositivos que têm por objetivo minimizar o efeito da aderência dos filhos do <sup>222</sup>Rn sobre sua superficie (*auto plate-out*) ou para reter os produtos de decaimento do radônio.

A monitoração da taxa de radônio emanada de materiais em ambientes controlados é uma técnica muito empregada e conhecida. A amostra permanece em um contêiner vedado para evitar trocas gasosas, juntamente com o detector durante um tempo de exposição preestabelecido. Posteriormente, o detector é analisado como descrito acima (Khan *et al.*, 1992 e Jarallah *et al.*, 2001). Conhecendo-se a calibração do sistema de detecção e a geometria da amostra é possível relacionar a densidade de traços com a taxa de emanação de radônio e filhos.

A determinação só do radônio é feita de maneira semelhante. A amostra é separada do detector por uma membrana permeável ao <sup>222</sup>Rn e que barra seus outros isótopos e produtos de decaimento. O mecanismo de barreira baseia-se no fato que eles são metálicos e tem facilidade de

estabelecem ligações e na meia vida destes elementos, a membrana provoca um atraso na passagem deles pela mesma, logo eles decairão antes de serem detectados. A partir das características do contêiner, da membrana (espessura, área e coeficiente de difusão), e do detector, determina-se a taxa de emanação de radônio (Tomasino, 1998).

# 3.6 URÂNIO

O urânio, número atômico 92, é um elemento pesado e radioativo, presente naturalmente na crosta terrestre. Seus isótopos de ocorrência natural são o <sup>238</sup>U, <sup>235</sup>U e <sup>234</sup>U. O <sup>238</sup>U é o isótopo mais abundante, sua porcentagem em peso é de 99,28 %, enquanto as porcentagens do <sup>235</sup>U e <sup>234</sup>U são de 0,71 e 0,0054%, respectivamente. O U é polivalente (+4 e +6), podendo apresentar comportamento diferenciado, dependendo de sua valência (Voto, 1978).

O U(+6) na forma de ion uranila  $(UO_2)^{+2}$  tem propriedades de um ion metálico de grande tamanho e dupla carga positiva. Na natureza, este ion é reduzido comumente a um estado tetravalente e precipita-se como o óxido UO<sub>2</sub>, ou precipita-se no estado hexavalente como óxidos, hidróxidos, silicatos, fosfatos, arsenatos, vanadatos, molibdanatos, sulfatos, selenitas, tellurites e carbonatos, dependendo da disponibilidade dos diversos ligantes. Quimicamente o urânio se assemelha ao cromo e ao molibdênio em alguns aspectos e a certos elementos de terras raras, especialmente cerium, em outros aspectos. Há também algumas similaridades (tamanho iônico, carga e eletronegatividade, etc.) entre o urânio e outros elementos, principalmente ítrio, zircônio, tório, cálcio e bário. Assim, em minerais que contêm estes elementos ocorre, comumente, uma substituição desses pelo urânio (Voto, 1978).

Os minerais primários de urânio mais comuns são a uraninita (pitchblene), coffinite, brannerite e davidite. Estes minerais contêm o elemento, principalmente, no estado tetravalente. Os minerais secundários de urânio conhecidos incluem óxidos, óxidos hidratados, carbonatos, sulfatos, molibdanatos, fosfatos, arsenatos, vanadatos, silicatos, e outros complexos derivados. Os mais comuns são a gummite (mineral uranífero que contém vários minerais secundários de urânio), schroeckingerite, zippeite, autanita, torbernita, carnotita, tyuyamunita, e uranofânio. Estes minerais contêm o elemento no estado hexavalente (Voto, 1978).

### 3.6.1 Urânio na crosta terrestre

O urânio e o tório são os únicos recursos minerais energéticos presentes desde a formação da Terra. Eles participaram de todos os episódios que levaram à evolução do planeta, muito embora não sejam conhecidas concentrações com potencial de exploração econômica em terrenos mais antigos do que 280 milhões de anos. Mas foi exatamente a partir desses terrenos mais antigos, que o urânio começou a se dispersar pelos diferentes ambientes geológicos durante as diferentes eras (Pereira, 1990).

A distribuição de urânio na crosta terrestre é de tal modo complexa, que se torna difícil interpretar ou circunscrever sua presença de acordo com esquemas simples de certas metalogenias clássicas. Evidência deste fato é o grau de controvérsia alcançado quanto à origem dos depósitos conhecidos, a respeito da qual ainda não existem teorias completamente aceitas (Maciel & Cruz, 1973).

Para melhor compreender a distribuição do urânio, torna-se indispensável o conhecimento da teoria dos processos que influenciam ou podem intervir na sua disposição, sua distribuição temporal, bem como as características geológicas e geomorfológicas da região (Maciel & Cruz, 1973).

O urânio na litosfera ocorre na forma de óxidos, tanto em minerais próprios como nas suas demais formas de ocorrência, entre elas, solução aquosa, adsorção, substituição diadóxida, etc. (Maciel & Cruz, 1973). O valor médio da concentração na crosta terrestre é de 2 ppm (Boyle, 1982). A formação geológica da região pode fornecer indicações sobre o seu teor de urânio, pois este possui uma distribuição seletiva de acordo com o tipo de rocha em que está presente. Nas rochas graníticas normais, seu conteúdo se eleva a 3-4 ppm, e não é raro encontrar-se rochas ácidas com conteúdo anormal de urânio de 10 ppm. A fixação do urânio dependerá muito mais das condições fisico-químicas do ambiente hospedeiro do que da origem das soluções mineralizantes (Maciel & Cruz, 1973).

O urânio, em seu ciclo primário está intimamente ligado às condições de consolidação original e sucessivas pulsações do magma original ou refundido, que através de processo fisicoquímico de diferenciação deram origem aos múltiplos grupos, famílias e espécies de rochas magmáticas. A heterogeneidade das rochas ígneas da crosta é sugerida por alguns autores como base de delimitação de possíveis áreas uraníferas, onde este elemento tende a se agrupar (Maciel & Cruz, 1973).

Devido a fatores como vento, água e temperatura o urânio é liberado das rochas ígneas e dos filões tendendo a concentrar-se em áreas de sedimentos próximas às áreas de deposito das soluções como íons de uranila ou, depois de carreados para o mar, em depósitos marinhos (Maciel & Cruz, 1973).

O urânio também é encontrado em cinzas de alguns betumes e carvões, particularmente na Suécia. É provável que ele faça parte de reações bioquímicas da vida vegetal, formando componentes coloidais (Lindgren, 1933).

A maior parte dos depósitos mundiais de urânio localiza-se nas zonas orogênicas (áreas de metamorfismo e intensa estruturação rochosa) ou em suas proximidades, exceto no caso de depósitos ou ocorrências em sedimentos marinhos.

Para estabelecer se a região pode conter jazidas de urânio pode-se basear em princípios geológicos teóricos que regem a distribuição do urânio. As condições básicas favoráveis e desfavoráveis para a essa ocorrência são citadas abaixo (Maciel & Cruz, 1973).

42

#### Condições favoráveis

- Presença de áreas orogênicas montanhosas, com corpos ígneos de caráter ácido ou alcalino, que incluam rochas petrograficamente muito diferenciadas, e ainda filões de metais ligados por relações de paragênese (associação de minerais pelo mesmo processo genético) à presença de urânio.
- Existência de períodos de erosão que tenham possibilitado a liberação nestes centros primários.
- Desenvolvimento de zonas sedimentares periféricas ou próximas a núcleos graníticos, com ocorrência de rochas continentais, nas quais se concentraria o urânio (produto de uma possível lixiviação dos granitos), sob certas condições que contariam sua concentração ou deposição.
- Ambiente redutor, em presença de H<sub>2</sub>S, bactérias, material carbonoso, asfáltico, etc.
- Adsorção de urânio.
- Gradiente de pressão das soluções portadoras de urânio
- Influência de outros íons.

#### Condições desfavoráveis

 Áreas de eugeossinclinais (áreas de bacias sedimentares de extensão regional em forma de fossa linear em que o vulcanismo está associado à sedimentação clástica) recentes em cadeias montanhosas de rochas básicas.

- Zonas cobertas por espessas séries de efusões basálticas (derramamento de lava superficial).
- Presença de espessas séries de efusões de sedimentos marinhos.

## 3.6.2 Urânio nas rochas ígneas

O teor de urânio no magma é baixo, de 0,5 a 1 ppm em média no magma basáltico. Durante a consolidação do magma, a alta valência (+4) e o grande raio atômico (0,97 Å) impuseram uma dificuldade de estabelecer ligações. A baixa concentração fez com que o urânio não se precipitasse como um mineral ou fizesse substituições isomórficas durante a formação das rochas (Voto, 1978).

A concentração do urânio ocorreu em um estágio avançado da diferenciação do magma, na diferenciação das rochas graníticas ou vulcânicas ou em veios hidrotermais, tendendo a uma aumento do teor de urânio nas rochas ígneas com a diferenciação do magma (Voto, 1978)

Alguns grupos de rochas ígneas cogenéticas exibem um aumento da quantidade de urânio com aumento do teor de sódio e potássio ou com o teor total de álcalis. Elementos tais como o zircônio, hafinio, terras raras, nióbio e tântalo, que fazem associação freqüentemente com o urânio, seguem uma tendência similar nas rochas ígneas, embora a combinação de dois elementos radioativos seja comumente favorável. A relação Tório/Urânio em determinados grupos de rochas ígneas cogenéticas tende a decrescer com o aumento do teor de sílica e total de álcalis, mas em outros grupos a relação cresce ou mantém-se relativamente constante (Boyle, 1982). A Tabela 3.1 apresenta o teor de urânio em algumas rochas ígneas.

Tipo de rocha *	Média (ppm)	Faixa (ppm)
Dunite	0,02	0,003 - 0,05
Eclogite	0,2	0,013 - 0,80
Piroxenite	0,7	-
Gabro	0,9	<0,2-3,4
Diorite	2,0	<0,5 - 11,5
Granodiorite	2,6	<1 - 9
Granito	4	2,2 - 21
Alcalinas intrusivas	-	0,04 - 140

Tabela 3.1. Teor de urânio das rochas ígneas (Voto, 1978).

\* as rochas vulcânicas equivalentes contêm de 1,5 a 2 vezes mais urânio que as rochas plutônicas

### 3.6.3 Urânio nos minerais acessórios

A presença de urânio nas rochas ocorre de diversas formas, sendo que uma das principais formas é como constituinte dos minerais acessórios, tais como: allanitte, uraninita, zircão, monazita, xenotímio, esfênio, anatase, rutílio, hematita, pyrochlore. Pode também substituir outros elementos, principalmente o cálcio. Isto ocorre em feldspatos, chlorite, biotita, amphibones, pyroxenes, epidoto, fluorita e apatita. O urânio aparece associado com várias substâncias coloidais e carboníferas em sedimentos e também, absorvido ou presente em pequenos grãos minerais tais como uraninita em fissuras cristalográficas, intersticiais ou pequenas fraturas ou em outras descontinuidades das rochas (Boyle, 1982). A Tabela 3.2 apresenta o teor de urânio em minerais acessórios do sudoeste da Califórnia.

Mineral	Teor médio de urânio (ppm)	% de total de urânio
Plagioclase (Na, Ca) (Al, Si) AlSi <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	1,6	
Orthoclase KAISi3O <sub>8</sub>	1,9	60
Quartzo SiO <sub>2</sub>	2,2	
Hypersthene (Mg, Fe) <sub>2Si</sub> 2O <sub>6</sub>	4,7	
Biotita K (Mg, Fe) <sub>3</sub> (Al, Fe)Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH, F) <sub>2</sub>	5,7	
Augita (Ca, Na) (Mg, Fe, Al) (Si, Al) <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	7,7	35
Muscovita KAl <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub>	8,0	
Hornblende (Ca, Na, K) <sub>2-3</sub> (Mg, Fe <sup>+2</sup> , Fe <sup>+3</sup> , Al) <sub>5</sub>	18,0	
(Si, Al) <sup>°</sup> <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub>		
Apatita (Ca <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (F, OH, Cl) <sub>3</sub>	67	<u></u>
Allanite (Ca, $Fe^{+2}$ ) <sub>2</sub> (R. E., Al, $Fe^{+3}$ ) <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>12</sub> (OH)	180	
Esfênio CaTiSiO <sub>5</sub>	196	5
Monazita (Ce, La, Y, Th) PO <sub>4</sub>	820	
Zircão ZrSiO <sub>4</sub>	1367	
Xenotímio YPO <sub>4</sub>	6630	

Tabela 3.2. Teor de urânio nos minerais acessórios (minerais do sudoeste da Califórnia, Voto, 1978)

#### 3.3.4 Urânio no solo

O teor de urânio nos solos é muito variável, com valores entre menos de 1 ppm a 8 ppm, para solos normais, apresentando uma média próxima de 1 ppm. Em áreas uraníferas, valores superiores a 50 ppm não são incomuns. A quantidade de urânio em solos residuais depende essencialmente do tipo da rocha de origem, sendo grande em solos originados de granitos, gnaisses e rochas ígneas alcalinas e pequena em solos originados de rochas ígneas básicas e carboníferas (Boyle, 1992).

A condição climática de uma região também é um importante fator. O urânio é muito mais móvel em solos de regiões semi-áridas quentes do que em regiões temperadas e tropicais, provavelmente devido à baixa abundância de matéria orgânica nas regiões semi-áridas. Em solos, parte do urânio está presente em minerais resistentes, tais como zircão e monazita e outra parte está intimamente associada a frações de argila e complexos de bauxita, orgânicos, de leucoxene, de oxido férrico hidratado e de dióxido de manganês (Boyle, 1992).

### 3.6.5 Urânio em sedimentos

A concentração de urânio em sedimentos (carreados, em rios e lagos) é muito variável e depende, principalmente, dos tipos de rocha do terreno. Deve ser considerado também, o tipo de desgaste, que depende de fatores climáticos, relevo e natureza do regime de águas subterrâneas. Sedimentos carreados contêm usualmente de 0,5 a 5 ppm de urânio. Em terrenos uraníferos este número pode elevar-se para uma média de 10 ppm e próximo a depósitos uraníferos pode chegar a 300 ppm ou mais. Parte do urânio encontrado em sedimentos carreados está presente em minerais resistentes, tais como zircão, monazita e apatita. O urânio remanescente está presente em uma grande variedade de formas, principalmente no estado absorvido ou como um co-precipitado combinado com um grande número de substâncias (Boyle, 1992).

No estado absorvido, o urânio está presente em partículas de silte, minerais argilosos, e vários géis e substâncias microcristalinas. Nos co-precipitados, o urânio aparece como constituinte de géis e formas microcristalinas de óxidos de ferro hidratados, óxidos de manganês hidratados, leucoxene, complexos húmicos e numerosas substâncias fosfáticas, aluminosas, siliciosas, titaníferas e zirconíferas, que existem nas formas gelatinosa e microcristalina (Boyle, 1992).

### 3.6.6 Urânio em materiais orgânicos

Alguns solos férteis, turfas (solo orgânico), lignitas (carvão fóssil) e carvões que contêm um alto teor de húmus podem ser enriquecidos com urânio. Nestes materiais a maior parte do urânio está presente em compostos urano-orgânicos e o restante ocorre na forma adsorvida ou ocasionalmente como discretos minerais de urânio. Solos férteis, turfas, lignitas e carvões normais contêm de 0,05 a 3 ppm de urânio. Entretanto, solos férteis e turfasenriquecidos podem conter acima de 4000 ppm de urânio, lignitas enriquecidas entre 30 e 7000 ppm e carvões sub-
betuminosos enriquecidos de 30 a 1000 ppm. A concentração de tório na maioria das lignitas e carvões raramente excede 5 ppm nas matérias-primas em que é encontrado (Boyle, 1992).

Há, frequentemente, uma relação paralela entre a porcentagem do teor de carbono e a concentração de urânio em ambientes orgânicos não desenvolvidos. Com o aumento do metamorfismo dos carvões, a capacidade de adsorver e absorver Th e U diminui, principalmente, devido ao consistente decréscimo da capacidade de reter elementos radioativos (Boyle, 1992).

# 3.6.7 Urânio no Brasil

Apesar de inúmeras ocorrências de urânio já terem sido estudadas e catalogadas no Brasil, raramente estas ocorrências podem corresponder ou levar à descoberta de um depósito economicamente explorável. De acordo com o tipo de rocha hospedeira as ocorrências brasileiras de urânio podem ser classificadas em (Maciel & Cruz, 1973):

#### <u>Alcalinas</u>

- Poços de Caldas (MG).
  - Cerrado;
  - Campo Agostinho.

#### Sedimentares:

- Bacia do Paraná.
  - Figueira (PR).
- Bacia do Parnaíba.
- Bacias do Nordeste.
  - Tucano (BA);
  - Jatobá (PE).

Metaconglomeráticas (área formada por conglomerado<sup>2</sup> de origem metamórfica)

- Quadrilátero Ferrífero (MG);
- Jacobina (BA);
- Cavalcante (GO).

#### Graníticas

-Currais Novos (RN);

-Camaquã (RS);

-Sorocaba - Itu (SP).

#### Micaxistosas

- Cavalcante Teresina (GO);
- Quadrilátero Ferrífero (MG);
- Bambuí (MG).

O Brasil possui a sexta reserva de urânio do mundo. As principais jazidas são: Itataia (CE), Espinharas (PB), Campos Belos/Rio Preto (TO), Lagoa Real (BA), Amorinópolis (GO), Quadrilátero Ferrífero (MG), Poços de Caldas (MG) e Figueira (PR) (Figura 3.4) (Schobbenhaus & Coelho, 1985).



Figura 3.4. Localização da jazidas e reservas de urânio no território brasileiro (Schobbenhaus & Coelho, 1985).

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> rocha formada de fragmentos arredondados de rochas preexistentes, na maioria de tamanho superior a um grão de areia, unidos por uma matriz de material calcário, oxido de ferro, silício ou argila.

# 3.6.7.1 Geologia das regiões onde estão localizadas as fábricas de cimento

Procurou-se descrever as características geológicas das minas de extração da matériaprima dos cimentos, visto que a concentração de <sup>238</sup>U dos cimentos depende desse fator. Os cimentos utilizados provêm de quatro regiões distintas. O cimento composto com filer calcário é produzido em Itaú de Minas - MG (Mina 1), Balsa Nova - PR (Mina 2) e Cantagalo - RJ (Mina 3). Os cimentos composto com escória de alto-forno e de alto forno possuem o mesmo clínquer, que é produzido na fábrica localizada em Santa Helena - SP (Mina 4) e a escória de alto-forno, adicionada ao cimento Portland de alto-forno provém de Cubatão (SP).

As minas 1 e 4 estão situadas na Bacia Sedimentar do Paraná. A região da mina 1 é formada por rochas metamórficas e rochas vulcano-sedimentares. A mina 4 situa-se na Depressão do Paranapanema. A litologia do embasamento Cristalino (Grupo Tubarão) é constituída por arenitos e arenitos eólicos e os solos são do tipo areias quartzosas e latossolo vermelho-amarelo (Ross & Moroz, 1997). A mina 2 está localizada no Escudo do Paraná, no Domínio Curitiba. A região é formada por rochas granitóides. A região da mina 3 é formada por rochas metamórficas e metamórficas ortoderivadas.

As minas apresentam características geológicas bem distintas entre si, consequentemente o teor de urânio nelas tende a ser diferente. Espera-se encontrar concentrações maiores nos solos das minas 1 e 2 com relação à mina 3, pois as características geológicas da região da mina 1 são semelhantes às das cidades de Araxá e Bambuí e as rochas granitóides (mina 2) tendem a possuir uma alta concentração de urânio. Devido ao fato da mina 4 estar próxima à cidade de Sorocaba, espera-se que o teor de urânio no solo seja maior que o da mina 3.

# **4 MATERIAIS E MÉTODOS**

Os materiais e métodos utilizados neste trabalho estão separados em duas partes. A primeira refere-se aos materiais e métodos utilizados na fabricação e caracterização dos concretos e a segunda aos materiais e métodos empregados na determinação da emanação de radônio.

# 4.1 Materiais e métodos empregados na fabricação e caracterização dos concretos.

# 4.1.1 Cimentos

Procurou-se utilizar tipos de cimento Portland empregados comumente na construção civil. Buscaram-se fábricas em regiões que apresentam características geológicas distintas e, consequentemente, tendendo a possuir teores de urânio no solo diferentes.

Foram utilizados 3 tipos de cimento: o cimento Portland com adição de filer calcário (CP II-F - comumente empregado na construção civil), cimento Portland composto com escória de alto-forno (CP II-E - largamente utilizado na região de Campinas) e o cimento Portland de alto forno (CP-III - teor de adição maior que o CP II-E). O teor de filer no cimento CP II-F 32 é de até 10%. O cimento com adição de filer foi proveniente de 3 fontes diversas. A primeira fonte de

obtenção foi a fábrica localizada em Itaú de Minas (MG), localizada próxima às regiões de Poços de Caldas, Araxá e Bambuí. A segunda fonte de obtenção foi a fábrica localizada em Cantagalo (RJ), situada próxima às regiões de Cabo frio e Morro de São João. E a terceira fonte de obtenção foi a fábrica localizada em Balsa Nova (PR), situada próxima à região de Curitiba.

É importante observar que o clínquer dos cimentos CP-III e CP II-E tem como mesma fonte de obtenção a fábrica localizada na cidade de Santa Helena, na região de Sorocaba, sendo distinta a quantidade de adição dos mesmos. A quantidade de adição no cimento Portland CP-III é de 35 a 70% e no cimento Portland CP II-E é de até 34%. Por fim teremos 5 cimentos de composições distintas.

## 4.1.1.1 Caracterização física dos cimentos

As propriedades apresentadas pelo concreto dependem das características do cimento empregado. Portando, os cimentos foram caracterizados de acordo com as normas técnicas brasileiras (ABNT), através da determinação da massa específica (NBR NM23/98), área específica (NBR NM76/98), finura (NBR 11579/91), tempos de início e fim de pega (NBR 11581/91) e resistência à compressão (NBR 7215/96). A caracterização foi executada no EPT de São Paulo e os resultados são indicados nas Tabelas 4.1 a 4.5.

#### Cimento CP II-F 32 proveniente de Itaú de Minas (IM)

Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		3,07
Área específica (cm <sup>2</sup> /g)		3190
Finura # 0,075 (%)		4,82
Tempo de Pega (h)	Início	3:03
	Fim	4:23
Resistência à compressão (MPa)	3 dias	25,8
-	7 dias	31,2
	28 dias	45,5

Tabela 4.1. Características fisicas do cimento Portland CP II-F 32 (IM)

# Cimento CP II-F 32 proveniente de Balsa Nova (BN)

*****	3,07
	3140
	3,02
Início	2:34
Fim	3:39
3 dias	23,7
7 dias	25,9
28 dias	34,7
	Início Fim 3 dias 7 dias 28 dias

Tabela 4.2	Características	físicas do	cimento	Portland	CP II-F	32	BN
A 2603 PARA TO 24.		TUDIARD PRO	VIALIVALU	T AT FREETOPS	<u> </u>		ومتصعا

## Cimento CP II-F 32 proveniente de Cantagalo (CG)

Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		3,08	
Área específica (cm <sup>2</sup> /g)		3880	
 Finura # 0,075 (%)		0,29	
 Tempo de Pega (h)	Início	1:52	
	Fim	2:50	
Resistência à compressão (MPa)	3 dias	34,3	
	7 dias	45,3	
	28 dias	53,4	

Tabela 4.3. Características físicas do cimento Portland CP II-F 32 (CG)

# Cimento CP II-E 32 proveniente de Santa Helena (SH)

Massa especifica (g/cm <sup>3</sup> )		3,08
Área específica (cm²/g)		2850
Finura # 0,075 (%)		6,18
Tempo de Pega (h)	Início	3:07
	Fim	4:36
Resistência à compressão (MPa)	3 dias	23,0
	7 dias	29,3
	28 dias	38,0



#### Cimento CP-III 32 proveniente de Cubatão (CB)

Tancia 4.5. Caraciclisticas físicas do chitento Portland CP-111 52 (CD)				
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		2,96		
Área específica (cm²/g)		3420		
Finura # 0,075 (%)		1,20		
Tempo de Pega (h)	Início	5:50		
	Fim	8:15		
Resistência à compressão (MPa)	3 dias	15,1		
	7 dias	21,4		
· · · · · ·	28 dias	34,6		

Tabela 4.5. Características físicas do cimento Portland CP-III 32 (CB)

#### 4.1.2 Agregados

Os agregados empregados foram os convencionais e disponíveis no mercado. A fonte de obtenção foi única, para não haver influências nas medidas.

O agregado miúdo empregado foi a areia quartzosa, obtida de cava, proveniente de Corumbataí (SP). A opção por este tipo de areia ao invés daquela retirada de rio, deve-se ao fato que esta última pode conter resíduos que irão interferir nas medidas. Os rios podem receber esgotos não tratados que contêm substâncias com alta concentração de urânio, tais como metais pesados. No entanto, a areia utilizada era muito fina, o que poderia causar problemas de fissuração no concreto produzido. Analisando-se este problema, o procedimento adotado foi a correção granulométrica da areia pela adição de pó de pedra (areia artificial), calcário, proveniente de Cajamar (SP), o que proporcionou um melhor fechamento do pacote granulométrico. A quantidade de pó de pedra empregada foi de 40% do peso do agregado miúdo. As curvas granulométricas da areia e do pó de pedra são indicadas nas Figuras 4.1 e 4.2 e nas Tabelas 4.6 e 4.7, respectivamente.

	Peneira	Abertura	Massa	%	%			
	n°	(mm)	(g)	retida	acumulada			
	4	4,8	955	1	1			
	8	2,4	9	1	1			
	16	1,2	23	2	4			
	30	0,6	71	7	11			
	48	0,3	286	29	39			
	100	0,15	458	46	85			
		Fundo	148	15	100			
		Total	1000	100	141*			
Módulo de Finura 1,41					1,41			
	ф <sub>тя́х</sub>				1,2 mm			
				*****				

Tabela 4.6. Granulometria da areia

\* somatória da % acumulada nas peneiras da série normal



Figura 4.1. Curva granulométrica da areia

Peneira n°	Abertura (mm)	Massa (g)	% retida	% acumulada
3/8"	9,5			
1/4"	6,3	87	9	9
4	4,8	134	13	22
8	2,4	267	27	49
16	1,2	188	19	68
30	0,6	125	13	80
48	0,3	77	8	88
100	0,15	40	4	92
	Fundo	83	8	100
	Total	1000	100	398*
Mo	ódulo de F		3,98	
	$\phi_{max}$		9,5 mm	







\* somatoria da % acumulada nas peneiras da série normal

O agregado graúdo foi a brita 1 ( $\phi_{max}$ =19 mm), basalto, obtido de uma mina localizada na cidade de Campinas (SP). Optou-se pelo basalto porque ele contém um teor de urânio mais baixo (em média 1 ppm) em relação ao granito, que tem média de 3 ppm. Este cuidado é importante porque a fonte de urânio à qual foi dado maior enfoque é o cimento Portland. A curva granulométrica do basalto empregado está apresentada na Figura 4.3 e na Tabela 4.8.

Peneira	Abertura	Massa	%	%		
n°	(mm)	(g)	retida	acumulada		
3/4"	19	193	4	4		
1/2"	12,5	2661	53	57		
3/8"	9,5	1227	25	82		
1/4"	6,3	786	16	97		
4	4,8	95	2	99		
8	2,4			99		
16	1,2			99		
30	0,6			99		
48	0,3			99		
100	0,15			99		
	Fundo	38	1	100		
	Total	5000	100	681*		
Módulo de Finura 6,81						
¢míx				19,0 mm		

Tabela 4.8. Granulometria da brital



Figura 4.3. Curva granulométrica da brita 1

\* somatória da % acumulada nas peneiras da série normal

# 4.1.3 Aditivos

Para confecção do concreto com baixa relação água/cimento foram utilizados os aditivos plastificante e superplastificante, com a finalidade de obtenção de uma melhor trabalhabilidade.

Suas composições são à base de lignosufonato e naftalenosulfonato, respectivamente, com as características descritas abaixo.

Aditivo	Massa específica (kg/L)	Teor de cloretos (%)	Ar incorporado (%)	Teor de álcalis (g/L)
Plastificante	1,14	0	< 2	< 4
Superplastificante	1,20	0	<2	< 72

#### 4.1.4 Concretos

O objetivo foi o de dosar três concretos de características bem distintas quanto à porosidade e à permeabilidade, propriedades relacionadas ao comprimento de difusão, para cada um dos 5 cimentos Portland. A obtenção destas propriedades de maneira distinta foi alcançada variando somente a relação água/cimento. Com isso, a interpretação dos resultados tornou-se mais fácil, pois com a uniformidade da proporção dos materiais obtém-se uniformidade da concentração de urânio, possibilitando uma melhor análise da contribuição do cimento para a emanação de radônio. A proporção básica de mistura em massa adotada foi a seguinte: 1:2:3 (cimento : agregado miúdo: agregado graúdo), escolhida devido à sua larga utilização na construção civil. Os diferentes concretos obtidos foram denominados: concreto 1, concreto 2 e concreto 3.

- Concreto tipo 1 (C-1)- Concreto com alta relação a/c (água/cimento), com a tendência de possuir uma alta porosidade. Relação a/c = 0,68.
- Concreto tipo 2 (C-2)- Concreto convencional, tendendo a ser um concreto com porosidade média. Relação a/c = 0,46.
- Concreto tipo 3 (C-3)- Concreto com baixa relação a/c (alta resistência), com a tendência de possuir uma baixa porosidade. Relação a/c = 0,33.

Os concretos foram obtidos a partir de um estudo de dosagem onde variou-se a relação a/c e determinou-se a consistência através da medida do abatimento do tronco de cone ("Slump test" -NBR NM67/98). O primeiro concreto confeccionado foi o concreto 2, onde se buscou a consistência cujo abatimento fosse de  $6 \pm 1$  cm, determinando-se a relação a/c de 0,46. Posteriormente, moldou-se o concreto 1, onde buscou-se um concreto auto-adensável que não apresentasse segregação dos materiais, encontrando-se a relação a/c 0,68. Finalmente, fez-se o concreto 3 que apresentou uma boa trabalhabilidade (abatimento de  $6 \pm 1$  cm) apesar da baixa relação a/c (0,33), que foi obtida através do emprego de 0,3 % de aditivo plastificante e 1,2 % de aditivo superplastificante (porcentagem em relação à massa de cimento).

## 4.1.5 Moldagem das amostras

Os concretos foram confeccionados com o auxílio de uma betoneira de eixo inclinado disponível no Laboratório de Estruturas e Construção Civil da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP. Os materiais secos foram pesados com o auxílio de uma balança digital, com precisão de 50 g, em recipientes plásticos individuais e em seguida inseridos no interior da máquina juntamente com a água e os aditivos na seguinte ordem: brita 1, pó de pedra, água, cimento e areia, para os concretos 1 e 2; e brita 1, pó de pedra, 80 % de água mais o aditivo plastificante, cimento, areia e 20 % da água mais o aditivo superplastificante, para o concreto 3 (sequência de colocação dos materiais obtida da prática do laboratório). A mistura foi mantida na betoneira até tornar-se homogênea, ou seja, sem segregação dos materiais.

Para cada proporção de mistura de concreto foram moldados corpos-de-prova com dois tamanhos distintos. O primeiro com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura (forma 1), segundo a NBR 5738/94, utilizado para os ensaios de resistência à compressão e absorção por capilaridade e o segundo com 15,8 cm de diâmetro e 6,5 cm de altura (forma 2) utilizado para o ensaio de permeabilidade ao ar e para a obtenção da taxa de emanação de radônio.

O adensamento foi feito em mesa vibratória. Procurou-se utilizar o mesmo tempo de vibração para concretos de mesmo tipo, executado em uma única etapa. Para concreto tipo 1, o preenchimento das formas 1 e 2 foi em uma só camada e o tempo de vibração foi de aproximadamente 15 s, pois este concreto era muito fluido e um tempo de vibração maior poderia acarretar em segregação do mesmo. Para o concreto 2, a forma 1 foi preenchida em 2 camadas e a forma 2 em uma camada e o tempo de vibração foi cerca de 40 s. Para o concreto 3, a forma 1 foi preenchida em 3 camadas e a forma 2, em 2 camadas e o tempo de vibração foi de aproximadamente 150 s, devido ao fato deste concreto possuir baixa relação a/c e o tempo de atuação do aditivo superplastificante ser pequeno. Um corpo-de-prova (15,8 cm de diâmetro e 6,5 cm de altura) foi mantido como reserva para cada tipo de concreto.

58

# 4.1.6 Condições de cura

Para que houvesse uniformidade nas condições de cura os corpos-de-prova, após a moldagem, foram mantidos durante 48 horas em ambiente de laboratório nos moldes. Este tempo foi utilizado devido ao fato do concreto 1 ter uma baixa resistência inicial necessitando um tempo maior para ser desmoldado adequadamente. Posteriormente à desmoldagem, as amostras foram submetidas à cura úmida por imersão em água em temperatura ambiente até a idade de 28 dias.

## 4.1.7 Ensaios

Empregaram-se ensaios que caracterizassem o concreto e fornecessem informações sobre o seu sistema e distribuição de poros e sua permeabilidade, parâmetros que estão relacionados ao comprimento de difusão do radônio no material.

# 4.1.7.1 Resistência à compressão axial

É importante a caracterização do concreto quanto à resistência, por ser esse ensaio largamente utilizado no dia-a-dia da construção civil, aproximando o projeto de uma condição real. A medida deste parâmetro facilita uma posterior utilização dos dados e comparação com outras pesquisas. O ensaio foi realizado seguindo a NBR 5739/94 na idade de 28 dias, que estabelece que os corpos-de-prova são submetidos a um esforço de compressão axial até que ocorra a ruptura dos mesmos. O equipamento empregado foi a prensa de ensaio universal, marca Soiltest.

## 4.1.7.2 Absorção capilar

A absorção de água por capilaridade, baseado na NBR 9779/95, foi caracterizada pela penetração da água através da superficie inferior da amostra durante 24 horas, em ambiente climatizado, a aproximadamente 23°C. A preparação dos corpos-de-prova, na idade de 28 dias, consistiu na secagem em estufa a 100°C até a constância de massa (≅ 72 horas) e, após o resfriamento dos mesmos, na impermeabilização de suas faces laterais com duas demãos de resina acrílica (teor de sólidos 18%), garantindo um fluxo de absorção em um único sentido (axial), conforme Figura 4.4. Posteriormente, as amostras foram imersas em uma lâmina d'água com 1 cm de espessura, com o nível de água mantido constante. A face imersa era sempre a face inferior do corpo-de-prova na moldagem. A pesagem das amostras foi feita em intervalos predeterminados para determinação da massa de água absorvida, até o período final do ensaio, empregando-se uma balança digital com precisão de 0,1 g. Em seguida, os corpos-de-prova foram rompidos diametralmente para a determinação da altura de penetração de água



Figura 4.4. Esquema do ensaio de absorção sem escala.

A partir dos valores obtidos da variação de massa e altura de penetração de água, calculou-se o coeficiente de absorção capilar em 1 hora e o valor da ascensão capilar em 24 horas, segundo as Equações 4.1 e 4.2 (Ballayssac, 1992):

$$S = \frac{z}{\sqrt{t}} \tag{4.1}$$

$$k_{abs} = \frac{(Wt - Wo)/A}{\sqrt{t}}$$
(4.2)

Onde: S: ascensão capilar (m.s<sup>-1/2</sup>);  $k_{abs}$ : coeficiente de absorção capilar (kg.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1/2</sup>); t: tempo de ensaio (s); z: altura de penetração da água (m); Wo: massa inicial do corpo-de-prova (kg); Wt: massa do corpo-de-prova no tempo de ensaio (kg); A: área transversal do corpo-de-prova (m<sup>2</sup>).

## 4.1.7.3 Permeabilidade ao ar

A difusão dos gases depende das condições do meio em que eles se encontram. Esse ensaio forneceu informações sobre a quantidade de ar retida nas paredes dos poros no interior do concreto. O ensaio auxiliará no entendimento dos processos de difusão e escape do radônio. Os corpos-de-prova (15,8 cm de diâmetro e 6,5 cm de altura) foram ensaiados no dispositivo mostrado na Figura 4.5. O permeabilímetro empregado foi o disponível no Laboratório de Estrutura e Construção Civil da FEC-UNICAMP, baseado no modelo desenvolvido pelo LMDC-INSA/USP de Toulouse, França (Balayssac, 1992). Tal equipamento utiliza-se da pressão de vácuo causada pelo peso de uma coluna de água em um tubo ligado à base da amostra a ser ensaiada, que permanece sob pressão atmosférica e exposta ao ambiente de laboratório. À medida que o ar atravessa a amostra, a altura da coluna d'água vai diminuindo, causando também uma diminuição no vácuo aplicado. (Yssorche et al., 1995 e Balayssac, 1992)



Figura 4.5. Esquema da aparelhagem para determinação da permeabilidade ao ar (medidas em cm) (De Milito, 2001)

Antes do ensaio, os corpos-de-prova foram mantidos em estufa à temperatura de 50° C durante o período de 48 horas e em seguida tiveram suas laterais impermeabilizadas com duas demãos de resina acrílica (teor de sólidos 18%) e, então, foram devidamente instalados no dispositivo. A água do recipiente foi sugada até uma altura superior a *ho* para que o fluxo se estabilize, fechando-se a válvula de pressão. Quando o nível de água atingiu o nível *ho*, iniciou-se a medida do tempo que a água leva para alcançar o nível *ht*, sendo que o procedimento de ensaio estabelece que *ho* e *ht* precisam obedecer à seguinte relação:

$$\ln\left(\frac{ho}{ht}\right) = 1 \tag{4.3}$$

O cálculo da permeabilidade ao ar foi feito através da teoria simplificada proposta por Balayssac (1992). A teoria simplificada despreza a compressibilidade do ar, submetido a duas diferentes pressões nas faces da amostra. Nestas condições, a lei de Darcy pode ser aplicada à espessura total da amostra ensaiada. A quantidade de ar escoando para um desnível h no tubo capilar é:

$$Q = -A\frac{K}{\mu} \cdot \rho_{w} \cdot g\frac{h}{Z}$$
(4.4)

Pode-se escrever também que:

$$Q = s. \left(\frac{dh}{dt}\right) \tag{4.5}$$

Ao medir-se o tempo t de escoamento do líquido entre dois pontos ho e h, pode-se deduzir a permeabilidade do material por:

$$\frac{dh}{h} = -\frac{K.A}{\mu.s.Z} \cdot \rho_{w} \cdot g.dt \tag{4.6}$$

De onde vem o coeficiente de permeabilidade ao ar.

$$K_{per} = \frac{\mu . s. Z}{(A. \rho_w. g. t). \ln(\frac{ho}{ht})}$$
(4.7)

Onde:  $K_{per}$ : permeabilidade ao ar (m<sup>2</sup>); *ho*: altura inicial do nível da água (m); *ht*: altura final da água, no tempo t (m);  $\mu$ : viscosidade do ar (kg.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>); *s*: seção do tubo capilar (mm<sup>2</sup>); *A*: seção do corpo-de-prova (mm<sup>2</sup>);  $\rho_w$ : massa específica da água (kg.m<sup>-3</sup>); *g*: aceleração da gravidade (m.s<sup>-2</sup>); *t*: tempo de medida (s); *Z*: altura do corpo-de-prova (m).

Como o ambiente onde estava disposto o aparelho não era climatizado, fez-se necessária a determinação da viscosidade do ar e da densidade da água para a temperatura de cada ensaio. Observou-se que a temperatura não variava significativamente durante o período do ensaio. No entanto, quando se comparou as temperaturas dos diferentes ensaios, estas flutuavam de maneira significativa. A viscosidade do ar foi calculada segundo a fórmula empírica de Sutherland (Bastos, 1983).

$$\mu_{t} = \mu_{0} \left( \frac{273 + G}{T + G} \right) \cdot \left( \frac{T}{273} \right)^{3/2}$$
(4.8)

Onde:  $\mu_t$ : viscosidade dinâmica do gás a temperatura  $T^{\circ}C$ ;  $\mu_0$ : viscosidade dinâmica do gás a 0°C; T: temperatura (K); G: constante característica do gás.

#### 4.1.7.4 Porosidade por intrusão de mercúrio (PIM)

Por ser um material heterogêneo, o concreto possui vários tipos de poros. Entretanto, com o porosímetro de mercúrio é possível caracterizar os materiais apenas com relação aos poros abertos.

O método consistiu em determinar o espectro de dimensões de poros de um material, injetando-se mercúrio sob pressão crescente na amostra previamente seca e submetida a vácuo, para a remoção da umidade e vapores presente na amostra. Posteriormente, determinou-se o volume do líquido penetrante em função da pressão aplicada. A determinação pode ser feita aplicando-se pressões com aumentos discretos, em forma de patamares, medindo-se o volume de mercúrio intrudido após um intervalo de tempo em que é atingida a estabilização. Alternativamente, pode-se usar um procedimento onde o acréscimo de pressão é contínuo.

A técnica baseia-se na relação entre o diâmetro do poro, assumido como sendo cilíndrico, e o volume de mercúrio que pode penetrá-lo em função da pressão aplicada. Neste método supõese que os poros sejam independentes uns dos outros, compondo um conjunto de poros paralelos individualmente conectados à superficie do material, ou seja, a conectividade do espaço poroso é desconsiderada. O diâmetro do poro é calculado pela equação de Washburn (Washburn, 1921).

$$d = \frac{-4\gamma\cos\theta}{P}.$$
(4.9)

Onde: d: diâmetro equivalente do poro intrudido (m);  $\gamma$ : tensão superficial do mercúrio (N/m);  $\theta$ : ângulo de contato entre o mercúrio e a parede do poro; P: pressão de intrusão (Pa).

O teste de intrusão de mercúrio fornece a porosidade total e a distribuição de diâmetros dos poros no interior do concreto. Informações sobre a distribuição do tamanho dos poros podem promover uma indicação da durabilidade. Além disso, tal distribuição também tem influência significativa na permeabilidade e características de difusão do concreto (Cook & Hover, 1999). Em conjunto com o ensaio de permeabilidade ao ar e absorção de água por capilaridade, consegue-se suporte para entender o sistema de transporte de gases no interior do concreto. Este ensaio foi realizado no CCDM da UFSCAR utilizando um porosímetro de mercúrio tipo PoreSizer 9320 marca Micromeritics, com capacidade de aplicação de pressão até 30000 psi (~ 207 MPa) e faixa de diâmetro de poro entre 0,006µm e 360µm.

Para a realização do ensaio separaram-se pequenos fragmentos da região central das amostras, tomando-se o cuidado de coletar somente a argamassa (sem a pedra). Estes fragmentos permaneceram em acetona até a data de ensaio para interromper o processo de hidratação.

Antes do ensaio os fragmentos foram levados à estufa a 100° C até a constância de massa. Após o resfriamento, foram determinadas as massas dos mesmos e do porta-amostras (penetrômetro) previamente calibrado. Em seguida, os fragmentos foram dispostos no penetrômetro, dando início ao ensaio, quando se intrudiu o mercúrio a baixa pressão para a determinação do sistema de poros "maiores". Após esta etapa, a pressão de intrusão de mercúrio se tornou elevada para a determinação do sistema de poros mais finos.

# 4.2 Materiais e métodos empregados na determinação da emanação de radônio

O sistema de detecção empregado baseia-se em técnica simples que consiste em dispor a amostra em um contêiner selado (campânula) e determinar a concentração de emissões alfa utilizando um detector de partículas alfa (LR-115), exposto durante um tempo preestabelecido.

#### 4.2.1 Detector sólido de traços nucleares

O detector utilizado foi o LR-115 tipo II, marca Kodak. Fisicamente, o LR-115 se assemelha a um filme fotográfico, possuindo coloração vermelha. Ele é composto de um polímero à base de nitrato de celulose ( $C_5H_8O_9N_2$  com composição percentual estimada em 24,76 % de carbono, 3,44 % de hidrogênio, 61,80 % de oxigênio e 10 % de nitrogênio). O LR-115 é confeccionado em lâminas de 12 µm de espessura e densidade de 1,67 g/cm<sup>3</sup>, que é a parte sensível do detector, montadas sobre uma base de poliéster de 100 µm de espessura (Silva, 2000).

Devido ao seu modo de fabricação, o LR-115 possui um lado preferencial para exposição, o que requer o cuidado de identificar o lado correto antes de dispor o detector no sistema de detecção. A face sensível é identificada visualmente como o lado mais opaco.

Este detector apresenta uma estreita faixa de sensibilidade para partículas alfa, detectando somente partículas com energias variando entre aproximadamente 1 e 4 MeV e valores do ângulo crítico<sup>1</sup> situando-se entre 40 e 60 graus (Bagnoli *et. al*, 1999; Misdaq *et. al*, 2001), dependendo da energia de incidência da partícula. A variação da eficiência com os valores da energia da partícula e com o ângulo de incidência pode ser vista na Figura 4.6 apresentada por Marocco &

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Ângulo crítico é definido como máximo ângulo entre a direção da partícula incidente e a normal ao detector, a partir do qual o traço formado pela partícula não pode ser revelado ao observador.

Bochicchio (2001). No entanto, estes parâmetros dependem das características do detector, condições do ataque e do critério de contagem. Na análise da sensibilidade do detector utilizado neste trabalho, feito por Silva (2000), essa se mostra constante para energias entre 0,5 e 4 MeV (Figura 4.7) para exposições de incidência normal. Observa-se que o valor para o limite máximo de energia é compatível com os observados na literatura. Porém, o valor para o limite mínimo está abaixo de outros experimentos.



Figura 4.6. Eficiência do LR-115 ( $\epsilon$ ) como função da energia da partícula alfa para ângulos de incidência  $\theta = 30^{\circ}$ , 40°, 50°, 55° e 60° (do externo para o interno) (Marocco & Bochicchio, 2001)



Figura 4.7. Densidade de traços em função da energia das partículas alfa da fonte de <sup>241</sup> Am (Silva, 2000).

#### 4.2.1.1 Formação de traços no detector.

O detector foi exposto às partículas alfa provenientes do ar em ambiente controlado (campânula). Após o tempo de exposição, foi analisada a densidade de traços por tempo de exposição, que é proporcional à concentração de emissões alfa no interior da campânula. Há vários modelos propostos de formação de traços no detector.

O modelo mais aceito sugere que uma partícula eletricamente carregada (próton, fragmento de fissão, alfa) quando incide sobre o detector provoca um desarranjo variável em sua estrutura desde a superfície até uma distância igual ao alcance máximo da partícula no material. Tal distância pode se estender por vários micrômetros dependendo da energia da partícula (Somogyi & Szalay, 1973).

O desarranjo molecular ou dano sofrido contém as informações a respeito da partícula que esta se detectando. Ele é chamado de traço latente. Com um tratamento adequado (ataque químico) o traço latente é ampliado formando os traços (buracos e figuras cônicas) que podem ser vistos ao microscópio óptico comum.

# 4.2.1.2 Critério de contagem

O detector possui algumas imperfeições que podem ocorrer durante a sua fabricação, ou posteriormente, por meio atrito mecânico durante o seu armazenamento e manipulação. A corrosão dessas "falhas" pela substância reveladora resulta em figuras de ataque que podem ser confundidas com os traços formados pelas partículas alfa revelados.

A análise do detector foi feita visualmente com o auxílio do microscópio óptico, marca Leica, com objetiva de 40 vezes. Portanto, a eficiência de contagem dependerá da experiência do observador e também do critério de contagem adotado.

Estabelecer um critério de contagem uniforme para todos os detectores é importante para que a eficiência de contagem seja constante e para minimizar erros devido às figuras de ataque que podem ser confundidas com traços. A análise de detectores expostos à fonte de amerício (<sup>241</sup>Am) (Silva, 2000), os testes preliminares e principalmente a elaboração da curva de ataque proporcionaram suporte para o reconhecimento dos traços e para a elaboração do critério de contagem.

As partículas alfa provenientes do ar incidem sobre o detector em diversos ângulos e energias. Entretanto, devido às características do detector, os traços que ficam registrados são provenientes de partículas alfa que vão de zero até o ângulo crítico (com relação à normal) e com energias variando entre 1 e 4 MeV. Portanto, os traços resultantes possuirão diversas formas. Inicialmente os traços foram separados em dois grupos: os que perfuram o detector e os que não perfuram. O primeiro grupo é de fácil visualização, pois o seu interior perde a pigmentação vermelha. Logo, a passagem da luz torna-o "brilhante", circundado por uma auréola negra (Figura 4.8 c). Danos pontuais no detector podem formar figuras semelhantes, diferenciadas pela sua profundidade uniforme e borda irregular.

Para identificação do segundo grupo é necessária uma seleção mais criteriosa. Este pode ser subdividido em dois subgrupos: traços formados por partículas alfa com ângulos de incidência próximo à normal e próximo ao ângulo crítico. A forma dos traços do primeiro subgrupo assemelha-se a um círculo (Figura 4.8 a). Os traços são diferenciados observando-se sua borda, auréola, cor e tamanho. Foram considerados somente os traços com borda bem definida, a auréola cinza e acima de um certo tamanho. O tamanho "mínimo" dos traços é definido observando as figuras de ataque do fundo do detector (Figura 4.10), ou seja, são considerados na contagem somente os traços com tamanho superior ao das figuras de ataque. Os traços pequenos são de dificil identificação e portanto foram descartados.

O segundo subgrupo permite ser identificado mais facilmente. Sua forma é assimétrica, similar a uma gota de líquido (Figura 4.8 b). Eles são facilmente identificados pela diferença de profundidade entre a parte "arredondada" (semicírculo) e a parte "afunilada" do traço. As figuras que poderiam ser confundidas possuem profundidade uniforme ao longo do traço (Figura 4.9 a), sendo que os traços pequenos também foram desconsiderados.



Figura 4.8. Traços: a. traço simétrico que não perfura o detector; b. traços assimétricos que não perfuram o detector; c. traços que perfuram o detector.



Figura 4.9. Figuras de ataque: a. figura de ataque semelhante ao traço assimétrico não perfurado; b. figura de ataque semelhante ao traço simétrico não perfurado; c. figura de ataque fácil de ser identificada.



Figura 4.10. Figuras de ataque no fundo do detector LR-115

## 4.2.1.3 Ataque químico

O traço latente torna-se um traço observável através de um tratamento adequado chamado ataque químico. Ele consiste basicamente em um banho do detector LR-115 em uma substância alcalina (NaOH) a uma temperatura de 60°C durante um tempo adequado. Esta substância atua no detector corroendo homogeneamente sua superfície, penetrando também nas trajetórias que formam os traços latentes, corroendo suas paredes. A velocidade de ataque ao longo do traço é maior que a velocidade de ataque superficial devido a uma menor resistência da região onde ocorre o dano molecular em relação à superfície do detector, acarretando o alargamento do traço, possibilitando, assim, a sua visualização.

A qualidade do ataque é importante para que as informações contidas no detector sejam reveladas de maneira adequada. Deve-se, portanto, estabelecer um procedimento padrão para o ataque químico, fixando o tempo, a temperatura do banho e a concentração da solução. O fabricante faz as seguintes recomendações: solução de NaOH (2,5 N) a 60°C durante 90 minutos, nestas condições o detector é corroído a uma taxa de aproximadamente 0,046 µm.min<sup>-1</sup> (Silva, 2000). No entanto, estes parâmetros não são os ideais para todos os tipos de visualização, o método de leitura utilizado definirá o grau adequado de corrosão do detector. Portanto, faz-se necessário buscar as condições de ataque químico que irão otimizar a reposta dada pelo detector, ou seja, condições de ataque que facilitem a identificação dos traços.

Normalmente, em experimentos realizados por outros pesquisadores, a solução e a temperatura do banho recomendados pelo fabricante são adotados, modificando-se somente o tempo de ataque (Bagnoli *et al.* 1999 e Misdaq *et al.*, 2001). Este procedimento é adotado também porque o tempo é uma variável fácil de ser controlada.

71

Para obtenção de um tempo de ataque adequado deve-se fazer uma curva de ataque. Esta consiste em variar o tempo de ataque e em seguida analisar o detector. Após esta análise escolhese o tempo que fornece a melhor resposta. A elaboração da curva de ataque é tratada no item seguinte.

Alguns cuidados durante a realização do ataque químico foram tomados. A temperatura do banho foi mantida constante em 60°C. Foram adotados béqueres de plástico como recipientes, pois este tipo de material facilita a transferência de calor. Utilizou-se um béquer para cada detector para não haver problemas de identificação dos detectores. Devido à fragilidade do LR-115, optou-se por não fazer qualquer tipo de marca que pudesse danificar o mesmo. A solução de NaOH foi preparada com água deionizada, momentos antes do ataque e após ser colocada nos béqueres, estes foram levados ao banho até a estabilização da temperatura em 60°C. Só então os detectores eram dispostos nos béqueres, sempre com sua face sensível voltada para cima, para evitar danos no detector durante o ataque.

Após o ataque, os detectores foram lavados em água corrente, à temperatura ambiente, por um período mínimo de 30 min. Posteriormente, fez-se outra lavagem em solução de álcool etílico 1:1. Em seguida, os detectores foram dispostos na posição vertical para secarem naturalmente.

## 4.2.1.4 Curva de ataque

Para a curva de ataque foram utilizados detectores expostos nas mesmas condições realizadas no restante do trabalho (campânulas). A concentração da solução de NaOH foi constante (2,5 N) e foram tomados tempos de ataque entre 30 e 150 min.

Os procedimentos adotados para o ataque químico foram os mesmos descritos anteriormente exceto que os detectores não foram limpos em solução de álcool, pois a realização deste procedimento impedia que o detector fosse atacado por mais de 3 vezes. Inicialmente, o detector utilizado foi limpo em solução de álcool, mas após o terceiro ataque ele perdeu a sua coloração vermelha inviabilizando a visualização dos traços e a construção da curva. Para minimizar a presença de "sujeiras" retiradas com a limpeza em solução de álcool o detector foi limpo em água corrente na posição vertical.

A área analisada do detector tinha sempre a mesma dimensão e mesmo número de campos e era localizada no centro do detector. Utilizou-se um microscópio com luz polarizada e um filtro verde para minimizar o efeito das figuras de ataque.

Após a análise do detector atacado pode-se observar que, com o aumento do tempo de ataque, os traços tornavam-se mais fáceis de serem identificados. Entretanto, a partir de um determinado tempo (~130 min), os traços perfurados apresentavam "manchas" no seu interior e alguns sobrepunham-se, dificultando a sua identificação.

Inicialmente o critério de contagem adotado foi o citado no item 4.2.1.2, entretanto, os traços redondos e negros não eram considerados. O critério de contagem foi mantido para todas as análises. A curva de ataque (Figura 4.11) não apresentou o patamar característico, indicando que o critério não era adequado, necessitando ser analisado e reformulado. Alguns tipos de figuras que não eram contados segundo o critério adotado, tornam-se figuras que eram contadas com o aumento do tempo de ataque. Pode-se citar os traços redondos, negros e pequenos. Este tipo de traço só era contado quando perfurava o detector, pois podia ser confundido com figuras de ataque. Observou-se que com o aumento do tempo de ataque os traços negros tornaram-se perfurados e, portanto, considerados na contagem. Os traços redondos, pequenos e não perfurados apresentam o mesmo problema, eles aumentavam de tamanho e assim eram considerados na contagem.

73



**Figura 4.11.** Curva de ataque inicial, não é observado o patamar característico. A contagem foi realizada em 400 campos de 0.0391 mm<sup>2</sup>

A curva de ataque foi refeita modificando-se o critério de contagem. Os traços redondos, pequenos e negros foram contados quando sua borda era regular. A contagem dos traços redondos, pequenos e não perfurados foi mais criteriosa. Levou-se em conta o aumento dos traços, ou seja, comparou-se o tamanho destas figuras com o tamanho das figuras que certamente eram traços. E na adoção do tamanho mínimo dos traços foi analisada a dimensão das figuras de ataque de fundo do detector, considerando-se na contagem os traços maiores que essas figuras de ataque.

A nova curva de ataque (Figura 4.12) possui o patamar entre ao tempos analisados de 90 e 150 min, indicando que o critério de contagem foi adequado. O tempo de ataque químico adotado foi de 120 min pois a identificação dos traços foi mais fácil e os traços não se sobrepunham ou apresentavam "manchas" em seu interior. Além disso, pequenas variações no ataque não alteraram a eficiência de contagem.





# 4.2.2 Campânula

Para obtenção do modelo de campânula utilizada neste experimento, vários foram os testes preliminares. Estes testes permitiram uma melhor visualização do trabalho a ser elaborado, corrigir as deficiências encontradas e a familiarização com o método e interpretação dos resultados.

## 4.2.2.1 Testes iniciais

O projeto inicial previa o emprego de garrafões minerais como campânula. Os garrafões foram cortados e após a disposição das amostras e dos detectores, esses foram vedados com auxílio de silicone e fita adesiva (Figura 4.13). O orificio superior do garrafão foi vedado um círculo de plástico semelhante ao do garrafão e silicone. Para testar este sistema foram realizadas duas exposições. A primeira, com um corpo-de-prova disponível no laboratório, do qual não eram conhecidas a sua proporção de mistura e as suas propriedades mecânicas. A segunda, empregou amostras de concreto moldados com o intuito de apresentarem propriedades distintas e determinou-se, também, a radiação de fundo<sup>2</sup>. Foram produzidos dois tipos de concreto diferentes com materiais disponíveis no Laboratório de Estruturas e Construção Civil (FEC-UNICAMP): concreto poroso (C.P.), consumo de cimento de 200 kg/m<sup>3</sup> e relação a/c 0,8 e concreto convencional (C.C.), consumo de cimento de 350 kg/m<sup>3</sup> e relação a/c 0,55.



Figura 4.13. Esquema do garrafão utilizado como campânula

O resultado obtido na primeira exposição indicava que a montagem era apropriada pois o valor de concentração de emissões alfa obtido (1,306±0,016 x 10<sup>3</sup> Bq.m<sup>-3</sup>, desconsiderando-se o valor da radiação de fundo) proporcionava uma condição bastante favorável para análise.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Radiação da campânula sem a amostra, determinada expondo o detector de partículas alfa na campânula sem o corpo-de-prova durante um tempo predeterminado.

Entretanto, os resultados obtidos na segunda exposição indicaram deficiências no sistema de medida. Os valores de concentração calculados para os dois concretos foram muitos próximos entre si e próximo do valor da radiação de fundo (Tabela 4.10), ou seja, o valor da concentração da radiação de fundo foi muito alto acarretando erros muito grandes, impossibilitando a análise dos resultados.

Concreto	Concentração medida (Bq.m-3)	Concentração considerando a radiação de fundo (Bq.m <sup>-3</sup> )
C.P.	547 ± 60	124 ± 79
C.C.	$595 \pm 71$	$172 \pm 79$
Radiação de fundo	$423 \pm 51$	-

Tabela 4.10. Valores da concentração de emissões alfa para os concretos e para a radiação de fundo

Analisando quais poderiam ser as possíveis causas do problema enfrentado, concluiu-se que pode ter ocorrido algum vazamento na campânula, o que descaracteriza totalmente o ensaio, ou seja, pode haver contribuição de radônio externo ou escape do interno. Esta deficiência foi comprovada verificando-se a estanqueidade do sistema, submetendo-se a campânula a uma variação de pressão. Pôde-se comprovar a fragilidade da aderência entre o policarbonato e o silicone, ou seja, pequenos movimentos poderiam causar vazamentos, tornando inadequado a utilização deste sistema.

#### 4.2.2.2 Nova campânula

Visto que o modelo inicial de campânula não atendeu aos requisitos necessários, buscaramse novas alternativas. Optou-se por um sistema simples, já empregado pelo Laboratório de Solos e Estradas (FEC-UNICAMP). A nova campânula adotada é formada basicamente por um tubo e duas placas paralelas, onde a placa inferior é colada com um adesivo instantâneo à base de cianoacrilato e a superior é fixada ao tubo com o auxílio de borboletas e um anel de borracha natural tipo "O"ring", como mostra a Figura 4.14.



Figura 4.14. Esquema da campânula

O corpo da campânula foi composto por um tubo de PVC, diâmetro de 250 mm, 6,1 mm de espessura e 230 mm de altura. A placa inferior foi feita de polipropileno por ser um plástico resistente e de baixo custo, de forma quadrada com 333 mm de lado. A placa superior foi executada em acrílico para permitir a observação dos detectores e da amostra, possuindo dimensão igual à placa inferior. Ela possui um orifício para verificação de possíveis vazamentos.

## 4.2.2.3 Teste de estanqueidade

As campânulas foram testadas para assegurar sua estanqueidade. Inicialmente, variou-se a pressão no seu interior e verificou-se a aderência entre a placa inferior e o corpo da campânula. Aplicou-se uma pressão de aproximadamente 0,5 kgf.cm<sup>-2</sup>, controlada por um manômetro e esta se mantinha constante por um determinado período, mostrando que não havia escape. Em seguida, testou-se viabilidade de seu emprego. O objetivo foi o de analisar se a utilização de amostras com diferentes conteúdos de urânio resultaria em densidades superficiais de traços distintas. Para este teste foram empregadas amostras de uma mistura de gesso, cimento e sílica, sendo uma série dopada com urânio e a outra não. O teor de urânio empregada foi de aproximadamente 0,01% em massa.

Os valores de emanação para as amostras dopadas foram significativamente superiores aos obtidos com as amostras não dopadas (Tabela 4.11), e os dois valores foram maiores que o da radiação de fundo, indicando a estanqueidade das campânulas e a viabilidade do método.

Mistura	% gesso, cimento e sílica	$ ho_{lpha}$ (traço.cm <sup>-2</sup> ) (dopadas)	$ ho_{lpha}$ (traço.cm <sup>-2</sup> ) (não dopadas)
M6	100, 0, 0	1330 ± 57	$279 \pm 23$
M7	85, 15, 0	$1183 \pm 47$	$251 \pm 22$
<b>M</b> 10	75, 20, 5	756 ± 38	$158 \pm 17$

**Tabela 4.11**. Valores da densidade superficial de traços ( $\rho_{\alpha}$ ) para as misturas

\* O tempo de exposição, idêntico para todas as amostras, foi de 654h.

### 4.2.2.4 Geometria de detecção

A geometria da campânula e a eficiência do detector são fatores que delimitam a região onde estão situados os átomos que emitirão partículas alfa que serão detectadas. O LR-115 detectará somente as partículas que o atingirem com energia entre 1 a 4 MeV e ângulo de incidência máximo de 40 a 60° com relação a normal do detector.

A campânula foi projetada de forma a evitar que partículas alfa emitidas por átomos aderidos à superficie da campânula e da amostra atingissem o detector. A distância entre o detector e a parede lateral da campânula é cerca de 11 cm. O alcance das partículas alfa de maior energia (<sup>214</sup>Po) é de aproximadamente 8 cm no ar. Portanto, a geometria utilizada garante que o LR-115 detectará somente partículas provenientes de radioisótopos que estejam se difundindo no interior da campânula, ou seja, partículas alfa emitidas por átomos que estejam aderidos à superficie da amostra ou às paredes da campânula não terão energia suficiente para alcançar o detector. O objetivo foi o de detectar partículas alfa de elementos que estejam se difundindo no ar, logo, a detecção de partículas alfa proveniente de elementos aderidos podem comprometer a medida da emanação

O detector está disposto a uma distância de aproximadamente 15 cm das amostras, o que evita que a concentração do torônio (gás nobre da cadeia do tório, que também aparece como impureza nos materiais de construção) e de seus filhos possa ser desprezada neste tipo de experimento devido a meia vida destes elementos serem muito curtas (Santos, N. F., comunicação pessoal).

Os elementos que emitirão partículas alfa são o <sup>222</sup>Rn com energia de aproximadamente 5,5 MeV e seus produtos de decaimento o <sup>218</sup>Po e o <sup>214</sup>Po com energias de 6,0 e 7,7 MeV, respectivamente. Considerando que as partículas alfa emitidas por esses elementos perdem energia ao se movimentarem no ar, o LR-115 detectará somente partículas a uma determinada distância do mesmo. Para ilustrar a região onde estarão os átomos detectados, considere-se que a taxa de perda de energia das partículas alfa no ar é cerca de 1,0 MeV.cm<sup>-1</sup>, e que o detector possui uma faixa de sensibilidade entre 1 e 4 MeV e ângulo crítico de aproximadamente 50° ( $\alpha$ ). Essa região pode ser representada por um tronco de cone apresentado na Figura 4.15. A sobreposição dos limites de detecção para os três elementos é apresentada na Figura 4.16.



Figura 4.15. Esquema da região onde estão situados os átomos que emitirão partículas alfas que serão detectadas. Onde a é o intervalo de distancia e b e c são as distancias mínimas e máximas que os três emissores alfa podem estar do detector, para que as partículas alfa emitidas por eles sejam registradas.





## 4.2.3 Determinação da emanação de radônio

As concentrações de radônio foram medidas dentro de campânulas plásticas vedadas de maneira a não propiciar a entrada de radônio externo ou saída do interno.

Após a cura úmida, as amostras foram deixadas em ambiente de laboratório por um período de aproximadamente um mês para estabilização da emanação de radônio (Yu *et. al,* 1997). Com a hidratação do cimento, ocorre uma diminuição na porosidade das amostras, devido ao fato dos produtos de hidratação que estão se formando gradativamente preencherem os vazios existentes. Após a idade de 28 dias a taxa de hidratação do cimento tende a se estabilizar (Neville, 1997). Posteriormente, elas foram mantidas em estufa à temperatura de 50° C por um período de 24 h para minimizar a influência da umidade. Após o resfriamento, foi determinada a massa dos corpos-de-prova numa balança digital com precisão de 0,01 g. Em seguida, eles foram dispostos no interior da campânula, juntamente com 2 detectores de partículas alfa, LR-115. O tempo de exposição foi de aproximadamente 4 meses.

Durante o esse período, o radônio emanado pelo concreto e seus produtos de decaimento emitiram partículas alfa que foram registradas pelos detector. Após o término da exposição, os detectores foram retirados e submetidos a um ataque químico (item 4.2.1.3), para possibilitar a visualização dos traços.

A análise do detector foi realizada com o auxílio de um microscópio óptico. Selecionouse uma região central do detector que foi divida em campos de 0,0391mm<sup>2</sup>. Determinou-se a quantidade de traços de cada campo seguindo ao critério de contagem estabelecido anteriormente (item 4.2.1.2). Após a contagem de todos os campos, calculou-se a densidade superficial de traços de partículas alfa segundo a Equação 4.10, que é proporcional à concentração de emissões alfa no interior da campânula (Fleischer et al., 1975).

$$\rho_{\alpha} = \frac{N_t}{N_c \cdot A_c} \tag{4.10}$$

Onde:  $\rho_{\alpha}$ : Densidade superficial de traços de partículas alfa (traços.cm<sup>-2</sup>);  $N_t$ : Número de traços de partículas alfa contados (und);  $N_c$ : Número de campos analisados do detector (und);  $A_c$ : Área do campo (cm<sup>2</sup>).

Dividindo-se a expressão anterior pelo tempo de exposição,  $\Delta t$ , tem-se a densidade superficial de traços de partículas alfa por tempo de exposição ( $\rho_{\Delta t}$ ).

A densidade está relacionada à concentração por um fator de eficiência que engloba um fator geométrico e um fator de revelação e observação do traço como mostrado na Equação 4.11:

$$\rho_{\Delta t} = \varepsilon.C \tag{4.11}$$

Onde: C é concentração de emissões alfa (Bq.m<sup>-3</sup>) e  $\varepsilon$  é eficiência de revelação e observação dos traços (m).

No trabalho experimental feito por Silva (2000), o fator de eficiência resultante foi de 0,69±0,04 cm. Considerando que os procedimentos de ataque químico e observação foram

semelhantes aos deste trabalho, esta eficiência foi utilizada nos cálculos da concentração de emissões alfa e consequentemente do coeficiente de emanação. No entanto, é importante notar que a eficiência de contagem do referido autor e a eficiência usada neste trabalho não podem ser consideradas idênticas em princípio, embora variações significativas não sejam esperadas e, também, que existam outros fatores de eficiência inerentes do material utilizado que não foram determinados pela dificuldade de execução e por não ser este o objetivo deste trabalho. Portanto, os valores obtidos não são propriamente as concentrações de radônio emanadas pelas amostras, mas valores proporcionais a estes, proporcionando um caráter qualitativo à interpretação dos dados.

Considerando que a concentração de emissões alfa determinada por tempo de exposição é proporcional à taxa de radônio produzido no volume de poros intersticiais da amostra, pode-se estimar o coeficiente de emanação das amostrar através das Equações 4.12 (Nazaroff & Nero, 1988) e 4.13:

$$f = \frac{1}{\phi} \lambda. I. \rho_{conc.}. \eta.$$
(4.12)

Como  $C \Delta f^{l} \alpha f$ , então:

$$\eta \propto \frac{C}{\Delta t} \cdot \frac{\phi}{\lambda \cdot I \rho_{conc.}}$$
 (4.13)

Onde:  $f \notin a$  taxa de produção de radônio no volume de poros intersticial (Bq.h<sup>-1</sup>.m<sup>-3</sup>);  $\phi \notin a$  porosidade do material;  $\lambda \notin a$  constante de decaimento do <sup>222</sup>Rn (h<sup>-1</sup>);  $I \notin o$  teor de <sup>226</sup>Ra da amostra (Bq.kg<sup>-1</sup>);  $\rho_{conc} \notin a$  massa específica aparente do concreto (kg.m<sup>-3</sup>) e  $\eta \notin o$  coeficiente de emanação de radônio.

Embora este parâmetro não possa ser tomado como um valor absoluto, proporciona um melhor entendimento do comportamento da emanação de radônio quando ele é correlacionado com as propriedades do concreto, mostrando-se uma importante variável para a análise dos dados.
#### 4.2.3.1 Proteção superficial

Para a verificação da influência de uma cobertura superficial na emanação de radônio do concreto, aplicou-se tinta às amostras. Optou-se pela tinta por ser um revestimento comumente empregado devido ao seu baixo custo e à facilidade de aplicação. Segundo O'Brien *et al.*, 1995, o emprego de tinta em painéis de fosfogesso contribuiu para redução da emanação de radônio.

Após a permanência na estufa, as amostras de concreto da série SH foram lixadas e o pó foi retirado com auxílio de jatos de ar. Posteriormente, os corpos-de-prova receberam duas demãos de tinta acrílica comum disponível no Laboratório de Estrutura e Construção Civil - FEC-UNICAMP, diluída conforme instrução do fabricante (70% de tinta e 30% de água). Após cerca de 5 meses de cura em ambiente de laboratório as amostras foram dispostas no interior das campânulas com dois detectores LR-115 durante aproximadamente de 2 meses.

# 4.2.4 Determinação da atividade específica de <sup>226</sup>Ra

A concentração de <sup>238</sup>U do concreto depende das matérias-primas empregadas na fabricação do concreto. Alguns cuidados foram tomados para torná-la o mais uniforme possível. Considerando que o concreto é composto de cimento, areia, pedra britada e água, que a proporção de mistura é mesma para todos concretos empregados (1: 2: 3), variando-se somente a quantidade de água adicionada à mistura e que a areia e pedra britada possuem fontes de obtenção fixas, a única variável é o cimento. A utilização de cimentos distintos causa alterações tanto no comprimento de difusão, quanto na concentração de <sup>238</sup>U da amostra. O comportamento do comprimento de difusão pode ser observado através da análise das propriedades do concreto relacionadas ao seu sistema de transporte (absorção capilar, permeabilidade ao ar e porosidade).

Portanto, a determinação da concentração de <sup>238</sup>U tornaria mais refinada as correlações da emanação de radônio dos concretos produzidos com cimentos diferentes, proporcionando um melhor entendimento de como o cimento influencia na taxa de emanação.

Inicialmente previa-se a determinação da concentração de urânio das amostras, que é a fonte primária do radônio. Quando a cadeia está em equilíbrio, a concentração de rádio (<sup>226</sup>Ra) pode ser inferida da concentração de urânio. A hipótese inicial deste trabalho era de que a cadeia do urânio estaria em equilíbrio no cimento. Esta hipótese é bastante razoável desde que, durante a sua fabricação, o clínquer do cimento não passe por separação química. Porém, constatou-se a possibilidade da cadeia do urânio não estar em equilíbrio no cimento devido à adição de subprodutos durante o processo de fabricação. Por exemplo, Mazzilli *et al.* (2000) mostraram que no fosfogesso a cadeia do urânio não estava em equilíbrio, pois durante a sua produção, a rocha de fosfato é quimicamente atacada para produzir o ácido fosfórico, gerando o fosfogesso como subproduto. Em algumas regiões a gipsita natural adicionada ao cimento para controle da pega é substituída pelo fosfogesso. Informações sobre as adições que são empregadas no cimento são de difícil acesso. Portanto, não foi possível saber quais adições foram utilizadas nos cimentos empregados neste trabalho experimental. Logo, não foi possível assumir equilíbrio da cadeia do urânio. Assim, optou-se pela determinação da atividade específica de rádio nas amostras.

O teor de <sup>226</sup>Ra foi determinado através da utilização da espectrometria gama empregando um detector de germânio (HPGe). Esta técnica tem a vantagem de determinar a fonte direta do radônio, dispensando preocupações sobre o equilíbrio da cadeia.

Para a realização do ensaio a amostra necessitava estar em forma de pó, com partículas de, no máximo, 0,5mm. A preparação das amostras consistiu, inicialmente, na moagem com o auxílio de um triturador de mandíbulas, obtendo uma dimensão máxima de 0,5cm. Para o refinamento dos grãos empregou-se um equipamento para determinação do desgaste de agregados graúdos denominado Abrasão Los Angeles. O material pulverulento retirado deste equipamento foi peneirado. Os grãos retidos foram triturados em um almofariz de porcelana e repeneirados até que não restasse resíduo algum. Posteriormente, as amostras foram homogeneizadas e

85

permaneceram durante cerca de um mês em um recipiente selado para atingir o equilíbrio radioativo. Após este período, elas foram adequadamente dispostas no detector de germânio. Os resultados foram apresentados como atividade em função da massa da amostra.

#### **5 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de determinação de resistência à compressão, absorção capilar, ascensão capilar, permeabilidade ao ar, porosidade por intrusão de mercúrio, teor de rádio e emanação de radônio. Eles são avaliados e discutidos e, também, são apresentadas correlações entre as propriedades do concreto e a emanação de <sup>222</sup>Rn.

#### 5.1 Propriedades do concreto

#### 5.1.1 Resistência à compressão

O resultados da resistência obtidos no ensaio de determinação da resistência à compressão aos 28 dias são apresentados na Figura 5.1 e na Tabela A.1 do Anexo A.

Os concretos feitos com cimentos distintos têm comportamento semelhante, exceto o concreto C-3 feito com cimento CP II- F proveniente da fábrica localizada em Itaú de Minas (IM).



Figura 5.1. Resistência à compressão em função da relação a/c para os concretos de cimento IM, BN, CG, SH e CB.

Os concretos 1 e 2 da série  $CG^1$  apresentaram os maiores valores de resistência à compressão. O concreto 1 mais resistente foi o C-1 IM.

#### 5.1.2 Absorção capilar

A representação gráfica da variação da massa das amostras é mostrada nas Figuras 5.2 a 5.6 sendo esse valor a média de três medidas.





Figura 5.2. Variação da massa das amostras de concreto de cimento IM em função da raiz quadrada do tempo



<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> IM: CP II-F proveniente de Itaú de Minas, BN: CP II-F proveniente de Balsa Nova; CG: CP II-F proveniente de Cantagalo; SH: CP II-E proveniente de Santa Helena e CB: CP III proveniente de Cubatão.





Figura 5.4. Variação da massa das amostras de concreto de cimento CG em função da raiz quadrada do tempo

Figura 5.5. Variação da massa das amostras de concreto de cimento SH em função da raiz quadrada do tempo



Figura 5.6. Variação da massa das amostras de concreto de cimento CB em função da raiz quadrada do tempo

A partir dos valores da variação de massa obtidos, calculou-se o coeficiente de absorção capilar para o período de 1 h e o valor da ascensão capilar para 24 h seguindo as fórmulas 4.2 e 4.1 (página 61), respectivamente. O coeficiente de absorção capilar e os valores de ascensão capilar para os diferentes concretos em função da relação a/c são apresentados nas Figuras 5.7 e 5.8 e na Tabela A.2 (Anexo A).



Figura 5.7. Coeficiente de absorção capilar em função da relação a/c para os concretos de cimento IM, BN, CG, SH e CB.

Figura 5.8. Ascensão capilar em função da relação a/c para os concretos de cimento IM, BN, CG, SH e CB.

Através da análise das Figuras 5.2 a 5.6, nota-se que o comportamento da variação de massa em função da raiz quadrada do tempo apresenta uma mesma tendência para os concretos confeccionados com diferentes cimentos: com o aumento da relação a/c, a quantidade de água absorvida aumenta, o que também pode ser visto observando-se as Figuras 5.7 e 5.8. Verifica-se que ambos, coeficiente de absorção capilar e valores da ascensão capilar, diminuem com o decréscimo da relação a/c, ou seja, com a diminuição da relação a/c há uma modificação no sistema capilar, diminuindo a capacidade de absorção de água pelo concreto.

O concreto produzido com o cimento CG obteve os menores valores de coeficiente de absorção. No entanto, os concretos feitos com os cimentos CB e SH apresentam os menores valores de ascensão capilar. A altura que a água atinge por meio da força capilar é inversamente proporcional ao diâmetro médio dos poros, em contato com a superfície externa e limitada pela interconexão entre eles. Consequentemente, o efeito citado acima deve-se, provavelmente, à presença de escória de alto-forno, que promoveu o refinamento dos poros e a diminuição da sua interconexão

#### 5.1.3 Permeabilidade ao ar

Com o auxílio do permeabilímetro pôde-se determinar os valores da permeabilidade ao ar que são apresentados na Figura 5.9 e na Tabela A.4 (Anexo A).



Figura 5.9. Coeficiente de permeabilidade ao ar em função da relação a/c para os concretos de cimento IM, BN, CG, SH e CB.

Analisando a Figura 5.9, observa-se que os valores do coeficiente de permeabilidade ao ar aumentam com o acréscimo da relação a/c. Os concretos 2 e 3 apresentam comportamento semelhante para os diferentes cimentos empregados. No entanto, os valores do coeficiente de permeabilidade para o concreto 1 variam significativamente para os diferentes cimentos. Este fato pode ser devido à zona de transição entre o concreto e o agregado.

O valor do coeficiente de permeabilidade obtido para o concreto 3, executado com cimento proveniente de Cubatão, foi contrário à tendência do outros concretos, pois ele foi significativamente superior ao valor apresentado pelo concreto 2.

#### 5.1.4 Porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM)

O ensaio de porosimetria forneceu informações sobre a porosidade total e distribuição dos de poros das amostras. Os resultados obtidos, apresentados nas Figuras 5.10 a 5.19 e na Tabela A.5 (Anexo A), demonstram que há alteração na distribuição de poros em função da relação a/c.



Figura 5.10. Volume de poros do concreto e cimento IM obtida por PIM (volume acumulado em função do diâmetro de poro).



Figura 5.12. Volume de poros do concreto de cimento BN obtida por PIM (volume acumulado em função do diâmetro de poro).



Figura 5.11. Distribuição do tamanho de poros do concreto IM obtida por PIM (volume incremental em função do diâmetro de poro).



Figura 5.13. Distribuição do tamanho de poros do concreto de cimento BN obtida por PIM (volume incremental em função do diâmetro de poro).





Figura 5.14. Volume de poros concreto de cimento CG obtida por PIM (volume acumulado em função do diâmetro de poro).

Figura 5.15. Distribuição do tamanho de poros do concreto de cimento CG obtida por PIM (volume incremental em função do diâmetro de poro).



Figura 5.16. Volume de poros concreto de cimento SH obtida por PIM (volume acumulado em função do diâmetro de poro).



Figura 5.17. Distribuição do tamanho de poros do concreto de cimento SH obtida por PIM (volume incremental em função do diâmetro de poro).





Figura 5.18. Volume de poros concreto de cimento CB obtida por PIM (volume acumulado em função do diâmetro de poro).

Figura 5.19. Distribuição do tamanho de poros do concreto de cimento CB obtida por PIM (volume incremental em função do diâmetro de poro).

As curvas de volume de poros dos concretos IM, BN, CG e SH apresentam comportamento semelhante. Com a diminuição da relação a/c ocorre a redução do volume de poros. O mesmo pode ser observado para as curvas de distribuição do tamanho de poros. Diminuindo-se a relação a/c ocorre um refinamento no diâmetro de poros. As curvas tendem a deslocar-se para a esquerda. Com exceção do concreto 3 IM, onde ocorreu uma redução de maneira global do número de poros. Um fator importante que deve ser levado em consideração é com relação ao princípio do método, que assume que os poros têm formato cilíndrico. Portanto, o que fica determinado é o diâmetro da entrada do poro, e não o do poro propriamente dito, que pode ser maior. Logo, o deslocamento da curva pode ser devido ao estrangulamento na entrada dos poros (poros com o formato "tinteiro"<sup>4</sup>).

O concreto CB apresentou curvas de volume de poros com tendências diferente dos demais concretos. O valor da porosidade total não variou significativamente com a relação a/c. As curvas possuem basicamente o mesmo formato, deslocando-se para a esquerda com a diminuição da relação a/c, ocorrendo um refinamento dos poros. Na curva de distribuição do tamanho de poros para o concreto CB, o volume de poros menores tende a aumentar com a diminuição da relação a/c, indicando o refinamento dos poros.

#### 5.2 Parâmetros relacionados à emanação de radônio

### 5.2.1 Teor de <sup>226</sup>Ra

A atividade de <sup>226</sup>Ra das amostras de concreto foi determinada através do método de espectrometria gama pelo IPEN de São Paulo e é indicada na Tabela 5.1.

Tabela 5.1. Teores de 226 Ra das amostras de concreto										
	Teores <sup>226</sup> Ra (Bq/kg)									
Concretos	C-1	C-2	C-3							
IM	7,7±0,9	6,1±0,9	8,2±0,9							
BN	13,1±1,0	11 <b>,2</b> ±1,0	13,3±1,0							
CG	9,0±1,0	8,5±0,8	8,6±0,9							
SH	16,5±1,2	17,5±1,2	1 <b>8,8</b> ±1,2							
СВ	28,0±1,5	25,3±1,5	29,0±1,8							

Entre os concretos produzidos com o cimento tipo CP-II F (IM, BN e CG), o que apresentou maior teor de <sup>226</sup>Ra foi o feito o cimento proveniente de Balsa Nova. Isto já era esperado devido à presença de rochas granitóides na região de extração de matéria-prima, o que favorece uma concentração maior de urânio no solo.

O teor de <sup>226</sup>Ra dos concretos de cimento com escória de alto-forno foi significativamente maior que dos concretos de cimento com adição de filler calcário. Observa-se também, que o concreto de cimento com maior porcentagem de escória (CB - CP-III, teor de escória de 35 até 70%) apresentou um teor de <sup>226</sup>Ra maior com relação ao cimento CP II-E (SH, teor de escória de até 34%), indicando que a escória de alto-forno contribuiu para aumentar a concentração de <sup>226</sup>Ra dos concretos.

#### 5.2.2 Emanação de radônio

Determinou-se a densidade superficial de traços por tempo de exposição e por teor de <sup>226</sup>Ra das amostras que é proporcional à concentração de radônio. Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 5.20 e 5.21 e na Tabela B.2 (Anexo B).



**Figura 5.20**. Densidade superficial de traços por tempo de exposição e pela atividade de <sup>226</sup>Ra em função da relação a/c para os concretos de cimento CP II-F **Figura 5.21**. Densidade superficial de traços por tempo de exposição e pela atividade de <sup>226</sup>Ra em função da relação a/c para s concretos de cimento com escória de alto-forno.

Pode-se observar que existem dois grupos distintos: concretos de cimento CP II-F e concretos de cimento com escória de alto-forno. Dentro de cada grupo nota-se comportamentos sistemáticos da emanação de radônio em função da relação a/c, apesar dos erros serem grandes. Esses comportamentos são diferentes entre si. Este fato deve-se, provavelmente, às mudanças causadas no sistema de transporte provocada pela adição da escória de alto-forno.

Os concretos de cimento CP-III apresentaram os menores valores de densidade superficial de traços por tempo de exposição e por teor de <sup>226</sup>Ra apesar de possuírem os maiores teores de <sup>226</sup>Ra. Isso é um indicativo de que as propriedades cimentantes da escória contribuíram para diminuir seu comprimento de difusão. Segundo Yu (2000), a sílica ativa apresentou um efeito semelhante, seu emprego como substituição de parte do cimento Portland diminuiu a emanação de radônio em blocos de concreto, ocasionado pela redução da porosidade e refinamento dos poros

devido às propriedades pozolânicas deste material. Nos concretos estudados, a escória proporcionou um refinamento dos poros, mas não alterou sua porosidade total, indicando que a redução no tamanho de poros teve maior contribuição para a diminuição da emanação do que a redução da porosidade total.

O emprego proteção à base de pinturas não alterou significativamente a emanação de radônio das amostras. A tinta apresentou uma absorção superficial pelo concreto pois o preparo superficial consistiu em apenas lixar e remover o pó. Entretanto, ela só preencheu os poros superficiais e também apresentou microfissuras que tornou o sistema poroso, permitindo a passagem do <sup>222</sup>Rn.

A partir da atividade do <sup>226</sup>Ra, determinou-se a emanação teórica das amostras como se as mesmas fossem fontes "puras", ou seja, desconsiderando-se o efeito de blindagem do concreto. A correlação do teor de rádio com a emanação experimental e a emanação teórica é apresentada nas Figuras 5.22 e 5.23 na Tabela B.3 (Anexo B).









Através da Figura 5.22, nota-se que a concentração de radônio aumenta linearmente com a atividade de <sup>226</sup>Ra, como era esperado. A diferença entre as densidades de traços teórica ( $\rho_{teo}$ ) e experimental ( $\rho_{exp}$ ) ilustra a capacidade do concreto de barrar o radônio. Este efeito está relacionado com o comprimento de difusão do material (Figura 5.23).

Nas Figuras 5.22 e 5.23 observa-se que o efeito de blindagem foi diferente em cada amostra. A diferença relativa ( $\rho_o$ ) entre cada valor obtido experimentalmente e o da densidade de traços teórica apresentado na equação abaixo, depende das propriedades específicas de cada amostra.

$$\rho_o = \frac{\rho_{teo} - \rho_{exp}}{\rho_{teo}} \tag{5.1}$$

Pode-se, a partir dos valores mostrados acima, estimar a influência das diversas propriedades determinadas (porosidade, permeabilidade, absorção e ascensão capilar) na blindagem do concreto.

Entretanto, primeiramente, os valores dos dados obtidos necessitaram ser escalonados, para poderem ser comparados. Isto pode ser feito subtraindo dos dados a média e dividindo o resultado pela variância. Este procedimento foi feito para as propriedades do concreto (p') e para a diferença relativa das densidades teóricas e experimentais ( $\rho_o'$ ). Em seguida, diz-se que a variação na emanação será uma combinação linear das propriedades com os coeficientes dando o peso relativo de cada propriedade (Edward, 1991). Matematicamente:

$$\rho_{o}' = \sum_{i=1}^{n} (a_{i} \cdot p_{i}')$$
(5.2)

$$\sum_{i=1}^{n} a_i = 1$$
 (5.3)

com

Onde:  $a_i$  é o peso relativo de cada propriedade

Foram testados os valores de coeficiente de absorção capilar, ascensão capilar, porosidade total, diâmetro de poros e coeficiente de permeabilidade ao ar. Os resultados são apresentados nas Tabelas 5.2. a 5.5.

**Tabela 5.2.** Peso das propriedades quando são testados os valores de coeficiente de permeabilidade ao ar, diâmetro médio de poros e a porosidade total

Propriedade	Peso
Coeficiente de permeabilidade ao ar	0,71
Diâmetro médio de poros	0,26
Porosidade total	0,03

**Tabela 5.3.** Peso das propriedades quando são testadosos valores de ascensão capilar, coeficiente depermeabilidade ao ar e diâmetro médio de poros

Propriedade	Peso
Ascensão capilar	0,00
Coeficiente de permeabilidade ao ar	0,76
Diâmetro médio de poros	0,24

Tabela 5.5. Peso das propriedades quando são testados

os valores de ascensão capilar, coeficiente de

**Tabela 5.4.** Peso das propriedades quando são testados os valores de ascensão capilar, coeficiente de permeabilidade ao ar e porosidade total

de permeabilidade ao ar e porosidade tota	1	permeabilidade ao ar e coeficiente de absorção capilar			
Propriedade	Peso	Propriedade	Peso		
Ascensão capilar	0,00	Ascensão capilar	0,04		
Coeficiente de permeabilidade ao ar	0,68	Coeficiente de absorção capilar	0,00		
Porosidade total	0,32	Coeficiente de permeabilidade ao ar	0,96		

Os resultados indicaram que a permeabilidade exerceu maior influência sobre a variação na blindagem de radônio. Quanto às outras propriedades, não foi possível distinguir quais eram mais influentes. A Tabela 5.2 indica que diâmetro médio de poros é mais influente que a porosidade total. Os valores dos pesos da ascensão capilar e do coeficiente de absorção capilar são muito próximos impossibilitando distinguir qual das duas propriedades afeta mais a blindagem (Tabelas 5.3, 5.4 e 5.5). Pode-se concluir somente que a porosidade e diâmetro médio de poros afetam mais que a absorção e ascensão capilar.

Levando-se em conta que o coeficiente de permeabilidade ao ar caracteriza o fluxo do ar no interior do concreto, e sendo o radônio um gás, é coerente que este parâmetro seja o mais influente no efeito de blindagem e consequentemente do comprimento de difusão do concreto.

#### 5.2.3 Coeficiente de emanação

Através da Equação 4.13 (página 83) foram estimados os valores do coeficiente de emanação de radônio, que são apresentados nas Figuras 5.24 e 5.25 e Tabela B.3 (Anexo B).





Figura 5.24. Coeficiente de emanação em função da relação a/c para concretos de cimentos CPII-F

Figura 5.25. Coeficiente de emanação em função da relação a/c para concretos de cimentos com escória

Através da Figura 5.24 observa-se que para os concretos de cimento CP II-F há inicialmente um crescimento do coeficiente de emanação ( $\eta$ ) com a relação a/c, tendendo posteriormente a uma estabilização. Para os concretos de cimento com escória de alto-forno, um ponto apresentou um valor discrepante dos demais e foi desconsiderado das análises. Esta discrepância deve-se, principalmente, ao alto valor de porosidade apresentado pelo concreto. Logo, para os concretos de cimento com escória de alto-forno os valores do coeficiente de emanação não variam significativamente com a relação a/c.

# 5.3 Correlações entre as propriedades do concreto e o coeficiente de emanação de radônio

Inicialmente, procurou-se correlacionar as propriedades do concreto com os valores da densidade superficial de traços por tempo de exposição e pela atividade de <sup>226</sup>Ra. Entretanto, através destas correlações não foi possível entender de forma clara o comportamento da emanação em função das propriedades. Buscou-se então outro parâmetro que possibilitasse o entendimento desse comportamento. O coeficiente de emanação estimado mostrou-se bastante adequado para este entendimento.

O coeficiente de emanação foi correlacionado com valores de resistência à compressão, coeficiente de absorção capilar, ascensão capilar, coeficiente de permeabilidade ao ar e diâmetro médio de poros. A variável  $\eta$  não foi correlacionada com a porosidade total devido ao fato deste valor fazer parte da estimativa da mesma.

# 5.3.1 Correlação entre o coeficiente de emanação e a resistência à compressão.

A correlação entre o coeficiente de emanação e a resistência à compressão está apresentada nas Figuras 5.26 e 5.27.



em função resistência à compressão para os concretos de cimento CP II-F Figura 5.27. Coeficiente de emanação de <sup>222</sup>Rn em função resistência à compressão para os concretos de cimento com escória de alto-forno

Através da Figura 5.26 nota-se que com a diminuição da resistência à compressão dos concretos de cimento CP II-F há um crescimento de  $\eta$  para concretos com resistência maior que  $\cong$  35 MPa. A partir deste ponto, os valores de  $\eta$  tornam-se, praticamente, constantes. Observa-se, que a porção da curva composta por C-2 e C-3 é descendente, enquanto que a parte composta por C-1 é constante. Para os concretos de cimento com escória de alto-forno os valores do coeficiente de emanação não variam significativamente com a resistência à compressão (Figura 5.28).

5.3.2 Correlação entre o coeficiente de emanação e o coeficiente de absorção capilar.

O coeficiente de absorção capilar é caracterizado pela absorção inicial de água do concreto que está relacionado com o tamanho e conexão dos poros, parâmetros que afetam a emanação de radônio. Nas figuras abaixo é apresentada a correlação entre o coeficiente de emanação e o coeficiente de absorção capilar.



Figura 5.28. Coeficiente de emanação de <sup>222</sup>Rn em função do coeficiente de absorção capilar para os concretos de cimento CP II-F.

**Figura 5.29.** Coeficiente de emanação de <sup>222</sup>Rn em função do coeficiente de absorção capilar para os concretos de cimento com escória de alto-forno.

Para os concretos de cimento CP II-F o coeficiente de emanação tende, inicialmente, a crescer com o coeficiente de absorção capilar. Posteriormente, os valores de  $\eta$  tendem a ser constantes (Figura 5.28). Observa-se também que os concretos dos 3 tipos estão presentes em toda a curva. Logo, não é possível fazer uma distinção entre a porção ascendente e constante da curva.

Os valores do coeficiente de emanação do concreto de cimento com escória de alto-forno se mantêm praticamente constantes com o crescimento do coeficiente de absorção capilar (Figura 5.29).

5.3.3 Correlação entre o coeficiente de emanação e a ascensão capilar.

A velocidade de ascensão capilar de água do concreto aumenta com o diâmetro do poro. Por outro lado, o radônio difunde-se com maior facilidade em poros mais largos. As correlações entre o coeficiente de emanação e os valores de ascensão capilar são apresentadas nas Figuras 5.30 e 5.31.



**Figura 5.30.** Coeficiente de emanação de <sup>222</sup>Rn em função da ascensão capilar para os concretos de cimento CP II-F.



Através da Figura 5.30 nota-se que, com aumento da ascensão capilar dos concretos de cimento CP II-F, há um crescimento do coeficiente de emanação. Em seguida, os valores de  $\eta$  não variam significativamente. Nota-se também que a porção composta por concretos 2 e 3 é ascendente da curva, enquanto que a porção formada apenas por concretos 1 é constante.

Para os concretos de cimento com escória de alto-forno os valores do coeficiente de emanação não variam significativamente com a ascensão capilar (Figura 5.31).

# 5.3.4 Correlação entre a coeficiente de emanação e o coeficiente de permeabilidade ao ar.

Sendo um radônio um gás, era esperado que a determinação da permeabilidade ao ar fornecesse informações sobre o comportamento do transporte de radônio no interior do concreto. A correlação entre o coeficiente de emanação e o coeficiente de permeabilidade ao ar é apresentada nas Figuras 5.32 3e 5.33





**Figura 5.33.** Coeficiente de emanação de <sup>222</sup>Rn em função do coeficiente de permeabilidade ao ar para os concretos de cimento com escória de alto-forno

Para os concretos de cimento CP II-F menos permeáveis, pequenas variações do coeficiente de permeabilidade resultam em grandes variações do coeficiente de emanação, ou seja, o comportamento do  $\eta$  é sensível a variações de permeabilidade. Posteriormente, para os concretos mais permeáveis, os valores de  $\eta$  tendem a ser constantes (Figura 5.32). Observa-se também que a porção composta por concretos 2 e 3 é ascendente da curva e a porção formada por apenas concretos 1 é constante.

Os valores do coeficiente de emanação do concreto de cimento com escória de alto-forno se mantêm, praticamente, constantes com o crescimento do coeficiente permeabilidade ao ar (Figura 5.33).

# 5.3.5 Correlação entre o coeficiente de emanação e o diâmetro médio de poros.

A correlação entre o coeficiente de emanação de radônio e o diâmetro médio de poros é apresentada nas Figuras 5.34 e 5.35.



Figura 5.34. Coeficiente de emanação de <sup>222</sup>Rn em função do diâmetro médio dos poros para os concretos de cimento CP II-F.

Figura 5.35. Coeficiente de emanação de <sup>222</sup>Rn em função do diâmetro médio dos poros para os concretos de cimento com escória de alto-forno

Através da Figura 5.34 nota-se que com aumento do diâmetro médio de poros dos concretos IM e BN há uma tendência de crescimento do coeficiente de emanação seguida de uma estabilização. Já para o concreto CG, o  $\eta$  aumenta com o diâmetro médio de poros.

Para os concretos de cimento com escória de alto-forno os valores do coeficiente de emanação não variam significativamente com diâmetro médio de poros (Figura 5.35).

O coeficiente de emanação relaciona a taxa de radônio produzida nos poros com o radônio emanado. Observa-se nos gráficos das correlações que há uma região na qual variações nas propriedades ocasionam variações em  $\eta$ . Esta região é definida por valores de resistência maiores que 35 MPa, permeabilidade ao ar, diâmetro médio de poros, ascensão capilar e absorção

capilar menores que 3,8 10<sup>-17</sup> m<sup>2</sup>, 42 nm (desconsiderando o C-3 CG), 2,0 10<sup>-4</sup> m.s<sup>1/2</sup> e 2,2 10<sup>-2</sup> kg.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1/2</sup>, respectivamente. Porém, a partir do ponto definido aproximadamente como o limite da região anterior, há uma estabilização dos valores do coeficiente de emanação. Tal resultado indica que, nos concretos que apresentam valores das propriedades nesta última região, todo o radônio que é produzido dentro dos poros consegue alcançar a superfície.

Quando um átomo de radônio é formado ele poderá ter diversas trajetórias dentro do material. Entretanto, ele só alcançará a superfície quando o comprimento desta trajetória for inferior ao comprimento de difusão (R). Quanto maior for o comprimento de difusão, maior será a probabilidade do radônio se difundir para fora da amostra. Porém, quando R for igual à maior dimensão da amostra, todo o radônio produzido nos poros poderá alcançar sua superfície. Deste ponto em diante, o aumento de R não é acompanhado pelo aumento do coeficiente de emanação. Definindo o valor crítico do coeficiente de difusão ( $R_c$ ) como sendo aquele a partir do qual o  $\eta$  permanece constante, que igual à maior trajetória percorrida pelo átomo na amostra e considerando a geometria do corpo-de-prova de concreto empregado, no ponto de saturação, o comprimento de difusão é igual a diagonal AB mostrada na figura abaixo.



Figura 5.36. Detalhe da geometria da amostra mostrando a diagonal AB (medidas em cm)

Para as dimensões utilizadas nos corpos-de-prova deste trabalho, obteve-se  $R_c$  igual a 17,08 cm. Nos gráficos das correlações, é possível identificar o ponto onde o comprimento de difusão das amostras é igual a  $R_c$  como sendo o ponto (ponto de saturação) onde  $\eta$  deixa de crescer ou decrescer com a alteração das propriedades e torna-se constante ( $\eta \approx 3,5 \times 10^{-3}$ ). Portanto, para um concreto que apresenta o conjunto de propriedades iguais a do ponto de saturação, ou seja, resistência igual a 35 MPa, permeabilidade ao ar 3,8  $10^{-17}$  m<sup>2</sup>, porosidade de 15,5 % e diâmetro médio de poros de 42nm, o valor do comprimento de difusão é de 17,08 cm.

### **6 CONCLUSÕES**

Este trabalho teve como objetivo avaliar a emanação de radônio em amostras de concreto de dosagens distintas e diferentes tipo de cimentos. Após a caracterização dos concretos, análise do teor de  $^{226}$ Ra, determinação da concentração de emissões alfa e do coeficiente de emanação e da correlação entre as propriedades do concreto e  $\eta$ , foi possível obter algumas conclusões sobre o comportamento da emanação de  $^{222}$ Rn dos concretos quando altera-se suas propriedades.

Para os concretos confeccionados com diferentes tipos de cimento, o emprego de relações a/c diferentes modificou suas propriedades relacionadas com o sistema de transporte. Estas propriedades apresentam um comportamento semelhante quando varia-se a relação a/c

Nas condições em que foi aplicada, o emprego de tinta acrílica não barrou a emanação do radônio. No entanto, alguns pesquisadores concluíram que a tinta barra o radônio quando aplicada a revestimentos de fosfogesso (O'Brien *et al.*, 1995) e a utilização de revestimentos cerâmicos e papel de parede atuam como blindagem quando aplicados sobre blocos de concreto (Yu, 1993).

Com relação ao comportamento da emanação de radônio em função de suas propriedades, os concretos estudados podem ser divididos em dois grupos: concretos de cimento CP II-F e concretos de cimento com escória de alto-forno. Em cada grupo, a correlação da emanação de radônio com as suas propriedades apresentaram comportamentos sistemáticos diferentes entre os grupos. A diferença de comportamento deve-se às mudanças causadas no sistema de transporte provocadas pela adição da escória de alto-forno. Correlacionando o coeficiente de emanação com as propriedades do concreto de cimento CP II-F foi possível obter correlações positivas com a ascensão e absorção capilar, permeabilidade ao ar e diâmetro médio de poros; e negativa com a resistência à compressão. Nos gráficos das correlações entre o coeficiente de emanação e as propriedades dos concretos de cimento CP II-F é possível observar que o valores de  $\eta$  crescem ou decrescem em função da propriedades até atingirem um ponto de saturação, onde, após este valor, mesmo com a variação das propriedades,  $\eta$  mantêm-se constante. Levando-se em conta que o coeficiente de emanação relaciona a quantidade de radônio que é produzido nos poros com a concentração de radônio no ar, isso indica que a partir do ponto de saturação todo o radônio produzido nos poros escapa para o ambiente. Ou seja, a estrutura interna do concreto não consegue mais barrar o radônio.

A adição de escória de alto-forno ao cimento contribuiu para aumentar o teor de <sup>226</sup>Ra dos concretos confeccionados com cimento que contêm esta adição (CP II-E e CP III). Apesar do concreto de cimento CP-III possuir os maiores teores de <sup>226</sup>Ra, ele apresentou os menores valores de densidade superficial de traços por tempo de exposição e teor de <sup>226</sup>Ra, indicando que as propriedades cimentantes da escória contribuíram para diminuir seu comprimento de difusão. A introdução da escória não alterou a porosidade total dos concreto mas, pode-se perceber claramente que ela proporcionou um refinamento dos poros, indicando que a redução no tamanho de poros teve maior contribuição para a diminuição da emanação do que a redução da porosidade total.

Estabeleceu-se uma hierarquia das propriedades que influenciam a emanação de radônio. Inicialmente, pela diferença entre a densidade superficial de traços por tempo de exposição teórica e experimental, que foi confirmada analisando-se os efeitos da escória de alto forno na emanação dos concretos. Portanto, segundo os resultados experimentais obtidos neste projeto, a ordem hierárquica das propriedades que afetam a emanação de radônio é: permeabilidade, diâmetro de poros, porosidade total e por fim, a absorção e ascensão capilar, observando que não foi possível determinar qual das duas últimas afeta mais a emanação.

#### 7 SUGESTÕES PARA PROSSEGUIMENTO DA PESQUISA

Para continuidade da pesquisa sugere-se o emprego de cimentos de outros tipos e de outras localidades para a confecção de concretos que serão estudados a emanação de radônio.

Recomenda-se a avaliação do efeito das adições na emanação de radônio pelo concreto. E a busca de aditivos e/ou adições que contenham baixo teor de <sup>226</sup>Ra e que proporcionem o refinamento de poros semelhante ao da escória de alto-forno para ser avaliados e comparados com os resultados obtidos neste trabalho experimental.

Estudar o efeito dos agregados na emanação de radônio, empregando-se um só tipo de cimento e variando-se o tipo e origem dos agregados.

Sugere-se uma investigação da microestrutura do concreto utilizando a microscopia por varredura eletrônica, a fim de se obter informações sobre o comprimento de difusão no concreto.

Estudos podem ser feitos empregando outros tipos de revestimentos tais como: resina acrílica, verniz acrilico, silicone, revestimentos cerâmicos, pastilhas de vidro e papeis de parede. Ou ainda, endurecedores de superficie com o silicato de cálcio.

Como o comprimento de difusão crítico depende das dimensões da amostra, recomendase o emprego de amostras de dimensões diferentes para avaliação do comprimento de difusão crítico com relação às propriedades do concreto.

109

# ANEXOS

# ANEXO A RESULTADOS OBTIDOS NA DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS CONCRETOS.

#### A.1 Resistência à compressão

	·	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)						
 Concretos	Cimento IM	Cimento BN	Cimento CG	Cimento SH	Cimento CB			
Concreto 1	19,03	11,23	17,78	12,60	11,67			
Concreto 2	41,18	34,82	45,80	33,57	31,26			
Concreto 3	51,16	60,52	66,76	59,40	59,83			

Tabela A.1. Resistência à compressão aos 28 dias para os concretos de cimento IM, BN, CG, SH e CB.

## A.2 Coeficiente de absorção capilar e ascensão capilar

Tabela A.2. Valores do coeficie	nte de absorção capila	r e ascensão capilar	para os concretos estudados
---------------------------------	------------------------	----------------------	-----------------------------

	Coeficien	ite de abso	rção capila	ur* (10 <sup>-2</sup> kg	$g.m^{-2}.s^{-1/2}$ )	Ascensão capilar* $(10^4 \text{ m.s}^{-1/2})$				
Concretos	Cimento IM	Cimento BN	Cimento CG	Cimento SH	Cimento CB	Cimento IM	Cimento BN	Cimento CG	Cimento SH	Cimento CB
C-1	2,93	3,30	0,94	1,55	1,89	2,44	2,48	2,36	1,71	1,67
C-2	1,65	2,20	0,64	1,23	0,75	1,95	2,02	1,77	0,94	1,09
C-3	0,62	1,41	0,36	0,72	0,67	1,30	1,40	0,95	0,41	0,71

\* Para o coeficiente de absorção capilar emprega-se a massa de água em 1 h de ensaio e para ascensão capilar, a altura de penetração após 24 h de ensaio.

A Tabela A.3 apresenta a média da variação de massa das amostras em função do tempo.

	Variação da massa do corpo-de-prova (g)														
Tempo	Cir	Cimento IM		Cir	Cimento BN		Cin	Cimento CG		Cimento SH		SH	Ci	Cimento CB	
	C-1	C-2	<b>C-3</b>	<b>C-1</b>	C-2	<b>C-3</b>	<b>C-1</b>	C-2	<b>C-3</b>	<b>C-1</b>	<b>C-2</b>	<b>C-3</b>	C-1	<b>C-2</b>	<b>C-3</b>
massa inicial (kg)	3,60	3,83	4,10	3,75	3,88	3,87	3,68	3,91	4,10	3,69	3,90	4,10	3,61	3,85	4,03
0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5 min	4,1	2,4	0,9	11,4	3,3	2,3	0,3	0,3	0,3	1,3	1,6	1,5	3,7	1,4	1,7
10 min	5,6	2,8	1,1	13,0	4,4	3,0	0,9	0,8	0,4	3,3	2,0	1,6	4,6	1,6	2,1
15 min	6,6	3,9	1,3	14,8	4,7	3,5	1,2	0,9	0,4	3,5	2,6	2,0	5,1	1,9	2,1
30 min	9,9	5,2	2,0	19,4	7,9	6,0	2,4	1,5	0,8	4,9	3,3	2,6	6,7	2,5	2,8
1 h	14,0	7,2	3,0	22,2	9,7	6,3	4,5	3,0	1,4	7,3	4,6	3,4	8,9	3,5	3,5
2 h	21,9	10,6	4,3	26,0	12,6	7,0	8,8	4,9	2,3	10,7	6,0	4,5	12,0	4,8	4,4
4 h	35,5	17,7	6,9	31,5	17,0	8,4	14,0	8,0	3,5	16,1	7,8	5,8	17,1	6,9	5,9
6 h	38,1	19,7	7,7	36,5	20,3	9,4	19,9	11,2	4,9	19,1	8,6	6,0	21,5	8,8	7,0
24 h	79,1	47,0	16,5	64,0	44,1	15,3	53,0	29,6	11,1	37,7	13,9	8,7	47,0	19,0	12,0

Tabela A.3. Média da variação da massa dos corpos-de-prova

# A.4 Coeficiente de permeabilidade ao ar

Tabela A.4. Coeficiente de permeabilidade ao ar (m<sup>2</sup>) para os diferentes concretos

Coeficiente de permeabilidade ao ar $(10^{-17} \text{ m}^2)$									
Concretos	Cimento IM	<b>Cimento BN</b>	<b>Cimento CG</b>	<b>Cimento SH</b>	Cimento CB				
Concreto 1	4,07	18,29	8,03	20,89	26,36				
Concreto 2	2,93	1,78	1,82	1,97	2,540				
Concreto 3	2,20	1,917	1,640	1,441	5,248				

## A.5 Porosidade total

Tabela A.5. Valores da porosidade total e do diâmetro médio de poros para os concretos estudados

		Porosi	idade Tot	al (%)		Diâmetro médio de poros (nm)					
Concretos	IM	BN	CG	SH	СВ	IM	BN	CG	SH	СВ	
C-1	17,16	22,91	22,13	23,18	14,45	68,7	72,7	114,8	58,8	32,6	
C-2	14,33	14,18	15,45	14,33	14,70	42,5	45,5	103,9	44,1	24,9	
C-3	13,17	9,98	11,88	8,61	13,89	28,2	29,9	61,4	35,7	17,7	

# ANEXO B PARÂMETROS RELACIONADOS À EMANAÇÃO DE 222Rn

# B.1 Teores de <sup>226</sup>Ra, <sup>228</sup>Ra e <sup>40</sup>K das amostras de concreto

	Teores (Bq/kg)											
	<sup>226</sup> Ra	<sup>228</sup> Ra*	<sup>40</sup> K*	<sup>226</sup> Ra	<sup>228</sup> Ra*	<sup>40</sup> K*	<sup>226</sup> Ra	<sup>228</sup> Ra*	<sup>40</sup> K*			
Concreto		<b>C-1</b>			C-2			C-3				
IM	7,7±0,9	16,4±2,2	167±14	6,1±0,9	16,2±2,2	181±15	8,2±0,9	17,2±2,3	144±14			
BN	13,1±1,0	10,3±2,1	162±15	11,2±1,0	13,7±2,2	122±14	13,3±1,0	13,1±2,2	144±14			
CG	9,0±1,0	13,3±2,6	131±15	8,5±0,8	6,7±2,0	174±10	8,6±0,9	14,5±2,2	125±14			
SH	16,5±1,2	14,7±2,2	116±14	17,5±1,2	16,6±2,4	135±14	18,8±1,2	14,2±2,3	136±15			
CB	28,0±1,5	16,3±2,4	144±14	25,3±1,5	17,4±2,4	181±16	29,0±1,8	18,7±3,0	186±20			

Tabela B.1. Teores de <sup>226</sup>Ra, <sup>228</sup>Ra e <sup>40</sup>K das amostras de concreto.

\* Dados fornecidos conjuntamente com o teor de <sup>226</sup>Ra pelo IPEN, no entanto estes dados não foram utilizados neste projeto experimental e são meramente ilustrativos.

# B.2 Densidade superficial de traços por tempo de exposição e por atividade de <sup>226</sup>Ra

Tabela B. 2. Densidade superficial de traços por tempo de exposição e pela atividade de <sup>226</sup>Ra.

	-		· · ·								
Q	Densidade superficial de traços por tempo de exposição e por atividade de <sup>226</sup> Ra (10 <sup>3</sup> traço.ano <sup>-1</sup> .Bq <sup>-1</sup> )										
Concretos	IM	BN	CG	SH	СВ	SH com tinta					
Concreto 1	0,77±0,09	0,66±0,05	0,73±0,08	0,83±0,06	0,51±0,03	0,75±0,06					
Concreto 2	1,0±0,1	0,89±0,08	0,73±0,07	0,55±0,04	0,48±0,03	0,64±0,05					
Concreto 3	0,69±0,08	0,72±0,06	0,54±0,06	0,73±0,05	0,57±0,04	0,70±0,05					

# B.3 Coeficiente de emanação de radônio

	Coeficiente de emanação de radônio (10 <sup>-4</sup> und)								
Concretos	Cimento IM	Cimento BN	Cimento CG	Cimento SH	Cimento CB				
Concreto 1	3,2±0,4	3,5 ± 0,3	3,6±0,5	5,0 ± 0,5	$1,8 \pm 0,1$				
Concreto 2	$3,5 \pm 0,5$	$3,2 \pm 0,3$	$2,7 \pm 0,3$	$2,2 \pm 0,2$	$1,9 \pm 0,2$				
Concreto 3	2,4 ± 0,3	1,8 ± 0,2	1,6 ± 0,2	$1,8 \pm 0,2$	$2,1 \pm 0,2$				

Tabela B. 3. Coeficiente de emanação de radônio

A tabela abaixo apresenta a massa e a massa específica aparente dos concretos necessária para o cálculo do coeficiente de emanação.

Tabela B.4. Valores da massa e da massa específica aparente dos concretos

	Massa (g)				Massa específica aparente (10 <sup>3</sup> kg.m <sup>-3</sup> )					
Concretos	Cimento IM	Cimento BN	Cimento CG	Cimento SH	Cimento CB	Cimento IM	Cimento BN	Cimento CG	Cimento SH	Cimento CB
C-1	3190,7	3057,8	3107,0	3065,8	3067,7	2,494	2,539	2,643	2,437	2,599
C-2	3287,1	3340,8	3257,6	3293,9	3242,3	2,526	2547	2,573	2,505	2,435
C-3	3215,2	3311,9	3368,2	3375,5	3416,1	2,519	2,543	2,647	2,4801	2.635

# ANEXO C ETAPAS E EQUIPAMENTOS EMPREGADOS NOS ENSAIOS

# C.1 Permeabilidade ao ar



Figura C.1. Permeabilímetro



Figura C.2. Detalhe do porta-amostra



Figura C.3. Amostra inserida no porta-amostra

# C.2 Absorção e ascensão capilar



Figura C.4. Bandeja com os corpos-de-prova imersos 1,0 cm para o ensaio de absorção capilar





Figura C.5. Determinação da massa da amostra

Figura C.6. Amostra rompida para a determinação da altura de penetração

### C.3 Equipamento de Abrasão Los Angels



Figura C.7. Abrasão Los Angeles



Figura C.8. Abertura para colocação e retirada das amostras





Figura C.9. Vista Superior da campânula



Figura C.10. Vista lateral da campânula

# **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7211/83 (1983): Agregados para concreto - Especificações. Rio de Janeiro: ABNT.

\_\_\_\_\_NBR 11579/91 (1991): Cimento Portland - Determinação da finura por meio de peneira 75 micrômetros (número 200). Rio de Janeiro: ABNT.

\_\_\_\_\_NBR 11581/91 (1991): Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro: ABNT.

**NBR 5738/94** (1994): Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos para a moldagem. Rio de Janeiro: ABNT.

NBR 5739/94 (1994): Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT.

\_\_\_\_\_NBR 9779/95 (1995): Argamassa e concreto endurecido - Determinação da água por capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT.

**NBR 7215/96** (1996): Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT. **NBR NM23/98** (1998): Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação de sua massa específica. Rio de Janeiro: ABNT.

**NBR NM67/98** (1998): Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT.

**NBR NM76/98** (1998): Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação de sua finura pelo método Blaine. Rio de Janeiro: ABNT.

Bágel', L' & Zivica, V. (1997). Relationship between pore structure and permeability of hardened cement mortas: on choice of effective pore structure parameter. Cement and concrete Research.
27, 8, 1225-1235.

Bagnoli, F.; Bochicchio, F. & Bucci, S. (1999). Sensitivity of a LR-115 based radon dosemeter. Radiation Measurements. 31, (1-6), 347 - 350.

Balayssac, J. P. (1992). Relations entre performances mecaniques, microestructure et durabilité des betons. Toulouse. Tese de Doutorado, INSA-UPS.

Bastos, F. A. A. (1983). Problemas de mecânica dos fluidos. 1<sup>a</sup> ed.. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan S.A.

Boyle, R. W. (1982). Geochemical prospecting for thorium and uranium deposits. Amsterdam: Elsevir Scientific publishing Company.

Camarini, G. (1995). Desempenho de misturas de cimento Portland e escória de alto-forno submetidas à cura térmica. São Paulo. Tese de Doutorado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, EPUSP-SP.

Camarini, G. (2000). Aglomerantes Minerais II. Notas de Aulas, Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, FEC-UNICAMP.

Campos, M. P. (1994). Avaliação do impacto radiológico provocado por materiais de construção em moradores de casas populares. São Paulo. Dissertação de Mestrado-Instituto de pesquisas Energéticas e Nucleares da Universidade de São Paulo, IPEN-USP.

Chao, C. Y. H.; Tung, T. C. W.; Chan, D. W. T. & Burnett, J. (1997). Determination of radon emanation and back diffusion characteristics of building materials in small chamber tests. **Building** and Environment. 32, 355-362.

Cook, R. A. & Hover, K. C. (1999). Mercury porosimetry of hardened cement pastes. Cement and Concrete Research. 29, 933-943.

Czernin, W. (1963). La química del cimento. Barcelona: Ediciones Palestra,

De Mets, G. (1990). Radioactvity of building materiais, design and improvement of houses. In Journée Radon, Conf. 900117, R. Soc. Bel. Eng. Ind., Bruxelles, Belgium.

De Milito, J. A. (2001). Avaliação do comportamento de pastas de gesso com cimento Portland e sílica ativa para revestimento. Campinas. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, FEC-UNICAMP.

Dumet, T. B. & Pinheiro, L. M. (2000). A evolução do concreto uma viagem no tempo. In: 42° Congresso Brasileiro do Concreto, Fortaleza. Anais... Fortaleza, IBRACON.

Durrani, S. A. & Ilic, R. (1997). Radon measurements by etched track detectors. Singapore: World Scientific Publishing.
Edward, J. J.(1991). A user's guide to principal components - Wiley series in probability and mathematical statistics. Applied probability and statistics. New York : J. Wiley.

El-Dieb, A. S. & Hooton, R. D. (1994). Evaluation of the Katz-Thompson model for estimating the water permeability of cement-based materials from mercury intrusion porosimetry data. **Cement and Concrete Research**. 24, 3, 443-455.

Fleischer, R. L.; Price, P. B. & Walker, R. M. (1975). Nuclear tracks in solids - Principles & applications. London: University of California Press, Ltd..

Font, L. L.; Baixeras, C.; Domingo, C. & Fernandez, F. (1999). Experimental and theoretical study of radon levels and entry mechanisms in a Mediterranean climate house. Radiation Measurements. 31, 1-6, 277-282.

Gadd, M. S. & Borak, T. B. (1995). In-situ determination of the diffusion-coefficient of Rn-222 in concrete. Health Physics. 68, 6, 817-822.

George, A. C. (1996). State-of-the-art instruments for measuring radon/thoron and their progeny in dwellings-a review. Health Physics. 70 (4), 451-463.

Guedes, S.; Hadler, J. C.; Iunes, P. J.; Navia, L. M. S.; Neman, R. S.; Paulo, S. R. Rodrigas, V. C., Souza, W. F.; Tello, C. A. & Zuringa, A. (1999). Indoor radon and radon daughterssurvey at Campinas Brasil using CR-39 - First results. **Radiation Measurements**. 31, 287-290.

Jarallah, M. I.; Abu-Jarad, F. & Fazal-ur-Rehman (2001). Determination of radon exhalation rates from tiles using active and passive techniques. **Radiation Measurements**. 34, 491-495.

Jawed, I.; Skalny, J. & Young, J. F. Hydration of Portland cement. In: Barnes, P. (1983) Structure and performance of cements London: Applied Science Publishers. Jonassen, N. (1983). The determination of radon exhalation rates. Health Physics. 45, 369-376.

Jong, P.; Dijk, W.; Hulst, J. G. A. & Heijningen, R. J. J. (1996). The effect of the composition and production process of concrete on <sup>222</sup>Rn exhalation rate. Environment International. 22, 1, S287-S287.

Kaplan, I. (1978). Física Nuclear. 2ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois S.A..

Khan, A. J.; Prasad, R. & Tyagi, R. K. (1992). Measurement of radon exhalation rate from some building materials. Nuclear Tracks Radiation Measurements. 20, 4, 609 - 610.

Khan, A. J. (2000). A study of indoor radon levels in Indian dwellings, influencing factors and lung cancer risks. Radiation Measurements. 32, 87-92

Khatibeh, A. J. A. H.; Ahmad, N.; Matiullah; Kenawy, M. A.; Abu- Murad, K. M.; Kullad, M. & Al-Bataina, B. A. (1997). Measurements of indoor radon concentration levels in some cities of Jordan. Radiation Measurements. 28, 589-590.

Klink, T.; Garber, K.; Schlattner, E. & Setzer, M. J. (1999). Characterization of the gas transport properties of porous materials by determining the radon diffusion coefficient. Materials and Structures. 32, 749-754.

Kumar, V.; Ramachaandran, T. V. & Prasad, R. (1999). Natural radioctivity of Indian building materials and by-products. Applied Radiation and Isotopes. 51, 93-96.

Lea, F. M. (1971). The chemistry of cement and concrete. 3<sup>a</sup> ed., New York: Chemical Publishing Company, INC.

Levy, S. & Helene, P. (1996). Cura. Como, quando e por quê. Téchne. 20, 18-21.

Lindgren, W. (1933). Mineral deposits. 4ª ed. New York: McGraw-Hill.

Lockington, D.; Parlange, J. Y. & Dux, P. (1999). Sorptivity and estimation of water penetration into unsaturated concrete. Material and Structures/ Matériaux et Constructions. 32, 342-347.

Maciel, A. C. & Cruz, P. R. (1973). Perfil analítico do urânio. Rio de Janeiro: Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM).

Man, C. K. & Yeung, H. S. (1996 a). The effects of cracks and holes on the exhalation of radon from concrete. **Building and Environmental**. 32, 4, 351 - 354.

\_\_\_\_\_ (1996 b). The effects of using pulverized fuel ash as partial substitute for cement in concrete. The Science of the Environment. 196, 171 - 176.

Marlow, W. H. (1988). Electrical charge in radon daughter deposition: a critical review. **Radiation Protection Dosimetry**. 24 (1-4), 171-179.

Marocco, D. & Bochicchio, F. (2001). Experimental determination of LR-115 detector efficiency for exposure to alpha particles. Radiation Measurements. 34, 509-512.

Martys, N. S. & Ferraris, C. (1997). Capillary transport in mortars and concrete. Cement and Concrete Research. 27, 5, 747-760.

Mays, G. (1992). Durability of concrete structures investigations, repair, protection. 1<sup>a</sup> ed. Great Britain: E & FN Spon.

Mazzilli, B.; Palmiro, V.; Saueira, C. e Nisti, M. B. (2000). Radiochemical characterization of Brazilian phosphogypsum. Journal of Environmental Radioactivity. 49, 113-122.

Metha, P. K. & Monteiro, P. J. M. (1994). Concreto, estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini.

Mindess, S. (1989). Interfaces of concrete. In: Skalny, J. & Mindess, S., Ed. Materials science of concrete I. Westerville: The American Ceramic Society, Inc..

Misdaq, M. A.; Aitnouh, F.; Khajmi, H.; Ezzahery, H. & Berrazzouk, S. A. (2001). A new method for evaluating radon and thoron alpha-activities per unit volume inside and outside various natural material samples by calculating SSNTD detection efficiencies for the emitted alpha-particles and measuring the resulting track densities. **Applied Radiation and Isotopes**. 55: (2) 205-213.

Nazaroff, W. W. & Nero, A. Jr. (1988). Radon and its decay products in indoor air. New York: John Wiley & Sons.

Neville, A. M. (1997). Propriedades do concreto. São Paulo: Pini.

O'Brien, R. S.; Peggie, J. R. & Leith, I. S. (1995). Estimates of inhalation doses resulting from the possible use of phospho- gypsum plaster-board in Australian homes. **Health Physics**. 68, 561-570.

Olliver, J. P. & Massat, M. (1992). Permeability and microstructure of concrete: a review of modeling. Cement and Concrete Research. 22, 503-514.

Paulon, V. A. (1995). Estudos da microestrutura da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado. São Paulo. Tese de Doutorado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, EPUSP-SP.

Pereira, N. M. (1990). **O Brasil e o mercado internacional de urânio**. São Paulo. Tese de doutorado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, EPUSP-SP.

123

Pereira, C. J.; Pice, R. W. & Skalny, J. P. (1989). Pore structure and relationship to properties of materials. Materials Research Society. 137, 3-21.

Powers, T. C.; Copeland, L.E. & Mann, H. M. (1959). Capillarity continuity or discontinuity in cement pastes. In: Cook, R. A. & Hover, K. C. (1999). Mercury porosimetry of hardened cement pastes. Cement and Concrete Research. 29, 933-943.

Renken, K. J. & Rosenberg, T. (1995). Laboratory measurements of the transport of radon gas through concrete samples. Health Physics. 68, 6, 800-808.

Ross, J. L. S. & Moroz, I. C. (1997). Mapa geomorfológico do estado de São Paulo. São Paulo: IPT: FAPESP.

Sanjuán M. A. & Munoz-Martialay, R. (1995). Influence of the age on air permeability of concrete. Journal of Materials Science. 30 5657-5662.

Schobbenhaus, C. & Coelho, C. E. S. (1985). Principais depósitos minerais do Brasil, vol. 1, Brasília - DF: Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM).

Scrievener, K. L. (1989). The microstructure of concrete. In: Skalny, J. & Mindess, S., Ed. Materials science of concrete I. Westerville: The American Ceramic Society, Inc.

Silva, A. A. R. (2000). Determinação da concentração de <sup>222</sup>Rn e filhos em ambientes fechados com detectores plásticos. São Paulo. Dissertação de mestrado - Instituto de Física da Universidade de São Paulo, IFUSP-SP.

Singh, S.; Kumar, J.; Singh, B. & Singh, J. (1999). Radon diffusion studies in some building materials using solid state nuclear track detectores. **Radiation Measurements**. 30, 4, 461 - 464.

Somogy, G. & Szaly, S. A. (1973). Track-diameter kinetics in dieletric track detectors. Nuclear Instruments and Methods. 109, 211-232 In: Paulo, S. R. (1991). Dosimetria ambiental de <sup>222</sup>Rn e filhos: medida da eficiência absoluta do CR-39 levando-se em conta os efeitos do plate-out e fatores ambientais. Campinas. Tese de doutorado - Instituto de Física Gleb Wataghin da Universidade Estadual de Campinas, IFGW-UNICAMP.

Tanner, A. B., (1980). Radon migration in the ground: A supplementary review. In: Durrani, S. A.
& Ilic, R (1997). Radon measurements by etched track detectors. Singapore: World Scientific Publishing.

Taylor, H. F. W. (1992). Cement chemistry. 2ª printing. London: Academic Press Inc..

Tomasino, L. (1998). Passive sampling and monitoring of radon and other gazes. Radiation Protection Dosimetry. 78, 55-58.

UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (1993). Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. United Nations, New York.

Vasconcelos, A. C. (1992). O concreto no Brasil, recordes-realizações-história. Vol. 1, 2<sup>a</sup> ed. São Paulo: Pini.

Voto, R. H. (1978). Uranium geology and exploration. Golden: Colorado School of Mines.

Vukovic, P.; Dapcevic, S.; Saveljic, N.; Uvarov, V. V. & Kulakov, V. M. (1997). Indoor radon concentration in the town of Podgorica-Montenegro. **Radiation Measurements**, 28, 755-758.

Washburn, E. W. (1921). Note on a method of determining the distribution of pore sizes in porous materials. In: Cook, R. A. & Hover, K. (1993). Mercury porosimetry of cement-based materials and associated correction factors. **ACI Materials Journal**. 90 (20), 152-161.

Wilkening, M. (1990). Radon in the environment: Studies in Environmental Science 40. Elsevier Science Publishing Company Inc.

Yssorche, M. P.; Bigaas, J. P. & Olliver, J. P. (1995). Mesure de la perméabilité à láir bétons au moyen dún perméamètre à charge variable. Materials and structures. 28, 401-405.

Yu, K. N. (1993). The effects of typical covering materials on the radon exhalation rate from concrete surfaces. Radiation Protection Dosimetry. 48, 4, 367-370.

\_\_\_\_\_ (1994). Radon emanation from concrete with pulverized fuel ash (PFA). Building and Environment. 29 (4), 545-547.

Yu, K. N.; Yong, E. C. M.; Chan, T. F.; Lo, T. & Balendran, R. V. (1996). The variation of radon exhalation rates from concrete surfaces of different ages. **Building and Environment**. 31, 255-257

Yu, K. N.; Yong, E. C. M.; Stokes, M. J.; Kwan, M. K. & Balendran, R. V (1997). Radon emanation from concrete surfaces and effect of the curing period, pulverized fuel ash (PFA) substituion and age. Applied Radiation and Isotopes. 48, 7, 1003 - 1007.

Yu, K. N.; Balendran, R. V.; Koo, S.Y. & Cherung, T. (2000). Silica fume as a radon retardant from concrete. Environmental Science & Technology. 34 (11), 2284-2287.

Zikovsky, L. (1992). Determination of radon exhalation rates from Canadian building materials with an internal proportional counter. Nuclear Tracks Radiation Measurements. 20, 3, 525 - 527.

UNICAMP BIBLIOTECA CENTRAL SEÇÃO CIPCULANTE