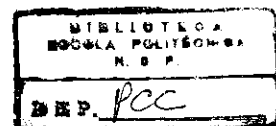


12 SET 1987

2861 135 11



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Departamento de Engenharia de Construção Civil



BT-09/87

POROSIDADE DO CONCRETO

VICENTE C. CAMPITELI



Boletim patrocinado pela

COMPANHIA CIMENTO PORTLAND ITAÚ

BOLETIM TÉCNICO DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL
ESCOLA POLITECNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

EDITOR RESPONSÁVEL

Prof. Norberto B. Lichtenstein

CONSELHO EDITORIAL

Prof. Fernando H. Sabbatini
Prof. Dr. João da Rocha Lima Jr.
Prof. Dr. Orestes M. Gonçalves
Prof. Dr. Vahan Agopyan
Prof. Dr. Witold Zmitrowicz

O BOLETIM TÉCNICO é uma publicação do Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, fruto de pesquisas realizadas por docentes e pesquisadores desta Universidade.

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL
Cidade Universitária - São Paulo - SP - Brasil
Caixa Postal 61548 - CEP 05508

Telex 011.32237 - Fone: 815.9322 R.234

POROSIDADE DO CONCRETO

Vicente C. Campiteli *

CAMPITELI, Vicente C. Porosidade do Concreto. São Paulo, Departamento de Engenharia de
Construção Civil da EPUSP, 1987. p. BT - PCC 09/87

São apresentadas as noções básicas sobre porosidade de pastas e concretos de cimento hidráulico e um estudo experimental sobre a determinação da porosidade de pastas de cimento endurecidas.

O trabalho experimental foi realizado com amostras de pastas endurecidas de cimento portland (clínquer e gesso) com adições de 20, 40, 60 e 80 por cento em massa. As adições empregadas foram: escória granulada de alto forno, cinzas volantes, cinzas de cascas de arroz e resíduo cerâmico moído.

A porosidade destas amostras foram obtidas através de ensaios de: absorção de água por imersão e vácuo e porosimetria por intrusão de mercúrio.

Observou-se uma ação eficiente das adições na modificação da porosidade das amostras, com relação àquelas de cimento portland sem adições, tomadas como padrão.

Cimento hidráulico. Concreto. Poros. Porosidade. Porosímetro. Absorção de água. Intrusão de mercúrio. Distribuição dos poros por tamanhos.

CAMPITELI, Vicente C. Concrete Porosity. São Paulo, Departamento de Engenharia de
Construção Civil da EPUSP, 1987. p. BT - PCC 09/87

The basic ideas on porosity of hardened cement pastes and concrete are presented and the results of an experimental research on the porosity of hardened cement pastes are also indicated.

The experimental work was carried out on hardened cement pastes where the binder was the portland cement (clinker and gypsum) with 20, 40, 60 or 80 percent of additions by weight. Blast furnace slag, fly ash, rice-hulls ash, and ground residues were used as cement additions.

The porosity of the samples were measured by: water absorption on by immersion and vacuum, and mercury porosimeter.

The cement addition have an efficient effect on the porosity of the samples.

Hydraulic cement. Concrete. Pores. Porosity. Porosimeter. Water absorption. Mercury penetration. Pore size distribution.

* Mestre em Engenharia, Professor de Materiais de Construção Civil da Universidade Estadual de Ponta Grossa.

1. INTRODUÇÃO

O uso do concreto como material de construção no Brasil tornou-se uma prática quase indispensável na maioria das obras de Engenharia Civil. Com isso, as técnicas de produção, de aplicação e de controle tecnológico têm melhorado, para atender às crescentes exigências técnicas, econômicas e estéticas.

Como consequência do grande uso do concreto como material de construção, o engenheiro tem se deparado com problemas patológicos que precisa resolver. Por esta razão existem atualmente aprofundadas pesquisas no campo da ciência dos materiais, aplicadas aos concretos.

Entre estas pesquisas, a porosidade tem ocupado lugar de destaque. Devido as dimensões dos poros variarem desde alguns angstroms até vários micrometros, bem como as suas formas serem bastante irregulares, as técnicas utilizadas no seu estudo variam desde operações e equipamentos simples até bastante sofisticados.

As informações técnicas a respeito destas questões não estão vulgarizadas na literatura técnica brasileira e este é o objetivo deste trabalho. As informações a seguir apresentadas dão uma noção sobre porosidade dos concretos, em particular da pasta de cimento endurecida. Uma pesquisa sobre porosidade de pastas de cimento endurecidas acompanha o trabalho.

Antes de abordar o tema proposto, é necessário apresentar algumas informações a respeito das propriedades estruturais dos poros e das técnicas de determinação que se conhecem.

1.1. Propriedades estruturais dos poros

As propriedades estruturais, fundamentais para a descrição dos materiais porosos, são: a porosidade, a área específica e a distribuição dos poros por tamanhos.

A porosidade de um material é a sua propriedade de apresentar poros ou vazios. É representada pela fração do volume total de uma amostra porosa, que é ocupada por poros ou por espaços vazios.

A área específica de um material poroso é a relação entre a área superficial das paredes dos poros e o volume ou a massa do material poroso.

A distribuição dos poros por tamanhos é a fração dos poros abertos, cuja fração é em quadrada numa faixa estabelecida de tamanhos. Numa comparação, a curva de distribuição dos poros por tamanhos correspondente à curva de distribuição granulométrica de uma areia, por exemplo, só que em vez de grãos, tem-se poros.

Essas três propriedades dos poros são essencialmente geométricas, havendo ainda uma

quarta propriedade geométrica, a forma do poro, que pode ser também de fundamental importância, embora seja menos quantificável do que as anteriores.

Por se tratar de medidas muito pequenas, a incerteza envolvida nos resultados é significativa; por essa razão existem vários métodos de determinação das propriedades dos poros, cada método destacando alguns aspectos, mas não todos. A tabela 1.1 indica uma relação de métodos diretos e indiretos para estas determinações.

TADELA 1.1 - Relação dos métodos utilizados para a determinação das propriedades estruturais dos poros (01).

Fenômeno envolvido	Metodologia empregada	Propriedade dos poros
Estereologia (óptico)	Integração de fase	- 1
	Análise de linha	- 1
	Contagem de pontos	- 1
	Análise de interceptação	- 6 - 7 - 8 - 9
Deslocamento de fluidos	Divisão em séries	- 8 - 9
	Flutuação	- 1 - 3
Fluxo de fluidos	Pícnometria	- 1 - 3
	Volúmetria a gás	- 3
Fluxo de fluidos	Fluxo instantâneo de gás	- 2 - 3
	Fluxo de fluidos em reg.perm.	- 4 - 6 - 7a
Curvatura Interfacial	Porosim. por pres. ou sucção	- 6b- 8
	Condensação capilar	- 3 - 6b- 8
	Depres. do ponto de congelam.	- 6b- 8
Adsorção	Adsorção de gases ou vapores	- 5 - 6 - 7c
	Adsorção de solução	- 6 - 7c
	Efeito de peneira molecular	- 5d
Outros	Calor de molhagem	- 6
	Condutância elétrica	- 4 - 6e
	Atenuação de radiação	- 1
	Espalhamento de radiação	- 6 - 7
	Cinética de molhagem	- 3 - 7

Propriedades dos poros:

- 1 - Porosidade total;
- 2 - Porosidade não acessível;
- 3 - Porosidade aberta;
- 4 - Porosidade permeável;
- 5 - Volume dos microporos;
- 6 - Área específica;
- 7 - Tamanho médio dos poros;
- 8 - Distribuição dos poros por tamanho;
- 9 - Forma dos poros.

Observações:

- a) Tamanho dos poros cilíndricos iguais, de mesmo volume total, dando a mesma permeabilidade;
- b) Calculado por integração;
- c) Calculado a partir da relação área-volume, se a porosidade for conhecida;
- d) Pode dar a distribuição dos microporos por tamanhos;
- e) Pelo método de Astbury, baseado na cinética de molhagem.

No estudo da porosidade das pastas de cimento endurecidas, determina-se, principalmente, a distribuição dos poros por tamanhos, a porosidade aberta e a área específica. A distribuição dos poros por tamanhos e a porosidade aberta são determinados por intrusão de mercúrio sob pressão e a área específica por adsorção de nitrogênio, pelo método BET. Outros métodos são utilizados, porém, estes são os mais usuais.

1.2. Porosimetria por intrusão de mercúrio

A determinação da distribuição de poros pelo método de injeção de mercúrio é baseada no comportamento de líquidos não molhantes em capilares. Um líquido que tenha um ângulo de contato maior do que 90 graus, não pode penetrar espontaneamente em um poro, devido à tensão superficial. Essa tensão superficial pode ser superada, exercendo-se uma certa pressão externa. A pressão requerida é função do tamanho do poro.

A relação entre o tamanho do poro e a pressão exercida é expressa pela seguinte equação:

$$P.r = 2.Ts.\cos \beta$$

onde: r = raio do poro;
P = pressão absoluta exercida;
Ts = tensão superficial do mercúrio;
 β = ângulo de contato.

Usando mercúrio com tensão superficial igual a 480 dinas/cm, com ângulo de contato igual a 141,3 graus e admitindo que todos os poros são cilíndricos, obtém-se a seguinte relação entre o raio do poro e a pressão:

$$r = 75.000/P$$

onde: r = raio do poro em angstrom;
P = pressão absoluta aplicada, em kgf/cm²

A amostra a ensaiar deverá ter uma massa que depende da porosidade. Se a amostra for muito porosa, a massa deverá ser pequena, da ordem de 0,2 g a 1,0 g e se for pouco porosa, poderá chegar a 5 g. Quanto maior a massa da amostra, menor a incidência de erro nas leituras do porosímetro de mercúrio.

A amostra é colocada em um frasco de vidro em cuja tampa está acoplado um tubo capilar de vidro de 10 cm de comprimento, com diâmetro interno de 3 mm ou 6 mm. Este frasco chama-se dilatômetro.

O dilatômetro com a amostra é conectado a um módulo de preenchimento, onde é feito vácuo. Após o vácuo, o dilatômetro é preenchido com mercúrio puro.

O dilatômetro é colocado numa autoclave no porosímetro, onde são aplicadas pressões crescentes até 1.500 kgf/cm². Os deslocamentos no capilar do dilatômetro, juntamente com as pressões correspondentes, são automaticamente registrados em um diagrama.

A partir dos dados de volume de mercúrio injetado e das pressões aplicadas, são calculadas a porosidade e a distribuição dos poros por tamanhos, cuja distribuição é representada sob três formas gráficas: curva acumulativa, curva diferencial e histograma. Recomenda-se que o ensaio seja repetido pelo menos três vezes para tornar reproduzíveis os resultados. Este método permite determinar a distribuição de poros de dimensões entre

75.000 e 50 angstroms.

2. POROSIDADE DO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND

A porosidade nos concretos é causada pelos seguintes fatores: água da mistura, porosidade dos agregados, alterações na zona de contato entre a pasta e os agregados, fissuração e deficiências da produção dos concretos.

Os estudos da fissuração e da produção dos concretos não serão abordados nesse trabalho. O estudo da porosidade da PCE será apresentado em outro capítulo.

2.1. Ascensão da água da mistura

Os concretos normais, não aditivados, para serem adensados convenientemente, necessitam mais água do que a necessária para a hidratação completa do cimento.

Durante e após o adensamento, a água sobe, em maior ou em menor quantidade, formando canalicos de dimensões que variam de 10µm a 100µm (02 e 03).

Essa água que sobe dentro do concreto, pode encontrar uma partícula de agregado ou uma barra de armadura, espalhando-se neste local. Pode ocorrer também que a água em excesso suba até a superfície, dando origem ao que se chama "nata" sobre a superfície do concreto. Se, sobre a água exsudada, for lançada outra camada de concreto, ela ficará parcialmente retida entre essas duas camadas.

A água em excesso sob as partículas de agregados ou sob as barras da armadura provocará o descolamento da pasta, criando vazios nessas regiões, e também, pelo excesso de água, formará uma zona de acentuada porosidade. Da mesma forma, o excesso de água na superfície do concreto ou presa entre duas camadas, provocará o aumento da porosidade.

2.2. Porosidade dos agregados

Para os agregados comuns, o espaço de poros acessíveis (abertos) pode-se constituir num volume de aproximadamente 0% até 20%, sendo, em geral, de 0,5% até 5% (04 e 05). A Tabela 2.1 apresenta alguns valores de porosidades de rochas comuns.

Tabela 2.1. Porosidade de algumas rochas comuns (06)

Grupo	Porosidade (%)
Arenito	0,0 - 48,0
Quartzito	1,9 - 15,1
Calcáreo	0,0 - 37,6
Granito	0,4 - 3,8

Os poros dos agregados variam muito em tamanho, sendo que os maiores podem ser vistos ao microscópio óptico ou a olho nu. Mas, mesmo

os poros menores são, em geral, maiores do que os poros de gel da pasta de cimento endurecida (06).

A água pode penetrar nos poros dos agregados, sendo que a quantidade e a extensão dessa penetração dependem das dimensões, continuidade e volume total dos poros. Já, a pasta de cimento, devido a viscosidade, não consegue penetrar até uma profundidade grande, senão nos poros maiores.

Por meio de ensaios de permeabilidade das rochas, pode-se constatar a grande influência do tamanho dos poros. Rochas com mesma porosidade, apresentam diferentes valores de permeabilidade (07). Comparando-se as permeabilidades de algumas rochas e de pastas de cimento endurecida, pode-se constatar a influência do tamanho dos poros nas rochas, uma vez que as PCE têm porosidade que pode chegar a 50% (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 - Comparação entre permeabilidades: a água de rochas e pastas de cimento endurecidas (06)

Rochas	Coefficiente de Permeabilidade (m/s)	Rel. água-cimento de pastas maduras, com igual permeabilidade
Basalto Denso	$2,47 \times 10^{-14}$	0,38
Basalto Diorito	$8,24 \times 10^{-14}$	0,42
Mármore	$2,89 \times 10^{-13}$	0,48
Mármore	$5,77 \times 10^{-12}$	0,66
Granito	$5,35 \times 10^{-11}$	0,70
Arenito	$1,23 \times 10^{-10}$	0,71
Granito	$1,56 \times 10^{-10}$	0,71

A porosidade dos agregados é de grande importância para a qualidade dos concretos, tanto que alguns países especificam a qualidade dos agregados para concreto em função de sua porosidade, entre outras propriedades relevantes (08)

No caso de agregados leves, o volume de vazios varia de 30% a 60% (04). Nesse caso, os vazios são relativamente grandes e interligados.

2.3. Zona de contato entre a pasta e o agregado

Na zona de contato entre a pasta de cimento endurecida e os agregados (interface) pode ocorrer excesso de porosidade por aumento de relação água-cimento, por deficiência de aglomerante ou por tensões provenientes de cargas externas.

O aumento da relação água-cimento, causado pela exsudação da água durante ou após o adensamento, a qual se espalha sob os agregados, provocará o descolamento entre a pasta e os agregados e o aumento da porosidade da

pasta nessa região.

Em misturas pobres em aglomerantes ou devido a deficiência de homogeneização da mistura, pode ocorrer falta de envolvimento dos agregados pela pasta, o que acarretará porosidade na interface.

Com relação ao carregamento externo, à medida que se processa o carregamento, aumentando as deformações, o número e a extensão dos descolamentos aumenta (09 e 10). Esses descolamentos dependem das propriedades do agregado graúdo. A resistência de aderência entre a pasta e os agregados é influenciada pelas características da superfície, pela forma e pelo tipo de agregado, para uma dada pasta de cimento endurecida (06).

2.4. Quantidade de poros no concreto

Num concreto de boa qualidade, as primeiras idades, a porosidade é de 20% a 25% e, a uma idade madura, é de 10% a 15%. Mas, não é possível para um concreto, ter um volume de vazios de menos de 10% (4).

Os concretos podem ser classificados de acordo com a sua porosidade, conforme a Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Valores médios da porosidade dos concretos (08).

Qualidade do concreto	Porosidade (%)
Excelente	10 a 11
Boa	11 a 15
Satisfatória	16 a 18
Medíocre	19 a 22
Ruim s muito ruim	22

Foram observadas porosidades de 30%

2.5. Absorção de Água

Absorção é um processo físico pelo qual o concreto retém água nos poros e condutos capilares e é função dos poros que têm comunicação com o exterior. A água tem acesso aos poros do concreto pela ação de pressão ou pelo fenômeno de capilaridade.

A capilaridade, que é característica dos materiais higroscópicos, se desenvolve por sucção capilar, independente de pressão exterior e necessita apenas contato com o foco de umidade. A água absorvida por capilaridade, permanece na rede capilar, podendo sofrer evaporação através das extremidades externas dos vasos.

A absorção é a maneira de se medir o volume dos poros abertos, isto é, acessíveis à água. A partir do volume de água absorvida, pode-se determinar a porosidade, que é a relação entre o volume dos poros e o volume total do corpo de prova. A porosidade determinada por absorção de água, chama-se porosidade de aberta ou aparente.

O valor de absorção, obtido nos ensaios, varia em função do método utilizado, conforme mostra a tabela 2.4. Verifica-se que o ensaio que submete o corpo de prova a secagem a 100°C e imersão em água por 48 h, com mais 5h de ebulição é a condição mais rigorosa. A norma americana ASTM C 642 preconiza esta metodologia.

A variação da absorção também é sensível com o consumo de cimento, sendo que quanto maior o consumo, em concretos bem dosados, menor será a absorção.

A porosidade aparente do concreto tem sido determinada também por imersão e vácuo, em vez de fervura. A porosidade absoluta do concreto (inclusive os poros não acessíveis), é determinada por uma relação entre as massas específicas das amostras secas e após moagem. Os resultados obtidos com imersão e fervura, imersão e vácuo e após moagem são aproximadamente iguais (08).

Tabela 2.4 - Valores de absorção de água de concretos, determinados por diversos métodos (11).

Condição de Secagem	Condição de Secagem	Absorção - %			
		A	B	C	D
100 °C	água - 30 min	4,7	3,2	8,9	12,3
100 °C	água - 24 h	7,4	6,9	9,1	12,9
100 °C	água - 48 h	7,5	7,0	9,2	13,1
100 °C	água - 48 h + ebulição 5 h	8,1	7,3	14,1	17,2
65 °C	ebulição - 5 h	6,4	6,4	13,2	17,2

A absorção não pode ser usada como medida de qualidade de um concreto, mas grande parte dos concretos de boa qualidade têm absorção bem abaixo de 10%.

3. POROSIDADE DA PASTA DE CIMENTO ENDURECIDA

A micro estrutura da pasta de cimento endurecida (PCE) é constituída pelos produtos da hidratação do cimento e pelos poros. Os poros em uma PCE se caracterizam por terem quantidade, formas e dimensões muito variadas.

As propriedades da PCE variam com a porosidade. Para se relacionar as propriedades com a porosidade, é necessário classificar os poros quanto ao tamanho, pois esta é uma das características dos poros que mais influencia as propriedades. A tabela 3.1 apresenta uma classificação dos poros quanto ao tamanho e a tabela 3.2, as relações entre a porosidade e as propriedades.

Tabela 3.1 - Classificação dos poros quanto ao tamanho, em pasta de cimento endurecida (12).

Designação	Descrição	Diâmetro	Unid.
Poros Capilares	Capilares grandes	10 - 0,5	µm
	Capilares médios	50 - 10	nm
Poros do Gel	Capilares pequenos	10 - 2,5	nm
	Microporos "interlamelares"	2,5 - 0,5	nm
		0,5	nm

1 µm = 1.000 nm

Tabela 3.2 - Relações entre a porosidade e as propriedades da pasta de cimento endurecida (12).

Poros	Papel da água	Propriedades da pasta afetada
Capilares grandes	Mantida como água livre	Resistência Permeabilidade
Capilares médios	Gera forças de moderada tensão superficial	Resistência Permeabilidade Retração sob altas umidades
Capilares pequenos	Gera forças de forte tensão superficial	Retração a 50% de umidade relativa
Microporos	Água fortemente adsorvida, não forma menisco	Retração Deformação lenta
Microporos "interlamelares"	Água estrutural envolvida em ligações	Retração Deformação lenta

3.1 - A micro-estrutura da PCE e o papel da água

Gel é o nome que se dá aos produtos da hidratação do cimento, tais como o Silicato Hidratado de Cálcio (C-S-H), a Portlandita ou Hidróxido de Cálcio (CH), o Sulfato-aluminato de Cálcio Hidratado ou Etringita, o Monosul-

foaluminato de Cálcio Hidratado, etc. Estes compostos se apresentam na forma cristalina, com morfologia bem variada, tais como fibras no C-S-H, placas hexagonais finas no CH, agulhas alongadas na Etringita, placas hexagonais longas e finas ou rosetas no monossulfato aluminato, etc.

Na pasta de cimento endurecida ocorre também a presença, maior ou menor, de grãos de cimento não hidratados ou parcialmente hidratados. Esses resíduos de cimento não hidratados podem persistir até em cimentos bem hidratados. Ocorrem também pequenas quantidades de hidróxido de magnésio. Esses componentes podem ser encontrados em até 5% em volume nas pastas maduras, embora os resíduos não hidratados prevaleçam em pastas com pequenas idades.

O papel da água no interior da PCE é de grande importância, pois exerce grande influência nas suas propriedades. É um de seus constituintes essenciais, pois toma parte nas reações de hidratação e, uma vez que o esqueleto estrutural tenha se formado, é atraída para as superfícies sólidas dentro do gel. A água está presente então, de diferentes maneiras dentro da PCE.

De acordo com a dificuldade de remoção da água por secagem, as situações em que a água se apresenta dentro da PCE são as seguintes:

- VAPOR DE ÁGUA** - A PCE raramente não contém vazios no seu interior e os vazios frequentemente contêm ar advindo do ambiente exterior ou da água no interior da pasta. Em consequência, os vazios também contêm vapor d'água exercendo a pressão de vapor apropriada à umidade relativa e à temperatura.
- ÁGUA LIVRE** - A água livre está localizada principalmente nos capilares, mas também nos maiores poros do gel e esta, por definição, suficientemente longe das superfícies sólidas para estar livre das forças de atração daquelas superfícies.
- ÁGUA ADSORVIDA** - Ao contrário da água livre, a água adsorvida esta sob a influência das forças de superfícies e assim, esta sobre a superfície. A primeira camada é frequentemente dito estar quimisorvida e esta rigidamente mantida, podendo ser considerado como parte do sólido. As próximas quatro ou mais camadas moleculares são atraídas fisicamente e suas energias de ligação diminuem com a distância até a superfície.
- ÁGUA INTER-LAMELAR** - Como em algumas argilas, a água pode penetrar nas camadas estruturais do gel, sólido ou dentro dos espaços inter-cristalinos. Esta é a água lamelar, algumas vezes chamadas de água zeolítica. A sua remoção resulta em uma diminuição do espaço inter-lamelar.

- ÁGUA COMBINADA QUIMICAMENTE** - Um nome alternativo é água de hidratação. Esta é a água que se combina com o cimento não hidratado nas reações de hidratação e a qual faz parte integrante dos produtos sólidos.

3.2. Retirada da água

Para a determinação da porosidade das PCE, como de outros materiais à base de cimento, é necessário retirar toda a água dos vazios, pois os métodos se baseiam em medidas de massas saturadas de água e massas isentas de umidade. Para a desumidificação das PCE, são utilizados três processos, chamados de secagem: secagem-P, secagem-D e secagem em estufa. A tabela 3.3 apresenta as condições destas secagens.

Tabela 3.3 - Condições de secagem padrão, usadas para determinar o conteúdo de água na PCE (12).

Tipo de secagem	Temperatura	Pressão do vapor d'água (Pa)*	Outras condições
Secagem-P	ambiente	1,1	Vácuo (0,001 Pa) sobre $Mg(Cl_2) \cdot 4H_2O$
Secagem-D	ambiente	0,07	Vácuo (0,001 Pa) sobre gelo seco a. -78°C **
Secagem em estufa	105°C	-	Pressão atmosférica Aquecimento em estufa

* Pa x 0,0075 = 1 torr = 1 mmHg

** Temperatura de sublimação do CO2 sólido

Tem-se procurado métodos de secagem que retirem a maior quantidade de umidade das amostras e que não altere o grau de hidratação do cimento no momento da secagem. Quando se utiliza métodos de secagem com calor, a introdução de energia no sistema acelera o processo de hidratação durante algum tempo, modificando a micro-estrutura da PCE. Por essa razão, a secagem em estufa tem sido rejeitada quando se requer maior rigor no estudo das propriedades dos poros.

3.3. Poros capilares

Os poros capilares são formados pela saída da água da mistura em excesso, que não participou das reações de hidratação do cimento. Essa água em excesso, antes da hidratação, provoca afastamento dos grãos de cimento numa magnitude tal, que os cristais em crescimento podem ou não colmatar, esses espaços disponíveis. Assim, a porosidade capilar será tanto maior, quanto maior for a

quantidade de água adicionada à mistura e quanto menor for o grau de hidratação. A classificação dada na tabela 3.1 considera os poros capilares, aqueles onde ocorre formação de menisco, os poros menores, são chamados de microporos.

Com relações água-cimento maiores que cerca de 0,36 (12), o volume de gel não é suficiente para encher todo o espaço disponível, de modo que sobrar um certo volume de poros capilares, mesmo que o processo de hidratação tenha sido completado.

Esses poros variam em tamanho, como se vê na tabela 3.1, e formam um sistema interconectado, distribuído aleatoriamente pela PCE. Esses poros capilares interconectados são os principais responsáveis pela permeabilidade da pasta de cimento à água. A hidratação aumenta o conteúdo sólido da pasta e, em pastas maduras, os capilares podem ficar obstruídos pelo gel e segmentado de tal modo que se transformem em poros capilares interconectados somente pelos poros de gel. Para que os capilares sejam segmentados pelos produtos da hidratação, é necessário que a amostra permaneça um tempo mais ou menos longo em cura úmida, cujo tempo depende do fator água-cimento (tabela 3.4).

Tabela 3.4 - Idade aproximada, necessária à maturidade, para que os capilares sejam segmentados (06)

Relação água-cimento em massa	Tempo necessário
0,40	3 dias
0,45	7 dias
0,50	14 dias
0,60	6 meses
0,70	1 ano
0,70	impossível

Para relações água-cimento acima de 0,7 mesmo a hidratação completa não produziria gel bastante para obstruir todos os capilares. No caso de cimentos extremamente finos, a relação água-cimento máxima seria maior, possivelmente até 1,0. No caso de cimentos grossos seria menor que 0,7 (06).

3.4. Poros do gel

Os poros do gel são os espaços vazios existentes entre os produtos da hidratação e também grãos de cimento não hidratados ou parcialmente hidratados, menores do que os poros capilares.

Os poros de gel ocupam cerca de 26% do volume total do gel (12), considerando-se como sólido o material remanescente após a secagem. A porcentagem real dos poros do gel, durante o andamento da hidratação, é característica para cada tipo de cimento. Desde que haja água suficiente para hidratar com-

pletamente o cimento, a porosidade do gel é independente da relação água-cimento.

Como o volume total de gel aumenta com o prosseguimento da hidratação, o volume de poros de gel também aumenta. Assim, a porosidade do gel depende somente do grau de hidratação, ou da maturidade, da pasta.

3.5. Influência da porosidade nas propriedades da PCE.

a) Resistência - A resistência à compressão de amostras de pastas de cimento de várias relações água-cimento e a vários estágios de maturidade, curadas a temperatura normal, varia conforme a relação empírica:

$$f_c = f_{c0} \cdot x^n$$

onde:

- f_c = resistência à compressão;
- f_{c0} = é uma característica constante do cimento e parece representar a resistência do gel de cimento (13)
- x = relação gel-espaço, que para uma pasta completamente hidratada é essencialmente $(1-P_c)$, onde P_c é a porosidade capilar (14);
- n = é uma constante que vale de 2,6 a 3,0 dependendo das características do cimento (15).

Como acontece com outros materiais porosos, a resistência da pasta de cimento depende preliminarmente da porosidade e, como se viu acima, da porosidade capilar. A natureza química exata dos produtos da hidratação é menos significativa (12).

b) Permeabilidade - A porosidade domina também a permeabilidade da PCE. Pastas com alta porosidade capilar têm alta permeabilidade, pois a água flui facilmente através dos grandes poros. Pastas hidratadas, com baixa relação água-cimento têm permeabilidades muito baixas quando comparadas com pastas de alta relação a/c.

c) Mudanças de Volume - As variações de volume, devidas às modificações de umidade ambiente (retração e inchamento), são funções das mudanças na umidade interna do material e das características de tensão-deformação elástica e não elástica. Embora a retração e o inchamento sejam independentes da porosidade, eles o são da interação entre a parte sólida da pasta e a entrada ou a saída da água.

d) Módulo de Deformação - O módulo de deformação das amostras de pasta de cimento é proporcional a aproximadamente a terceira potência da relação gel-espaço.

4. POROSIMETRIA EM PCE, POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO

Para se conhecer a influência de algumas adições na porosidade e na distribuição dos po-

ros por tamanhos, de pastas de cimento endurecidas, foi realizado uma pesquisa de poro simetria por intrusão de mercúrio em amostras com 90 dias de idade, com fator água-cimento de 0,40 e com teores variados de adições.

As adições escolhidas para a pesquisa foram: escória granulada de alto-forno, cinzas volantes, cinzas de cascas de arroz e resíduo cerâmico moído. As adições foram misturadas ao cimento portland "puro" (clinker moído com gesso), nos teores de 20%, 40%, 60% e 80% relativo à massa de mistura. As análises químicas desses materiais são apresentadas a seguir e foram realizadas pelo Laboratório de Química dos Materiais da Divisão de Edificações do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo.

Tabela 4.1 - Resultados das análises químicas dos materiais utilizados (16)

a) Cimento Portland

Análise Química	Composição Potencial de Bogue		
Perda ao fogo	1,45%	Gesso	7,10%
SiO ₂	18,50%	C3S	55,50%
Al ₂ O ₃	4,95%	C2S	10,40%
Fe ₂ O ₃	3,71%	C3A	6,85%
CaO	60,40%	C4AF	11,30%
MgO	5,84%		
S ₀₃	3,30%		
Na ₂ O	0,16%		
K ₂ O	0,77%		
P ₂ O ₅	1,04%		
Insolúveis	0,31%		
Cal livre	1,02%		
álcalis	0,67%		

b) Escória Granulada de Alto Forno

Análise Química

Perda ao fogo	1,41%	Na ₂ O	0,14%
SiO ₂	5,60%	K ₂ O	0,52%
Al ₂ O ₃	10,79%	Mn ₂ O ₃	0,75%
Fe ₂ O ₃	0,81%	Sulfeto	0,97%
CaO	42,70%	Ferro Metálico	0,42%
MgO	6,57%	Insolúveis	0,75%
S ₀₃	0,09%	Teor de Álcalis	0,48%

c) Materiais Pozolânicos

- Análise Química

Tipo	Cinza Volante (%)	Cinza de Cascas de arroz (%)	Resíduo Cerâmico (%)
Perda ao fogo	2,86	9,40	0,98
SiO ₂	49,20	91,40	66,10
Al ₂ O ₃	25,20	1,10	19,60
Fe ₂ O ₃	16,00	0,78	7,84
CaO	2,50	0,84	0,21
MgO	1,18	1,13	1,82
S ₀₃	0,16	0,34	0,03
Na ₂ O	0,34	0,04	0,14
K ₂ O	1,78	2,88	2,14

- Álcalis Disponíveis

Tipo	Cinza Volante (%)	Cinza de Cascas de arroz (%)	Resíduo Cerâmico (%)
Na ₂ O	0,06	0,01	0,03
K ₂ O	0,62	0,52	0,41
Teor da álcalis (em Na ₂ O)	0,47	0,38	0,30

Os materiais ensaiados apresentaram as características físicas mostradas na tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Características físicas dos materiais ensaiados (16).

Ensaio	Unidade	Cimento Portland	Escór. Granul.	Cinza Volante	Cinza de Cascas de arroz	Res. Cerâm.
Massa Especif.	g/cm ³	3,15	2,87	2,66	2,06	2,67
Área Especif.	cm ² /g	3.290	5.170	8.650	15.210	9.170
Finura - # 200	%	0,9	4,8	1,8	1,2	6,2
Finura - # 325	%	13,8	17,3	2,7	16,4	43,4
In. de pega	h	2:15	-	-	-	-
Lim de pega	h	10:22	-	-	-	-

Durante as verificações da reologia, constatou-se que as misturas com 60% e 80% de cinzas de cascas de arroz e a mistura com 80% de resíduo cerâmico moído deixaram de apresentar o comportamento característico das pastas e passaram a se comportar como "terra úmida".

4.1. Amostras e ensaios

As misturas do cimento portland com as adições foram feitas a seco e após, foram adicionadas à água numa argamassadeira mecânica. Depois de homogeneizadas, as pastas foram moldadas em cilindros de 5mm de diâmetro e estocadas em água saturada de cal por 90 dias. Depois de desmoldadas, as amostras foram secas em estufa a 105°C.

Com as amostras, foram realizados ensaios de

porosidade e de distribuição dos poros por tamanhos com o porosímetro de mercúrio e em saios de porosidade e massa específica por imersão e vácuo.

A porosidade, em porcentagem, determinada com os dados do porosímetro, foi calculada pela seguinte equação:

$$\text{POROSIDADE} = \frac{\text{volume de vazios} \times 100}{\text{vol. de vazios} + (\text{massa/massa espec.}) \times 1000}$$

O volume de vazios corresponde ao volume total de mercúrio introduzido na amostra, medido diretamente pelo porosímetro.

A massa da amostra seca foi determinada antes de iniciar o ensaio com o porosímetro e a massa específica calculada pela seguinte equação.

$$G = \frac{A}{A - B} \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

onde: G = massa específica;
A = massa da amostra seca em estufa;
B = massa da amostra imersa em água, após saturação por imersão e vácuo (processo hidrostático).

A tabela 4.3 apresenta os resultados de massas específicas referidas acima.

Tabela 4.3 - Resultados de massas específicas das PCE, utilizados no cálculo das porosidades com os dados do porosímetros (16).

Amostra	Massas específicas (g/cm ³)	Amostra	Massas específicas (g/cm ³)
Puro	2,49		
20 E	2,48	20 A	2,45
40 E	2,45	40 A	2,35
60 E	2,39	60 A	2,23
80 E	2,30	80 A	2,15
20 FA	2,46	20 T	2,47
40 FA	2,44	40 T	2,49
60 FA	2,45	60 T	2,53
80 FA	2,51	80 T	2,53

Os símbolos apresentados na tabela 4.3 têm os seguintes significados:

Puro = Cimento Portland;
E = Escória granulada de alto forno;
FA = Cinzas volantes;
A = Cinzas de cascas de arroz;
T = Resíduo cerâmico moído;
20 - 40 - 60 - 80 = Teor de adição nas misturas.

Um valor mais exato para este cálculo de porosidade é obtido com o uso das massas específicas absolutas, determinadas por moagem das amostras a um alto grau de finura, porém

este critério apresenta dificuldades, devido a grande dispersão dos resultados. Como os valores de massa específica absoluta obtida por moagem e os de massa específica aparente obtida por imersão e vácuo são aproximadamente iguais, optou-se pelo uso das massas específicas aparentes.

A distribuição dos poros por tamanhos é determinada pela aplicação da equação apresentada em 1.2, com a determinação dos raios dos poros, considerados cilíndricos, a partir das pressões aplicadas pelo porosímetro. Os resultados obtidos serão apresentados mais adiante.

A porosidade obtida pelo ensaio de imersão e vácuo é determinada com a aplicação da seguinte equação:

$$\text{POROSIDADE} = \frac{C - A}{C - B} \times 100 (\%)$$

onde: A = massa da amostra seca em estufa;
B = massa da amostra imersa em água, após saturação por imersão e vácuo (processo hidrostático);
C = massa da amostra saturada por imersão e vácuo;

Os resultados de porosidade obtidos com os dados do porosímetro e com os dados de imersão e vácuo não são exatamente iguais, como pode ser constatado pelos dados da tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Resultados de porosidade das PCE, obtidos com os dados do porosímetro e por imersão e vácuo (16).

Tipo	Porosidade (%)		Tipo	Porosidade (%)	
	Porosimetria	absorção		Porosimetria	absorção
Puro	37,2	28,0			
20 E	39,5	27,1	20 A	42,7	34,7
40 E	36,8	28,3	40 A	47,3	35,1
60 E	33,1	27,4	60 A	50,4	48,2
80 E	28,7	28,6	80 A	68,0	56,9
20 FA	29,6	32,6	20 T	31,0	31,5
40 FA	30,7	33,9	40 T	31,8	34,5
60 FA	34,3	37,1	60 T	33,1	39,0
80 FA	43,4	42,2	80 T	42,2	42,2

Da análise da tabela 4.4 observa-se que houve um aumento de porosidade das PCE, quando se substituiu parte do cimento pelas adições ensaiadas, exceto no caso da escória.

Os resultados de porosidade obtidos por imersão e vácuo foram adotados como representativos das porosidades das PCE ensaiadas, tendo em vista tratar-se de um ensaio mais usual, devido a sua simplicidade.

4.2. Distribuição dos poros por tamanhos

O porosímetro de mercúrio, durante as operações do ensaio, fornece os dados de pressões aplicadas e de deslocamentos do nível do mercúrio no tubo capilar do dilatômetro. Como o diâmetro do capilar é conhecido, calcula-se, para cada pressão aplicada, o volume de mercúrio introduzido na amostra. É possível calcular o raio dos poros que permitem a penetração do mercúrio sob aquela pressão (veja item 1.2), com isso tem-se os pares de valores: volume de mercúrio e raio do poro.

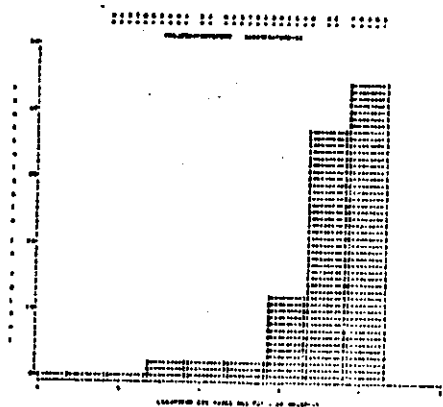
Como a quantidade de dados obtidos é muito grande, convém tratar esses dados estatisticamente, como pode ser visto nas figuras 4.1 e 4.2.

ANÁLISE DE MICROPOROS POR INJEÇÃO DE MERCÚRIO		
ESPECIMEN Puro-16		POROSIDADE: 15.65 %
RAIO DOS POROS (ANGSTROMS)	PORCENTAGEM DE P.C.P.R.	POPULAÇÃO ACUMULADA
553673.	0.00	0.00
553587.	0.16	0.00
452425.	0.30	0.00
375011.	0.30	0.02
375000.	0.00	0.00
325546.	0.16	0.00
325500.	0.30	0.00
26295.	0.30	0.00
21377.	0.32	0.00
21368.	0.30	0.00
21360.	2.24	1.04
15000.	1.36	2.05
10000.	9.87	5.74
8023.	1.36	6.29
8020.	2.30	8.31
710.	3.12	11.46
557.	13.54	25.00
500.	23.96	48.96
425.	18.16	61.54
300.	6.15	69.79
21.	14.10	84.30
20.	10.42	96.79
17.	5.11	100.00

PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DA DISTRIBUIÇÃO	
MEDIA	1.39
MODA	24. LANGSTROM
DESVIO PADRÃO	0.55
ASSÍMETRIA	-0.06
CURTÓSE	1.66

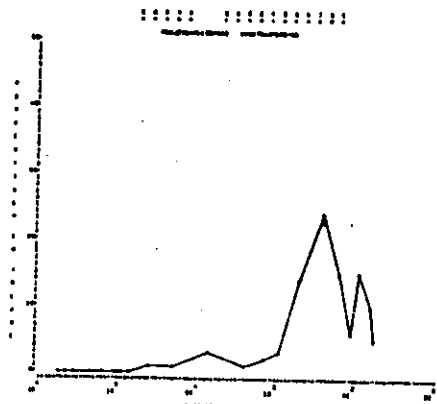
UNIDADE MICRO = 10000 ANGSTROMS

a) Tabela de Dados

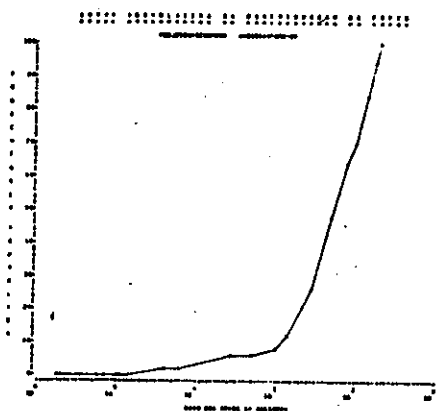


b) Histograma

Figura 4.1. Tabela de dados e histograma, de terminados a partir da porosimetria de mercúrio de uma amostra de cimento "puro" (16).



a) Curva Diferencial

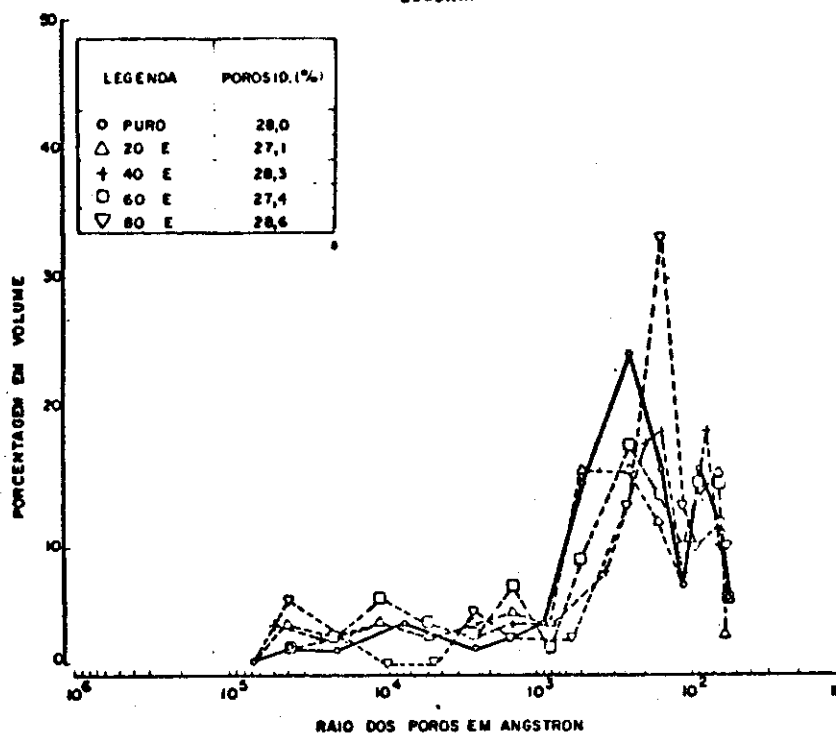


b) Curva Acumulativa

Figura 4.2. Curva diferencial e curva acumulativa da distribuição de poros por tamanhos, de uma amostra de cimento "puro" (16).

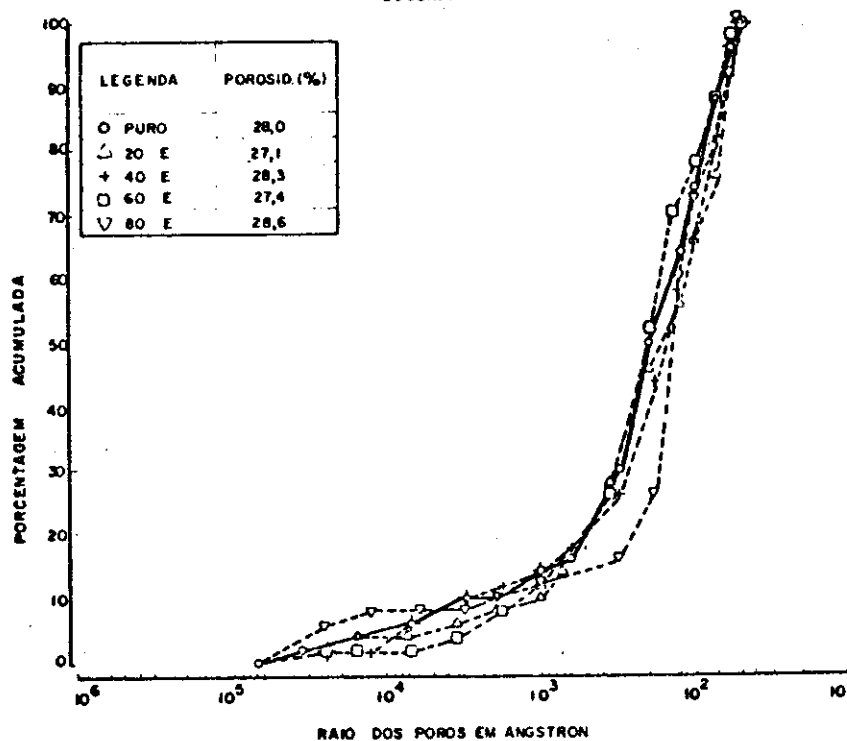
Com os resultados de porosimetria, obtidos para todas as misturas já referidas, fez-se um estudo comparativo, juntando em um só gráfico os dados das misturas com um mesmo tipo de adição, confrontando-os com os dados do cimento "puro". Esses estudos comparativos foram feitos com as curvas diferenciais e com as curvas acumulativas (figuras 4.3 a 4.6).

CURVA DIFERENCIAL
ESCÓRIA



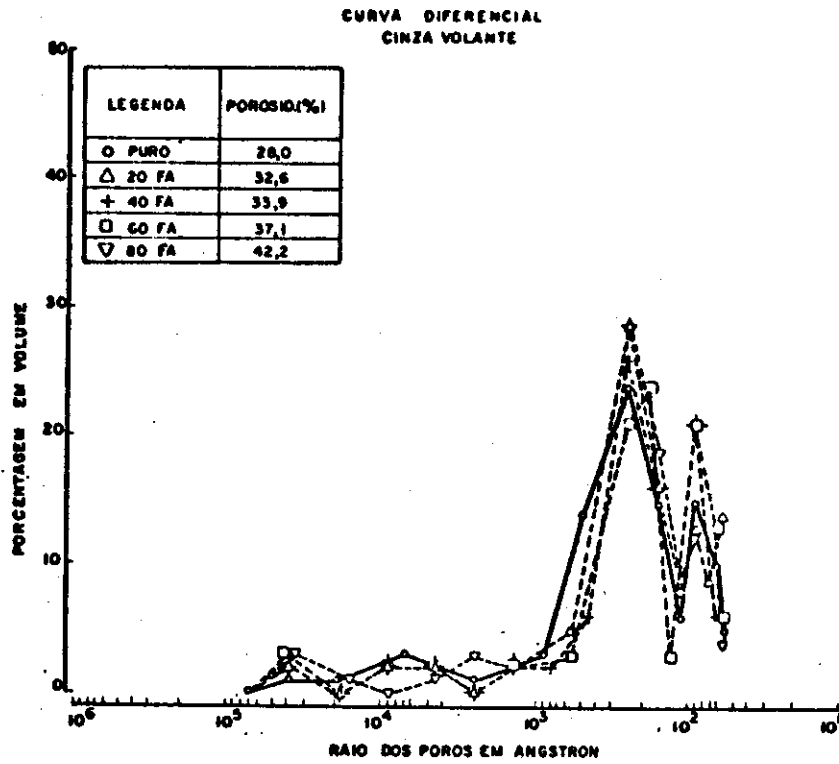
a) Curvas Diferenciais

CURVA ACUMULATIVA DA DISTRIBUIÇÃO DE POROS
ESCÓRIA

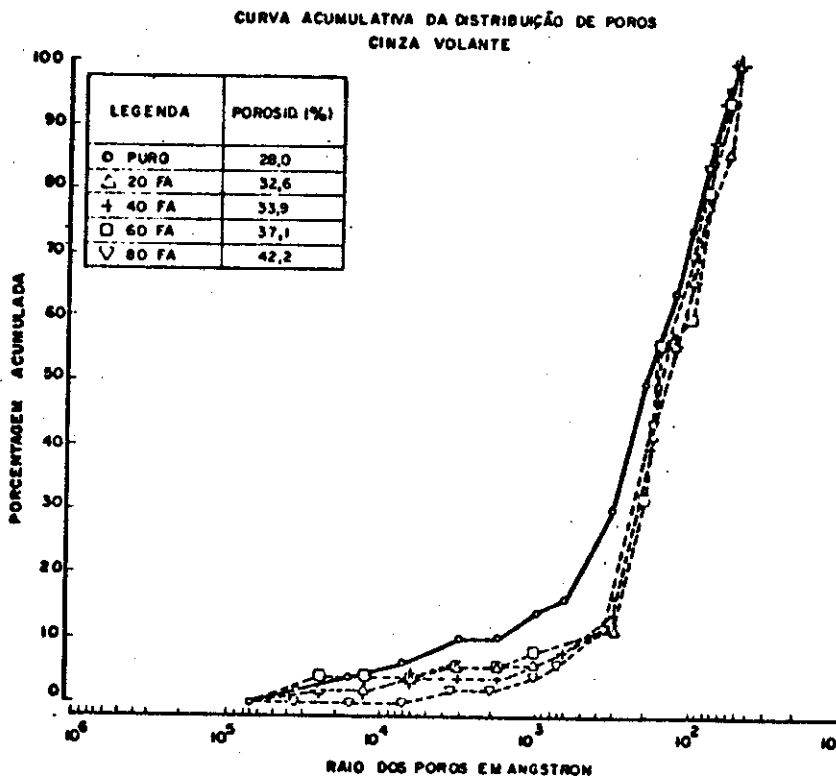


b) Curvas Acumulativas

Figura 4.3. Estudo comparativo de curvas diferenciais e curvas acumulativas, obtidas de amostras de cimento "puro" e de cimento com adição de escória granulada de al to forno (16).



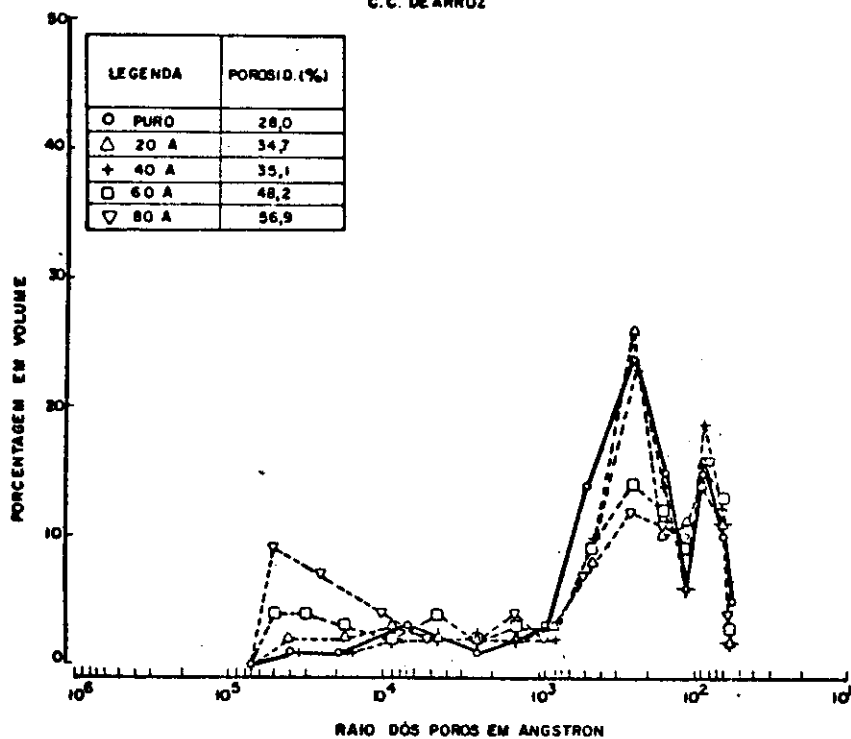
d) Curvas Diferenciais



b) Curvas Acumulativas

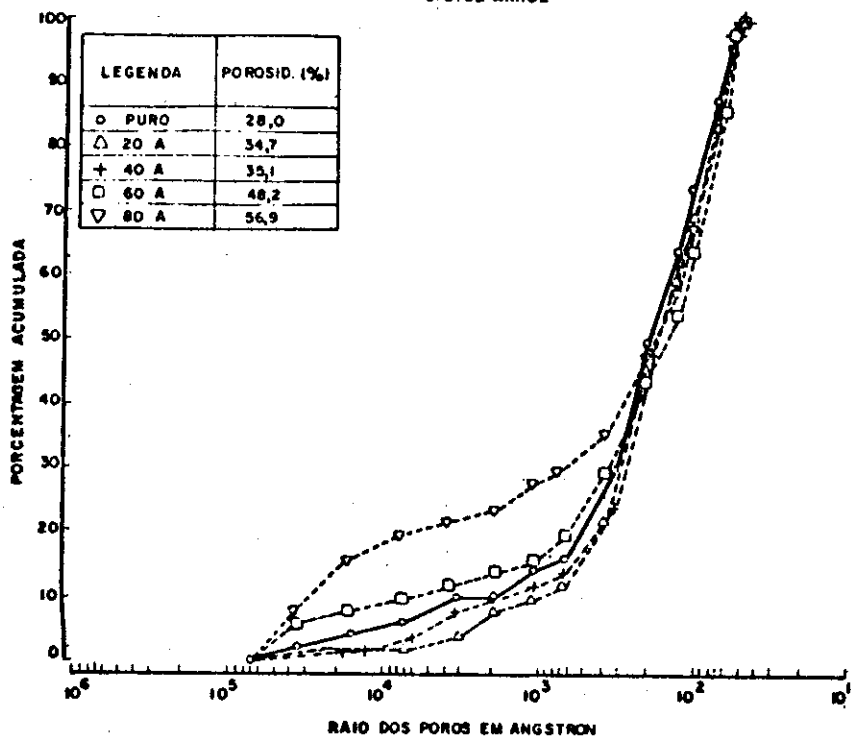
Figura 4.4. Estudo comparativo de curvas diferenciais e curvas acumulativas, obtidas de amostras de cimento "puro" e de cimento com adição de cinzas volantes (16).

CURVA DIFERENCIAL
C. C. DE ARROZ



a) Curvas Diferenciais

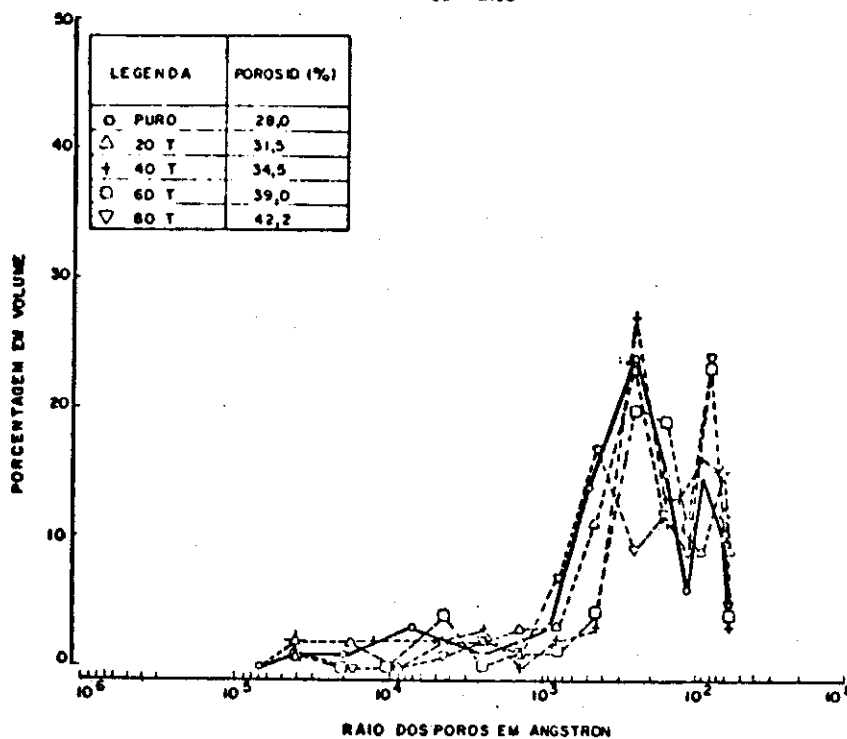
CURVA ACUMULATIVA DA DISTRIBUIÇÃO DE POROS
C. C. DE ARROZ



b) Curvas Acumulativas

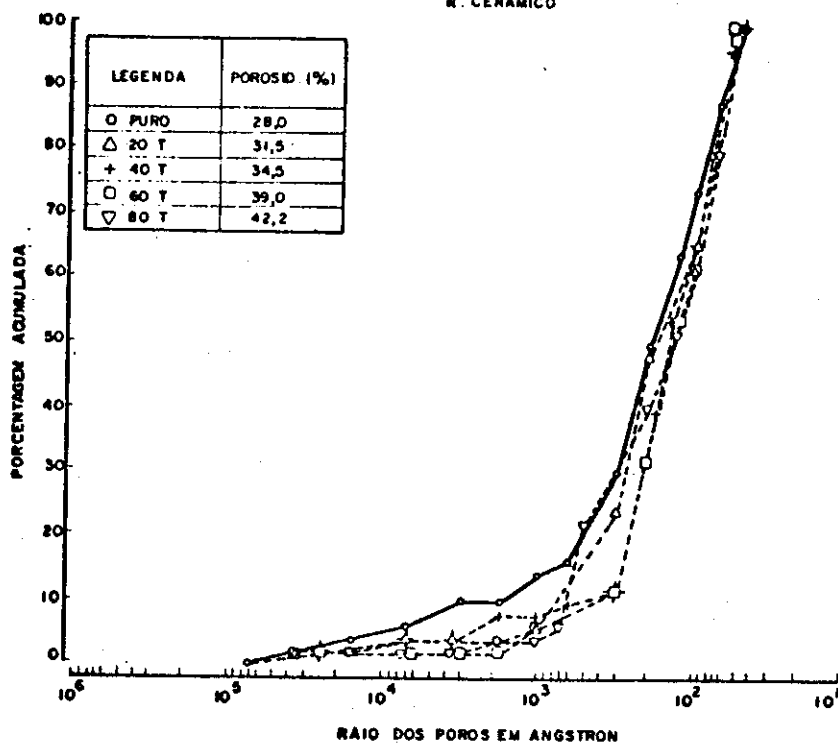
Figura 4.5. Estudo comparativo de curvas diferenciais e curvas acumulativas, obtidas de amostras de cimento "puro" e de cimentos com adição de cinzas de cascas de arroz (16).

CURVA DIFERENCIAL
R. CERÂMICO



a) Curvas Diferenciais

CURVA ACUMULATIVA DE DISTRIBUIÇÃO DE POROS
R. CERÂMICO



b) Curvas Acumulativas

Figura 4.6. Estudo comparativo de curvas diferenciais e curvas acumulativas, obtidas de amostras de cimento "pu ro" e de cimentos com adição de resíduo cerâmico moído (16).

Do estudo das figuras 4.3 a 4.6 e das tabelas de dados de todas as amostras (3 para cada tipo), chega-se aos dados da tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Porcentagens de poros, de acordo com os tamanhos. Média de três ensaios (16).

Tipo	Raios em angstroms					
	1.000	1.000	660	330	190	70
Puro	> 9,57	3,2	2,6	13,5	22	15
20 E	10,75	3,2	3,2	15,4	17	14
40 E	13,48	3,0	3,0	8,1	17	16
60 E	10,63	5,3	0,8	11,1	20	13
80 E	10,54	2,0	0,0	8,0	22	12
Média	11,35	3,4	1,8	10,7	19	14
20 FA	8,04	2,1	0,0	13,8	27	12
40 FA	5,90	2,1	1,6	4,9	28	17
60 FA	7,76	3,0	0,0	4,1	20	17
80 FA	5,14	1,6	0,9	6,0	29	15
Média	6,71	2,2	0,6	7,2	26	15
20 A	10,84	2,6	2,4	8,8	25	14
40 A	11,18	2,8	3,2	9,8	20	16
60 A	17,53	3,9	2,7	8,6	14	18
80 A	29,44	3,2	3,6	6,9	10	16
Media	17,25	3,1	3,0	8,5	17	16
20 T	7,02	2,7	6,7	9,4	22	8
40 T	7,40	1,6	1,6	7,3	22	16
60 T	4,53	3,3	0,4	8,8	22	16
80 T	3,72	2,0	5,0	15,9	16	20
Média	5,67	2,4	3,4	9,1	20	15
Média Total	10,20	2,8	2,2	8,9	21	15

Da tabela 4.6 e das figuras 4.3 a 4.6, destacam-se as seguintes constatações:

- Das figuras 4.3 a 4.6, observa-se que a presença das adições provocou um deslocamento das curvas para a direita, em relação a do cimento "puro", significando que houve uma diminuição do tamanho dos poros;
- As curvas diferenciais e a tabela 4.6 mostram que a maioria dos poros (cerca de 90%) têm raios menores do que 1.000 Å. Observa-se também que a presença de poros se torna mais significativa para raios menores do que 660 Å;
- As curvas diferenciais apresentam dois picos, correspondentes aos raios de poros de 190 e 70 angstroms, significando que ocorreu uma alta concentração de poros com esses raios;

As altas concentrações de poros com raios de 190 e 70 angstroms pode ter ocorrido devido ao seguinte:

- os poros de raios de cerca de 190 Å (1º pico) e de cerca de 70 Å (2º pico) podem ter a forma de garrafas de gargalo estreito. Assim, quando a pressão atinge um valor tal que injete mercúrio através dos gargalos, grandes volumes de mercúrio penetram nos vazios que se situam após os gargalos, antes inacessíveis devido às pressões menores.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A porosidade do concreto é influenciada pelos seguintes fatores, conforme foi apresentado nos capítulos anteriores:

- Exsudação.** Para evitar a exsudação, deve-se dosar concretos com mínimo fator água-cimento, compatível com a trabalhabilidade necessária, e aumentar a quantidade de finos com diâmetro menor do que 0,15 mm;
- Agregados.** Os agregados devem ter, se possível, forma cúbica, textura áspera, alguma atividade química não expansiva com a pasta (agregados calcários ou altamente solícicos), pequeno teor de poros e ter poros de pequeno tamanho;
- Interface pasta-agregados.** A zona de contato entre a pasta e os agregados será melhorada se, além de atender às recomendações do item b, adicionar-se materiais pozolânicos tais como cinzas volantes ou microssilica;
- Pasta.** A pasta que compõe o concreto terá porosidade mínima nas seguintes condições:
 - ter baixo fator água-cimento (abaixo de 0,55 l/kg - ver tabela 3.4);
 - quanto maior a idade, para uma dada temperatura;
 - quanto mais cuidadosa e prolongada for a cura;
- Adições.** O uso de adições, tais como escória granulada de alto forno, cinzas volantes, microssilica, cinzas de cascas de arroz e outras de eficiência comprovada, provocam a diminuição do tamanho dos poros, se forem convenientemente dosadas;
- Aditivos.** Uso de aditivos redutores de água ou superplastificantes, que possibilitem redução do fator a/c, mantendo a trabalhabilidade adequada.

Todas essas recomendações serão úteis por ocasião da dosagem do concreto, quando o tecnólogo deverá compatibilizar os materiais existentes na região com as condições da obra.

Além das recomendações anteriores, um concreto bem dosado, com materiais de boa qualidade, terá baixa porosidade se as operações de mistura, transporte, adensamento e cura forem cuidadosamente atendidas. Além disso, as formas utilizadas deverão ser estanques, não absorventes (impermeáveis ou saturadas com água antes do lançamento) e também deverão ser indeformáveis.

O conhecimento das causas que levam um concreto a ser pouco poroso ou impermeável, possibilitam ao construtor ou ao tecnólogo tomar providências antes ou durante o andamento de uma obra, para se evitar problemas patológicos futuros.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

01. HAYNES, J. M. Determination of pore properties of constructional and other materials: general introduction and classification of methods. Materiaux et Construction, Paris 6(33): 169-74, maio/jul. 1973.
 02. BASÍLIO, F. A. Elementos agressivos da água do mar às pastas de cimento Portland. In: INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO (IBRACON). Colóquio sobre durabilidade do concreto, São Paulo, 1984. p.ç-15.
 03. ----- Permeabilidade do concreto à água do mar e a sua durabilidade. In: INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO (IBRACON). Colóquio sobre durabilidade do concreto à água, São Paulo, 1971. p. 3-32.
 04. HAYNES, H. H. Permeability of concrete in sea water. In: AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). Performance of concrete in marine environment. Detroit, 1980. p.21139. (SP-65).
 05. WASHA, G. W. Permeability and absorption. In: CONCRETE Construction hand book. New York, McGraw-Hill, 1968, p. 8/1-8.
 06. NEVILLE, A. M. Propriedades do Concreto. São Paulo, Pini, 1982.
 07. FARJALAT, J. E. S. Physical problems of the degradation of basalt. In: INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY. Proceedings of the second International Congress of the International Association of Engineering Geology, São Paulo, 1974, v.3, p.207-29.
 08. GORISSE, F. Essais et controle des bétons. Barcelona, Editores Técnicos Associados, 1980.
 09. BASÍLIO, F. A. Durabilidade dos concretos: permeabilidade, corrosão eletrolítica. São Paulo, ABCP, 1970, p.7-14.
 10. ----- Concreto estrutural im permeável. São Paulo, ABCP, 1983. p. 1-11. (ET-49).
 11. LEA, F. M. The chemistry of cement and concrete. 3.ed. London, Arnold, 190. p. 402-5.
 12. MINDESS, S. & YOUNG, J. F. Concrete. New Jersey, Prentice Hall, 1981.
 13. POWERS, T. C. The physical structure of portland cement paste. In: TAYLOR, H. F. W., ed. The chemistry of cements. London, Academic Press, 1964. v.1, p.391-416.
 14. COPELAND, L. E. & VERBECK, G. J. Structures and properties of hardened cement pastes. In: INTERNATIONAL Congress on Chemistry of cement. 6th, Moscow, 1974. p.1-44.
 15. POWERS, T. C. Structure and physical properties of hardened portland cement pastes. Journal of the American Ceramic Society, Easton, 41(1): 1-6, Jan. 1958.
 16. CAMPITELI, V. C. A porosidade do concreto e a sua modificação com o uso de algumas adições. Dissertação de mestrado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1985.
- 6.1. Bibliografia complementar
01. MIGRATIONS d'eau dans le bâtiment; la porosité, special enterprises. Batiment Batir, Paris, 4(2): 61-3. fev. 1978.
 02. BRUNAUER, S. The structure of hardened portland cement paste and concrete. In: CONFERENCE on the Silicate Industry, 8th, Budapest, 1966. p.205-30.
 03. AUSKERN, A. & HORN, W. Capillary in hardened cement paste. Journal of Testing and Evaluation, Philadelphia, 1(1): 74g-9, jan. 1973.
 04. NYAME, B. K. & ILLSTON, J. M. Capillary pore structure and permeability of hardened cement paste. In: INTERNATIONAL Congress on the Chemistry of Cement, 7th, Paris, 1980. v.3, p.181-5.
 05. RAMACHANDRAN, V. S. & FELDMAN, R. F. & BEAUDOIN, J. J. Concrete Science; treatise on current research. London, Heyden, 1981.
 06. MEHTA, P. K. & MANNOHAM, D. Pore size distribution and permeability of hardened cement paste. In: INTERNATIONAL Congress on the Chemistry of Cement, 7th, Paris, 1980, v.3, pVII/1-5.
 07. FAGERLUND, G. Determination of specific surface by BET method. Materiaux et Constructions, Paris, 6(33): 239-45, mai/jul. 1973.

BOLETIM TÉCNICO - textos publicados

Technical Bulletin - Issued Papers

- | | |
|--|-------------------------|
| BT 01/86 - Ação do incêndio sobre as estruturas de concreto armado
<i>The effect of fire on reinforced concrete structures</i> | FRANCISCO R.LANDI |
| BT 02/86 - Argamassas de assentamento para paredes de alvenaria resistente
<i>Masonry mortar for structural brickwork</i> | FERNANDO H.SABBATINI |
| BT 03/86 - Controle de qualidade do concreto
<i>Quality control of the concrete</i> | PAULO R.L.HELENE |
| BT 04/86 - Fibras vegetais para construção civil-fibra de coco
<i>Vegetable fibres for building - coir fibres</i> | HOLMER SAVASTANO JR. |
| BT 05/86 - As obras públicas de engenharia e a sua função na estruturação da cidade de São Paulo
<i>The public works of civil engineering and its function on structuring the city of Sao Paulo</i> | WITOLD ZMITROWICZ |
| BT 06/86 - Patologia das construções. Procedimentos para diagnóstico e recuperação
<i>Building pathology. Diagnosis and recovering procedures</i> | NORBERTO B.LICHTENSTEIN |
| BT 07/86 - Medidas preventivas de controle da temperatura que induz fissuração no concreto massa
<i>Preventive measurements to control the temperature wich produces cracking in mass concrete</i> | GEORGE INOUE |
| BT 08/86 - O computador e o projeto do edificio
<i>The computer and the building design</i> | FRANCISCO F.CARDOSO |
| BT 09/87 - Porosidade do Concreto
<i>Concrete Porosity</i> | VICENTE C. CAMPITELI |

BOLETIM ESPECIAL - Textos publicados

Special Bulletin - Issued Papers

BE 01/87 - Carta de Brasília

J.C. FIGUEIREDO FERRAZ