

ATENÇÃO

O ORIGINAL DESTE ÍTEM NÃO FORNECE CONDIÇÕES
PARA OBTER UMA CÓPIA DIGITALIZADA COM
MELHOR QUALIDADE



CNEN/SP

ipen Instituto de Pesquisas
Energéticas e Nucleares

AUTARQUIA ASSOCIADA A UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO

DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE A GÁS EM CONCRETO USADO EM REPOSITÓRIOS PARA REJEITOS RADIOATIVOS

ELOISA TAMIE MIYAKE

Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau
de Mestre em Ciências na Área de
Reatores Nucleares de Potência e
Tecnologia do Combustível Nuclear.

Orientador:
Profa. Dra. Bárbara Maria Rzycki

**São Paulo
1994**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE A GÁS EM
CONCRETO USADO EM REPOSITÓRIOS PARA
REJEITOS RADIOATIVOS**

ELOISA TAMIE MIYAKE



Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau
de Mestre em Ciências na Área de
Reatores Nucleares de Potência e
Tecnologia do Combustível
Nuclear.

Orientadora: Profª. Drª. Bárbara Maria Rzycki

São Paulo
1994

*Aos meus pais, Koji e Kiyoe,
irmãos e amigos.*

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsa de estudos que viabilizou esta pesquisa.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, pelas facilidades concedidas para a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Achilles A. Suarez (*in memoriam*), pelo incentivo e confiança.

A Serrana S.A. de Mineração pelo fornecimento dos cimentos.

Ao Laboratório L. A. Falcão Bauer - Centro Tecnológico de Controle da Qualidade Ltda - Departamento de Concreto - em especial ao Engenheiro Shunji Takashima, aos técnicos e aos laboratoristas, pela realização de parte dos experimentos.

À Divisão de Eletrônica (IEE), em especial ao engenheiro Franco Brancaccio e o bolsista Roberto Antonio da Costa, pela construção do amplificador para Strain Gage.

Aos setores de projeto, usinagem, calderaria e montagem da Divisão de Projetos (IEO): Engenheiro Francisco Edmundo Sprenger (chefe da divisão), aos engenheiros Alberto de Jesus Fernando e Fabio Eduardo de Campos, ao projetista José Rodrigues de Lima e ao tecnólogo José Carlos Sabino, pela elaboração e execução da câmara de permeabilidade.

Ao chefe da Supervisão de Rejeitos e Descontaminação, Prof. Roberto Vicente, pela orientação inicial em outro campo de pesquisa. Aos pesquisadores, engenheiros e técnicos da MQR, em especial a Marcos Maciel de Goes, Vera Lúcia Keiko Isiki e Marcos Antonio Araújo; à secretária Carmem Silvia S. Rodrigues: suas colaborações foram decisivas para consecução desta pesquisa.

Aos professores da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, por tudo que aprendi acerca do concreto.

À Comissão de Pós-Graduação (CPG) do IPEN, pelo atendimento atencioso.

Aos funcionários da biblioteca do IPEN e da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), pela cordialidade e eficiência.

Ao Roberto Marcio de Macedo Fraga, pelas fotos e slides.

Aos amigos:

- Robson de Jesus Ferreira, técnico da MQR, pelo auxílio, incentivo e carinho.

- Nanami Sato, pela confiança, amizade e revisão do texto.

- André Bozzon pela confecção dos gráficos e desenhos.

- Raquel N. Mattes, pelo estímulo e pela editoração do texto.

Aos amigos que, embora não citados nominalmente, contribuam, direta ou indiretamente, para a realização desta dissertação.

À minha família pela paciência, compreensão, estímulo e carinho.

Last but not least, à Prof^a. Dra. Bárbara Maria Rzycki, pela dedicada orientação.

DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE A GÁS EM CONCRETO USADO EM REPOSITÓRIOS PARA REJEITOS RADIOATIVOS

Eloisa Tamie Miyake

RESUMO

O concreto é um material amplamente utilizado para a construção de repositórios finais para rejeitos radioativos e deve ter as suas características bem determinadas. A permeabilidade é uma propriedade que permite avaliar a durabilidade do concreto. Esta, por sua vez, garante a proteção do meio ambiente circunvizinho ao repositório. Concretos duráveis têm permeabilidade baixa, o que reduz a penetração de líquidos no repositório, diminuindo a probabilidade de lixiviação de compostos radioativos solúveis e o escape de gases para o *habitat* humano. Este trabalho inclui: a construção de uma câmara para medir o coeficiente de permeabilidade de produtos hidráulicos, usando-se como fluido permeante o nitrogênio gasoso; determinação das características dos materiais utilizados nas misturas dos concretos e testes em concretos com composições diversas, nos quais se usam o cimento Portland comum e o de alto-forno.

DETERMINATION OF PERMEABILITY TO GASES OF CONCRETE USED AS REPOSITORY FOR RADIOACTIVE WASTES

Eloisa Tamie Miyake

ABSTRACT

Concrete is widely used in final radioactive waste repository construction and must have well defined characteristics. The permeability is a property that allows to evaluate the durability of concrete which guarantee the protection of the surroundings. Durable concretes have low permeability which reduces liquids intrusion into the repository and decreases the probability of leaching of soluble radioactive compounds and gases escapes to the human "habitat". This work includes: the construction of a camera to measure the permeability coefficient of hydraulic products, by using gaseous nitrogen as a permeation fluid; determination of characteristics of materials used in concrete compositions; and tests in concretes with different compositions in which ordinary Portland cement and blast-furnace cement were used.

Sumário

RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
Capítulo um	1-1
1.1 Introdução	1-1
1.2 Objetivos	1-8
Capítulo dois	2-1
2.1 Permeabilidade de materiais hidráulicos e parâmetros correlatos	2-1
2.2 Permeabilidade a gás: fundamentos teóricos	2-4
2.3 Permeabilidade a gás: experimentos mais recentes	2-9
2.4 Permeabilidade dos componentes do concreto	2-16
2.4.1 Permeabilidade da pasta	2-18
2.4.2 Permeabilidade dos agregados	2-23
2.4.3 Influência da aderência da pasta com o agregado	2-24
Capítulo três	3-1
3.1 Câmara de permeabilidade: construção e funcionamento	3-1
3.2 Descrição da Câmara	3-2
3.3 Sistema de medidas e modo de operação	3-9
3.4 Procedimento para obtenção dos resultados	3-12

Capítulo quatro	4-1
4.1 Materiais e técnicas de medidas	4-1
4.2 Materiais utilizados	4-2
4.2.1 Água	4-2
4.2.2 Agregados	4-3
4.2.3 Cimentos	4-4
4.2.3.1 Cimento Portland Comum	4-5
4.2.3.2 Cimento Portland de Alto-Forno	4-7
4.2.4 Aditivos	4-8
4.3 Técnicas de Medidas	4-12
4.3.1 Caracterização dos materiais	4-12
4.3.1.1 Cimentos	4-12
4.3.1.2 Agregados Miúdos e Graúdos	4-13
4.3.2 Confeção dos corpos de prova	4-15
4.3.3 Ensaio realizados em concreto fresco	4-17
4.3.3.1 Determinação da consistência pelo abatimento tronco de cone	4-17
4.3.3.2 Determinação do teor de ar pelo método pressométrico	4-18
4.3.4 Moldagem dos corpos de prova	4-18
4.3.5 Preparo dos corpos de prova para o ensaio de permeabilidade	4-20
4.3.6 Ensaio realizados em concreto endurecido	4-21
4.3.6.1 Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica	4-21
4.3.6.2 Determinação da penetração de água sob pressão	4-23

4.3.6.3	Determinação da absorção de água por capilaridade	4-24
4.3.6.4	Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto	4-25

Capítulo cinco 5-1

5.1	Resultados e discussões	5-1
5.1.1	Análise do concreto fresco	5-1
5.1.1.1	Consistência pelo abatimento do tronco de cone	5-1
5.1.1.2	Teor de ar pelo método pressométrico	5-2
5.1.2	Análise do concreto endurecido	5-3
5.1.2.1	Absorção de água, índice de vazios e massa específica	5-3
5.1.2.2	Penetração de água sob pressão	5-7
5.1.2.3	Absorção de água por capilaridade	5-8
5.1.2.4	Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto	5-9
5.1.2.5	Permeabilidade	5-10

Capítulo seis 6-1

6.1	Conclusões	6-1
6.2	Sugestões para futuros trabalhos	6-4

Bibliografia a-1

Anexo A A-1

Anexo B B-1

Capítulo um

1.1 INTRODUÇÃO

Os materiais que contêm elementos radioativos são considerados rejeitos radioativos dependendo dos limites especificados pela norma CNEN-NE-6.05⁽²⁴⁾ de 1985. Assim, rejeito radioativo pode ser definido como todo material resultante da atividade humana que contenha radionuclídeos acima dos limites de isenção e que, por não se destinar à re-utilização e deve ser tratado. Por causa da radioatividade, os rejeitos radioativos gerados em atividades de produção de energia elétrica, em hospitais, em indústrias e na agricultura, entre outros setores, precisam ser gerenciados de forma cuidadosa.

Os riscos potenciais que os rejeitos radioativos apresentam são os mesmos de resíduos hospitalares altamente infecciosos ou de alguns resíduos industriais que

tenham metais pesados, como o mercúrio. Dessa forma, os rejeitos radioativos, como qualquer resíduo tóxico proveniente de outras atividades humanas fora da área nuclear, são inofensivos quando gerenciados adequadamente. A radioatividade do rejeito decai e desaparece com o tempo. Esse tempo pode ser curto ou longo, dependendo do tipo de rejeitos.

Antes do isolamento, os rejeitos radioativos são tratados, imobilizados e acondicionados em embalagens especiais. O isolamento é feito em locais chamados repositórios finais para rejeitos radioativos. A previsão de acondicionamento desses rejeitos deve ser de centenas ou milhares de anos.

O objetivo do repositório é assegurar que o homem e o meio ambiente, ao longo do tempo, não sofram efeitos nocivos causados pela radiação.

Alguns fatores importantes a serem considerados para isolar os rejeitos do *habitat* humano são: o acondicionamento adequado dos rejeitos imobilizados com materiais específicos, como cimento ou cimento com aditivos; as embalagens que contêm os rejeitos; as barreiras de engenharia adicionais (estrutura do repositório) e as barreiras geológicas naturais. As barreiras são obstáculos que minimizam, retardam ou ainda previnem a migração de radionuclídeos dos embalados para o meio ambiente.

As propriedades das barreiras de engenharia em repositórios finais para rejeitos radioativos são determinadas em experimentos como: resistência à intrusão de

água do meio ambiente, retenção dos radionuclídeos e estimativas de sua durabilidade.

Grande parte dos projetos de repositórios, superficiais ou profundos, para a deposição de rejeitos radioativos, propõe o uso extensivo de cimentos hidráulicos e concretos. Esses materiais podem ser utilizados também como matrizes de imobilização de rejeitos, como material estrutural para confecção de paredes e pisos, como reboco para cobrir falhas entre as embalagens de rejeitos e como selantes. Um dos principais objetivos para que o repositório tenha uma durabilidade alta é conhecer a composição do cimento e materiais empregados, bem como os fatores físicos e químicos, individualmente, e entender os mecanismos que afetam o produto final, através de dados obtidos experimentalmente.

Muitos estudos têm sido realizados para prever a durabilidade de concretos usados como barreiras de engenharia em repositórios finais para rejeitos radioativos. As propostas francesa⁽⁵³⁾ e espanhola⁽⁶¹⁾ projetam uma durabilidade de 300 anos e a proposta canadense⁽⁴⁹⁾, de 500 anos. Sabe-se que cada país tem insumos diferentes em sua composição e características físico-químicas, por este motivo têm sido concentrados muitos esforços no sentido de atribuir ao concreto características que permitam prever a sua longevidade, com o intuito de isolar os elementos radioativos do meio ambiente. Todos os programas de pesquisa incluem, em suas listas de propriedades, a permeabilidade do concreto, que reflete a interação do repositório com o meio hospedeiro até que o conteúdo desse repositório se torne inócuo.

A classificação dos rejeitos radioativos no Brasil baseia-se nas recomendações da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) e faz parte da norma da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN-NE-6.05) intitulada "Gerência de Rejeitos Radioativos em Instalações Radioativas". Os rejeitos são classificados de acordo com o estado físico, a natureza da radiação, a concentração de radionuclídeo e a taxa de exposição. Para fins de repositório, os rejeitos são classificados em categorias:

Categoria I: rejeitos de nível alto, contendo emissores de meia vida longa;

Categoria II: rejeitos de nível intermediário, contendo emissores de meia vida longa;

Categoria III: rejeitos de nível baixo, contendo emissores de meia vida longa;

Categoria IV: rejeitos de nível intermediário, contendo emissores de meia vida curta;

Categoria V: rejeitos de nível baixo, contendo emissores de meia vida curta.

Os rejeitos radioativos classificados nas categorias IV e V são comumente dispostos em repositórios pouco profundos (em superfícies, sub-superfícies, declives). Os das categorias II, III, IV e V em cavidades rochosas (cavernas, minas abandonadas) e os da categoria I em repositórios profundos (estruturas geológicas estáveis, em grandes profundidades). No Brasil os rejeitos radioativos, gerados em diversas atividades, nas categorias IV e V e raramente na categoria III (rejeitos de pesquisa ou aplicações industriais).

Com a introdução do programa nuclear no Brasil, em 1974⁽²⁷⁾, estão sendo gerados rejeitos radioativos com diferentes níveis de atividade (contendo emissores alfa, beta ou gama) na área nuclear, em pesquisas e em aplicações de materiais radioativos na indústria, medicina e agricultura, entre outras áreas. Os rejeitos gerados são de nível baixo e, em poucos casos, de nível intermediário.

Considerando-se todos os rejeitos gerados em diversas atividades do ciclo do combustível nuclear e em outras aplicações de materiais radioativos, o Brasil, até o ano 2010, poderá atingir um volume de cerca de 8000 m³⁽²⁷⁾ de rejeitos condicionados, excluindo os rejeitos gerados no acidente de Goiânia, ocorrido em 1987. Este volume, quando comparado com o de outros países, por exemplo, o Canadá, que chega a gerar cerca de 13000 m³ anuais⁽²³⁾, é pequeno.

O Brasil ainda não possui um repositório para acolher os rejeitos radioativos que estão sendo gerados. Há perspectivas, no entanto, de que a sua construção se dê nesta década e os trabalhos já estão sendo desenvolvidos. Existe uma proposta brasileira para a construção de um repositório de superfície que pode ser visto na Figura 1.1⁽²⁷⁾.

- 1 COBERTURA DE ARGILA
- 2 CAMADA DE DRENAGEM
- 3 CAMADA DE SOLO
- 4 COBERTURA DE VEGETAÇÃO PERMANENTE
- 5 EMBALADOS DE CONCRETO
- 6 MONOLITOS
- 7 CAMADAS DE DRENAGEM
- 8 CAMADA DE ARGILA
- 9 DUTOS DE DRENAGEM DA LIXIVIA
- 10 CAMADA FLEXIVEL
- 11 MEMBRANA FLEXIVEL

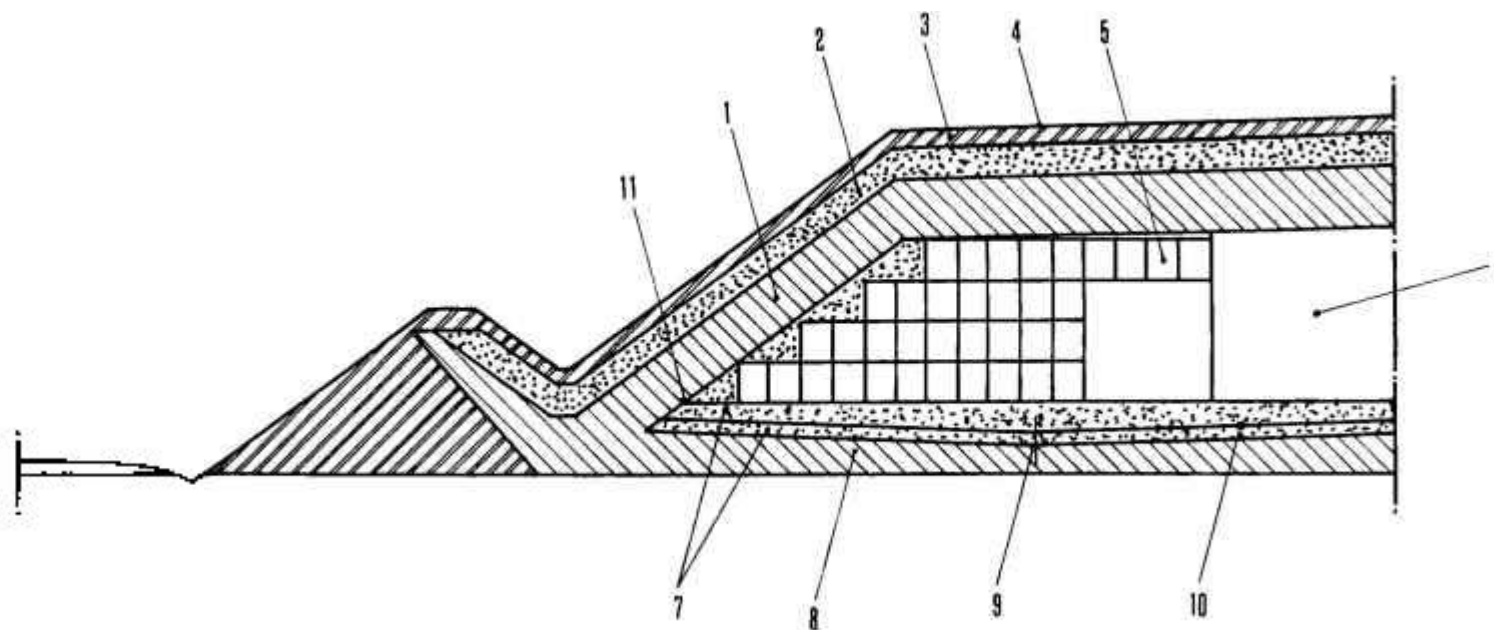


FIGURA 1.1 - REPOSITÓRIO FINAL - PROPOSTA BRASILEIRA⁽²⁷⁾

(rejeitos, matriz de imobilização, embalagem e seus reforços). A escolha do local deve ser criteriosa e envolve estudos de ecologia, hidrologia, uso da terra e avaliações sócio-econômicas. Segundo estudos atinentes devem ser levados em consideração os seguintes aspectos:

- os materiais radioativos devem ter formas sólidas ou estar solificados para serem depositados;
- os rejeitos radioativos com meia vida menor que 30 anos podem ser depositados em repositórios de superfície;
- os rejeitos contaminados com emissores alfa, abaixo de limites determinados por cada país, podem ser depositados em repositório de superfície;
- os rejeitos contendo radionuclídeos com meia vida maior que 30 anos devem ser depositados em formações geológicas profundas (minas, cavernas etc.);
- até a confirmação do local e a construção do repositório final, todos os rejeitos devem ser tratados e estocados de forma segura.

A procura de locais para a construção de um repositório de superfície, no Brasil, teve início no final da década de 70⁽²⁷⁾. A escolha envolveu, primeiro, as regiões de interesse em vários estados como: Piauí, Pará, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Bahia, Minas Gerais e Rio de Janeiro. Duas ilhas também foram consideradas, Martim Vaz e Trindade, por estarem situadas longe da

costa brasileira, terem uma densidade populacional pequena e acesso controlado pela Marinha Brasileira⁽²⁷⁾.

Entre inúmeros parâmetros que precisam ser analisados, aqueles ligados às propriedades do concreto, material usado para a construção, já estão sendo avaliados. Uma dessas propriedades diz respeito a um item importante, que é a permeabilidade.

É desejável que os concretos usados na construção dos repositórios finais para rejeitos radioativos sejam pouco permeáveis, para reduzir a infiltração de água, o escape de gases eventualmente produzidos e a lixiviação dos elementos radioativos solúveis para o meio ambiente circunvizinho.

Para que o concreto tenha permeabilidade reduzida, é necessário caracterizar os materiais utilizados na sua composição. Desta forma verifica-se qual o comportamento dos mesmos no concreto que venha a ser usado para a construção do repositório final.

1.2 OBJETIVOS

Um dos objetivos deste trabalho foi construir uma câmara, acoplada a um sistema de medidas, para determinar o coeficiente de permeabilidade de concretos destinados à construção de barreiras de engenharia em repositórios finais para rejeitos radioativos.

Sabe-se que a água não é um meio inerte quando em contato com produtos hidráulicos solidificados. A estrutura dos poros pode ser modificada por causa do efeito da hidratação dos componentes de cimento ainda não hidratados. Além disso, a água pode lixiviar o hidróxido de cálcio presente, degradando a matriz.

Diante destes fatos, escolheu-se o nitrogênio gasoso como meio permeante, por ser um gás inerte.

Outros objetivos, associados ao grau de permeabilidade de concretos, foram: a determinação das características dos materiais usados na mistura do concreto; o estudo de algumas propriedades físico-químicas do concreto, por exemplo, resistência mecânica; e a obtenção de dados experimentais, como a absorção de água sob pressão e a absorção por capilaridade, que permitem indicar tipos de cimentos e composições de concretos mais adequadas, para a construção de repositórios.

Este estudo é útil no campo da engenharia da construção civil para melhorar as características dos concretos e a durabilidade dos produtos hidráulicos.

Capítulo dois

2.1 PERMEABILIDADE DE MATERIAIS HIDRÁULICOS E PARÂMETROS CORRELATOS

Até 1856, não havia nenhum estudo sobre o movimento das águas nos meios porosos e fissurados. Foi nesta época que o engenheiro hidráulico francês Henry P. G. D'Arcy publicou na imprensa um artigo sobre o abastecimento de água na cidade de Dijon, França. Nessa matéria descreve experiências feitas em laboratório sobre a análise do fluxo de água através da areia. Os resultados apresentados podem ser generalizados dentro de uma lei empírica que leva o seu nome. A partir dessa época foi iniciada a pesquisa na área da hidrologia como uma ciência quantitativa.

A lei de D'Arcy é de extrema importância por ser utilizada nas análises de fluxo de lençóis freáticos, no fluxo em meios porosos, no fluxo de solos, na física dos solos, na mecânica dos solos, na formação geológica, na análise de reservatórios de petróleo,

nos projetos de filtração, em testes nos materiais porosos, no estudo de membranas porosas etc.

O conhecimento da permeabilidade de um corpo é um dos caminhos para se encontrar uma relação com outras propriedades, como porosidade, capilaridade, absorção de água e resistência mecânica, entre outras, para, eventualmente, facilitar a determinação da superfície específica da massa desse corpo.

A permeabilidade é uma das propriedades mais importantes do concreto que afeta a durabilidade, especialmente quando ligada ao uso como isolante de rejeitos radioativos. As medidas da permeabilidade permitem estabelecer os caminhos e os mecanismos de escoamento de fluidos através de materiais cimentícios, embora a permeabilidade não seja influenciada somente pelo volume total dos poros, mas também pela distribuição dos mesmos no espécime sólido, pela permeabilidade dos agregados, pela zona de transição pasta/agregado, pelo lançamento, pelo adensamento e pela cura.

A partir do século passado, a preferência pelo tipo de fluido permeante recaía sobre a água, por interesses da engenharia da construção civil. Com o decorrer do tempo, a revolução industrial impôs melhorias nos projetos já existentes e aumentou a demanda por concepções mais modernas.

Mais tarde, entre as décadas de 40 e 50, com o desenvolvimento da energia nuclear para fins pacíficos (geração de energia elétrica e usos na medicina), os termos “estanqueidade” e “durabilidade” passaram a ter uma importância muito grande no que diz respeito à construção civil.

Conforme os requisitos básicos de cada projeto, os testes em amostras sólidas, em que se queira determinar a permeabilidade, são feitos com os fluidos desejados: água, óleo, soluções especiais e gases, entre outros.

Os requisitos de estanqueidade e durabilidade dos materiais na área nuclear são associados aos projetos de construção de reatores nucleares de potência, filtros, materiais para imobilizar rejeitos radioativos, construção de repositórios finais para rejeitos radioativos etc.

No caso específico de se procurar ajustar certos parâmetros de projeto à permeabilidade de concretos, argamassas e pastas de cimento, pode-se fazer os experimentos com água e gases. No caso particular da água, é importante mencionar que, ao passar pelo produto cimentício, a água lixivia o hidróxido de cálcio, fragiliza a amostra, além de não penetrar em poros com diâmetro muito pequeno. Os gases não são tão agressivos assim. O nitrogênio, oxigênio, o próprio ar, com baixo teor de CO_2 , são praticamente inertes.

A utilização de gases nos testes de permeabilidade é vantajosa também porque os repositórios para rejeitos radioativos podem acumular gases produzidos ao longo dos anos, como resultado da corrosão das armaduras (hidrogênio), formação de metano e dióxido de carbono nos processos de degradação microbiana de produtos orgânicos.

2.2 PERMEABILIDADE A GÁS: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A resistência do concreto, por exemplo, aos ataques químicos, pressões ou variações de temperatura, depende muito da sua composição e porosidade.

A porosidade de um corpo é composta por poros abertos e fechados. Os poros abertos que ligam a superfície externa com o interior do corpo podem ser "cegos" (impermeáveis) ou abertos (permeáveis). Estes últimos ligam duas superfícies opostas, através do corpo, e permitem a passagem de gases e líquidos.

A passagem dos gases pelos poros permeáveis ocorre se o livre caminho médio das moléculas difundidas é menor que o diâmetro do poro, se existe um gradiente de pressão e, ainda, se o escoamento do gás é do tipo viscoso. A difusão volumétrica ocorre se existe uma pressão total constante nas duas extremidades do poro capilar e se é formado um gradiente de pressão parcial entre estas extremidades.

O livre caminho médio da maior parte das moléculas de gás é da ordem de 50 a 100 nm, sob condições normais de temperatura e pressão⁽²⁵⁾, e varia diretamente com a temperatura absoluta e, inversamente, com a pressão.

O escoamento viscoso normal pode ser encontrado em materiais cerâmicos e refratários. Por causa do tamanho reduzido dos poros, este escoamento geralmente é laminar, num intervalo grande de taxas de escoamento. Assim considera-se que o concreto tenha o escoamento do tipo laminar à semelhança dos materiais cerâmicos.

A passagem de um fluido através de um material poroso pode ocorrer de várias maneiras:

- a. fluxo laminar,
- b. fluxo turbulento,
- c. difusão molecular.

Embora os três modos sejam aplicáveis aos gases, nesta pesquisa será estudada a passagem do gás, por meios porosos, admitindo-se um fluxo laminar.

O escoamento do gás é laminar desde que sua velocidade não seja demasiado grande e as obstruções, contrações e dobras dos poros não sejam tais que possam ocorrer mudanças repentinas de direções do gás nas linhas de escoamento.

A permeabilidade dos meios porosos é descrita pela lei empírica de D'Arcy: "para um fluido que passa através de um material poroso, a taxa de escoamento é diretamente proporcional ao gradiente de pressão (entrada e saída) e inversamente proporcional à viscosidade dinâmica do fluido"⁽⁴³⁾, ou seja:

$$Q = \frac{K \cdot A \cdot (p_e - p_s)}{\eta \cdot L \cdot p} \quad (2.1)$$

onde:

Q - vazão do fluido (m³/s)

A - área de secção transversal, perpendicular à direção do fluxo (m²)

K - coeficiente de permeabilidade (m²)

η - viscosidade dinâmica do fluido (N.s/m²)

$(p_e - p_s)$ - diferença de pressão (N/m^2)

L - comprimento da amostra (m)

p - pressão aplicada, $[(p_e + p_s) / 2]$, (N/m^2)

K é uma constante que caracteriza a permeabilidade do material poroso e é considerada como "a facilidade com que o fluido atravessa uma superfície de área A , sob um gradiente de pressão conhecido". Portanto, K é uma função do meio e tem a dimensão de $[L^2]$. A unidade associada é o darcy (D) e equivale a 10^{-12} m^2 .

Geralmente a equação que representa a lei de D'Arcy é utilizada para fluidos incompressíveis (como é o caso da água), já que uma das condições para utilizar esta expressão é que o fluxo esteja no estado estacionário, ou seja, que o fluxo, ao longo da amostra, não varie com o tempo.

Quando se usam fluidos compressíveis, no caso o gás, a pressão é diferente a cada ponto do percurso, isto é, a pressão entre a superfície de entrada e de saída do gás no meio varia continuamente com o tempo. Mesmo assim, nesta situação dinâmica, é possível calcular a permeabilidade do material poroso, admitindo que o fluxo seja quase permanente, ou seja, do tipo laminar; que a passagem do gás seja isotérmica e que o gás utilizado seja um gás perfeito.

A forma mais específica da lei empírica de D'Arcy baseia-se na lei de Hagen-Poiseuille que considera o escoamento laminar de um fluido através de um corpo poroso.

Os poros são formados por tubos capilares, de dimensões reduzidas, e o escoamento do fluido através deles se dá em condições estáveis. Então:

$$v = \frac{r^4 \cdot \pi \cdot t \cdot \Delta p}{8 \cdot \eta \cdot L} \quad (2.2)$$

onde:

v - volume do fluido que atravessa a amostra (m^3)

η - viscosidade do fluido no momento do teste ($N.s/m^2$)

r - raio do poro capilar (m)

t - tempo em que o volume de gás atravessa o capilar (s)

Δp - pressão diferencial entre a entrada e saída do capilar ($p_e - p_s$),

(N/m^2)

L - comprimento do capilar (m)

A equação (2.2) só pode ser aplicada a fluidos não compressíveis e, para usá-la para meios compressíveis, o volume v deve ser multiplicado pela pressão absoluta $p = [(p_e + p_s) / 2]$, aplicada ao fluido. Assim, de acordo com a lei de Boyle-Mariotte escreve-se:

$$v \cdot p = \frac{r^4 \cdot \pi \cdot t \cdot \Delta p}{8 \cdot \eta \cdot L} \cdot [(p_e + p_s) / 2] \quad (2.3)$$

O termo que se segue à igualdade representa a vazão do gás através do capilar sob uma pressão média $[(p_e + p_s) / 2]$.

Para uma amostra porosa, isto é, um conjunto muito grande de capilares, é necessário multiplicar a equação (2.3) pelo número de poros N e pela área A da secção transversal da amostra (perpendicular ao sentido de escoamento do gás). Escreve-se então:

$$A \cdot N \cdot v \cdot p = \frac{r^4 \cdot \pi \cdot N \cdot A \cdot t \cdot \Delta p}{8 \cdot \eta \cdot L} [(p_s + p_e) / 2] \quad (2.4)$$

Mas $A \cdot N \cdot v$ é o volume total do gás, igual a V , que atravessa a amostra porosa no tempo t e com uma pressão $\Delta p = (p_s - p_e)$.

Admitindo-se que a porosidade da amostra, ξ , seja definida como a área dos poros, $N \cdot \pi \cdot r^2$, valor adimensional e, ainda, com um valor idêntico ao espaço ocupado pelos poros numa unidade de volume da amostra, a equação (2.4) pode ser reescrita para a forma seguinte:

$$V = \frac{r^2 \cdot \xi}{8} \cdot \frac{A \cdot t}{\eta \cdot L} \cdot \frac{\Delta p (p_s + p_e)}{2p} \quad (2.5)$$

Mas o termo $[(r^2 \cdot \xi) / 8]$ depende só da porosidade do material e é definido como o coeficiente de permeação específico $D_s^{(37,40)}$. Conforme Zagar⁽³⁹⁾, a compressibilidade do gás pode ser desprezada porque o desvio do valor verdadeiro do coeficiente de permeação específico chega ao máximo de 3% e está no limite do erro do procedimento de medida. Por isso, a técnica usada neste trabalho torna-se mais simples. O coeficiente de permeação específico D_s , também denominado K , é calculado pela equação:

$$D_s = K = \frac{\eta}{A} \cdot \frac{Q \cdot L}{\Delta p} \quad (m^2) \quad (2.6)$$

Lembrando que: $Q = V / t$, $\Delta p = (p_e - p_s)$ e que $p_s = p_o$ (pressão atmosférica) chega-se a equação de D'Arcy:

$$K = \frac{Q \cdot \eta \cdot L}{A(p_e - p_s)} \quad (2.7)$$

2.3 PERMEABILIDADE A GÁS: EXPERIMENTOS MAIS RECENTES

Embora os testes de permeabilidade tenham sido realizados há mais de um século, em diversos tipos de materiais, serão mencionadas a seguir as contribuições mais recentes e importantes para amostras de concreto.

Entre os estudos sobre a permeabilidade do concreto a gases, pode-se citar o trabalho de Gräf e Grube⁽³⁰⁾, feito em 1984. Os pesquisadores com intuito de verificar a influência do grau de corrosão e do tempo de cura na permeabilidade do concreto, utilizaram o oxigênio como fluido permeante. Para calcular a permeabilidade do concreto, o volume de gás que atravessa a superfície circular da amostra foi medido do lado oposto do espécime com um medidor de fluxo por borbulhamento. Os autores utilizaram corpos de prova cilíndricos com 150 mm de diâmetro por 50 mm de altura, com diferentes tipos de cimento, assim como diferentes razões A/C (água/cimento)

de 0,5; 0,6 e 0,7. As pressões utilizadas para a pesquisa foram 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 e 2,5 bar. Concluíram que a permeabilidade do concreto depende principalmente da cura e muito mais da razão A/C. A ordem de grandeza encontrada para o coeficiente de permeabilidade foi de 1 a 2.10^{-16} m² para três dias de cura selada e relação A/C abaixo de 0,7.

Em outro trabalho, realizado em 1984, Grube e Lawrence⁽³¹⁾ consideram que os valores dos coeficientes de permeabilidade do concreto devem ter um alto grau de confiança em relação ao controle de qualidade do concreto, desde que a permeabilidade seja um dos parâmetros que afeta a durabilidade. Por causa da ausência de normas, investigaram os resultados encontrados em sete laboratórios que utilizaram o mesmo equipamento, com o objetivo de obter um parâmetro na medida da permeabilidade do concreto ao oxigênio e, além disso, verificar a influência da cura e as proporções dos compostos na mistura. A medida de permeabilidade foi feita em corpos de prova cilíndricos de 150 mm de diâmetro por 50 mm de altura, e a técnica usada foi a da determinação da vazão, para um determinado gradiente de pressão, usando um medidor de fluxo por borbulhamento. Encontraram valores no entorno de 0,001 e 30.10^{-16} m² para o coeficiente de permeabilidade. Observaram que a permeabilidade aumentou com a elevação da razão A/C e a permeabilidade máxima foi determinada em concreto para um consumo de cimento de 300 kg/m³, com razão A/C = 0,7, no tempo de cura de um dia. A permeabilidade mínima foi constatada para um consumo de cimento de 360 kg/m³, A/C = 0,5 e cura de 28 dias.

Outra pesquisa sobre a permeabilidade do concreto foi realizada por Martialay⁽³⁸⁾, em 1985, que acompanhou a evolução da permeabilidade por um período de 20 anos. Para esse experimento utilizou ar sob pressões de 0,39; 0,93; 1,32 e 1,86 bar, corpos de prova cilíndricos com 7cm de altura e 13cm de diâmetro e corpos de prova prismáticos com 10 cm x 10 cm de área e diferentes espessuras. As misturas foram preparadas com $A/C = 0,37$ e o consumo de cimento de 405 kg/m³. Os corpos de prova foram armazenados em câmara com temperatura entre 15 e 25°C e umidade relativa entre 40 a 70%, durante 20 anos. Os testes foram realizados sempre na mesma época do ano. O autor concluiu que a permeabilidade do concreto ao ar aumenta, de forma não linear, com o tempo, dependendo do preparo da amostra e da pressão aplicada no permeâmetro. Para pressões altas, por exemplo 1,86 bar, a permeabilidade no vigésimo ano foi, aproximadamente, 25 vezes maior do que aquela determinada no primeiro ano, enquanto que para pressões baixas, por exemplo 0,39 bar, para a mesma amostra, a permeabilidade chega a ser 10 vezes maior do que a do primeiro ano.

Atkinson⁽¹⁹⁾, em 1985, analisou a permeabilidade a água de amostras produzidas com cimento para observar a lixiviação de radionuclídeos de um repositório final para rejeitos radioativos. O autor publica um quadro com valores do coeficiente de permeabilidade de solos hospedeiros, barreiras construídas e matrizes de imobilização, obtidos por diversos pesquisadores, onde a temperatura de cura foi de 27°C.

Tabela 2-1 Coeficientes de permeabilidade de alguns materiais mais relevantes em repositórios finais para rejeitos radioativos⁽¹⁹⁾.

MEIO GEOLÓGICO	ARGILOSO																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
	CRISTALINO																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
BARREIRA DE ENGENHARIA	CONCRETO	Bom																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									

O trabalho apresentado por Lawrence⁽³⁶⁾ no Congresso Internacional de Química, em 1986, mostra que os parâmetros importantes no controle da permeabilidade são: a umidade relativa e o grau de cura do concreto. O autor faz uma relação entre a permeabilidade do concreto e a sua resistência mecânica, com diferentes tipos de cimento. Observou que, para uma pressão de 2,5 bar, obteve um coeficiente de permeabilidade de aproximadamente 10⁻¹⁶ m², em amostras com 150 mm de diâmetro por 50 mm de altura, A/C entre 0,5 e 0,92 e consumo de cimento entre 199 e 364 kg/m³.

Bamforth⁽²⁰⁾, em 1987, investigou a relação entre os coeficientes de permeabilidade do concreto, usando separadamente o nitrogênio e a água. Para a pesquisa utilizou corpos de prova com 25 mm de altura e 50 mm de diâmetro. A pressão, utilizada tanto para nitrogênio quanto para água, foi de 10,3 bar. O gás sob pressão foi aplicado no topo inferior da câmara e a vazão através do concreto foi medida, usando-se um medidor de fluxo por borbulhamento, colocado no topo superior

da câmara. Três aparelhos foram utilizados para permitir que três amostras fossem testadas simultaneamente. O tempo registrado para que fosse atingido um regime estável foi de 10 minutos. O coeficiente de permeabilidade obtido para o gás foi da ordem de 10^{-18} m^2 e, para água, foi de 10^{-21} m^2 . Há uma grande diferença entre os valores obtidos para fluidos diferentes, e o autor concluiu que existem vários fatores de influência, entre eles a umidade contida no concreto no momento do ensaio e o fator de conversão proposto pela teoria da aderência do gás (gas slippage theory).

O estudo feito por Mills⁽⁴²⁾, em 1987, semelhante ao trabalho de Bamforth, mostra os tipos de parâmetros que influenciam a permeabilidade, assim como a porosidade do concreto. O pesquisador utilizou pressões de 0,69 a 5,5 bar, tanto para o nitrogênio quanto para a água, para determinar o coeficiente de permeabilidade. Os resultados mostraram que o aumento da porosidade implica o aumento da permeabilidade. O coeficiente de permeabilidade encontrado foi de 10^{-16} m^2 , para o gás, e 10^{-18} m^2 , para a água, em concretos com A/C variando de 0,42 a 0,77.

No trabalho de Schönlin e Hilsdorf⁽⁴⁴⁾, realizado em 1987, há uma discussão sobre a avaliação da eficácia do tipo de cura do concreto e, para isso, os autores desenvolveram um método rápido. Esse método, do tipo não destrutivo, mede a permeabilidade da amostra ao ar nas superfícies, o que exige um preparo especial da amostra. O resultado é obtido em um período de aproximadamente 10 minutos. Os experimentos realizados mostram uma correlação entre a permeabilidade e o tempo de cura, a temperatura de cura, o tipo de cimento, a razão A/C e a quantidade de cinza volante adicionada no concreto. O consumo de cimento foi de 240 a 300 kg/m³ de

cimento Portland comum e 300 kg/m³ de cimento Portland de alto-forno, com 68 % de escória. A razão A/C variou de 0,42 a 0,60, dependendo do tipo de cimento. Para os concretos realizados com adição de cinza volante, a razão A/C e o consumo de cimento foram determinados de acordo com a consistência do concreto fresco em relação às misturas do cimento Portland comum. A determinação da permeabilidade ao ar, além de ser rápida, é feita sob as condições ambientais. Os valores obtidos foram similares aos de outros autores, isto é, no entorno de 10^{-16} m², para todos os traços de concreto.

Cabrera e Lynsdale⁽²²⁾, em 1988, descreveram experiências de determinação da permeabilidade de concreto e argamassa ao oxigênio e observaram que o coeficiente de permeabilidade está no entorno de 10^{-16} m² para misturas de A/C = 0,44 e curas efetuadas sob diversas condições: úmida, seca e com as amostras protegidas com diferentes tipos de membranas. Concluíram que as perdas de água das amostras, nos diversos tipos de cura, podem ser apreciáveis, embora não haja reflexos acentuados no valor final da permeabilidade para baixas idades.

Kollek⁽²³⁾, em 1989, publicou uma recomendação acerca da medida da permeabilidade do concreto ao oxigênio, baseada no método usado pelo CEMBUREAU. Observou que, em amostras com composições normais, onde o consumo de cimento varia de 200 a 450 kg/m³, o coeficiente de permeabilidade, para pressões de entrada de 1,5 a 3,5 bar, está entre 10^{-14} e 10^{-19} m². Nesse trabalho evidencia a necessidade de se observar os aspectos de precisão. Para cinco medidas realizadas na mesma amostra, obteve uma variação de 2%. O valor de K, para a mesma amostra, medido em diferentes laboratórios, teve uma variação de

aproximadamente 4% e geralmente esta prática resulta em variações de até 2 %. Observou que a variação da permeabilidade em diferentes amostras, feitas a partir de uma mesma mistura, não chega a 30%. Concluiu que as variações não refletem os desvios de medidas repetitivas do método, mas, sim, mostram as dificuldades de organizar e de fazer os ensaios com precisão, em diferentes laboratórios, apesar das variáveis como homogeneidade de mistura, qualidade e propriedade dos materiais primários. O autor recomenda ser necessário seguir com seriedade o método de medida e realizar os ensaios com o menor número de variáveis.

Dhir e outros²⁰, em 1989, mediram o coeficiente de permeabilidade ao ar e à água em corpos de prova de diâmetros de 50 e 100 mm e altura de 50 mm, com pressões variando entre 1,7 a 10,2 bar, obtendo esse resultado, tanto para a água como para o ar, de 10^{-17} m^2 . Dessa forma, o objetivo desse estudo foi desenvolver uma metodologia que pudesse relacionar a permeabilidade tanto para o ar quanto para a água, além de pesquisar os fatores que afetam as características do concreto.

Em 1991, Hearn e Mills⁽³²⁾ utilizaram corpos de prova de concreto, cilíndricos, com 100 ou 150 mm de diâmetro e 25 a 60 mm de altura. Utilizaram como fluido permeante o gás nitrogênio. Para a determinação do coeficiente de permeabilidade foram usados dois permeômetros equipados com um conjunto de buretas de gás com várias capacidades. Os testes para que o gás pudesse atingir um regime de permeação estável foram de aproximadamente 15 minutos, por amostra. O coeficiente de permeabilidade determinado foi da ordem de 10^{-16} m^2 .

A pesquisa realizada por Plecas e outros⁽⁵⁰⁾, em 1992, tem como ponto principal melhorar a forma de tratamento e condicionamento de rejeitos radioativos, assim como desenvolver a qualidade do programa de segurança para o futuro centro de estocagem de rejeitos radioativos na Croácia. Os resultados apresentados no trabalho são exemplos dos resultados obtidos para argamassas e concretos com 10 anos de idade. Para determinar a permeabilidade do concreto, foram utilizados corpos de prova cilíndricos com diâmetro e altura iguais a 10 cm. Por exemplo: para amostras curadas por 28 dias, a 20°C e em cura úmida, o valor do coeficiente de permeabilidade encontrado é de 10^{-16} m^2 . O ensaio foi realizado a uma temperatura de 20°C, com umidade relativa do ar de 65%. O nitrogênio foi usado como fluido permeante, sob pressão de 1 bar, e o resultado obtido foi semelhante ao alcançado por outros pesquisadores.

Pode-se verificar que, nos trabalhos citados, o coeficiente de permeabilidade dos concretos varia entre 10^{-14} e 10^{-21} m^2 . A variação é, de certo modo, muito grande porque o tipo de cimento, o consumo de cimento, o modo de cura e o método de preparo da amostra antes do ensaio são diferentes de um trabalho para outro.

2.4 PERMEABILIDADE DOS COMPONENTES DO CONCRETO

Antes de estudar a permeabilidade de qualquer material, é preciso fazer algumas distinções conceituais entre permeabilidade, porosidade e capilaridade.

Permeabilidade: é a propriedade que indica uma maior ou menor facilidade de passagem de um fluido (líquido ou gás) através do material, aplicando um gradiente de pressão entre duas de suas extremidades.

Porosidade: é a propriedade que estabelece uma relação entre o volume do corpo e a quantidade de poros.

Capilaridade: é o fenômeno da ascensão de um líquido nos poros capilares de um material, pela ação da tensão superficial.

Os três conceitos são relacionados entre si como mostra a Figura 2.1.

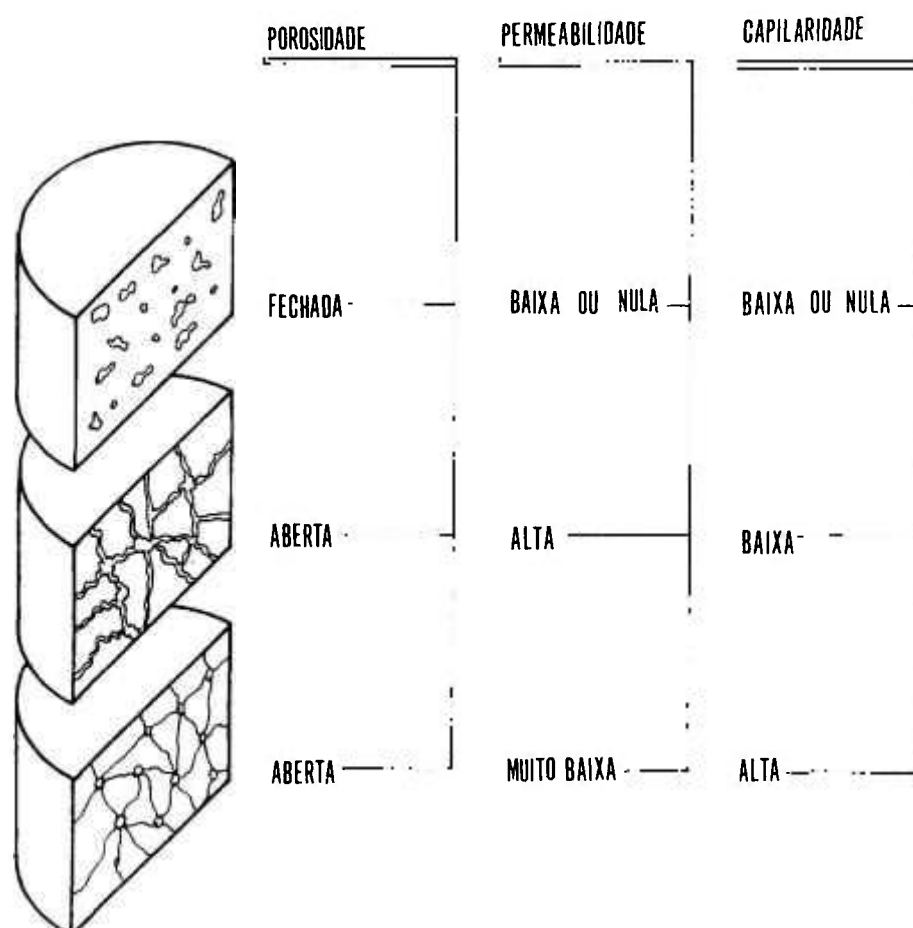


Figura 2.1 Relação entre a permeabilidade, a porosidade e a capilaridade do concreto ⁽⁷⁾.

2.4.1 Permeabilidade da pasta

Muitos pesquisadores têm estudado a relação existente entre a permeabilidade e o volume dos poros. Entre eles Powers⁽⁵¹⁾, o primeiro que investigou esta relação; Nyame⁽⁴⁹⁾, que publicou trabalho sobre a influência do diâmetro máximo dos poros contínuos na permeabilidade; Hughes⁽³³⁾ que, na pesquisa sobre a influência dos poros de diâmetro médio na permeabilidade, utilizou a equação de Poiseuille; Metha⁽⁴¹⁾, que averiguou a distribuição do tamanho dos poros através da fórmula empírica que expressa a relação entre a permeabilidade e o volume dos poros.

Sabe-se que a permeabilidade da pasta de cimento é a maior responsável pela permeabilidade do concreto. A permeabilidade da pasta varia com o progresso da hidratação. Na pasta recém-formada, o escoamento de um fluido depende do tamanho e forma dos poros e o teor de água livre nos poros comunicantes. À medida que ocorre a hidratação, a permeabilidade se reduz porque o volume do gel do cimento (incluindo os seus poros) chega a ser o dobro do volume do cimento não hidratado. Dessa forma, o gel de cimento passa a ocupar um espaço maior do que aquele ocupado pela água.

Em pastas endurecidas, após um período de tempo, a permeabilidade depende do tamanho, forma e concentração de partículas do gel e da descontinuidade, ou não, dos poros capilares⁽⁴⁵⁾.

A pasta tem a função de envolver os agregados, preencher os vazios e dar consistência à mistura do concreto fresco. Após o endurecimento, deve aglutinar os agregados de maneira a impermeabilizar e dar maior resistência mecânica ao material.

A permeabilidade da pasta de cimento é influenciada por:

a. Razão A/C

Na pasta de cimento, verifica-se que a permeabilidade é menor quanto menor for a razão A/C. Portanto, no processo de hidratação, o tamanho e a continuidade dos poros interferem no coeficiente de permeabilidade.

Quando a razão A/C for maior que 0,60, a permeabilidade aumenta por ser a porosidade capilar mais alta. Assim, para reduzir o coeficiente de permeabilidade da pasta, basta diminuir a razão A/C, utilizando uma quantidade adequada de cimento, compactando a mistura de forma correta e curando o material em ambiente adequado.

Goto e Roy⁽²⁹⁾, em trabalho realizado em 1981, observaram que pastas de cimento, preparadas com razões A/C de 0,35; 0,40 e 0,45, curadas sob imersão em solução aquosa de hidróxido de cálcio, em temperaturas de 27°C e 60°C, apresentaram uma permeabilidade diferenciada à água. As amostras curadas em temperatura de 60°C mostraram ser mais permeáveis que aquelas curadas a 27°C. Este fato pode ser explicado da forma seguinte: o calor mais elevado acelerou o processo de hidratação do cimento e os autores esperavam que as amostras com porosidade elevada apresentassem permeabilidade maior, o que não ocorreu. Isto explica o fato de que, apesar do volume de poros ser grande, a permeabilidade pode ser baixa, se muitos poros forem do tipo fechado. Os pesquisadores observaram que o conceito de volume de poros abertos é o mais importante no estudo da permeabilidade e que o efeito da temperatura de cura é semelhante ao do tempo de cura, embora não seja idêntico. Isto foi observado para qualquer uma das razões A/C.

Garboczi⁽²⁶⁾ determinou o valor do coeficiente de permeabilidade para pasta de cimento endurecido, em aproximadamente $6 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$, para um tempo de cura de 28 dias e uma razão A/C de 0,4.

b. Tempo de cura

A cura dos materiais hidráulicos, como o cimento, pode ser feita sob condições constantes ou variáveis de temperatura, pressão, umidade e outros fatores que possam vir a acelerá-la, retardá-la ou modificá-la.

A permeabilidade da pasta, argamassa ou concreto é influenciada, entre outros fatores, pelo procedimento de cura. Goto⁽²⁹⁾ observou que, nas mesmas condições de cura, a porosidade de uma amostra diminui com o aumento do grau de hidratação do cimento, ou seja, com o tempo de cura. A hidratação contínua dos grãos de cimento resulta no desenvolvimento da cristalização que, por sua vez, reduz a quantidade de vazios, aumentando a impermeabilidade do material solidificado.

Para ensaios de permeabilidade deve-se evitar a cura de corpos de prova imersos em água, porque pode ocorrer a precipitação de hidróxido de cálcio. Desta forma, introduz-se solução de cal na água para evitar a lixiviação do hidróxido de cálcio. Se a cura da pasta é feita ao ar livre, a permeabilidade pode ser grande em comparação com a cura feita em câmara úmida. Ao ar livre, a evaporação da água dos poros reduz a possibilidade de se formar uma massa mais compacta e com poucos poros abertos.

A Tabela 2-2 mostra o efeito do tempo na permeabilidade da pasta de cimento com $A/C = 0,51^{(44)}$.

Tabela 2-2 Influência do tempo de cura na permeabilidade pasta de cimento com $A/C = 0,51^{(44)}$

Tempo de cura (dias)	$K (m^2)$	Observações
pasta fresca	10^{-12}	independente da A/C
1	10^{-15}	
3	10^{-16}	poros capilares interconectados
4	10^{-17}	
7	10^{-18}	
14	10^{-19}	
28	10^{-20}	
100	10^{-23}	Poros capilares descontínuos
240 (hidratação máxima)	10^{-25}	

c. Outros fatores

A permeabilidade da pasta de cimento não depende só da porosidade. Depende também do tamanho, distribuição e continuidade dos poros. Embora o gel de cimento tenha uma porosidade de 28%, sua permeabilidade é de $7 \cdot 10^{-23} m^2^{(45)}$. Isto é resultante da textura fina da pasta, onde os poros e as partículas sólidas são pequenos e numerosos.

A dimensão dos grãos de cimento não hidratados afeta a porosidade da pasta. Em misturas, com a mesma razão A/C , nas quais o cimento seja muito fino (diâmetro de grão muito pequeno), a porosidade da pasta endurecida resultará mais baixa (ver Figura 2.2).

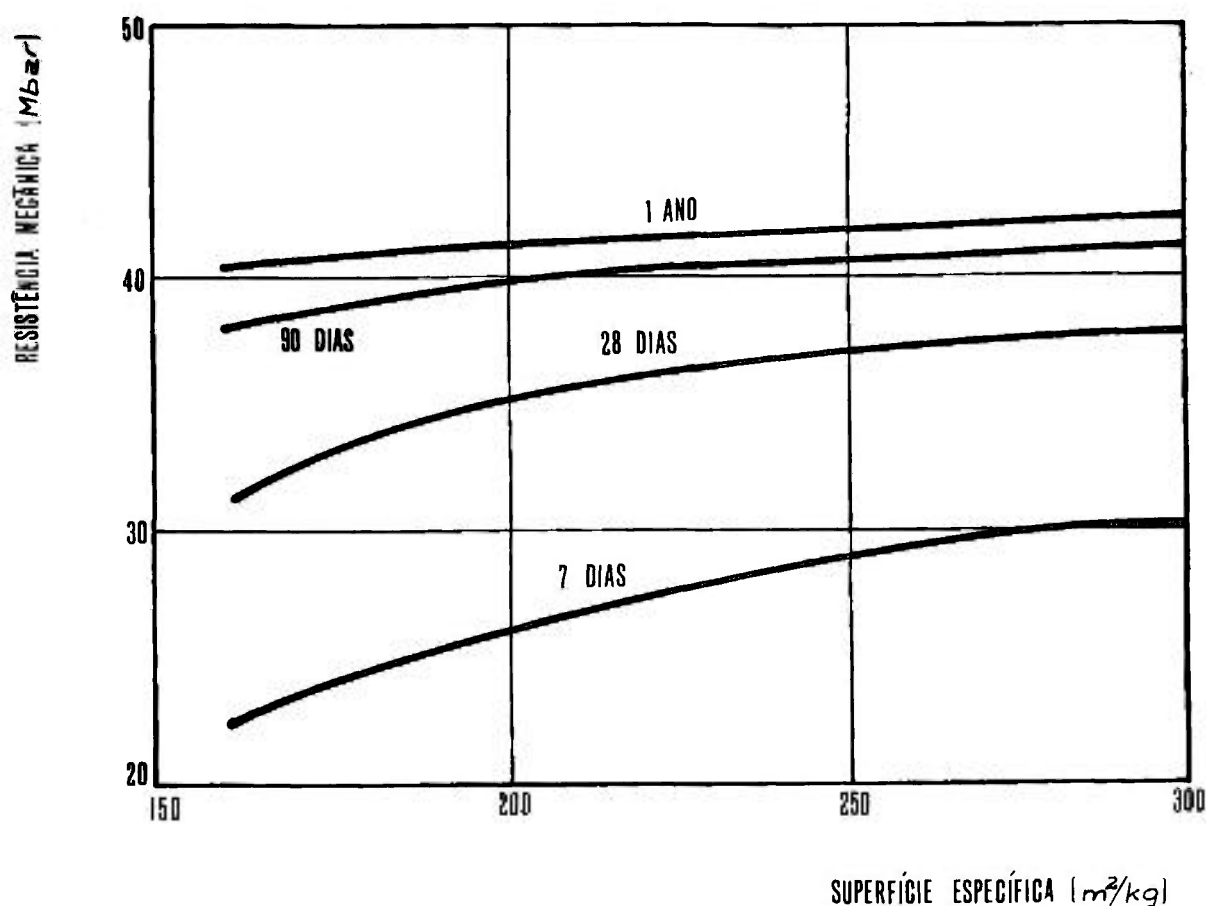


Figura 2.2 Relação entre a resistência do concreto a diferentes idades e as dimensões dos grãos de cimento⁽⁴⁵⁾.

Deve-se observar que muitos parâmetros podem influenciar a permeabilidade da pasta: consumo de cimento por m³ de concreto, finura do cimento, razão A/C, tipo e condições de cura etc.

De acordo com a literatura⁽⁵⁸⁾, observa-se que o cimento Portland de alto-forno tem algumas vantagens por causa da sua composição. A permeabilidade das pastas de cimento de alto-forno é menor do que a das pastas de cimento Portland comum, nas mesmas condições, resultando assim em durabilidade maior. Apesar da permeabilidade

depende da porosidade total, em termos de praticidade, considera-se que a permeabilidade depende somente da porosidade capilar. Assim, embora o concreto confeccionado com esse tipo de cimento tenha uma porosidade total maior (por causa de quantidade maior de poros de gel), o volume de poros capilares é maior nas pastas de cimento Portland comum. A lixiviação de hidróxido de cálcio na pasta de cimento de alto-forno endurecido é mais reduzida que em pastas de cimento Portland comum; além disso, este cimento é mais resistente ao ataque a sulfatos⁽³⁸⁾. Outra vantagem é ter a propriedade de ligante hidráulico muito resistente, aumentando a resistência do concreto.

2.4.2 Permeabilidade dos agregados

O tamanho e a continuidade dos poros influenciam as propriedades físicas e químicas dos agregados. As características dos poros afetam a resistência mecânica dos agregados, controlam a absorção da água, a permeabilidade, determinam a qualidade da aderência com o cimento e, conseqüentemente, afetam a durabilidade do produto final.

Comparando-se a porosidade capilar de pastas de cimento no concreto endurecido, que atinge cerca de 30 a 40%, com o volume dos poros dos agregados naturais, verifica-se que a porosidade capilar do agregado é inferior a 3%, em sua maioria, excedendo raramente os 10%. O motivo pelo qual alguns agregados possam ter uma porosidade tão baixa quanto 10% e uma permeabilidade maior que uma pasta de cimento, deve-se ao tamanho dos poros capilares, que são normalmente maiores⁽⁴⁰⁾.

A Tabela 2-3 mostra a relação entre o coeficiente de permeabilidade dos agregados e das pastas de cimento hidratado (relação A/C entre 0,42 a 0,71)⁽⁴⁰⁾.

Tabela 2-3 Equivalência entre a permeabilidade da pasta de cimento (A/C de 0,42 0,71) e de agregados naturais⁽⁴⁰⁾

Tipo de rocha	Permeabilidade (m ²)	Razão A/C
Quartzo	$8,24 \cdot 10^{-19}$	0,42
Mármore	$2,39 \cdot 10^{-18}$	0,48
Mármore	$5,77 \cdot 10^{-17}$	0,66
Granito	$5,35 \cdot 10^{-16}$	0,70
Arenito	$1,23 \cdot 10^{-15}$	0,71
Granito	$1,56 \cdot 10^{-14}$	0,71

2.4.3 Influência da aderência da pasta com o agregado

Sendo introduzido um elemento de permeabilidade baixa, na pasta de cimento, o agregado, para formar o concreto, este teoricamente apresenta uma permeabilidade baixa. Na prática isso nem sempre acontece porque o coeficiente de permeabilidade depende, além da razão A/C, da dimensão máxima característica do agregado. Assim, esse descompasso entre teoria e prática pode ser atribuído às microfissuras existentes na zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado. A zona de transição pode ser definida como uma película que tem uma espessura de 10 a 50 μm que fica ao redor do agregado graúdo, com porosidade no entorno de 50% em relação à pasta de cimento.

A zona de transição é fraca e vulnerável à fissuração, no processo inicial de hidratação, por causa das transformações que ocorrem por secagem, por retração térmica ou por cargas aplicadas externamente. Além disso, as fissuras nessa zona são largas, com diâmetros maiores quando comparados com os poros capilares da pasta, interferindo na ligação entre a pasta e o agregado, aumentando dessa forma a permeabilidade⁽⁴⁰⁾. Pode-se concluir então que, para obter uma permeabilidade baixa,

os concretos devem ser feitos com misturas de agregados, gráudo e miúdo, com superfície específica convenientemente reduzida e razão A/C tão baixa quanto possível⁽²¹⁾.

Além dos motivos citados, a quantidade de água interfere também na trabalhabilidade da mistura. Sabe-se que água em demasia pode aumentar a trabalhabilidade, mas tende a produzir zonas de acúmulo de água entre a pasta e os agregados gráudos, resultando em vazios que aumentam a permeabilidade do corpo solidificado. Entende-se então que a razão A/C está diretamente ligada à permeabilidade do concreto.

O grau de umidade do agregado, no momento da mistura, pode reduzir ou aumentar a exsudação. Feito o cálculo da quantidade de água necessária para a hidratação de cimento, portanto fixando-se a razão A/C, os agregados poderão absorver parte dessa água, de acordo com o teor de umidade. A Figura 2.3 mostra a possibilidade de ocorrência de uma exsudação quando são usados agregados com diferentes graus de umidade⁽⁴⁵⁾.

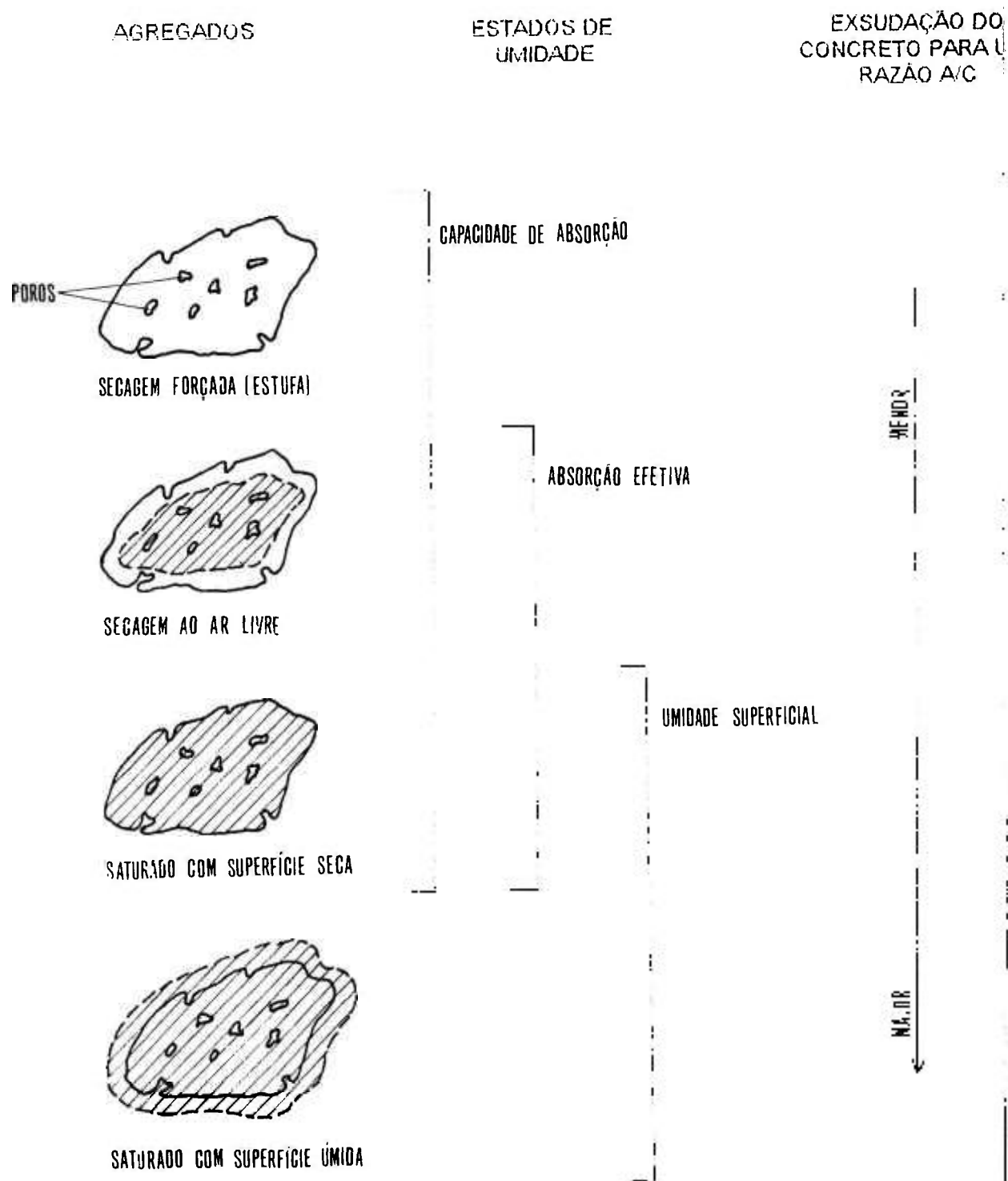


Figura 2.3 Agregados com diferentes graus de umidade ⁽⁴⁵⁾

Capítulo três

3.1 CÂMARA DE PERMEABILIDADE - CONSTRUÇÃO E FUNCIONAMENTO

Um dos objetivos do presente trabalho foi projetar, confeccionar e montar a câmara de permeabilidade e o sistema de medidas, para testar materiais hidráulicos.

Não existindo nenhuma metodologia padronizada para a determinação da permeabilidade do concreto a gás, optou-se pelo procedimento experimental utilizado no Centro de Estudos Nucleares de Saclay, na França⁽³⁴⁾.

A câmara de permeabilidade foi inteiramente confeccionada e montada no IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares), semelhante à câmara construída por Gräf e Grube⁽³⁰⁾, com certas adaptações. O sistema de medidas, como um todo, não é encontrado no mercado brasileiro e poderá servir para ensaios de

concreto, argamassa e pasta de cimento, para fins de determinação de certas propriedades ligadas à área nuclear, bem como na engenharia da construção civil, como mostra este trabalho.

3.2 DESCRIÇÃO DA CÂMARA

A câmara de permeabilidade tem forma cilíndrica e permite que se testem corpos de prova com 150 mm de diâmetro e 50 mm de altura.

O corpo da câmara é composto por dois semi-anéis de aperto, feitos de aço inoxidável (Figura 3.1), e dois distanciadores de PVC (Figura 3.2). Os semi-anéis são ajustados ao corpo de prova com dois parafusos Allen de cabeça cilíndrica, em aço carbono.

Para vedar a superfície lateral do corpo de prova é usado um anel de borracha (Figura 3.3), com densidade de 50 shore, marca Elastin, que permanece ajustado entre a amostra e os semi-anéis. Esse anel possui bordas, nos dois topos, que permitem vedar o sistema com adequação maior quando tocam as flanges de fechamento (Figura 3.4).

Nos dois topos da câmara, são usadas flanges (superior e inferior), com 230 mm de diâmetro, feitas de aço inoxidável. Em cada uma dessas flanges existem seis furos, simetricamente distribuídos, onde são colocados parafusos Allen, de cabeça cilíndrica, que fecham hermeticamente a câmara.

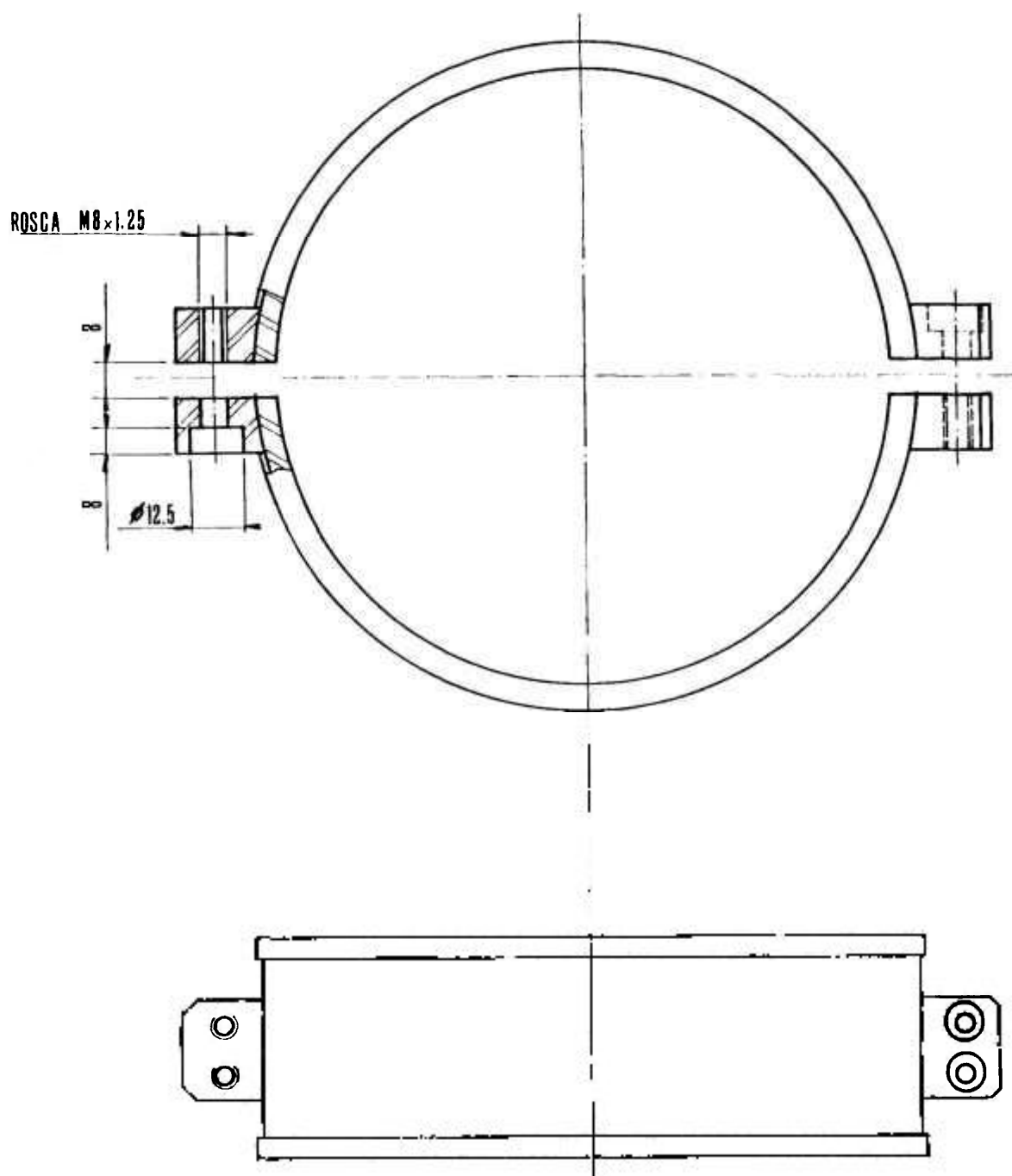


FIGURA 3.1 - ANEL DE APERTO FEITO DE AÇO INOX

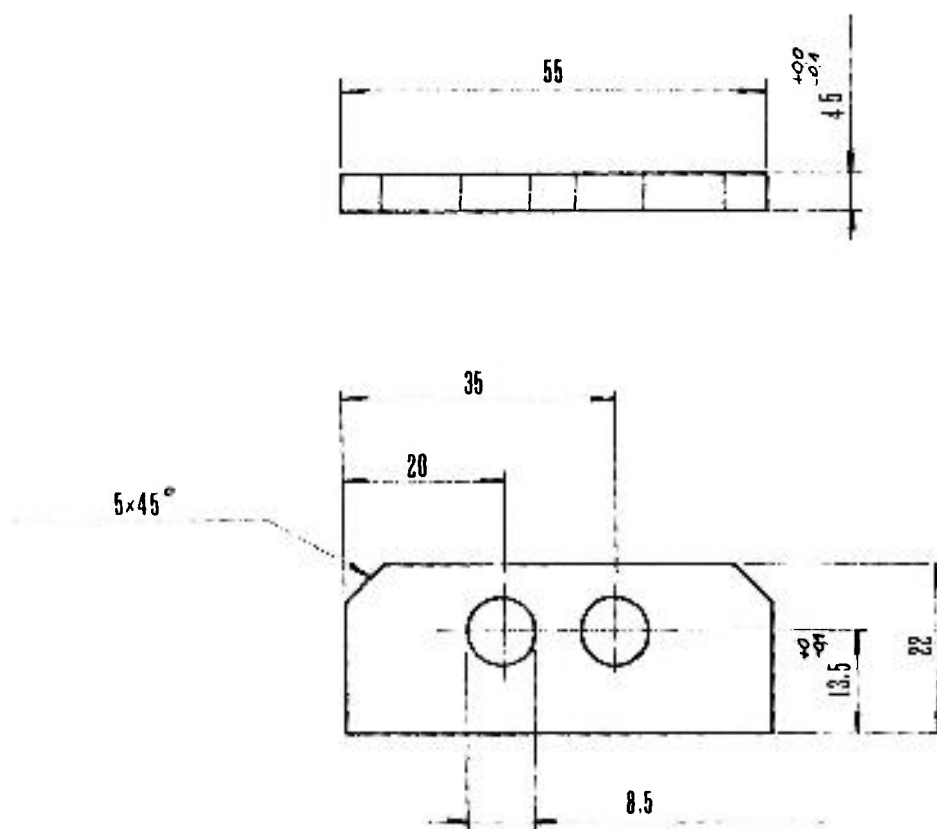


FIGURA 3.2 - DISTANCIADOR DE PVC

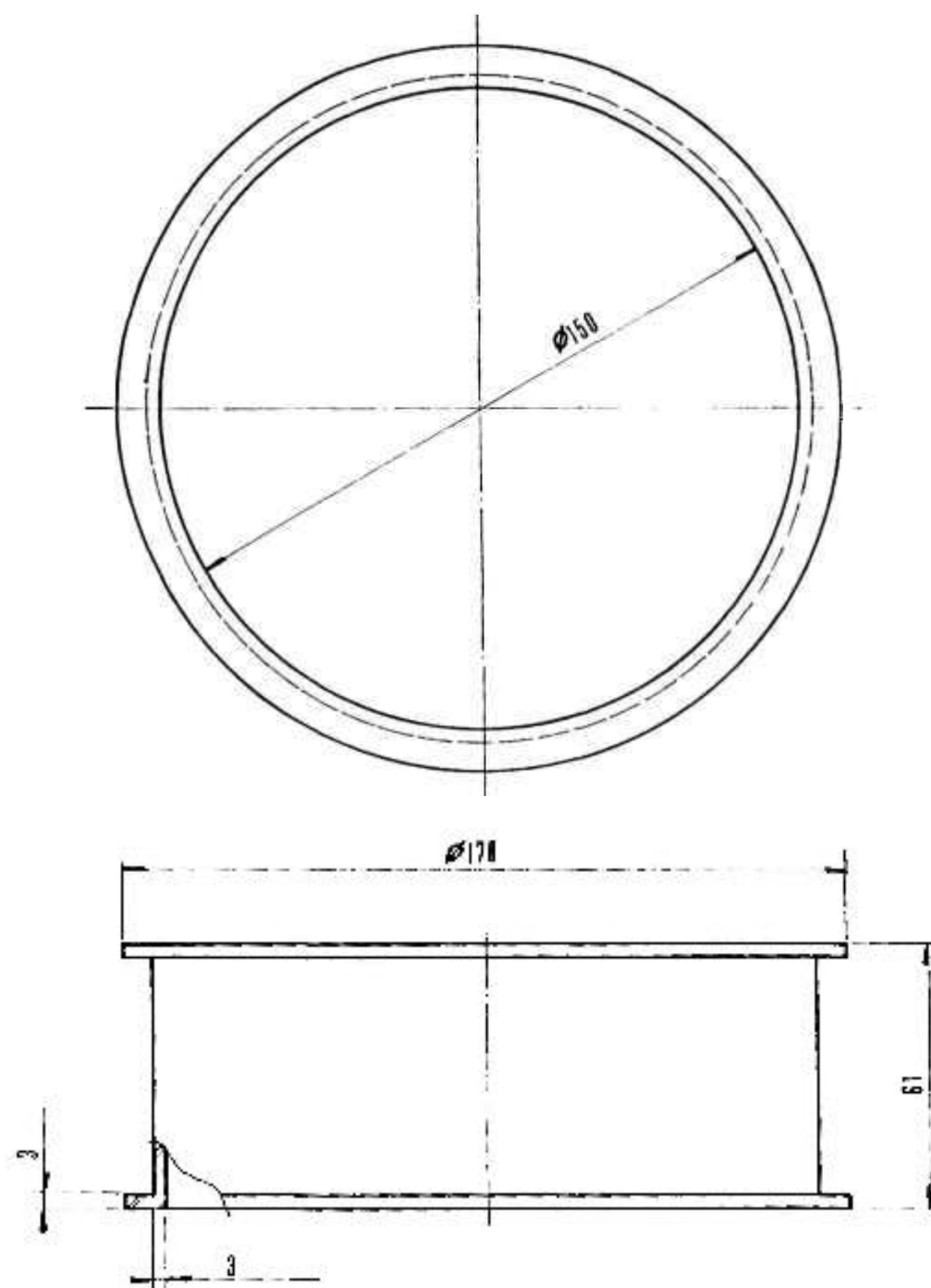


FIGURA 3.3 - BORRACHA DE VEDAÇÃO

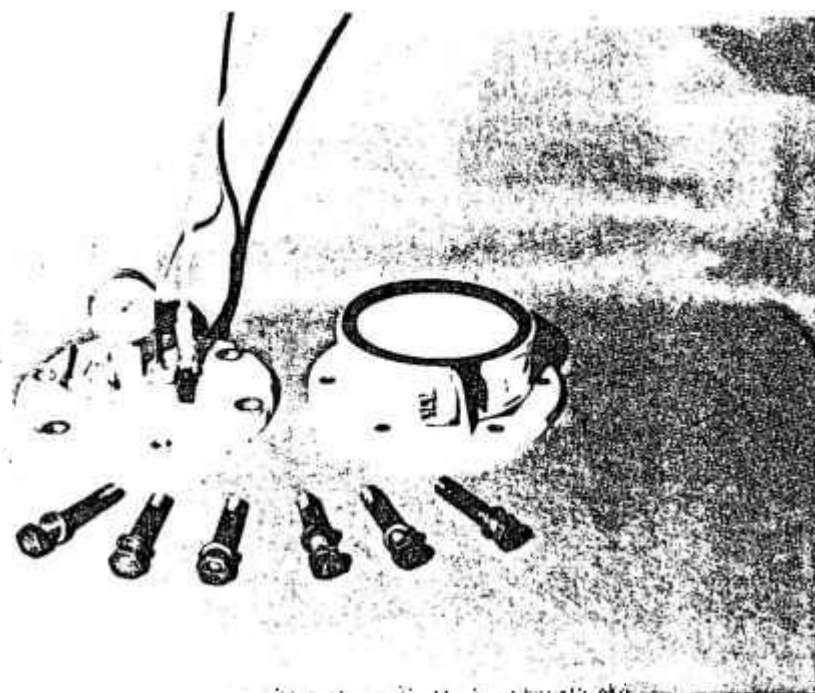


Figura 3.4 Corpo de prova, revestido com o anel de borracha, dentro da câmara de permeabilidade.

Na flange superior estão instalados:

1. um manômetro, marca White Martins, que permite controlar a pressão, dentro da câmara de permeabilidade, entre 0 a 15,69 bar;
2. duas válvulas tipo "toggle", marca Whitey, conectadas por um adaptador para tubos, feito de latão, marca Swagelok, uma que serve para a insuflação e outra para a descompressão do gás, em caso de necessidade. Na válvula de entrada do gás está acoplada uma mangueira de polietileno proveniente do cilindro de gás. Na saída do cilindro de gás existe um regulador de pressão em aço inoxidável, marca Gasotec, composto por dois manômetros de 0 a 200 bar.

3. um transdutor de pressão piezoresistivo, tipo 4 AP-26, marca IOPE Instrumentos de Precisão Ltda, com precisão de 0,6%. Este transdutor permite conhecer a variação de pressão do gás na câmara.

A Figura 3.5 mostra a câmara com detalhe das partes instaladas na flange superior.

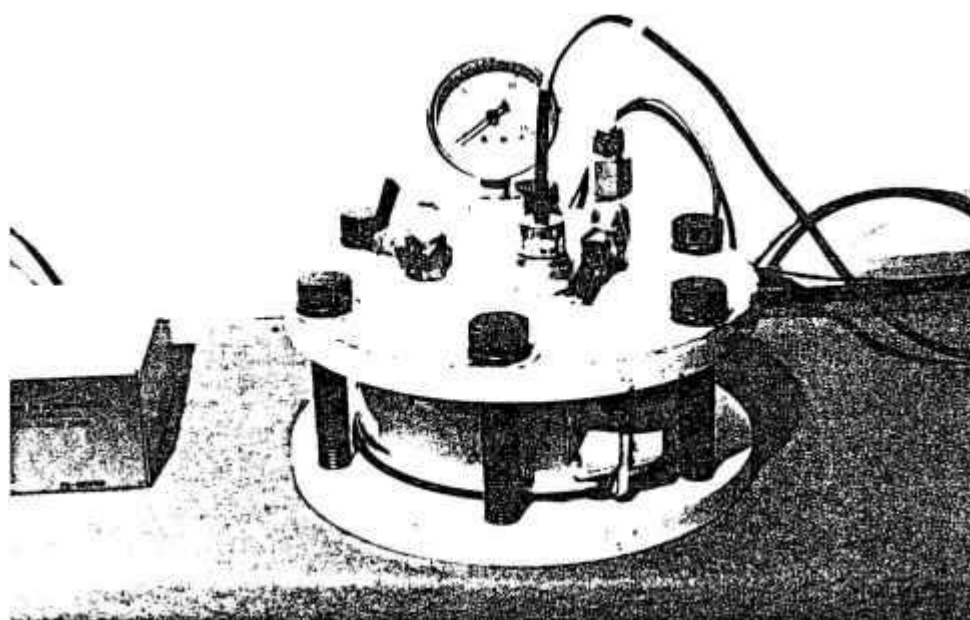


Figura 3.5 Detalhe das partes instaladas na flange superior da câmara de permeabilidade.

Na flange inferior, no seu centro geométrico, existe um furo com 50 mm de diâmetro por onde sai o gás para o meio ambiente, após permear o corpo de prova.

Como pode ser visto na Figura. 3.6, a câmara tem um espaço vazio, com volume V , entre a superfície do topo superior do corpo de prova e a flange superior. Este espaço vazio corresponde a um volume de $71,51 \text{ cm}^3$.

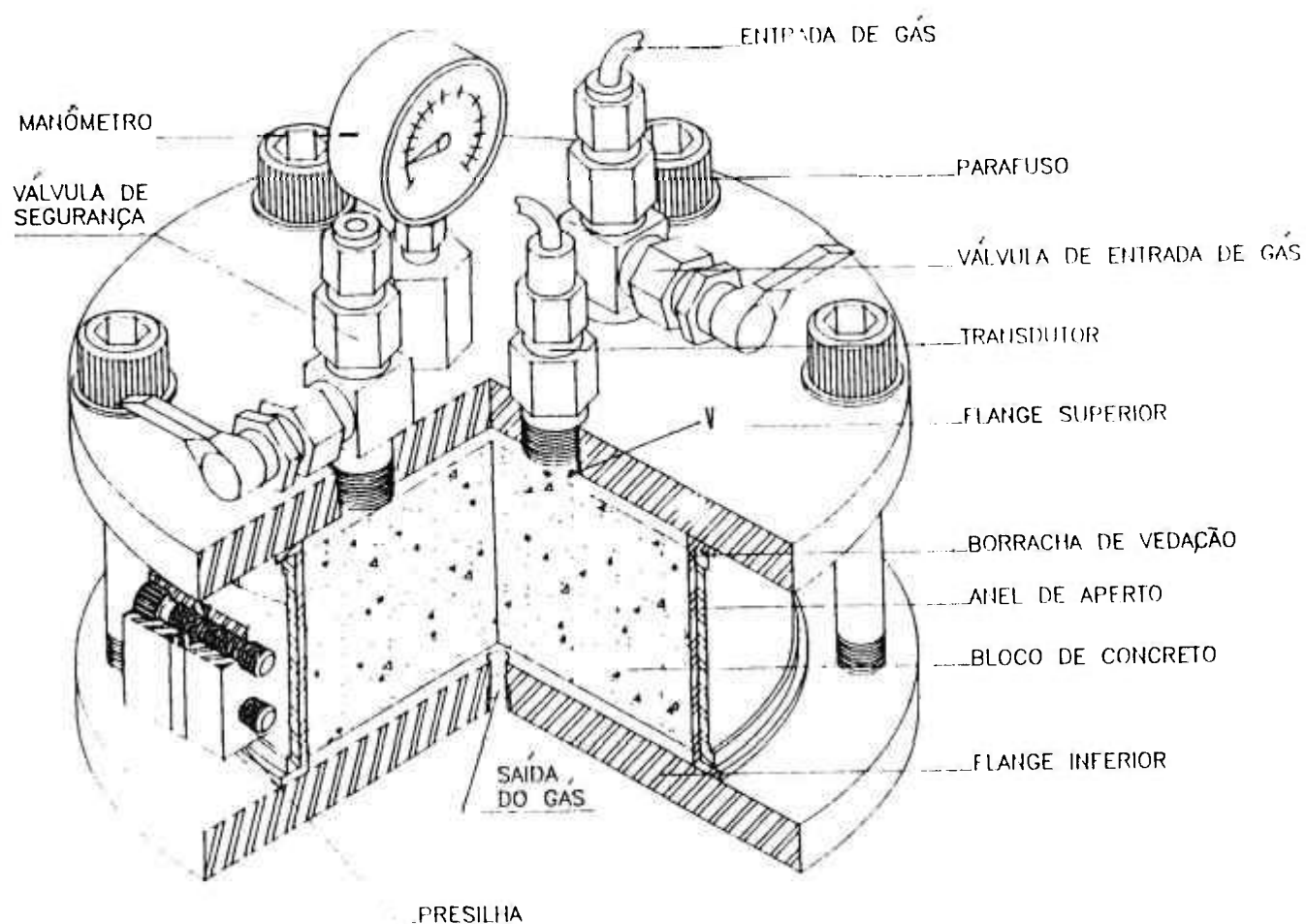


Figura 3.6 Câmara de permeabilidade com o corpo de prova onde é visto o espaço V, existente entre a flange superior e a amostra.

3.3 SISTEMA DE MEDIDAS E MODO DE OPERAÇÃO

O sistema de medidas é mostrado na Figura 3.7.

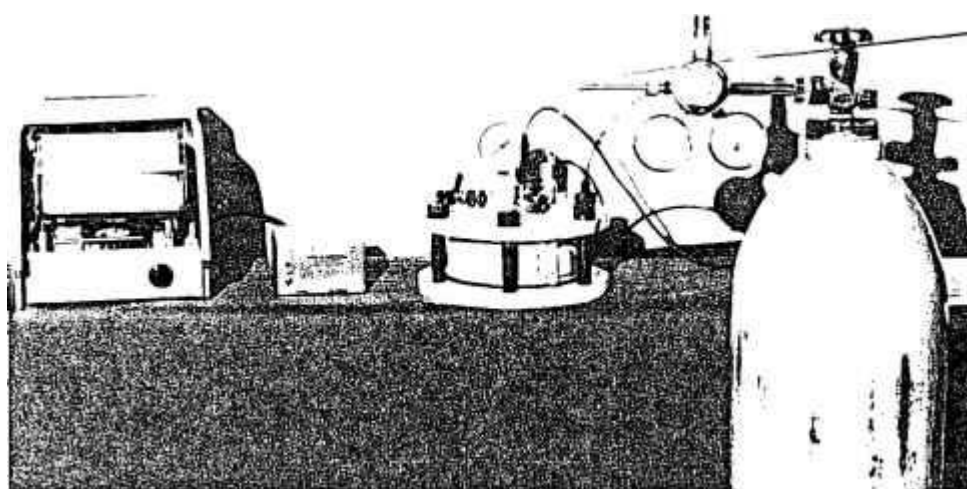


Figura 3.7 Sistema de medidas de permeabilidade a gás para materiais hidráulicos.

Os elementos essenciais são:

1. um cilindro (bujão) de gás de 6.600L que alimenta a câmara de permeabilidade com nitrogênio;
2. um manômetro duplo acoplado à saída do cilindro, marca Gasotec, de 0 a 200 bar;
3. um amplificador de sinal, construído na Divisão de Eletrônica do IPEN-CNEN/SP;

4. um transdutor de pressão piezoresistivo;
5. um graficador, onde é registrada a variação da pressão de gás na parte superior da câmara, marca Necti/Niter - Texas Instruments Incorporated, que opera com velocidades variáveis.

O sistema opera numa sala com condições de temperatura, pressão e umidade controladas. A temperatura, que varia entre 20 a 24°C, é controlada com um condicionador de ar e a umidade é mantida no intervalo de 60 a 70%, com o auxílio de um desumidificador com controlador de umidade. A pressão atmosférica é medida com barômetro, marca Oakton (aneroid barometer), de 930 a 1060 mbar.

Para ajustar o graficador a um valor de pressão, usa-se um corpo "cego", confeccionado em aço inox, com as mesmas dimensões das amostras que são testadas. Parte-se de valor zero, que corresponde à pressão atmosférica e, depois da injeção de gás, ajusta-se pressão desejada. A Figura 3.8 mostra o corpo de aço antes da montagem.

A estanqueidade da câmara de permeabilidade também é testada com o corpo metálico. Coloca-se o corpo de aço na câmara e injeta-se o gás sob determinada pressão. O sistema é mantido neste estado por 24 horas. Considera-se que a câmara é estanque, se a pressão se mantiver a mesma nesse intervalo de tempo.

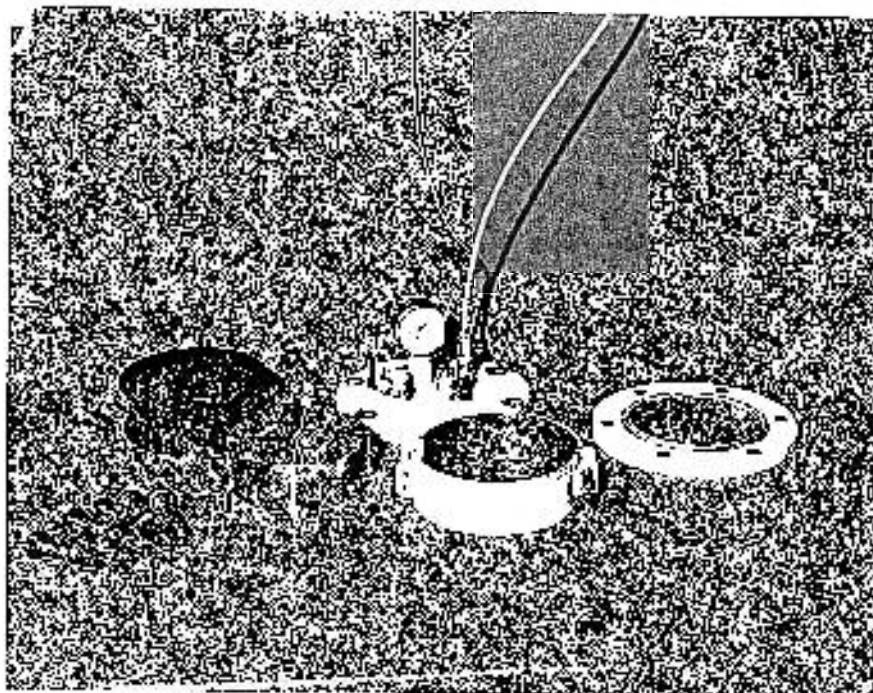


Figura 3.8 Peças para a montagem da câmara de permeabilidade onde se vê um corpo de aço inox usado para ajustes do sistema de medidas.

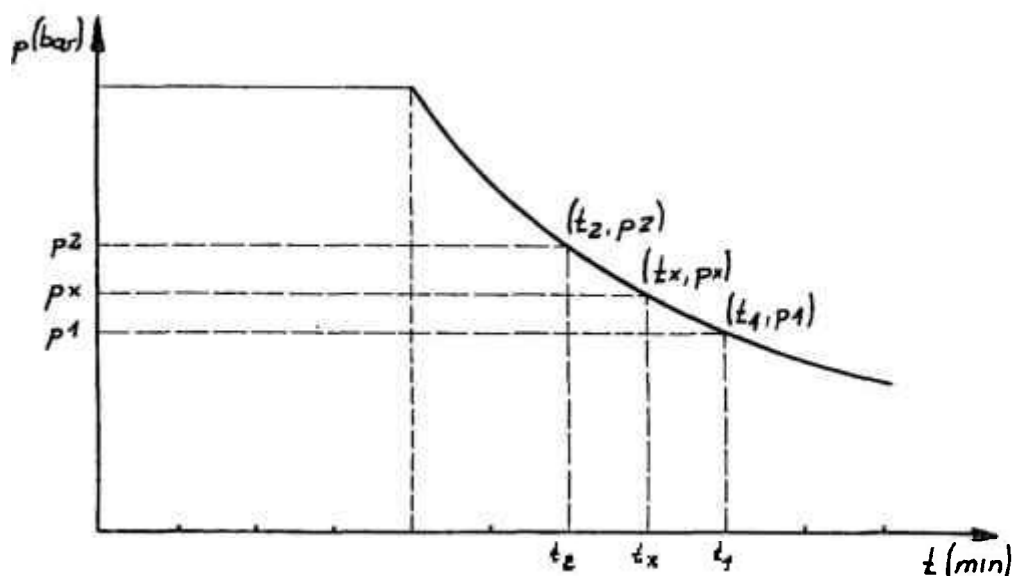
Uma vez ajustados todos os parâmetros, o gás é injetado na câmara com a pressão desejada. Após determinado tempo, de aproximadamente 10 minutos, o escoamento do gás através da amostra passa a atingir um regime estável. O tempo decorrido entre a injeção do gás e a estabilização de escoamento depende muito do grau de permeabilidade da amostra. Em amostras mais permeáveis, este tempo é menor.

Após alcançar um regime de escoamento estável, a injeção do gás é interrompida. Após a suspensão da alimentação do gás, a pressão na câmara de permeabilidade cai com o passar do tempo. Esta variação de pressão na câmara é registrada no gravador, continuamente, em função do tempo, $p = f(t)$. A velocidade

do papel usada foi de 1,9 cm/min. A determinação da permeabilidade da amostra testada é feita a partir da curva de decaimento da pressão.

3.4 PROCEDIMENTO PARA A OBTENÇÃO DOS RESULTADOS

A curva que se obtém, como resultado da medida da pressão na parte superior da câmara de permeabilidade, é do tipo:



Para calcular o valor do coeficiente de permeabilidade, K , é necessário admitir algumas hipóteses:

- o gás utilizado é um gás perfeito;
- o escoamento é isotérmico;
- a todo instante, o regime de escoamento dentro da amostra é quase permanente.

As duas primeiras hipóteses permitem calcular o fluxo de gás, Q , sob uma pressão média $[(p_e + p_s) / 2]$, de modo que:

$$Q = \frac{2 \cdot V}{(p_e + p_s)} \cdot \frac{dp}{dt} \quad (3.1)$$

onde:

Q - fluxo do gás sob uma pressão média $[(p_e + p_s) / 2]$, (Q em m^3 / s ; p_e e p_s em bar)

V - volume disponível no permeâmetro (entre a flange superior e a amostra, $V = 71,51 \text{ cm}^3$)

dp/dt - a inclinação da curva $p = f(t)$ (bar/s)

Se for considerado um fluxo do gás que escoar na direção do eixo OZ, perpendicular a um elemento de superfície A da amostra, pode-se escrever que:

$$Q = \frac{K}{\eta} \cdot A \cdot \frac{dp}{dz} \quad (3.2)$$

onde:

A - superfície de escoamento (m^2)

$Z = L$ - altura da amostra no eixo OZ (m)

Integrando a equação acima, obtém-se:

$$Q \int_0^L dZ = \frac{K}{\eta} \cdot A \int_{p_e}^{p_s} dp$$

$$Q = \frac{K \cdot A}{\eta \cdot L} (p_e - p_s) \quad (3.3)$$

Tirando o valor de K:

$$K = \frac{Q \cdot \eta \cdot L}{A \cdot (p_e - p_s)} \quad (3.4)$$

Determina-se Q para qualquer ponto da curva, usando a equação (3.1):

$$Q = \frac{2 \cdot V}{(p_x + p_s)} \cdot \frac{(p_2 - p_1)}{(t_1 - t_2)}$$

Substituindo-se os valores conhecidos de p_x , p_2 , p_1 , p_s , t_1 , t_2 e V , obtém-se Q_x . Determina-se K na equação (3.4). Procede-se desta maneira em cinco pontos diferentes da curva.

Calculados os valores de Q separadamente para cinco pontos da curva, tira-se o valor de K , isto é, K_s , K_v , K_x , K_y , K_z .

O coeficiente de permeabilidade médio, para o corpo de prova testado, é o resultado da média aritmética dos valores K_s , K_v , K_x , K_y , K_z .

Capítulo quatro

4.1 MATERIAIS E TÉCNICAS DE MEDIDAS

O concreto é definido como uma mistura de materiais, em proporções pré-estabelecidas de: um aglomerante (cimento Portland), agregado graúdo (pedra), agregado miúdo (areia), água e aditivo. O resultado da mistura é uma massa compacta, com uma consistência desejada e que endurece com o passar do tempo, permitindo que o conjunto adquira uma boa resistência mecânica à compressão.

A palavra "concreto" vem do termo latino "concretu" que significa "crescido junto". Os materiais cimentícios são aplicados na construção civil há muitos séculos e talvez a sua origem remonte aos tempos de Grécia e Roma antigas.

Uma das vantagens do uso do concreto é a facilidade com que se pode moldá-lo na dimensão e na configuração desejadas. Isto é possível, já que o concreto fresco tem uma plasticidade que permite ao material fluir com facilidade em contenções de formas variadas. Dependendo da finalidade, o concreto poderá ser produzido com teores diferentes de compostos.

Neste capítulo estão descritos materiais e técnicas de medidas utilizadas no estudo.

4.2 MATERIAIS UTILIZADOS

4.2.1 Água

Sabe-se que a água usada no amassamento do concreto não deve ter certos tipos de impurezas que possam vir a prejudicar os constituintes do cimento. No entanto, mais do que a esses elementos, pode-se atribuir a origem dos problemas do cimento à quantidade excessiva de água. Normalmente as anomalias surgem quando ela não é potável, isto é, quando possui cheiro anormal e apresenta turvação. Como é difícil avaliá-la, uma das formas é realizar alguns ensaios comparativos como: o tempo de pega, a tensão de ruptura e a variação volumétrica da pasta, argamassa ou concreto, utilizando a água suspeita e a água potável.

Neste trabalho utilizou-se água do abastecimento público.

4.2.2 Agregados

Os agregados são partículas de diferentes tamanhos e formas, constituídos de rochas, que ficam dispersos na pasta de cimento. A utilização dos agregados deve-se muito a razões técnicas e econômicas.

No início do século o uso dos agregados era mais de ordem econômica do que técnica. Somente a partir da década de 40 os fatos mostraram que a natureza química e a estrutura dos agregados eram fatores muito importantes. Nessa época iniciaram-se os estudos das reações químicas entre o cimento e o agregado, bem como outras propriedades.

A maior parte do concreto é composta por agregados, cerca de 75 a 80%⁽²³⁾, que não devem interferir no processo de hidratação e na pega do cimento. Por isso são realizados ensaios para verificar a presença de impurezas (matéria orgânica, argilas, carvão, mica, sais solúveis etc.). Existem, entre as impurezas deletérias ao concreto, as substâncias orgânicas que comumente estão presentes nas areias e que consistem de matéria vegetal em decomposição (presença de ácido tânico e derivados), como o humus e o lodo orgânico.

Outros tipos de ensaio, os de natureza física dos agregados, em particular o da resistência mecânica e determinação da granulometria, são indispensáveis para caracterizar o concreto.

Dependendo da granulometria dos agregados, pode-se classificá-los como agregados graúdos ou miúdos. Pode-se definir como agregado graúdo o material que fica retido na peneira com 4,8 mm de abertura de malha (material com até 15% de grãos mais finos do que a peneira especificada) e como agregado miúdo o material que passa pela peneira com 4,8 mm de abertura e malha (contém até 15% de grãos retidos na peneira especificada).

Atualmente, a maior parte dos agregados graúdos utilizados na confecção de concreto são os britados.

O agregado graúdo (brita 1), com dimensão máxima característica de 19 mm, utilizado neste trabalho, foi extraído da Pedreira Cantareira e a procedência do agregado miúdo (areia média) é do Rio Paraíba (Vale do Paraíba).

4.2.3 Cimentos

Os cimentos utilizados na construção civil são geralmente do tipo Portland.

Cimentos hidráulicos são definidos como cimentos que não somente endurecem ao reagir com a água, mas também formam um produto resistente a ela⁽⁴⁰⁾.

No presente estudo, foram utilizados dois tipos de cimento, cimento Portland comum (CPE - 32) e cimento Portland de alto-forno (AF - 40), ambos gentilmente doados pela Serrana S. A. de Mineração.

Os números que acompanham as siglas identificadoras dos tipos de cimentos referem-se aos valores da resistência mecânica de amostras de argamassa, produzidas dentro das especificações da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), após 28 dias de cura.

4.2.3.1 Cimento Portland Comum

O cimento Portland é um pó fino com propriedades aglomerantes, constituído principalmente de silicatos e aluminatos de cálcio, praticamente sem cal livre. O componente principal do cimento Portland é o clínquer, que tem como matérias-primas o calcário e a argila. A argila e o calcário são moídos em proporções adequadas, e a mistura homogeneizada é queimada a 1450 °C, dando origem ao clínquer. Após a queima, este novo material é resfriado, moído e transformado em pó. Na fase da moagem é adicionado o sulfato de cálcio (gesso), com dosagem adequada, que tem a função básica de controlar o tempo de início das reações do aglomerante com a água.

Os principais componentes do cimento Portland comum são: cal (CaO), sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3), magnésia (MgO), álcalis (Na_2O e K_2O) e sulfatos (SO_3)⁽⁴⁸⁾.

Todos os componentes se aglomeram quimicamente e formam os quatro compostos básicos do cimento Portland comum. São eles:

- silicato tricálcico = $3 \text{ Ca} \cdot \text{SiO}_2$ ou C_3S ;
- silicato dicálcico = $2 \text{ Ca} \cdot \text{SiO}_2$ ou C_2S ;
- aluminato férrico tetracálcico = $4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ou C_4AF ;
- aluminato tricálcico = $3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ou C_3A .

O C_3S é responsável pela resistência inicial alta, desprendendo muito calor durante a hidratação. O C_2S desenvolve lentamente a resistência mecânica e desprende pouco calor. O C_3A promove o endurecimento rápido do cimento hidratado (pega), desprende muito calor, é pouco resistente aos sulfatos e quase não colabora com a resistência final da mistura, assim como o C_4AF .

A *pega* do cimento, endurecimento da mistura cimento-água, ocorre em virtude de três processos: químico (hidratação), físico (cristalização) e físico-químico (passagem do estado plástico ao estado sólido).

Após moldagem e endurecimento da mistura, o procedimento que continua promovendo a hidratação do cimento denomina-se *cura*.

4.2.3.2 Cimento Portland de Alto-Forno

Na fase da moagem do clínquer, pode-se adicionar, em proporções adequadas, além do gesso, outras matérias-primas, entre elas a escória de alto-forno.

A escória de alto-forno é o resíduo da produção de ferro-gusa das indústrias siderúrgicas, em forma de grãos de areia. É um material poroso que tem propriedade de ligante hidráulico, como o cimento. É muito resistente e confere melhorias a algumas propriedades do cimento, entre elas, resistência final maior e durabilidade maior.

A escória granulada de alto-forno tem, na sua composição, uma quantidade grande de silicatos e aluminossilicatos de cálcio. Em presença de água, reage formando uma massa pastosa que endurece com o passar do tempo. O tempo de pega longo é uma das vantagens que o cimento Portland de alto-forno apresenta, porque permite que os grãos e as partículas liguem-se melhor entre si, reduzindo os espaços vazios e, conseqüentemente, a quantidade de poros.

Nas reações químicas de hidratação do cimento Portland de alto-forno, o calor gerado é menor, beneficiando as argamassas e os concretos produzidos com este tipo de cimento.

Os compostos hidratados da escória de alto-forno são iguais aos da hidratação do cimento Portland comum, apenas não ocorre a liberação do hidróxido de cálcio.

Para a indústria produtora de cimento, a utilização de escórias de alto-forno é benéfica por razões de ordem técnico-econômica: diminui o consumo energético necessário na fabricação do cimento, conseqüentemente reduz os custos; melhora algumas propriedades de forma considerável e aumenta a durabilidade do concreto.

4.2.4 Aditivos

O uso de aditivos é praticamente tão antigo quanto a dos ligantes hidráulicos. Nas construções romanas antigas, a trabalhabilidade das misturas era favorecida, adicionando-se leite, banha etc. Mais adiante, já no século 20, quando da produção do cimento Portland, estes aditivos foram substituídos e atualmente a oferta do produto, com propriedades modificadoras, é muito grande.

Os aditivos são produtos químicos adicionados em pequena quantidade, com o propósito de melhorar as propriedades do concreto, tanto no estado fresco quanto no estado sólido.

No preparo de qualquer concreto, os aditivos não são de todo indispensáveis e tornam-se, cada vez mais, um elemento essencial na mistura do concreto, tanto do ponto de vista tecnológico quanto econômico.

Podem-se utilizar os aditivos para viabilizar o comportamento, como:

- melhorar a trabalhabilidade;
- acelerar a pega;
- retardar a pega;
- acelerar a resistência mecânica nas primeiras idades;
- aumentar a tensão de ruptura após a primeira semana;
- diminuir a permeabilidade aos líquidos e gases;
- aumentar a aderência do concreto antigo ao novo;
- reduzir a exsudação;
- diminuir o calor de hidratação etc.

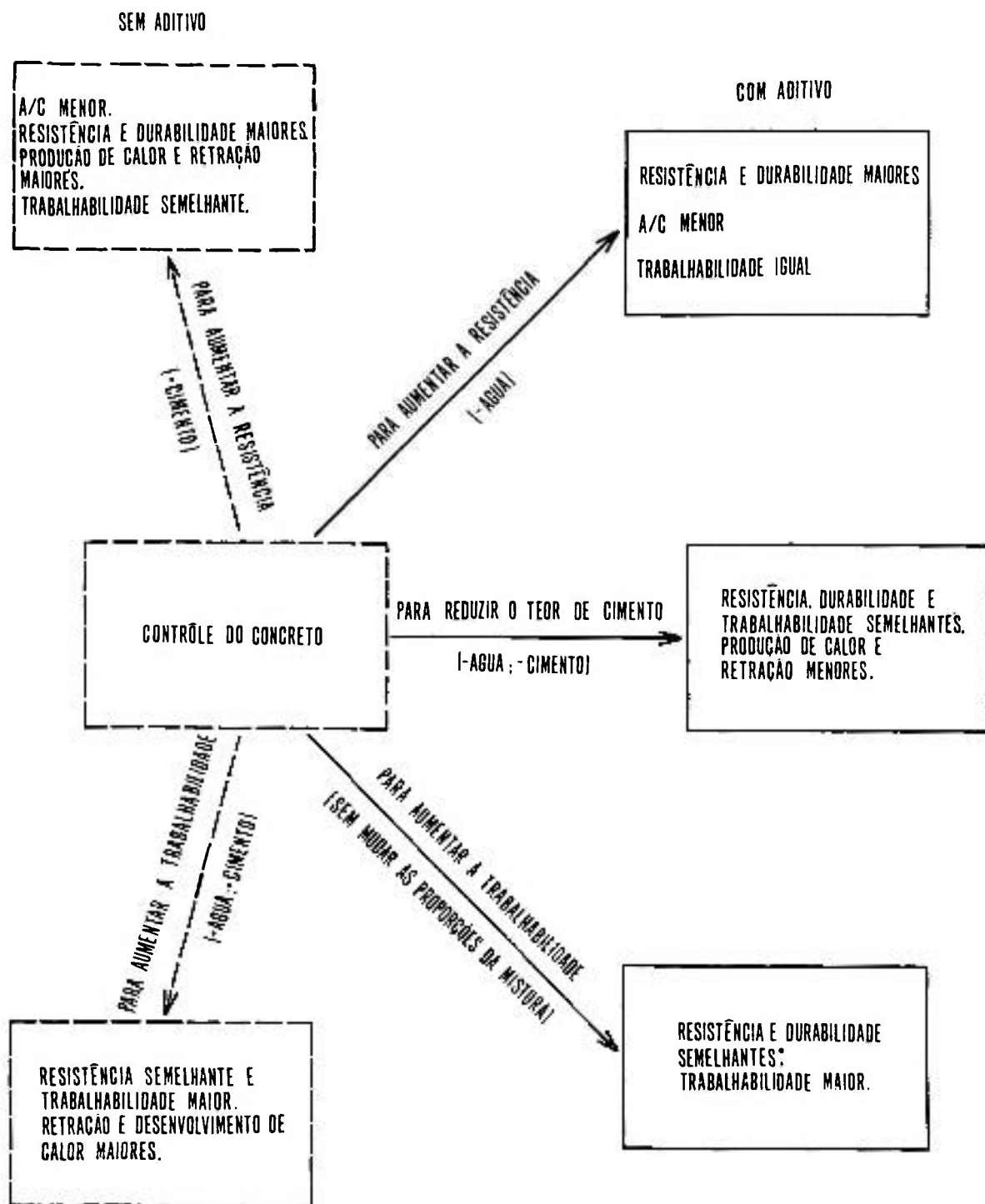
Os aditivos mais usados são:

- plastificantes;
- incorporadores de ar;
- expansores;
- retardadores e aceleradores de pega;
- impermeabilizantes;
- produtores de gás ou espuma.

No presente trabalho optou-se pelo uso do aditivo plastificante redutor de água, com a denominação comercial Sika - BV 40 (ASTM C-494 - Tipo A), cuja

principal vantagem é a de se poder reduzir a quantidade de água na mistura do concreto para uma mesma trabalhabilidade⁽⁵²⁾. Este aditivo melhora as propriedades do concreto endurecido e, em particular, aumenta a resistência e a durabilidade, diminuindo a permeabilidade. Além de ter a vantagem de se poder reduzir o teor de água, este plastificante é muito indicado para ser usado em climas quentes porque reduz o calor de hidratação do cimento⁽⁵²⁾.

A Figura 4.1. mostra um esquema do efeito do plastificante no concreto fresco e endurecido⁽⁵²⁾.



*Espera-se uma resistência pouco menor no início e pouco maior nas idades mais avançadas, exceto quando se usa redutor de água - Neste caso a resistência é maior em qualquer idade.

Figura 4.1 Esquema do efeito do redutor de água no concreto fresco e endurecido ⁽⁵²⁾

4.3 TÉCNICAS DE MEDIDAS

4.3.1 Caracterização dos materiais

Todo o processo de caracterização dos materiais, de confecção dos corpos de provas e os ensaios foram realizados no laboratório L. A. Falcão Bauer. Somente o ensaio para determinar a permeabilidade a gás em concreto e a cura dos corpos de prova referentes ao ensaio foram efetuados no Laboratório de Avaliação da Durabilidade de Materiais e Componentes de Repositórios na Supervisão de Rejeitos e Descontaminação do IPEN.

4.3.1.1 Cimentos

As análises químicas dos cimentos foram realizadas no Laboratório da Serrana S. A. de Mineração, seguindo as especificações das normas da ABNT, conforme o Anexo A.

A caracterização dos cimentos foi feita conforme a recomendação das normas: "Determinação da finura por meio de peneira número 200"⁽⁷⁾, "Determinação dos tempos de pega"⁽¹⁶⁾, "Determinação da água da pasta de consistência normal"⁽³⁾, "Determinação da expansibilidade de Le Chatelier"⁽⁶⁾ e "Determinação da resistência

à compressão”⁽¹¹⁾ da Associação Brasileira de Normas Técnicas, cujos resultados encontram-se na Tabela 4-1.

Tabela 4-1 Características dos cimentos usados no presente trabalho.

	CPE - 32	AF - 40
Fimura - Resíduo na peneira de 200 mm (%)	1,22	0,96
Água lançada (g)	140	146
Início de pega (h: min)	4:25	3:02
Fim de pega (h: min)	6:30	5:02
Expansibilidade Le Chatelier		
- a frio (mm)	0,2	0,1
- a quente (mm)	0,5	0,6
Índice de consistência da argamassa (mm)	181	179
Resistência à compressão (MPa)		
Idade: 3 dias	23,9	22,5
7 dias	32,9	32,9
28 dias	42,7	54,6

4.3.1.2 Agregados miúdos e graúdos

Para caracterizar qualquer tipo de agregado é necessário conhecer a sua granulometria. Esta informação é de extrema importância para que se possa efetuar a dosagem correta para a confecção dos corpos de prova. Para este ensaio utilizou-se a norma “Determinação da composição granulométrica”⁽⁴⁾, cujo resultado é mostrado na Tabela 4-2.

Tabela 4-2 Análise granulométrica do agregado usado no presente trabalho.

Penelras:	Agregado miúdo		Agregado graúdo	
	Abertura de malha (mm)	% retida	% retida acumulada	% retida acumulada
	12.7	-	-	38
	9.5	-	-	33
	4.8	0	0	27
	2.4	6	6	1
	1.2	21	27	-
	0.6	37	64	-
	0.3	24	88	-
	0.15	11	99	-
		módulo de finura: 2.84	módulo de finura: 7.02	
		diam.máx.caract: 4.8 mm	diam.máx.caract: 19 mm	

A análise granulométrica, assim como outros ensaios, ou seja: material pulverulento, impurezas orgânicas, massa específica absoluta, massa unitária, torrões de argila e absorção, foram realizadas conforme normas: “Determinação do teor de materiais pulverulentos”⁽¹⁵⁾, “Determinação de impurezas orgânicas húmicas em agregado miúdo”⁽¹²⁾, “Determinação da massa específica, massa específica aparente e da absorção de água”⁽⁸⁾, “Determinação da massa unitária”⁽⁹⁾ e “Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis”⁽¹⁴⁾, da ABNT. Os resultados estão demonstrados na Tabela 4-3.

Tabela 4-3 Características dos agregados usados no presente trabalho.

	Agregado Miúdo	Agregado Graúdo
Material Pulverulento	0,5 %	0,6 %
Impurezas Orgânicas	< 300 p.p.m	-
Massa Específica Absoluta	2,63 kg/dm ³	2,73 kg/dm ³
Massa Específica Aparente	1,43 kg/dm ³	1,37 kg/dm ³
Torrões de Argila	Isento	Isento

4.3.2 Confeção dos corpos de prova

Para a confecção dos corpos de prova, após a caracterização dos materiais, fixou-se o consumo de cimento na proporção de 250, 350 e 450 kg/m³ e a razão A/C de 0,7; 0,5; 0,4, respectivamente.

Para a preparação da mistura de concreto, utilizou-se uma betoneira planetária, marca Cibi, com capacidade de 100 L. Para que a homogeneidade da mistura não fosse afetada, optou-se por preparar todos os corpos de prova necessários fazendo, de uma única vez, o amassamento do concreto para cada traço escolhido. O objetivo principal dessa mistura é o de obter o revestimento uniforme de toda a superfície dos agregados com a pasta de cimento de maneira a formar um conjunto homogêneo.

Neste estudo, o melhor sistema encontrado para a introdução dos constituintes na betoneira, consistiu em inicialmente colocar todos os sólidos, ou

seja, os agregados *gráudo* e *miúdo* e o cimento. Em seguida, esses materiais foram misturados para obter uma mistura homogênea. Para tanto, a betoneira foi movimentada por cerca de 30 s. Por fim, adicionou-se a água e o aditivo. O tempo de amassamento do concreto foi de aproximadamente 1 min., tempo suficiente para a betoneira usada.

Para a identificação dos corpos de prova, adotaram-se as seguintes denominações:

- T 1 - CPE-32: - razão $A/C = 0,4$; consumo de cimento: 450 kg/m^3 ; traço: 1:2,2:1,7
- T 2 - CPE-32: - razão $A/C = 0,5$; consumo de cimento: 350 kg/m^3 ; traço: 1:2,2:2,9
- T 3 - CPE-32: - razão $A/C = 0,7$; consumo de cimento: 250 kg/m^3 ; traço: 1:4:3,7
- T 4 - AF-40: - razão $A/C = 0,4$; consumo de cimento: 450 kg/m^3 ; traço: 1:2,2:1,7
- T 5 - AF-40: - razão $A/C = 0,5$; consumo de cimento: 350 kg/m^3 ; traço: 1:2,9:2,4
- T 6 - AF-40: - razão $A/C = 0,7$; consumo de cimento: 250 kg/m^3 ; traço: 1:4:3,6

As dimensões dos corpos de prova foram de:

- $\phi = 150$ mm, $h = 300$ mm, para os ensaios de resistência mecânica à compressão⁽¹⁷⁾ e de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica⁽²⁾, conforme normas da ABNT;
- $\phi = 150$ mm, $h = 50$ mm, para o ensaio de permeabilidade a gás;
- $c = 250$ mm, $l = 250$ mm e $h = 125$ mm, para o ensaio de penetração de água sob pressão⁽¹⁰⁾, conforme norma da ABNT;
- $\phi = 150$ mm, $h = 150$ mm, para o ensaio de absorção de água por capilaridade⁽²¹⁾, conforme norma da ABNT.

A quantidade de aditivo plastificante foi de aproximadamente 0,25% em relação ao consumo de cimento.

4.3.3 Ensaios realizados em concreto fresco

4.3.3.1 Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone

Uma das propriedades do concreto fresco é a trabalhabilidade, que pode ser definida como a facilidade com que pode ser transportado, lançado, compactado e acabado sem perder a homogeneidade. A trabalhabilidade é avaliada pela norma da ABNT, “Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone”⁽⁵⁾.

4.3.3.2 Determinação do teor de ar pelo método pressométrico

A determinação do teor de ar incorporado no concreto fresco é de grande importância e serve para verificar a qualidade e uniformidade da mistura.

O procedimento baseia-se na lei de Boyle ($p_1 \cdot v_1 = p_2 \cdot v_2$), através da relação da pressão e volume, a uma temperatura constante⁽⁵⁵⁾.

Para a determinação do teor de ar incorporado no concreto fresco usou-se a norma da ABNT, “Determinação do teor de ar pelo método pressométrico”⁽¹³⁾.

4.3.4 Moldagem dos corpos de prova

A moldagem dos corpos de prova foi feita imediatamente após o amassamento e com a maior rapidez possível. O concreto foi colocado nas fôrmas, com o auxílio de uma concha, em camadas aproximadamente iguais. Para o ensaio de permeabilidade a gás, a mistura foi moldada em uma única camada e vibrada em uma mesa vibratória, num conjunto de 4 corpos. O tempo de vibração foi de 15 ± 1 s, para uma frequência vibratória de 3600 Hz, tempo suficiente para o adensamento adequado do concreto na fôrma. Para os outros ensaios, a moldagem foi feita colocando-se duas camadas sucessivas que foram vibradas separadamente.

Para cada proporção da mistura de concreto, foram preparados três corpos de prova para os ensaios de:

- absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica;
- penetração de água sob pressão;
- absorção de água por capilaridade;

nove corpos de prova para o ensaio de resistência mecânica à compressão axial, três para cada tempo de cura, e dez corpos de prova para o ensaio de permeabilidade a gás.

Após a moldagem, as fôrmas foram cobertas com filme plástico, com a finalidade de evitar evaporação da água. As misturas ficaram nas fôrmas durante $24 \text{ h} \pm 30 \text{ min}$. Esse tempo foi controlado assim que a água foi introduzida na mistura. Somente o concreto T 6 permaneceu durante $48 \text{ h} \pm 30 \text{ min}$ na fôrma por não ter alcançado solidez necessária.

Passado o tempo para o endurecimento do concreto, os corpos de prova foram desmoldados, identificados e levados para a cura úmida. A temperatura na câmara úmida foi de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e a umidade relativa de 95%. Os corpos de prova permaneceram na câmara úmida até o momento do ensaio.

Para o ensaio de permeabilidade a gás e resistência mecânica, os tempos de cura adotados foram de 30, 60 e 90 dias. Para o restante dos ensaios o tempo de cura foi de 30 dias. Esta escolha foi feita para avaliar, analisar e inter-relacionar o comportamento das amostras durante esse período.

4.3.5 Preparo dos corpos de prova para o ensaio de permeabilidade

A moldagem e cura de corpos de prova de concreto para os ensaios de permeabilidade foram feitos conforme norma “Moldagem e cura de corpos de prova de concreto cilíndricos ou prismáticos”⁽¹⁸⁾ da ABNT.

A Figura 4.2 mostra a fôrma, confeccionada em aço inox pelo IPEN, usada para moldar os espécimes de concreto.



Figura 4.2 Fôrma para moldagem dos corpos de prova para o ensaio de permeabilidade.

Decorrido o tempo de cura, foram retiradas três amostras aleatoriamente, enxugadas com papel absorvente e pesadas. A água dos poros foi eliminada aquecendo os espécimes em uma estufa com temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$. Foram mantidas na estufa até alcançarem peso constante. Após a secagem, os corpos de prova tiveram seus topos levemente lixados na politriz, marca Solotest, tipo Maxigrind, para a eliminação de nata de cimento endurecida.

4.3.6 Ensaios realizados em concreto endurecido

4.3.6.1 Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica

Para a determinação da absorção de água, do índice de vazios e da massa específica em corpos de prova usados neste trabalho, utilizou-se a norma “Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - índice de vazios e massa específica”⁽²⁾ da ABNT.

a. Absorção de água

A absorção de água pode ser conceituada como o processo pelo qual o líquido penetra, apenas por contato e sob pressão atmosférica, nos poros e capilares, retendo o líquido e aumentando desta forma a massa do corpo de prova poroso. Pelo cálculo da diferença entre a massa do corpo de prova saturado (M_{sat}) e a massa do

corpo de prova seco (M_s), em estufa à temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ até alcançar peso constante, obtém-se a quantidade de água absorvida. O valor desta quantidade de água é dividido pela massa do corpo de prova seco, multiplicado por 100. O resultado é a absorção percentual de água no espécime testado. A saturação do corpo de prova foi feita imergindo-o em água à temperatura ambiente até alcançar peso constante. A expressão utilizada para determinar a absorção é

$$\frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \cdot 100$$

b. Índice de vazios

Entende-se por índice de vazios a relação do volume de poros permeáveis do espécime para o volume total da amostra. A equação que se utiliza para calcular o índice de vazios é dada por:

$$\frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} \cdot 100$$

onde:

M_i - massa do corpo de prova saturado, imerso em água (balança hidrostática).

c. Massa específica

A massa específica do concreto pode ser conceituada como a massa da unidade de volume, incluindo os vazios. É uma das características importantes do concreto, levando-se em consideração sua aplicabilidade em cálculo de estruturas.

Para se obter a massa específica da amostra seca, usa-se a seguinte expressão:

$$\frac{M_s}{M_{sat} - M_i}$$

e para se determinar a massa específica da amostra saturada, usa-se a expressão:

$$\frac{M_{sat}}{M_{sat} - M_i}$$

4.3.6.2 Determinação da penetração de água sob pressão

A água pode penetrar no concreto ao ser submetido a uma pressão hidrostática, de forma semelhante ao escoamento de um fluido através de qualquer corpo poroso. Desta forma, o corpo se satura, cessam as forças capilares e o fluxo se mantém estável sob uma intensidade de escoamento, dependendo da pressão exercida e das características do concreto. Portanto, o ensaio consiste em forçar a penetração da água no corpo de prova, de dimensão conhecida, através de uma pressão

específica, por um período estabelecido. Após esse intervalo, rompe-se o corpo de prova e determina-se a profundidade máxima de penetração de água, assim como a sua distribuição no concreto. Entende-se como “máxima penetração de água” a média das máximas penetrações em três corpos de prova.

Neste ensaio utilizou-se a norma “Concreto endurecido - determinação da penetração de água sob pressão” ⁽¹⁰⁾ da ABNT, e pressões de água de 0,1; 0,3 e 0,7 Mbar, durante um período de 48, 24 e 24 h, respectivamente.

4.3.6.3 Determinação da absorção de água por capilaridade

Define-se absorção de água por capilaridade o movimento de um líquido existente nos interstícios do corpo de prova, pela ação da tensão superficial, independente da existência do gradiente de pressão. Pela diferença entre a massa do corpo de prova, que permaneceu em contato com a água durante um período pré-estabelecido, e a massa da amostra seca, obtém-se a quantidade de água absorvida, dividida pela área de secção transversal do espécime em contato com a água. Desta maneira, determina-se a absorção de água por capilaridade. A absorção de água é expressa em g/cm² e a altura da ascensão capilar, em centímetros.

A capilaridade é definida pela expressão:

$$C = \frac{(A - B)}{S}$$

onde:

C - absorção de água por capilaridade (g/cm²)

A - massa do corpo de prova que permanece com uma das faces em contato com a água durante um período de tempo especificado (g)

B - massa do corpo de prova seco em estufa ventilada, à temperatura de 40 ± 5°C (g)

S - área de secção transversal da superfície em contato com a água (área da secção molhada inicial) (cm²)

Os procedimentos de medida seguiram a norma “Argamassa e concreto endurecido - determinação de absorção de água por capilaridade”⁽¹⁾ da ABNT .

4.3.6.4 Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto

Um dos ensaios de maior importância, dentro da tecnologia do concreto, é a determinação da resistência mecânica. Muitas outras propriedades, como a qualidade do concreto, a impermeabilidade, a porosidade, o módulo de elasticidade, a

resistência a agentes químicos, entre outras, estão diretamente relacionados com a resistência.

A resistência mecânica é um parâmetro importante quando se trata de obras em que o concreto é produzido para fazer pisos, paredes e estruturas diversas nos repositórios para rejeitos radioativos. O mesmo ocorre na ocasião em que é necessário avaliar o grau de resistência quando o cimento é usado como matriz de imobilização de rejeitos radioativos.

Existem fatores que afetam a resistência mecânica e entre eles estão:

- as características e proporções dos materiais;
- os processos de cura;
- as condições de teste.

De uma maneira geral, quando se melhora a resistência do concreto, beneficiam-se outras propriedades.

O ensaio de resistência mecânica, que obedeceu à norma “Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto”⁽¹⁷⁾ da ABNT, foi efetuado em uma prensa hidráulica, marca Torsee (Compression Testing Machine) de 0 a 113,2 Mbar, após 30, 60 e 90 dias de cura.

Capítulo cinco

5.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1.1 Análise do concreto fresco

5.1.1.1 Consistência pelo abatimento do tronco de cone.

Na Tabela 5-1, são apresentados os valores das determinações da consistência do concreto fresco pelo abatimento do tronco de cone⁽⁹⁾.

As medidas de consistência pelo abatimento do tronco de cone foram realizadas uma única vez.

Tabela 5-1 Consistência pelo abatimento do tronco de cone em diversas composições de concreto.

Corpos de prova	Razão A/C	Consumo de cimento (kg/m ³)	Consistência pelo abatimento do tronco de cone (cm)
T1	0,5	350	4,5
T2	0,4	450	6,0
T3	0,7	250	4,5
T4	0,5	350	5,0
T5	0,4	450	5,0
T6	0,7	250	2,0

Para determinar a permeabilidade do concreto foram estudados os materiais e a sua mistura os quais têm influência sobre a permeabilidade. Assim, foram fixados o consumo de cimento e as razões A/C. Este ensaio mostra a característica de cada traço em relação à consistência do concreto para consumos de cimento e a razões A/C diferentes. Neste caso, pela Tabela 5-1, não se pode afirmar qual a melhor ou a pior mistura de concreto. Não existe norma referente à consistência mínima ou máxima de um concreto, ela simplesmente é fixada de acordo com a necessidade de cada emprego.

5.1.1.2 Teor de ar pelo método pressométrico

A Tabela 5-2 mostra os valores obtidos no ensaio de determinação do teor de ar pelo método pressométrico⁽¹³⁾, feito uma única vez para cada traço.

Tabela 5-2 Teor de ar pelo método pressométrico em diversas composições de concreto.

Corpos de prova	Razão A/C	Consumo de cimento (kg/m³)	Quantidade de ar incorporado no concreto fresco (%)
T1	0,5	350	4,0
T2	0,4	450	3,2
T3	0,7	250	4,4
T4	0,5	350	3,0
T5	0,4	450	3,3
T6	0,7	250	3,6

Em relação à Tabela 5-2, verifica-se que a presença de ar desempenha um papel duplo, o da melhoria da trabalhabilidade e o de um inerte. Portanto, se a trabalhabilidade da mistura é maior, pode-se reduzir o teor de água. Mesmo assim, na medida em que foram fixados tanto o consumo de cimento como as razões A/C, não se pode afirmar qual o melhor ou o pior desempenho das misturas. Da mesma forma, como no item anterior, não existe uma norma, apenas uma sugestão utilizada na área da engenharia civil onde se costuma adotar que o valor máximo da quantidade de ar incorporado no concreto fresco seja de 6%.

5.1.2 Análise do concreto endurecido

5.1.2.1 Absorção de água, índice de vazios e massa específica.

a. Absorção de água

Os valores obtidos no ensaio de absorção de água⁽²⁾ estão apresentados na Tabela 5-3.

Tabela 5-3 Absorção de água por imersão nos concretos com diferentes traços usados neste trabalho.

Corpos de prova	Consumo de cimento (kg/m ³)	Normal (%)	Com Ebulição (%)
T1	350	5,52 ± 0,06	5,64 ± 0,06
T2	450	5,19 ± 0,04	5,32 ± 0,06
T3	250	5,77 ± 0,80	5,91 ± 0,05
T4	350	4,77 ± 0,33	4,80 ± 0,32
T5	450	4,32 ± 0,16	4,39 ± 0,24
T6	250	5,29 ± 0,15	5,75 ± 0,11

Como a absorção de água no concreto depende da quantidade de poros que estão ligados com o meio exterior, na área da engenharia de construção civil se recomenda, por não existir norma, que a absorção máxima de água dos corpos de prova no concreto seja menor que 6%, quando se quer um concreto impermeável. Assim, verifica-se, através dos resultados obtidos, que todas as amostras atendem a essa recomendação. Em relação aos cimentos utilizados, observa-se que, para o cimento Portland comum, a amostra T 2 teve a menor absorção de água, portanto menor quantidade de poros e capilares, enquanto que, para o cimento Portland de alto-forno, foi o espécime T 5. Comparando esses dois corpos de prova, deduz-se que o cimento de alto-forno teve melhor desempenho. Conclui-se que, ao reduzir a

razão A/C e aumentar o consumo de cimento, diminui-se a comunicação desses poros, pois o produto final torna-se mais denso e menos permeável à água.

b. Índice de vazios

Os valores percentuais dos índices de vazios⁽²⁾ nas misturas de concreto testadas neste trabalho encontram-se na Tabela 5-4.

Tabela 5-4 Índice de vazios de diferentes misturas de concreto.

Corpos de prova	Consumo de cimento (kg/m ³)	Normal (%)	Com ebulição (%)
T1	350	12,39 ± 0,15	12,65 ± 0,13
T2	450	11,87 ± 0,08	12,15 ± 0,10
T3	250	12,69 ± 0,23	13,00 ± 0,13
T4	350	10,89 ± 0,69	10,96 ± 0,70
T5	450	10,02 ± 0,35	10,10 ± 0,41
T6	250	11,95 ± 0,27	12,99 ± 0,17

Geralmente, dentro da engenharia de construção civil, o índice de vazios do concreto gira em torno de duas vezes o da absorção de água, ou seja, no entorno de 12%, devido à inexistência de norma. Através de dados obtidos, pode-se dizer que os resultados se enquadram nesse intervalo. Para o cimento Portland comum, a amostra T 2 teve um índice de vazios menor, enquanto que, para o cimento Portland de alto-forno, foi a espécime T 5. Desta maneira, na Tabela 5-4, verifica-se que, quanto menor a razão A/C, menor a quantidade de vazios.

c. Massa Específica

Na Tabela 5-5 são apresentados os valores da massa específica⁽²⁾ obtidos nos ensaios.

Tabela 5-5 Massa específica de diferentes misturas de concreto.

Corpos de prova	Massa específica (g/cm ³)			
	Aparente	Aparente saturada		Real
	Seca (g/cm ³)	Normal (g/cm ³)	Com ebulição (g/cm ³)	(g/cm ³)
T1	2,24 ± 0,01	2,36 ± 1,16	2,37 ± 0,01	2,56 ± 0,01
T2	2,28 ± 0,02	2,40 ± 0,01	2,40 ± 1,15	2,60 ± 1,15
T3	2,19 ± 1,16	2,32 ± 0,01	2,32 ± 0,01	2,52 ± 0,01
T4	2,28 ± 0,01	2,39 ± 0,01	2,39 ± 0,01	2,56 ± 0,01
T5	2,32 ± 0,01	2,42 ± 0,01	2,42 ± 0,01	2,58 ± 0,01
T6	2,24 ± 0,02	2,36 ± 0,02	2,37 ± 0,02	2,57 ± 0,01

Não existindo norma técnica que limite o valor da massa específica do concreto convencional, costuma-se aceitar o valor de aproximadamente 2,5 g/cm³. Diante desse fato, observa-se, através dos resultados obtidos, Tabela 5-5, que os valores encontrados estão dentro dos parâmetros normais. Se o valor encontrado fosse inferior a 2,5 g/cm³, ter-se-ia uma quantidade maior de argamassa e, conseqüentemente, um concreto mais poroso e mais permeável.

5.1.2.2 Penetração de água sob pressão

Os resultados do ensaio de penetração de água sob pressão⁽¹⁰⁾ estão apresentados na Tabela 5-6.

Tabela 5-6 Penetração de água sob pressão em concretos com diferentes traços.

Corpos de prova	Razão A/C	Consumo de cimento (kg/m ³)	H _{min} (cm)	H _{max} (cm)
T1	0,5	350	2,8 ± 0,64	4,1 ± 1,20
T2	0,4	450	6,1 ± 1,20	8,1 ± 1,20
T3	0,7	250	12,5 ± 0	12,5 ± 0
T4	0,5	350	6,4 ± 0,71	7,5 ± 0,85
T5	0,4	450	5,7 ± 0,71	7,0 ± 0,64
T6	0,7	250	11,4 ± 1,06	11,7 ± 1,56

Ao se aplicar uma pressão de 0,3 Mbar, observou-se que na amostra T 3 a penetração de água foi total para um dos três corpos de prova ensaiados para este traço. Nos outros dois espécimes, verificou-se, para a mesma pressão, que a altura de penetração externa média foi de 12 cm. À pressão de 0,7 Mbar, os dois corpos de prova ficaram completamente saturados. Pela Tabela 5-6 verifica-se que essa amostra teve o pior comportamento. Para o cimento Portland comum esperava-se que o espécime T 2, por ter uma razão A/C baixa e um consumo de cimento alto, pudesse apresentar o melhor comportamento. Um dos motivos para que esse fato não tenha ocorrido seja talvez a má compactação durante a moldagem dos corpos de prova. Quanto ao cimento Portland de alto-forno, o comportamento foi mais regular.

Para esse tipo de cimento verifica-se que, quanto menor a razão A/C e maior o consumo de cimento, menor será a penetração de água sob pressão. De um modo geral, comparando-se os concretos feitos com os dois tipos de cimento, o melhor comportamento foi da amostra T 1.

5.1.2.3 Absorção de água por capilaridade

Os resultados da absorção de água por capilaridade⁽¹⁾ estão apresentados na Tabela 5-7.

Tabela 5-7 Absorção de água por capilaridade de diversas composições de concreto.

Corpos de prova	Consumo de cimento (kg/m ³)	Absorção de água (g/cm ²)	Altura da ascensão capilar (cm)
T 1	350	0,29	2,1 ± 1,93
T 2	450	0,20	1,3 ± 0,15
T 3	250	0,21	3,5 ± 0,40
T 4	350	0,22	1,6 ± 0,12
T 5	450	0,20	1,0 ± 0,81
T 6	250	0,51	5,9 ± 0,17

Para os dois tipos de cimentos, o comportamento para todos os traços foi regular, como era de se esperar. Intercomparando os corpos de prova T 3 e T 6, confirma-se que, com a mesma razão A/C e consumo de cimento, a absorção de água por capilaridade da espécime T 6 foi maior. Talvez isso se deva ao processo de hidratação insuficiente, lembrando que o cimento de alto-forno necessita de um

período longo para se hidratar. Nesse ensaio, o corpo de prova T 5, feito com cimento Portland de alto-forno, teve a menor altura de ascensão capilar. Isso comprova que esse cimento reduz a quantidade de poros capilares. Pela Tabela 5-7, averigua-se que, para razões A/C menores e maior consumo de cimento, a ascensão capilar é menor.

5.1.2.4 Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto

A Tabela 5-8 mostra os resultados obtidos dos ensaios de resistência mecânica por compressão axial⁽¹⁷⁾, em diferentes misturas de concreto.

Tabela 5-8 Resistência mecânica em corpos de prova de concreto com traços diferentes.

Corpos de prova	Razão A/C	Consumo de cimento (kg/m ³)	Resistência mecânica (Mbar)		
			30 (dias)	60 (dias)	90 (dias)
T1	0,5	350	41,7 ± 0,57	49,0 ± 0,35	49,8 ± 1,85
T2	0,4	450	55,5 ± 0,78	61,7 ± 0,42	63,4 ± 0,35
T3	0,7	250	19,3 ± 0,78	22,2 ± 0,57	23,5 ± 0,42
T4	0,5	350	42,0 ± 0,57	53,2 ± 0,85	55,4 ± 0,64
T5	0,4	450	60,8 ± 0,42	67,4 ± 0,78	69,1 ± 0,78
T6	0,7	250	25,2 ± 1,20	28,2 ± 0,64	30,0 ± 0,85

A Tabela 5-8 mostra o resultado dos testes de resistência mecânica para idades variadas, para cada traço A/C. Constata-se que, para tempo maior de cura, entre 30 e 60 dias, resistência aumenta consideravelmente, enquanto que, para um

período entre 60 e 90 dias, este aumento é pequeno, porque o processo de hidratação torna-se mais lento. Comparando os dois tipos de cimentos, nota-se que tiveram comportamentos regulares, como esperado. Se for analisado o comportamento entre os corpos de prova T 3 e T 6, cimento Portland comum e alto-forno, respectivamente, com a mesma razão A/C , o mesmo consumo de cimento, com o mesmo tempo de cura, conclui-se que o cimento de alto-forno demonstrou ser mais resistente que o de Portland comum. Observa-se que o traço que mostrou resistência à compressão axial maior foi T 5.

5.1.2.5 Permeabilidade

Os valores dos coeficientes de permeabilidade, K , em relação a pressão média e o tempo de cura, para os dois tipos de cimento com diferentes composições de concreto, são mostrados nas Figuras 5.1; 5.2; 5.3; 5.4; 5.5, 5.6, 5.7 e 5.8. No Anexo B podem ser vistas, em detalhes, as curvas dos coeficientes de permeabilidade em relação à pressão média para diferentes tempos de cura.

CIMENTO PORTLAND COMUM

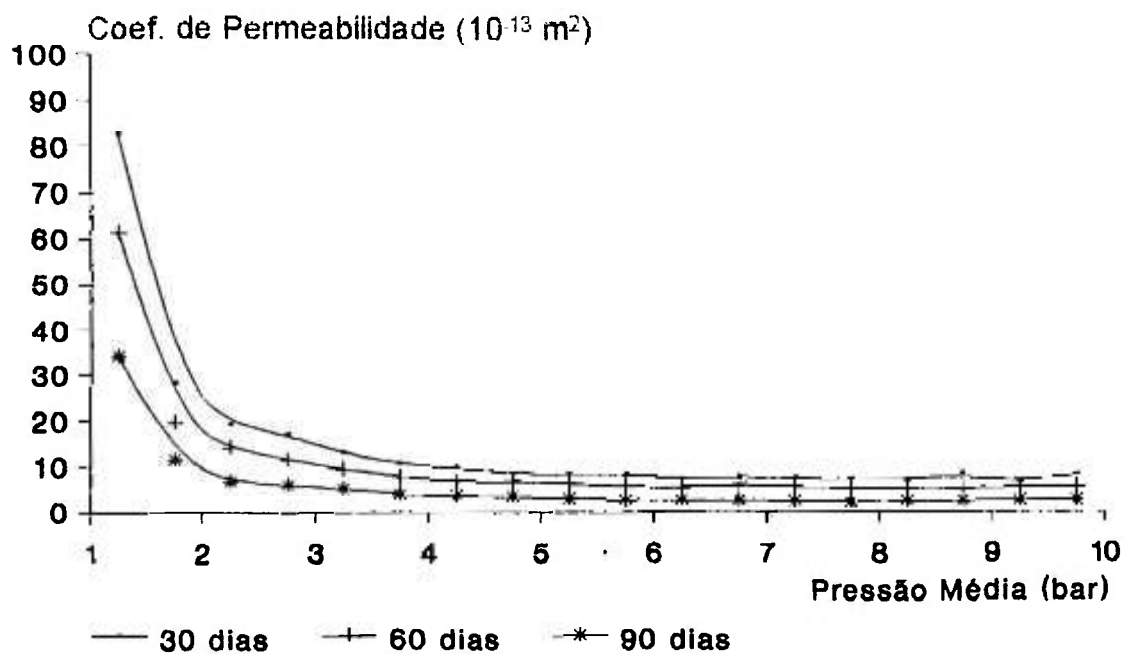


Figura 5.1 Relação entre o coeficiente de permeabilidade e a pressão média para a razão A/C = 0,5.

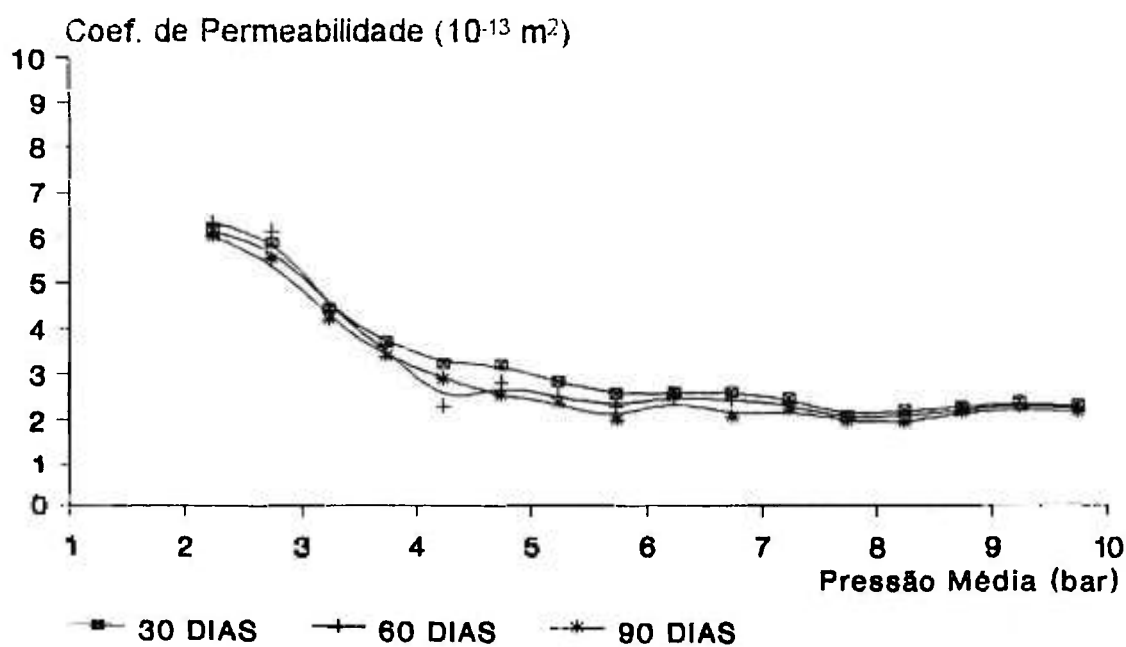


Figura 5.2 Relação entre o coeficiente de permeabilidade e a pressão média para a razão A/C = 0,4.

CIMENTO PORTLAND COMUM

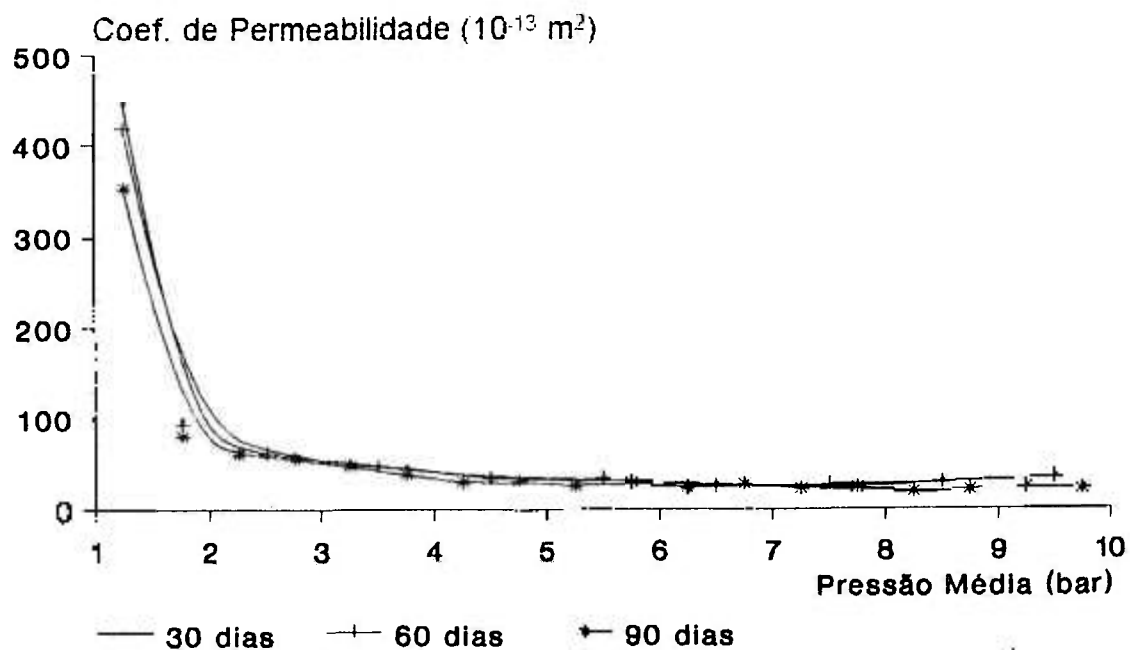


Figura 5.3 Relação entre o coeficiente de permeabilidade e a pressão média para a razão A/C = 0,7.

CIMENTO PORTLAND DE ALTO-FORNO

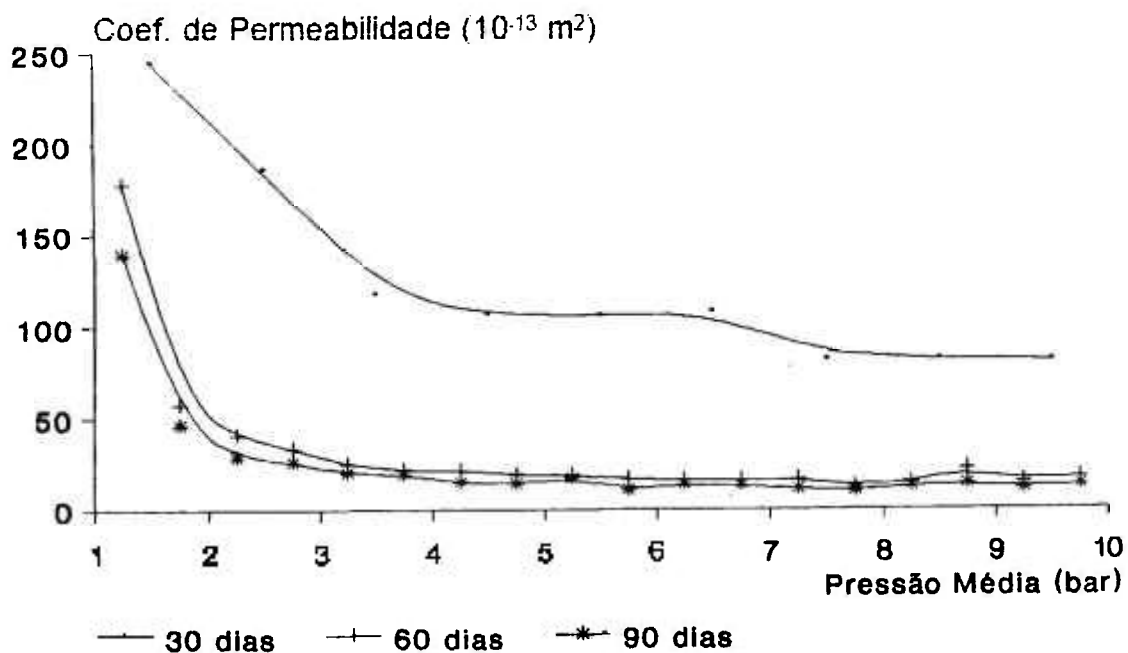


Figura 5.4 Relação entre o coeficiente de permeabilidade e a pressão média para a razão A/C = 0,5.

CIMENTO PORTLAND DE ALTO-FORNO

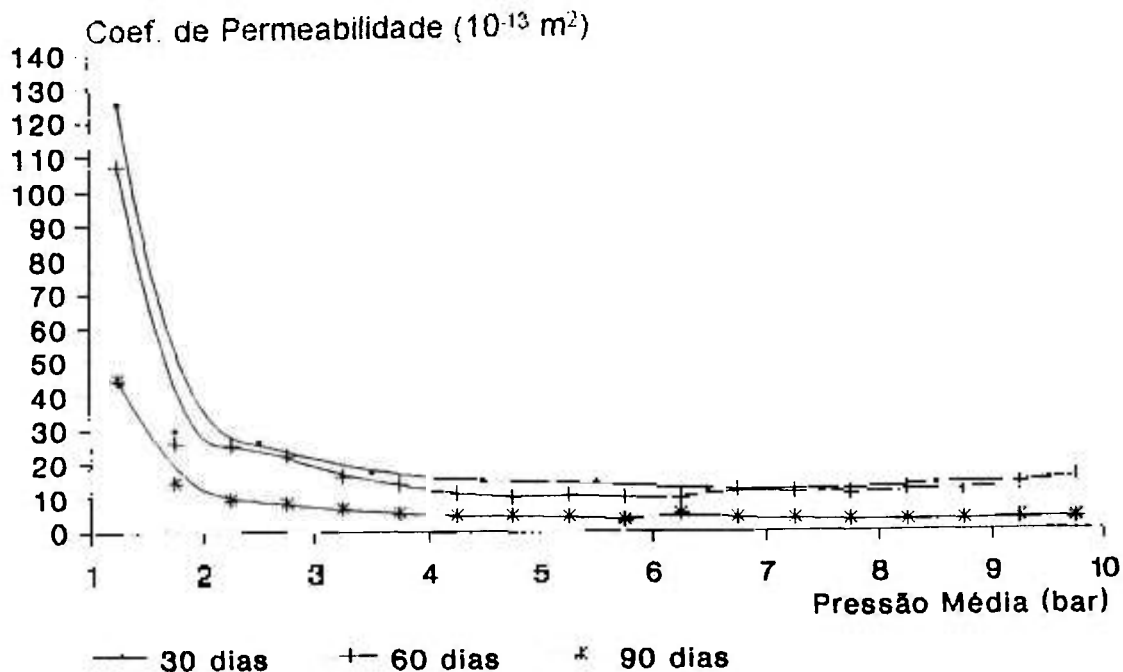


Figura 5.5 Relação entre o coeficiente de permeabilidade e a pressão média para a razão A/C = 0,4.

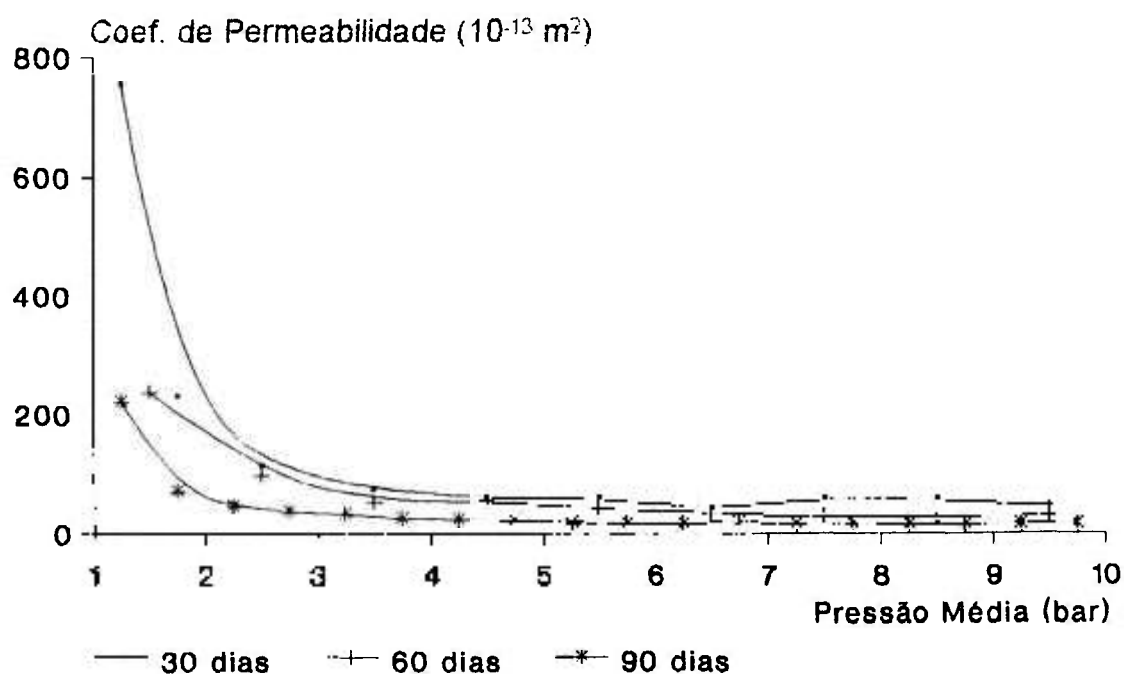


Figura 5.6 Relação entre o coeficiente de permeabilidade e a pressão média para a razão A/C = 0,7.

COMPARAÇÃO DOS CIMENTOS: CPE-32 E AF-40

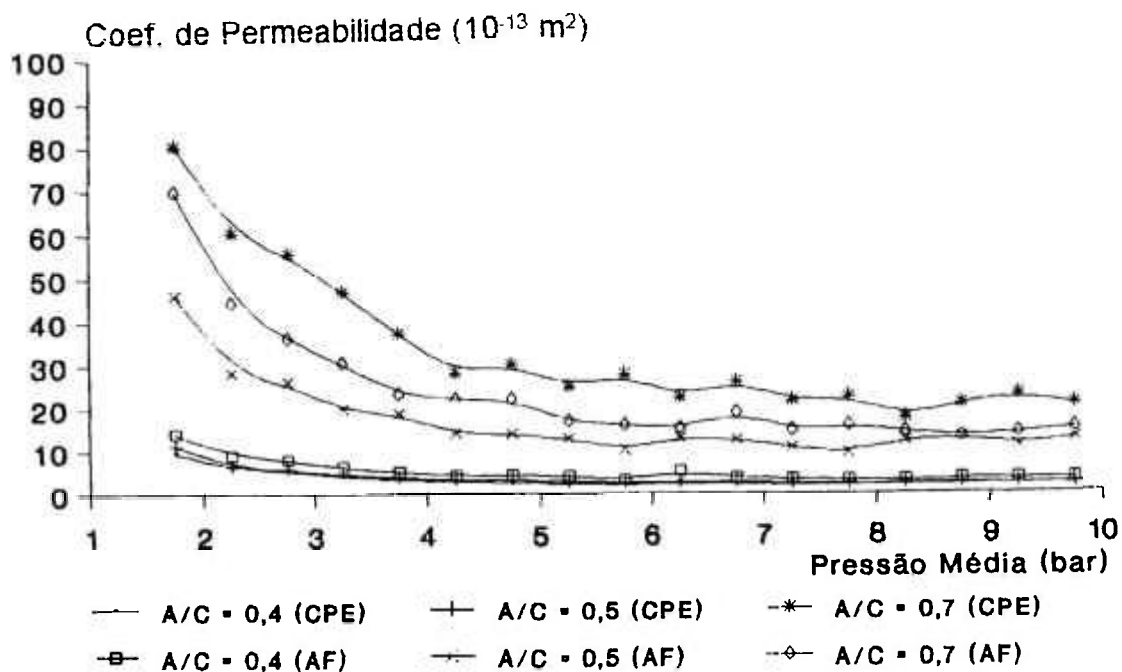


Figura 5.7 Relação entre o coeficiente de permeabilidade e a pressão média.
Tempo de cura: 90 dias.

COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE X TEMPO DE CURA

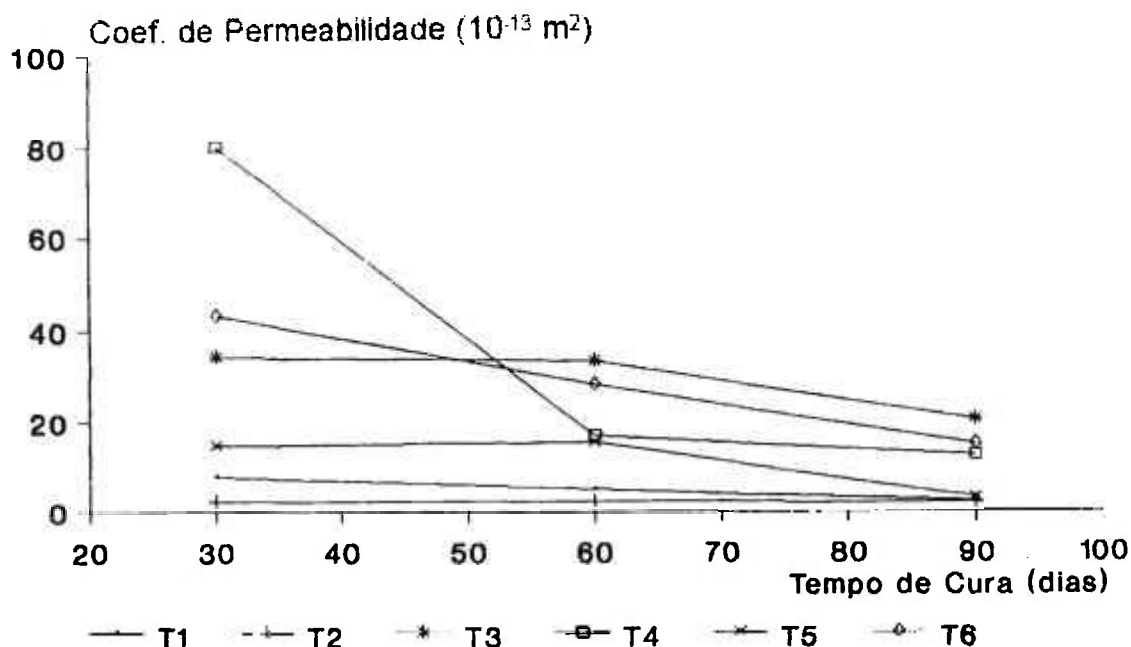


Figura 5.8 Relação entre o coeficiente de permeabilidade e o tempo de cura.

Percebe-se, através da Figura 5.1, que o concreto com traço T 1, razão $A/C = 0,5$, feito com o cimento Portland comum, teve o comportamento mais regular, enquanto que o menor coeficiente de permeabilidade pode ser obtido na amostra T 2, razão $A/C = 0,4$, Figura 5.2. Para o cimento Portland de alto-forno, o menor coeficiente de permeabilidade é do concreto T 5, razão $A/C = 0,4$, Figura 5.5.

Sabe-se que a razão A/C é um dos fatores que influenciam decisivamente o coeficiente de permeabilidade do concreto. Pelas Figuras 5.3 (T 3) e 5.6 (T 6), confirma-se que o coeficiente de permeabilidade para corpos de prova com razão $A/C = 0,7$ aumenta consideravelmente devido ao aumento da quantidade dos poros capilares.

Outro fator que influencia o coeficiente de permeabilidade é o tempo de cura. Um decréscimo notório do coeficiente de permeabilidade, Figura 5.4 e 5.8, foi observado na amostra T 4, cimento Portland de alto-forno, com razão $A/C = 0,5$ e tempo de cura entre 30 e 60 dias. Essa variação talvez se deva à má compactação durante a moldagem dos corpos de prova.

Examinando-se a Figura 5.8, vê-se que o corpo de prova T 2 teve um comportamento praticamente regular durante o período de 90 dias. Os espécimes T 1, T 2 e T 5 aos 90 dias de cura possuem um coeficiente de permeabilidade semelhante.

Comparando-se os dois tipos de cimento, observa-se que o cimento Portland de alto-forno tem um coeficiente de permeabilidade mais alto do que as amostras feitas com cimento Portland comum.

Entretanto, se o tempo de cura for suficientemente longo, ambos atingem aproximadamente o mesmo valor. Esse fato pode ser explicado por causa das características de maior estabilidade molecular dos componentes que produzem reações de hidratação mais lentas, necessitando, dessa forma, um tempo mais longo de cura. Assim, o coeficiente de permeabilidade diminui com o aumento do tempo de cura.

O consumo de cimento é outro item que influencia o coeficiente de permeabilidade, por causa da trabalhabilidade da mistura. Nas amostras T 3 e T 6 onde se utilizou um consumo de 250 kg/m^3 , o coeficiente de permeabilidade é maior em relação aos outros corpos de prova, Figura 5.7. Geralmente, o consumo de cimento de aproximadamente 300 kg/m^3 é suficiente para se obter um coeficiente de permeabilidade baixo⁽²⁸⁾.

A relação entre o coeficiente de permeabilidade e resistência mecânica pode ser vista na Figura 5.9. O coeficiente de permeabilidade da amostra T 2 manteve-se praticamente constante durante os 90 dias de cura, embora a resistência mecânica tenha aumentado. Houve uma discrepância no espécime T 4 para o tempo de cura de 30 dias. O coeficiente de permeabilidade é extremamente alto e uma resistência mecânica que pode ser considerada baixa. Um dos motivos é a má compactação

durante a moldagem porque o processo de hidratação para o cimento Portland de alto-forno é lento. Após este período, o comportamento se torna regular. Os outros corpos de prova apresentaram comportamento praticamente regular.

Comparando os tipos de cimentos utilizados, observa-se que a amostra T 2, cimento Portland comum, maior consumo de cimento e menor razão A/C, resultou em coeficiente de permeabilidade menor e maior resistência mecânica, para 90 dias de cura. Para espécimes feitos com cimento Portland de alto-forno, o melhor resultado foi o corpo de prova T 5. Constatase que, quanto maior o tempo de cura, menor coeficiente de permeabilidade e maior a resistência mecânica.

COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE X RESISTÊNCIA MECÂNICA

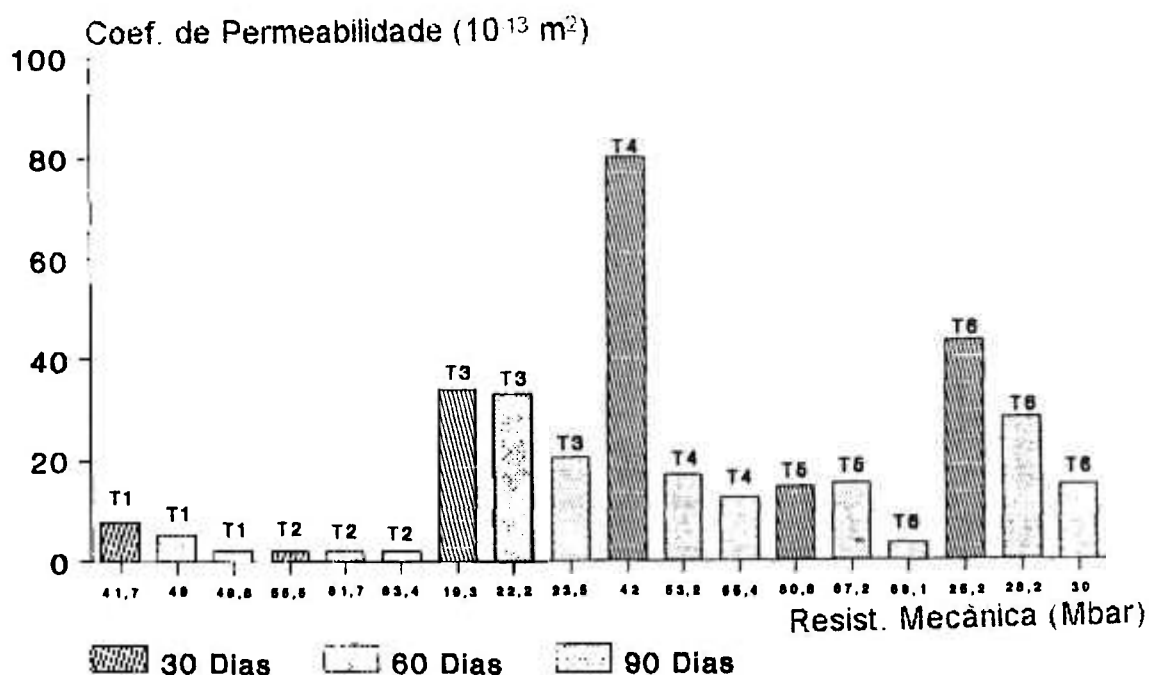


Figura 5.9 Relação entre o coeficiente de permeabilidade e a resistência mecânica.

A relação entre o coeficiente de permeabilidade e a penetração de água pode ser vista na Figura 5.10. Observa-se que o cimento Portland comum teve comportamento mais regular do que o de alto-forno. Novamente, constatou-se que a amostra T 4 teve um comportamento anômalo, provavelmente por causa dos motivos citados anteriormente. Se forem comparados os corpos de prova T 2 e T 1, para um tempo de cura de 30 dias, o primeiro teve, para um coeficiente de permeabilidade baixo, uma penetração de água maior, enquanto que, para o segundo, aconteceu o contrário. Analisando ainda o espécime T 2, pode-se concluir que o fato de a permeabilidade ser mais baixa que do espécime T 1, para uma penetração mediana de água, pode ter resultado do fato de o tamanho dos corpos de prova serem diferentes nesses dois ensaios.

COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE X PENETRAÇÃO DE ÁGUA

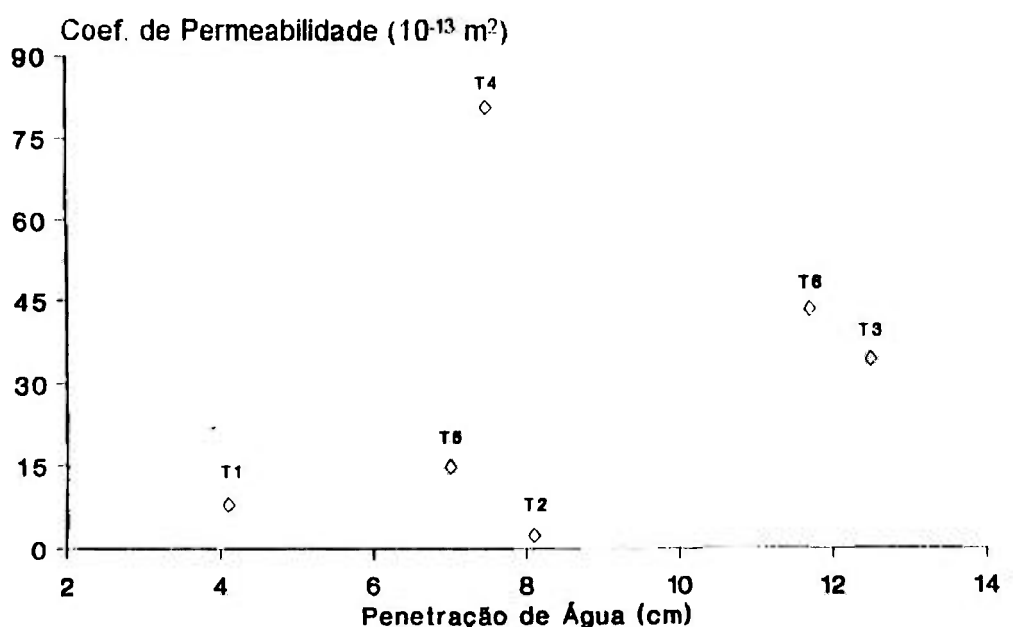


Figura 5.10 Relação entre o coeficiente de permeabilidade e a penetração de água sob pressão.

Das amostras feitas com cimento Portland de alto-forno, aquela que apresentou resultado melhor foi a T 5.

Analizando a Figura 5.11, onde é mostrada a relação entre o coeficiente de permeabilidade e a absorção de água por capilaridade, deduz-se que o cimento Portland comum teve comportamento regular, enquanto que no cimento Portland de alto-forno houve uma discrepância da amostra T 4 como nos casos anteriores. Comparando-se os espécimes T 2 e T 5, nota-se que o primeiro, para um dado coeficiente de permeabilidade, mostra menor altura de ascensão capilar do que o segundo. Neste caso, fica difícil apontar qual é o melhor resultado porque isto vai depender do destino dado à utilização do material.

COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE X CAPILARIDADE

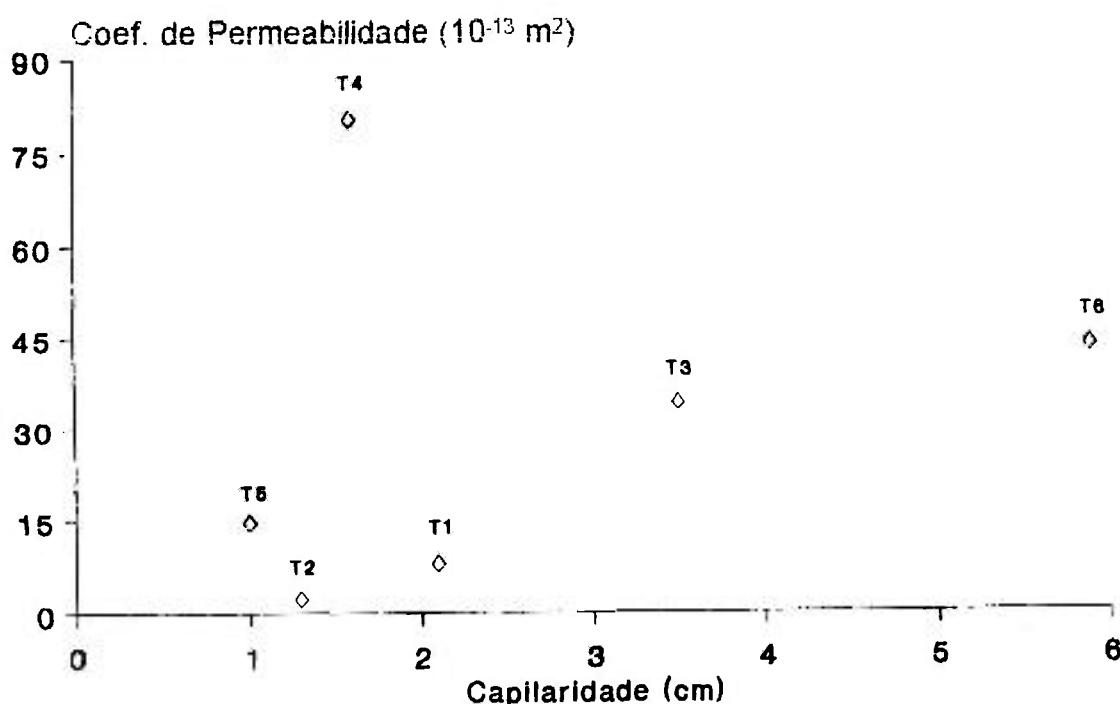


Figura 5.11 Relação entre o coeficiente de permeabilidade e a absorção de água por capilaridade.

Com relação à Figura 5.12, onde é mostrada a relação entre a resistência mecânica e a penetração de água, os dados demonstram que os concretos feitos com cimento Portland de alto-forno fornecem resultados mais coerentes do que com o cimento Portland comum. A amostra T 2 deveria ter apresentado um valor mais coerente do que o corpo de prova T 1. Como pode ser visto na Tabela 5-6, a má compactação da amostra resultou em um valor alto de penetração de água, provavelmente porque a quantidade de poros capilares é maior. O fato de a resistência mecânica ser alta não implica uma penetração de água baixa porque a resistência não depende da quantidade de poros capilares (que podem ser fechados), mas da porosidade do material.

RESISTÊNCIA MECÂNICA X PENETRAÇÃO DE ÁGUA

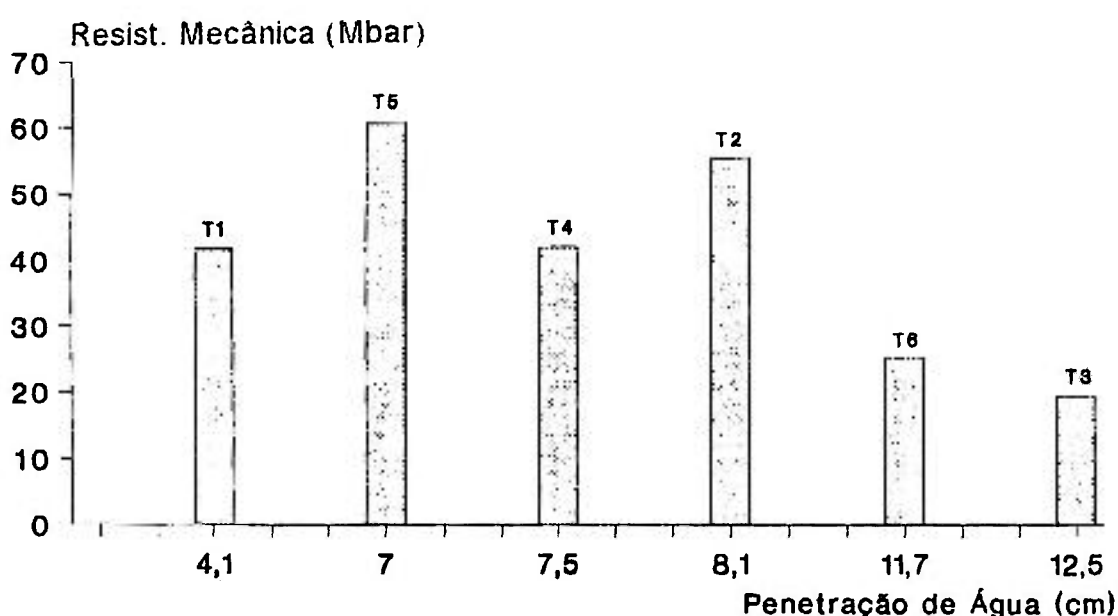


Figura 5.12 Relação entre a resistência mecânica e a penetração de água sob pressão em amostras curadas durante 30 dias.

Quando a câmara de permeabilidade foi desenvolvida para esta pesquisa, com a finalidade de testá-la, foram feitas algumas amostras de pasta e argamassa com razão $A/C = 0,5$, curadas em câmara úmida à temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$, durante 28 dias. Para a obtenção do valor do coeficiente de permeabilidade da pasta e da argamassa, utilizou-se o mesmo procedimento experimental usado para o concreto. Obtiveram-se os resultados de 10^{-21} m^2 para a pasta, e 10^{-17} m^2 , para argamassa. Nesta pesquisa, para o concreto, a ordem de grandeza do coeficiente de permeabilidade obtido foi de 10^{-13} m^2 .

Capítulo seis

6.1 CONCLUSÕES

O equipamento desenvolvido no IPEN-CNEN/SP permite a determinação rápida do coeficiente de permeabilidade em amostras com diâmetro de 150 mm e altura de 50 mm. Dependendo da permeabilidade do corpo de prova de concreto, argamassa ou pasta, o tempo da medida varia. Em testes realizados para determinar o coeficiente de permeabilidade do concreto, o tempo envolvido na medida é de aproximadamente 30 min. Para a argamassa, o tempo necessário foi de 3 h. e para a pasta de 12 h.

Experimentos com diferentes tipos de concreto mostraram que o método do teste permite confirmar o comportamento conhecido deste material, relativo ao tempo de cura, tipo de cimento, razão A/C, resistência mecânica, entre outros fatores.

De um modo geral, a razão A/C, o tempo de cura e o consumo de cimento têm uma influência significativa no coeficiente de permeabilidade. Resultados confirmam que o coeficiente de permeabilidade é uma função direta da razão A/C e que o tempo de cura é essencial para se obter um coeficiente de permeabilidade baixo. Conclui-se então que, para obter um concreto menos permeável, a razão A/C deve ser tão baixa quanto possível e isto sugere o aumento no consumo de cimento e de aditivo plastificante.

Apesar de o cimento Portland de alto-forno ser mais permeável do que o cimento Portland comum, tal característica não torna o primeiro pior, apenas mostra que ele necessita de um tempo de cura maior para que haja uma maior hidratação do cimento. Em relação ao ensaio de resistência mecânica, o cimento Portland de alto-forno mostrou ser mais resistente do que o cimento Portland comum. Este fato pode ser explicado, lembrando que a permeabilidade é função dos poros abertos e não da quantidade de poros existentes no concreto.

Em geral o coeficiente de permeabilidade para gases tem uma ordem de grandeza maior do que para a água, o que é explicado pela teoria da aderência do gás⁽²⁰⁾, embora Dhir e outros⁽²⁶⁾ comentem em seu trabalho que as causas desta diferença ainda não foram satisfatoriamente explicadas.

Apesar de a ordem de grandeza do coeficiente de permeabilidade diferir daquelas encontradas nas literaturas citadas no Capítulo dois, é necessário considerar que a metodologia empregada, a composição química do cimento, a origem e o tamanho dos agregados, o procedimento para a preparação dos corpos de prova, a temperatura e o tempo de cura dos mesmos, a razão A/C, entre outros fatores, podem induzir grandes modificações no valor do coeficiente. Por este motivo, não é importante comparar os resultados entre os vários autores mas, sim, obter dados qualitativos para os materiais e misturas obtidas no presente trabalho e em trabalhos que venham a ser desenvolvidos no futuro.

Concretos produzidos na construção civil raras vezes são expostos a condições bem definidas, como as dos procedimentos experimentais empregados neste estudo. Desta forma as propriedades do concreto, entre elas a permeabilidade, podem variar largamente, dependendo do meio.

O concreto que se usa em repositórios finais para rejeitos radioativos deve ser o mais impermeável possível, para que a obra possa ser mais durável. Mas não basta dar atenção especial somente à permeabilidade de cada componente individual, deve-se estar atento às causas que podem provocar desvios na estanqueidade da obra, no cálculo da estrutura e durante o trabalho de construção. Embora neste trabalho tenha sido dada importância especial aos componentes individuais do concreto, sugere-se que estes mesmos cuidados, sejam estendidos também à construção, quando for feita a segregação dos materiais, compactação do concreto e

cura. Atualmente outro motivo de cuidado é o uso mais assíduo de armaduras que resultam na redução da espessura das construções e na redução de custos, o que pode favorecer o aumento da permeabilidade com o envelhecimento da obra.

6.2 Sugestões para futuros trabalhos

Para aumentar ainda mais o campo do conhecimento científico acerca do concreto, seria oportuno haver estudos voltados para a adição de aditivos pozolânicos suficientemente finos para reduzir a permeabilidade dos concretos ora estudados. Sabe-se que alguns tipos de pozolanas são usadas nas misturas de cimento e rejeitos radioativos porque servem como trocadores iônicos, com certos elementos químicos radioativos impedindo-lhes a lixiviação.

Outro aspecto levantado por esta pesquisa diz respeito à necessidade de relacionar a permeabilidade do concreto endurecido com o teor de aditivos incorporadores de ar, aniônicos ou catiônicos, na mistura fresca, avaliando outras características importantes como a resistência mecânica ao longo do tempo.

Fazer ensaios de retração em concretos com traços onde o consumo de cimento seja alto.

Testar outros aditivos que permitam reduzir a permeabilidade do concreto como cloretos solúveis, amônio, estreato de cálcio etc.

Bibliografia

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

Determinação da absorção de água por capilaridade. 1986.

(ABNT-NBR-9779).

2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica. 1986. (ABNT-NBR-9778).

3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

Determinação da água da pasta de consistência normal. 1991.

(ABNT-NBR-11580).

4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

Determinação da composição granulométrica. 1987. (ABNT-NBR-7217).

5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.

1992. (ABNT-NBR-7223).

6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

Determinação da expansibilidade de Le Chatelier. 1991.

(ABNT-NBR-11582).

7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

Determinação da finura por meio da peneira número 200. 1991.

(ABNT-NBR-11579).

8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

Determinação da massa específica, massa específica aparente e da absorção de água. 1984. (ABNT-NBR-6458).

9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

Determinação da massa unitária. 1982. (ABNT-NBR-7251).

10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

Determinação da penetração de água sob pressão. 1988.

(ABNT-NBR-10787).

11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

Determinação da resistência à compressão. 1991. (ABNT-NBR-7215).

12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

Determinação de impurezas orgânicas húmicas em agregado miúdo. 1987. (ABNT-NBR-7220).

13. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

Determinação do teor de ar pelo método pressométrico. 1990.

(ABNT-NBR-11686).

14. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis.

1987. (ABNT-NBR-7218).

15. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

Determinação do teor de materiais pulverulentos. 1987.

(ABNT-NBR-7219).

16. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

Determinação dos tempos de pega. 1991. (ABNT-NBR-11581).

17. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Ensaio*

de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto. 1974.

(ABNT-NBR-5739).

18. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

Moldagem e cura de corpos de prova de concreto cilíndricos ou prismáticos. 1983. (ABNT-NBR-5738).

19. ATKINSON, A. The influence of wasteform permeability on the

release of radionuclides from a repository. *Nucl. Chem Waste Manage.*, 5:203-14, 1985.

20. BAMFORTH, P.B.. The relationship between permeability

coefficients for concrete obtained using liquid and gas. *Mag. Concr. Res.*, 39(138):3-10, 1987.

21. BASILIO, F.A.. *Durabilidade do concreto: proteção química e proteção física contra águas agressivas*. São Paulo, ABCP, 1990.
22. CABRERA, J.G.; LYNSDALE, C.J.. A new gas permeameter for measuring the permeability of mortar and concrete. *Mag. Concr. Res.*, 40(144):177-82, 1988.
23. CHARLISWORTH, D.H. & HAWIESON, J.. Overview of management of low level radioactive wastes in Canada. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Management of low a intermediate level radioactive wastes: proceedings of a symposium held in Stockholm, May 16-20, 1988*. Vienna, 1988.
24. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. Gerência de rejeitos radioativos em instalações radiativas. Rio de Janeiro, 1985. (CNEN-NE-6.05)
25. DÄRR, G.M. & LUDWIG, U. Determination of permeable porosity. *Mat. Struct.*, 6(33):185-90, 1973.
26. DHIR, R.K.; HEWLETT, P.C.; CHAN, Y.N.. Near surface characteristics of concrete: intrinsic permeability . *Mag. Concr. Res.*, 41(147):87-97, 1989.
27. FRANZEN, H.R.; EILDEMAN, F.; PONTEDEIRO, E.. Waste management in Brazil. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Management of low and intermediate level*

*radioactive wastes: proceedings of international symposium on ...
held in Stockholm, May 16-20, 1988, Vienna. Vienna, 1989.
(IAEA-SMR 303/120)*

28. GATBOCZI, E.J.. Permeability, diffusivity, and microstructural parameters: a critical review. *Cem. Concr. Res.*, 20:591-601, 1990.
29. GOTO, S. & ROY, D.M.. The effect of W/C ratio and curing temperature on the permeability of hardened cement paste. *Cem. Concr. Res.*, 11:575-9, 1981.
30. GRÄFF, H., GRUBE, H.. The influence of curing on the gas permeability of concrete with different compositions. In: DURABILITY of concrete structures under normal outdoor exposure: *proceedings of rilem seminar on ... held in Hannover, March, 1984. Germany, 1984. p.68-79.*
31. GRUBE, H. & LAWRENCE, C.D.. Permeability of concrete to oxygen. In: DURABILITY of concrete structures under normal outdoor exposure: *proceedings of rilem seminar on ... held in Hannover, March, 1984. Hannover, 1984. p.68-79.*
32. HEARN, N. & MILLS, R.H.. A simple permeameter for water or gas flow. *Cem. Concr. Res.*, 21:257-61, 1991.
33. HUGHES, D.C.. Pore structure and permeability of hardened cement paste. *Mat. Concr. Res.*, 17(133):227-33, 1985.

34. JAMET, P.H. & DUBOIS, F.. *Measure de la perméabilité à l'azote du béton*. Gif-sue-Yvette, CEA Centre D'Estudes Nucleaires de Saclay, França, 1981.
35. KOLLEK, J.J.. *Mesure de la perméabilité du béton à l'oxygène par la méthode Cembureau*. *Cim., Bét., Plat., Chaux*, n° 778, 1989.
36. LAWRENCE, C.D.. *Measurements of permeability*. In: QUÍMICA do cimento: *anais do 8. congresso internacional ... realizado no Rio de Janeiro, set. 22-27, 1986*. Rio de Janeiro, s.ed., 1986. v.1, p.29-34.
37. MANEGOLD, E. *Kapillarsysteme Bd. 1, Strassenbau, Chemie und Technik*, Heidelberg p. 148, 1955 apud Därr, G.M. & Ludwig, U. *Determination of permeable porosity*. *Mat. Struct.*, 6(33):185-90, 1973.
38. MARTIALAY, R.. *Concrete air permeability age effects on concrete*. In: SCANLON, J.M. *Concrete durability*. Detroit, ACI, 1987.
39. MARTIALAY, R.M.. *Permeabilidad al aire del hormigón*. Madrid, Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y Del Cemento (Monografías), 1975.
40. METHA, P.K.. *Concrete - Structure, Properties and a Materials*. Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 1986.
41. METHA, P.K. & MANMOHAN, D.. *Pore size distribution and permeability of hardened cement paste*. In: *Chem. Cem. 7th*.

- international congress on ... held in Paris*. Paris, ed. Septima, 1980. v.III, VI-1/5.
42. MILLS, R.. Mass transfer of gas and water through concrete. In: SCANLON, J.M.. *Concrete durability*. Detroit, ACI, 1987.
43. MILLS, R.H.. *Gas and water permeability of concrete for reactor buildings*. Ottawa, Atomic Energy Control Board, 1987. (INFO 0188-2)
44. MINDESS, S. & YOUNG, J.F.. *Concrete*. Englewood Cliffs, N.J., Printice-Hall, 1981.
45. NEVILLE, A.M.. *Properties of concrete*. 2.ed.New York, N.Y., Pitman Publishing, 1973.
46. NYAME, B.K. & ILLSTON, J.M. Capillary pore structure and permeability of hardened cement paste. In: *Chem. Cem. 7th. international congress on ... held in Paris*. Paris, ed. Septima, 1980. v.III, VI-181/86.
47. PAPADAKIS, M. & VENUAT, M. *Manuel du laboratoire d'essais des ciments, mortiers, bétons*. Paris, Éditions Eyrolles, 1969.
48. PETRUCCI, E.G.R.. *Concreto de Cimento Portland*. 5.ed. Porto Alegre, Globo, 1978.
49. PHILIPOSE, K.E.. *500 year concrete for a radioactive waste repositoty*. Chalk River, Ontario, Atomic Energy of Canada, mar. 1988. (AECL-9721).

50. PLECAS, I.B.; PERIC, A.D., DRLJACA, J.D.; KOSTADINOVIC, A.M.; GLODIC, S.D.. Immobilization of radioactive waste water residues in a cement matrix. *Cem. Concr. Res.*, 22:571-6, 1992.
51. POWERS, T.C.; MANN, H.M.; COPELAND, L.E.. *The flow of water in hardened portland cement paste*. Washington, DC, Research Board, 1958. p.308-23 (Special Report n° 40)
52. RAMACHANDRAN, V.S.. *Concrete Admixtures Handbook*. Park Ridge, N.J., Noyes Publications, 1984.
53. RINGEARD, C.. Ultimate disposal of low and medium radioactive waste in France. In: BASCHWITZ, R; KOHOUT, R.; MAREK, J.; RICHTER, P.I.; SLATE, S.C. eds. NUCLEAR WASTE MANAGEMENT AND ENVIRONMENTAL REMEDIATION: *proceedings of the 1993 Int. Conf. ... held in Prague, September 5-11, 1993*. Prague, 1993. v.3, p.17-29.
54. SCHÖNLIN, K. & HILSDORF, H.. Evaluation of the effectiveness of curing of concrete structures. In: SCANLON, J.M. *Concrete durability*. Detroit, ACI, 1987.
55. SCHÖNLIN, K. & HILSDORF, H.K.. Permeability as a measure of potential durability of concrete. Development of a suitable test apparatus. In: WHITING, D. & WALITT, A.. *Permeability of concrete*. Detroit, ACI, 1988.
56. SILVA, P.F.A. Permeabilidade do concreto. Uma medida de durabilidade. *Revista IBRACON*. 8:18-21, 1993.

57. SUAREZ, A.A.; RZYSKI, B.M.; MARUMO, J.T.; SHIRAKAWA, M.A.; MIYAKE, E.T.. Evaluation of engineered barrier materials for surface disposal facilities. (Paper present at the 1st Research Coordinated Meeting, held in Sellafield, 21-25, October), 1991.
58. UCHIKAWA, H.; UCHIDA, S.; OGAWA, K.. Influence of character of blending component on the diffusion of Na and Cl ions in hardened blended cement paste. In: QUÍMICA do cimento: *anais do 8. congresso internacional ... realizado no Rio de Janeiro, set. 22-27, 1986*. Rio de Janeiro, s.ed., 1986. v.3.
59. ŽAGAR, L. Die Grundlagen zur Ermittlung der Gasdurchlässigkeit von feuerfesten Baustoffen. Arch. Eisenhüttenwesen, 26:777, 1955 apud Därr, G.M. & Ludwig, U. Determination of permeable porosity. *Mat. Struct.*, 6(33):185-90, 1973.
60. ZIEMENS, K.E. Kennzeichnung, Herstellung und Eigenschaften poröser Körper apud Därr, G.M. & Ludwig, U. Determination of permeable porosity. *Mat. Struct.*, 6(33):185-90, 1973.
61. ZULOAGA, P. & GRAVALOR, J.M.. El Cabril a near surface repository of I/LLw in Spain. In: BASCHWITZ, R.; KOHOUT, R.; MAREK, J.; RICHTER P.I.; SLATE, S.C. eds. NUCLEAR WASTE MANAGEMENT AND ENVIRONMENTAL REMEDIATION: *proceedings of the 1993 Int. Conf. ... held in Prague, September 5-11, 1993*. Prague, 1993. v.3, p.25-30.

Anexo A

Análises químicas dos cimentos Portland comum e de alto-forno.

Testes Químicos (%)		
	CPE-32	AF-40
Fe ₂ O ₃	2,96	2,56
CaO	58,73	53,77
SiO ₂	19,06	22,11
Al ₂ O ₃	4,90	6,50
SO ₃	3,06	2,75
P ₂ O ₅	0,78	0,78
MgO	5,18	5,64
K ₂ O	0,61	0,56
CaO livre	1,07	0,93
Perda ao fogo	5,05	3,78
Resíduo insolúvel	0,31	0,29
Na ₂ O	0,18	0,12

Testes Físicos e Mecânicos

	CPE-32	AF-40
Pega (min.)		
Início	202	202
Fim	288	321
Água gasta		
(%)	27,40	27,90
Blaine (m ² /kg)	424	449
Finura (%)		
M200	0,61	0,67
M325	4,06	3,25
Resistência		
(MPa)		
3 dias	24,80	22,70
7 dias	33,90	36,30
28 dias	45,90	52,50
Le Chatelier		
(mm)		
frio	0,15	0,30
quente	0,30	-
C ₃ A equivalente	5,59	-

Anexo B

CIMENTO PORTLAND COMUM

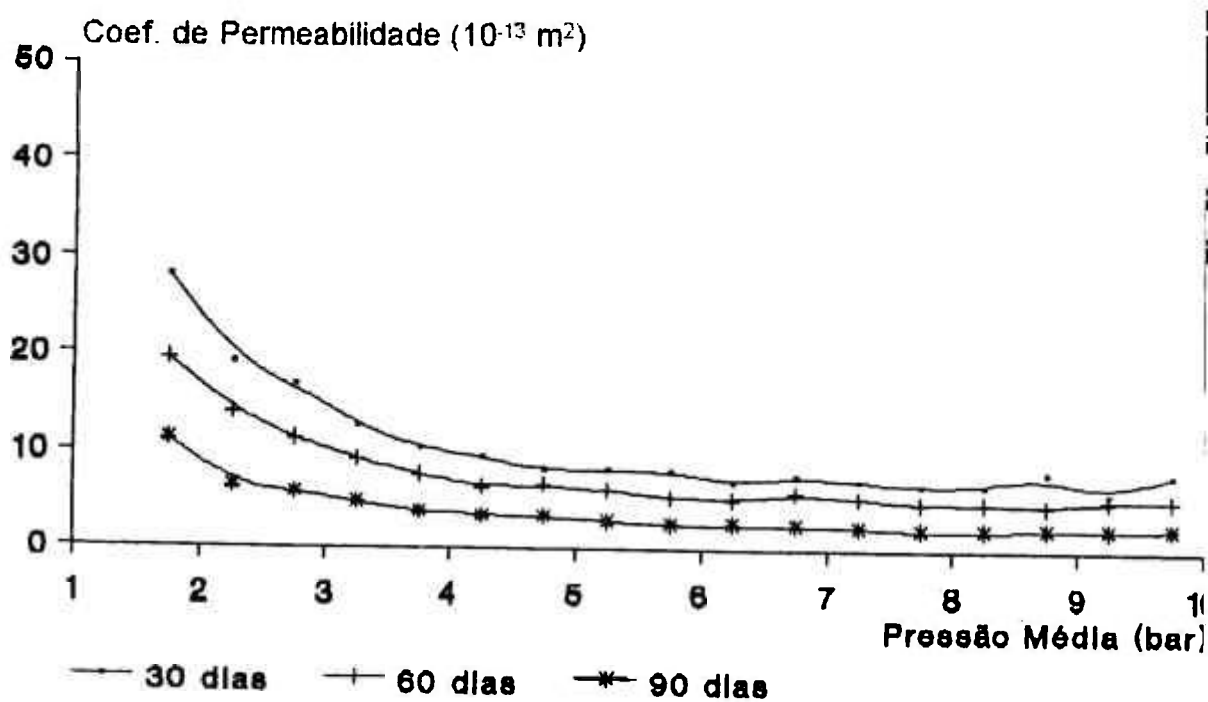


Figura 5.1.b Relação entre o coeficiente de permeabilidade e a pressão média para a razão A/C = 0,5.

CIMENTO PORTLAND COMUM

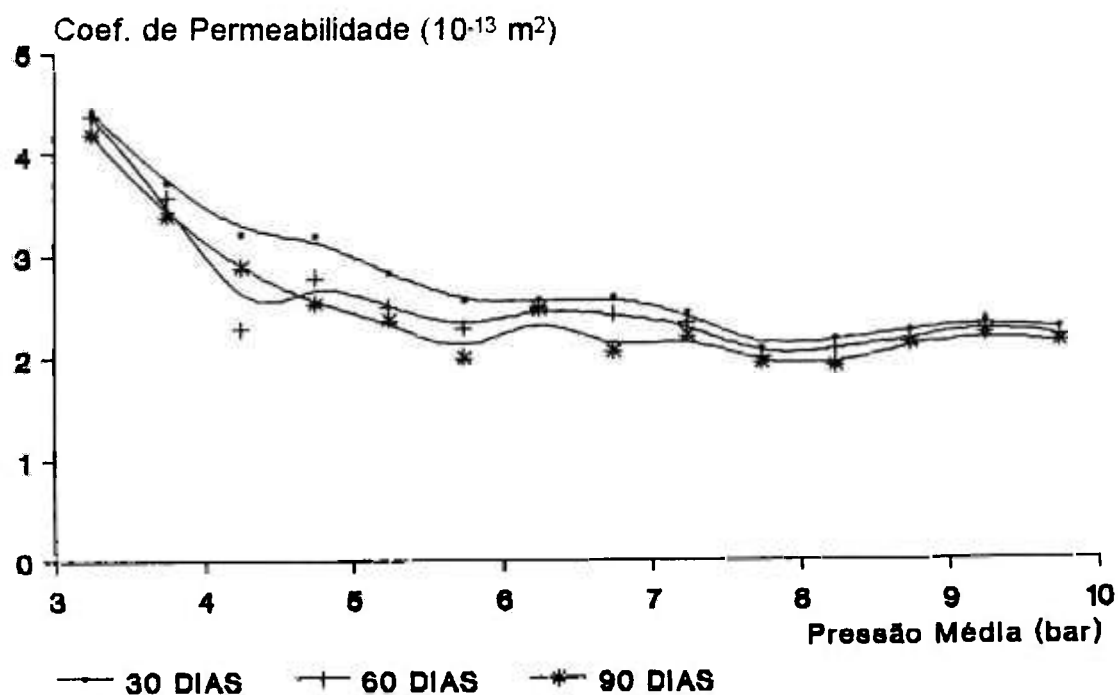


Figura 5.2.b Relação entre o coeficiente de permeabilidade e a pressão média para a razão A/C = 0,4.

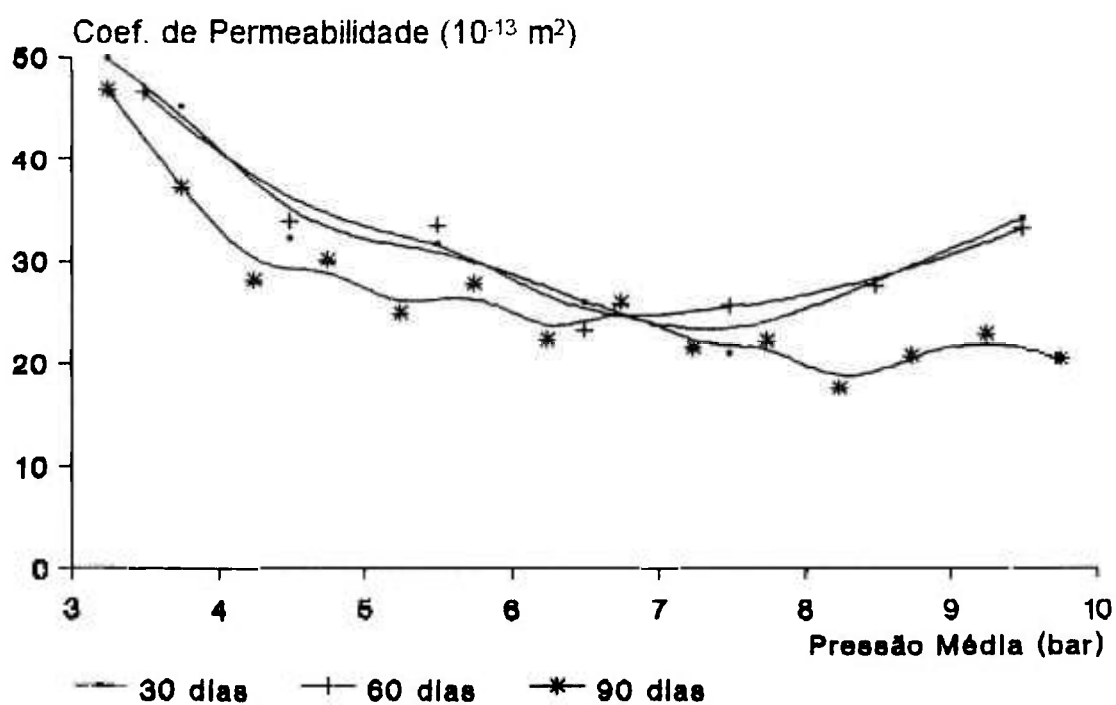


Figura 5.3.b Relação entre o coeficiente de permeabilidade e a pressão média para a razão A/C = 0,7.

CIMENTO PORTLAND DE ALTO-FORNO

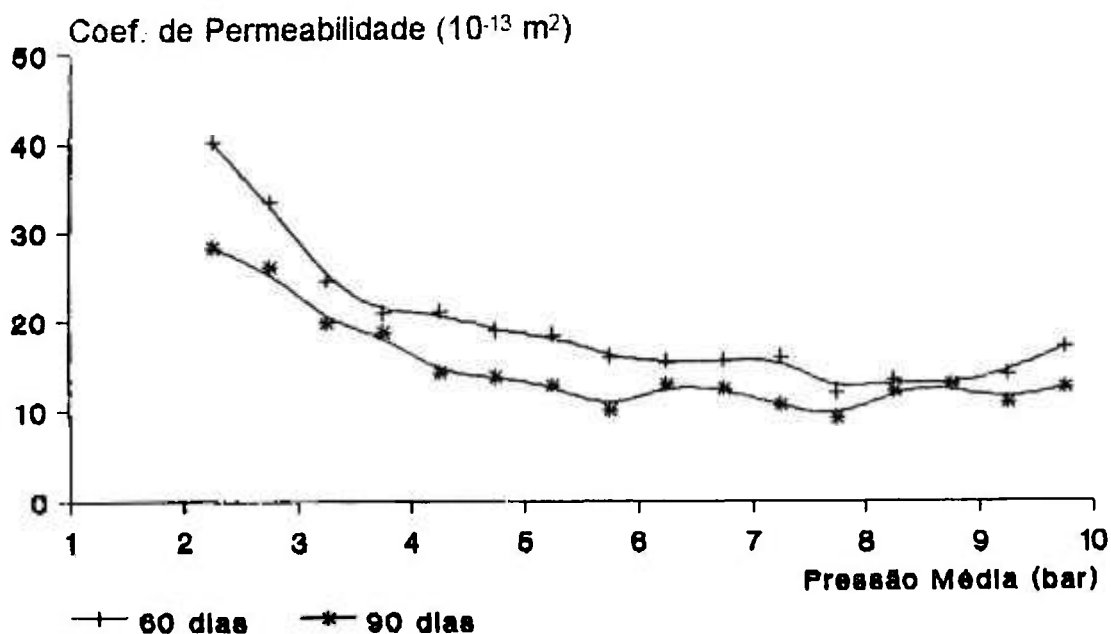


Figura 5.4.b Relação entre o coeficiente de permeabilidade e a pressão média para a razão A/C = 0,5.

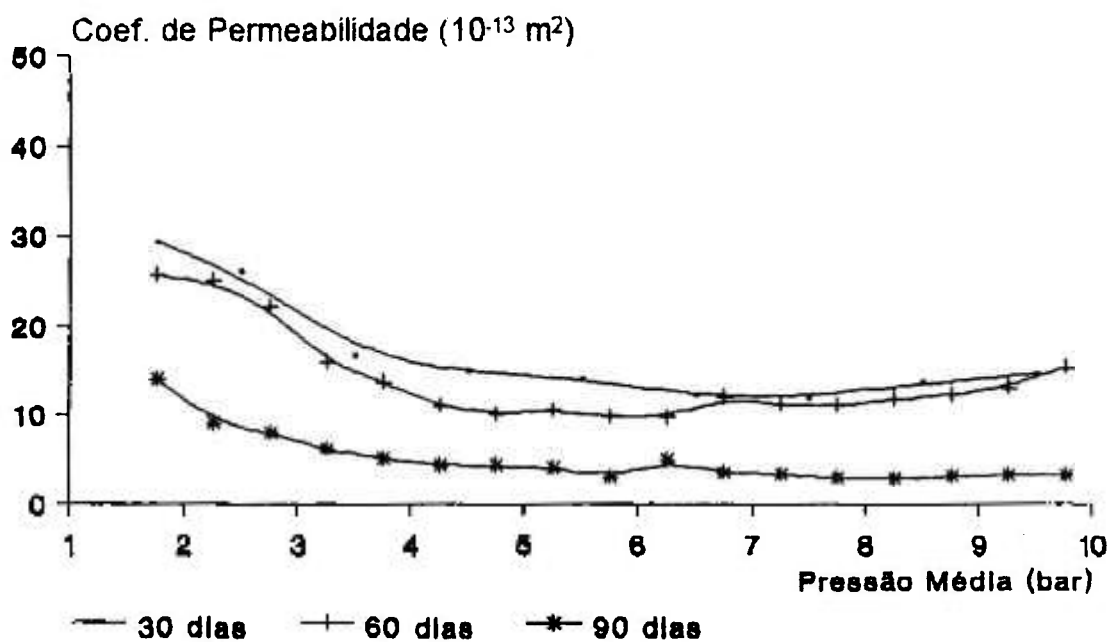


Figura 5.5.b Relação entre o coeficiente de permeabilidade e a pressão média para a razão A/C = 0,4.

CIMENTO PORTLAND DE ALTO-FORNO

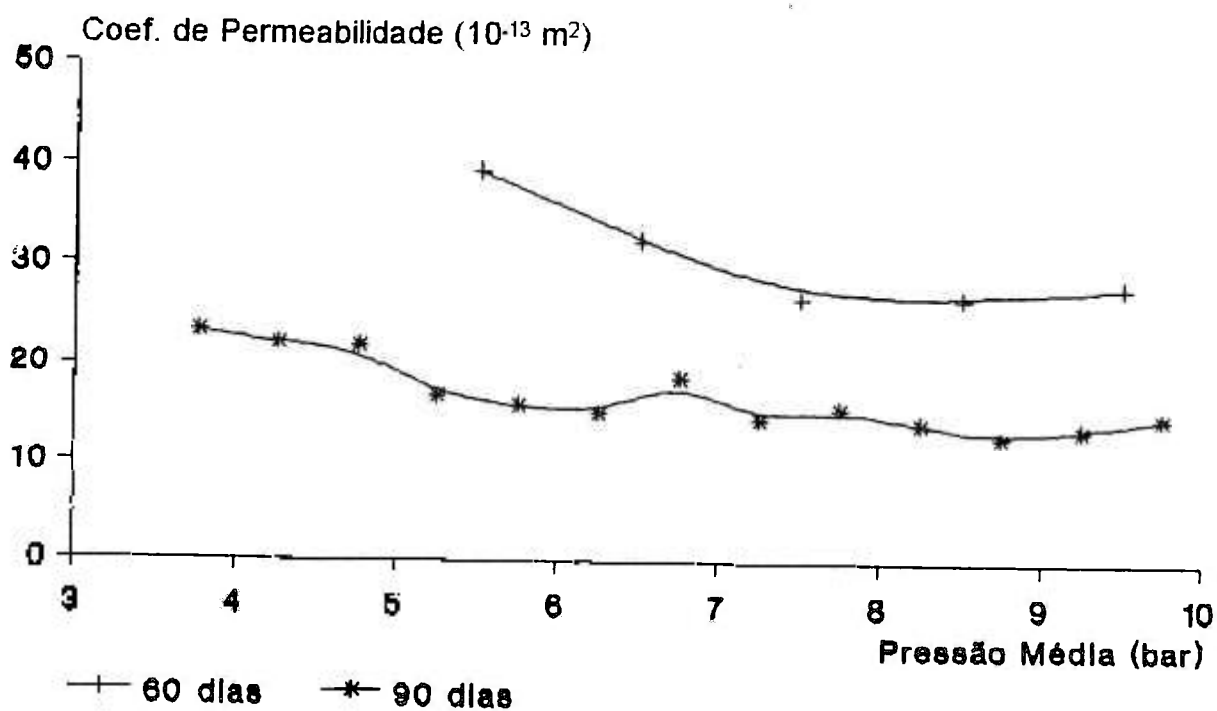


Figura 5.6.b Relação entre o coeficiente de permeabilidade e a pressão média para a razão A/C = 0,7.

02 NOV 1994