



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
Pós-graduação em Engenharia Civil

**Influência do volume de pasta na zona de
transição pasta/agregado com relação às
propriedades mecânicas e de durabilidade do
concreto**

*Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia.*

Eliane Pereira de Lima

Orientador: Prof. Dr. Paulo Helene

São Paulo, Junho 2000

Lima, Eliane Pereira

Influência do Volume de Pasta na Zona de Transição Pasta/Agregado com Relação às Propriedades Mecânicas e de Durabilidade do Concreto. São Paulo, 2000.

181p.

Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil PCC/USP.

1. Estrutura Interna 2. Zona de Transição 3. Dosagem de Concreto
I. Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil PCC/USP.

Dedico este trabalho, em primeiro lugar à Deus,
pela saúde, pelas oportunidades e orientação.
Aos meus pais Atílio e Claudete, pelo apoio
durante todas as etapas de minha vida, em
especial no desenvolvimento deste estudo.
Também ao conselheiro Quielse Crisóstomo da Silva
pela oportunidade de desenvolver este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Nesta oportunidade presto homenagem a todos aqueles que contribuíram para a realização desta obra.

Ao Departamento de Engenharia de Construção Civil da Universidade de São Paulo, que admitiu-me em seu curso de pós-graduação, permitindo frequentar suas aulas, laboratórios e demais dependências.

Aos professores do CEFET-PR, em especial, ao prof. Cesar Luis Kloss, o qual trouxe-me os primeiros conhecimentos técnicos à respeito de materiais de construção, entre eles, o concreto. Um amigo que, sempre prestativo, auxiliou-me em diversos trabalhos nas várias etapas de minha vida.

Aos professores da Universidade Federal do Paraná, em especial, aos professores Marcos Antônio Marino, Paulo Chamecki, Mauro Lacerda Santos Filho, Francisco Borsari Neto, que com grande dedicação dispensaram grande parte de seu tempo na arte de ensinar.

Agradeço também ao LAME – Laboratório de Materiais e Estruturas pela oportunidade dos meus primeiros contatos com pesquisas voltadas à Engenharia Civil e pesquisadores. Nesta etapa de minha vida, gostaria de agradecer aos amigos Paulo Chamecki e Mauro Lacerda Santos Filho, os quais sempre tiveram uma palavra positiva para auxiliar em minha caminhada! Sou eternamente grata!

Aos amigos do Laboratório de FURNAS os quais fazem por merecer o seu reconhecimento nacional e internacional, pelo brilhante trabalho que realizam. Agradeço todo o conhecimento técnico e humano que adquiri durante o período em que estive nesse laboratório.

Agradeço à COPEL, através de seus diretores que de forma direta ou indireta permitiram a execução deste trabalho.

Da mesma forma, agradeço aos profissionais das organizações que apoiaram através da flexibilização de minhas atividades, possibilitando assim, que eu cumprisse meus compromissos acadêmicos.

O programa experimental não poderia ser realizado sem o apoio das equipes de laboratórios da ABCP, IPT e CPqDCC. Agradeço a todos os colaboradores da ABCP, em especial aos Eng^{os} Arnaldo, Cláudio e Celina, à Geóloga Silvia e aos técnicos que prontamente auxiliaram-me na moldagem dos corpos-de-prova. Também não poderia deixar de agradecer à equipe da biblioteca, à Rose, que por muitas vezes enviou-me artigos em curto espaço de tempo. À recepcionista Helena com quem fiz amizade que poucos tem o privilégio de ter.

Agradeço ao Eng. Pedro, do Laboratório de Concreto do IPT e aos técnicos que efetuaram os ensaios de permeabilidade com presteza.

Também à equipe do CPqDCC, Laboratório do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Construção Civil, deixo registrado meu agradecimento pelo apoio recebido. Toda a equipe, sem exceção, contribuíram para a realização deste trabalho. Vale salientar que o auxílio recebido desta equipe abrange não somente a realização de ensaios, mas principalmente, de uma palavra amiga.

À todos os funcionários do Departamento de Construção Civil e Biblioteca da USP, os quais sempre estiveram prontamente para atender aos alunos.

Hoje acredito que tem pessoas que nascem com a missão de ensinar! Estou referindo-me dos Professores Paulo Helene e Paulo Monteiro, os quais me orientaram de maneira decisiva para o desenvolvimento deste estudo. Agradeço-os e quero registrar a minha admiração e o meu eterno carinho!

Este trabalho também não poderia ser realizado sem o apoio fundamental de uma pessoa muito especial, a qual descrevo nas palavras seguintes:

SONHO DE MENINA

UM SONHO! Não importa sua origem
Cabeça, coração ou imposto por uma condição.
Faz parte de um projeto de vida!
Muitas barreiras, dificuldades, oposições.
Não importa! É preciso lutar!
Enfim, uma guerreira
Que na busca de seu ideal
A solidão ...
Não importa! A lua mesmo só
Brilha no céu em sinal
De sua energia.
São muitos os caminhos a trilhar...
Enfim, um amigo
Pessoa feita não apenas de sorrisos mas,
Atitudes, palavras de apoio e incentivo,
Pessoa iluminada que hoje brilha
Mas que um dia, também guerreiro e solitário,
Buscou seu caminho e que
Ciente do sucesso de sua caminhada,
Ilumina os caminhos de outros que ainda estão em sua busca.
ENFIM, A CERTEZA DA PRESENÇA DE DEUS o qual
Colocou em meu caminho esta pessoa tão especial,
A quem dedico esta dissertação de mestrado com meu
Muito obrigado ao eterno amigo e conselheiro
Quielse Crisóstomo da Silva!!!

LIMA, E. P. **Influência do volume de pasta na zona de transição pasta/agregado com relação às propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto.** São Paulo, 2000. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, PCC/USP.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS.....	XI
RESUMO	XIII
ABSTRACT	XIV
INTRODUÇÃO.....	1
Justificativa e importância do tema	1
Centros de pesquisa e pesquisadores sobre o tema no Brasil e exterior... 6	
Objetivo	7
Conteúdo e estrutura da dissertação	8
CAPÍTULO I	10
A ESTRUTURA INTERNA DO CONCRETO E SUA INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS	10
Considerações iniciais.....	10
1.1 Porosidade	14
1.1.1 Influência do agregado	18
1.1.2 Influência da pasta.....	26
1.1.3 Influência da Zona de transição	27
1.2 Resistência à compressão	33
1.2.1 Influência da pasta.....	33
1.2.2 Influência da zona de transição	36
1.2.3 Influência do agregado	44
1.3 Permeabilidade	49
1.3.1 Influência da pasta.....	53
1.3.2 Influência do agregado	54

1.3.3	Influência da zona de transição	56
1.4	Capilaridade	59
1.4.1	Influência da pasta	62
1.4.2	Influência do agregado	63
1.4.3	Influência da zona de transição	64
1.5	Carbonatação	64
1.5.1	Influência da pasta	66
1.5.2	Influência do agregado	68
1.5.3	Influência da zona de transição	68
1.6	Penetração de íons cloreto	69
1.6.1	Influência da pasta	70
1.6.2	Influência do agregado	71
1.6.3	Influência da zona de transição	71
CAPÍTULO II.....		73
ZONA DE TRANSIÇÃO		73
2.1	Microestrutura da zona de transição pasta/agregado	73
2.2	Mecanismo de formação da zona de transição pasta/agregado.....	77
2.2.1	Efeito Parede	79
2.2.2	Relação água/cimento	81
2.2.3	Agregados	82
2.2.4	Cimento.....	88
2.2.5	Retração	90
2.2.5.1	Retração plástica.....	91
2.2.5.2	Retração por secagem	91
2.3	Porosidade e Microfissuras	96
CAPÍTULO III.....		100
PROGRAMA EXPERIMENTAL		100
3.1	Planejamento da pesquisa	100
3.2	Variáveis consideradas	101
3.2.1	Variáveis independentes fixas	101
3.2.2	Variáveis independentes.....	101
3.2.3	Variáveis dependentes	101
3.2.4	Variáveis intervenientes.....	102
3.3	Caracterização tecnológica dos materiais empregados	102
3.4	Moldagem dos corpos de prova	103
3.4.1	Dosagem.....	103

3.4.2	Adensamento.....	104
3.4.3	Cura.....	105
3.5	Resultados obtidos.....	106
3.5.1	Concreto fresco.....	106
3.5.2	Concreto endurecido.....	106
3.5.2.1	Resistência à compressão	106
3.5.2.2	Penetração de água sob pressão.....	110
3.5.2.3	Absorção de água por capilaridade.....	113
3.5.2.4	Penetração de íons cloreto	117
3.5.2.5	Massa específica e índice de vazios.....	120
3.5.2.6	Porosidade	121
3.5.2.7	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	139
CAPÍTULO IV.....		145
DISCUSSÃO DOS RESULTADOS		145
4.1	Resistência à compressão	145
4.2	Penetração de água sob pressão	146
4.3	Absorção de água por capilaridade	149
4.4	Penetração de íons cloreto	151
4.5	Porosidade	152
4.6	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	154
CONCLUSÕES.....		158
TRANSFERÊNCIA AO MEIO.....		163
CONTINUIDADE DOS ESTUDOS		163
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		164
ANEXO A – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS.....		178

LIMA, E. P. **Influência do volume de pasta na zona de transição pasta/agregado com relação às propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto**. São Paulo, 2000. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, PCC/USP.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Definição de alguns parâmetros em função da curva obtida por porosimetria através de intrusão de mercúrio (BUIL e OLLIVIER, 1992).	16
Figura 2	Classificação dos poros quanto ao tamanho	17
Figura 3	Distribuição e volume de poros em amostras com reduzido grau de hidratação (9,5% de teor de água não evaporável) (WINSLOW, 1990). (Medições à baixas idades, inferior a 3 dias).	19
Figura 4	Distribuição e volume de poros em amostras com elevado grau de hidratação (14,5% de teor de água não evaporável) (WINSLOW, 1990). (Medições em idades de 7 à 21 dias).	20
Figura 5	Volume total de poros em argamassas com relação areia/cimento de 0,0 a 3,0 (FELDMAN, 1986).	23
Figura 6	Volume e distribuição de poro em função do diâmetro em concretos com e sem substituição do agregado por pó calcário (UCHIKAWA et al. (1996).	26
Figura 7	Distribuição média da porosidade na zona de transição em concreto com relação água/cimento igual a 0,4 (CRUMBIE (1994) Apud SCRIVENER).	29
Figura 8	Comparativo da continuidade na pasta e da zona de transição em amostras curadas em água à 20°C aos 28 dias.	31
Figura 9	Esquema de ensaios para determinação da tensão de aderência entre a pasta e o agregado (ALEXANDER, WARDLAW e GILBERT, 1965).	38
Figura 10	Curva típica tensão – deformação para concreto (GLUCKLICH, 1968).	43
Figura 11	Influência da relação agregado/cimento sobre a resistência do concreto (SINGH, 1958).	46
Figura 12	Comparativo das resistências à compressão de concretos com e sem substituição de parte do agregado miúdo por pó calcário (UCHIKAWA et al., 1996).	48
Figura 13	Ensaio de permeabilidade da zona interfacial pasta/agregado (VALENTA, 1961).	58
Figura 14	Ascensão num capilar de raio r , sob ação da pressão P (COUTINHO, 1994).	60
Figura 15	Montagem do ensaio para determinação da penetração de cloreto na zona de transição em argamassa (TOGNON e CANGIANO, 1980).	72
Figura 16	Distribuição de constituintes microscópicos na região interfacial em concreto com 1 dia de idade (ESCADEILLAS et al. (1990)).	76
Figura 17	Representação esquemática de formação da zona de transição.	78
Figura 18	Efeito parede (FAURY, 1958)	80
Figura 19	Teor de água combinada e portlandita em concretos com e sem substituição de parte do agregado miúdo por pó calcário (UCHIKAWA et al., 1996).	88
Figura 20	Influência dos consumos de cimento e de água na retração do concreto ao fim de 24 horas	92
Figura 21	Verificação da homogeneidade do concreto utilizado para os ensaios	105
Figura 22	Ruptura de corpo-de-prova do traço 5T30; Tipo cones opostos	107
Figura 23	Ruptura de corpo-de-prova do traço 7T35; Tipo cones opostos	108

Figura 24	Ruptura de corpo-de-prova do traço 5T55; Tipo colunar	108
Figura 25	Ruptura de corpo-de-prova do traço 7T60; Tipo colunar	109
Figura 26	Determinação de penetração de água sob pressão (Laboratório do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo – IPT).....	110
Figura 27	Perfis de distribuição da água nas amostras 5T30 e 7T35	113
Figura 28	Taxa de absorção de água por capilaridade para os concretos de acordo com o método NBR 9779/95.	116
Figura 29	Comparativo das alturas médias máximas de absorção para os concretos.....	116
Figura 30	Comparativo do índice de vazios entre as amostras.....	121
Figura 31	Volume de mercúrio x diâmetro médio de poro da amostra 5T30.....	128
Figura 32	Incremento de volume de mercúrio x diâmetro médio da amostra 5T30	128
Figura 33	Área acumulada de poro x diâmetro médio da amostra 5T30	129
Figura 34	Incremento de área de poro x diâmetro médio da amostra 5T30	129
Figura 35	Volume de mercúrio x diâmetro médio de poro da amostra 7T35.....	131
Figura 36	Incremento de volume de mercúrio x diâmetro médio da amostra 7T35 ..	131
Figura 37	Área acumulada de poro x diâmetro médio de poro da amostra 7T35	132
Figura 38	Incremento de área de poro x diâmetro médio da amostra 7T35	132
Figura 39	Volume de mercúrio x diâmetro médio da amostra 5T55.....	134
Figura 40	Incremento de volume de mercúrio x diâmetro médio da amostra 5T55 ..	134
Figura 41	Área acumulada de poro x diâmetro médio de poro da amostra 5T55	135
Figura 42	Incremento de área de poro x diâmetro médio da amostra 5T55	135
Figura 43	Volume de mercúrio x diâmetro médio de poro da amostra 7T60.....	137
Figura 44	Incremento de volume de mercúrio x diâmetro de poro da amostra 7T60	137
Figura 45	Área acumulada de poro x diâmetro médio da amostra 7T60	138
Figura 46	Incremento de área de poro x diâmetro médio da amostra 7T60	138
Figura 47	Traço 5T30: Interface pasta/agregado; Aumento 350x	141
Figura 48	Traço 7T35: Interface pasta/agregado; sem fissura; Aumento 500x	141
Figura 49	Traço 5T55: Interface pasta/agregado, com fissura; Aumento 1000x.	142
Figura 50	Traço 7T60: Microfissuras na pasta; Aumento 500x.....	142
Figura 51	Traço 5T30: Interface pasta/agregado; Aumento 750x.	143
Figura 52	Traço 5T30: Região entre dois agregados, sem interconexão; Aumento 200x.	143
Figura 53	Traço 5T55: Região entre dois agregados, com microfissura; Aumento 200x.	144
Figura 54	Traço 5T55: Região entre agregados, com microfissuras; Aumento 100x.	144
Figura 55	Comparativo da resistência à compressão em função do volume de pasta e da relação a/c.	145
Figura 56	Comparativo das profundidades de penetração de água para os concretos ensaiados em função de a/c e do volume relativo de pasta por m ³	147
Figura 57	Comparativo entre os coeficientes de permeabilidade e resistência à penetração dos concretos.....	149
Figura 58	Altura da ascensão capilar máxima após 72 h de ensaio em função da relação a/c e do volume relativo de pasta por m ³	150
Figura 59	Carga total passante de ions cloreto nos concretos em função da relação a/c e do volume relativo de pasta.	151
Figura 60	Efeito do volume de pasta no aumento do volume de poros com diâmetro igual ou superior à 0,020 μm	152
Figura 61	Influência da relação a/c no volume de poros com diâmetro igual ou superior à 0,020 μm	153

Figura 62	Influência do volume de pasta na retração do concreto.....	156
Figura 63	Raios de poro relevantes para diferentes meios de transporte de agentes agressivos (MENG, 1994).....	159
Figura 64	Volume de poros que contribuem para o transporte de massa das amostras ensaiadas.....	160
Figura 65	Influência da relação a/c e do volume de pasta nos compostos resistentes e não resistentes da pasta no concreto, com 28 dias.....	162

LIMA, E. P. **Influência do volume de pasta na zona de transição pasta/agregado com relação às propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto.** São Paulo, 2000. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, PCC/USP.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Sólidos na pasta de cimento hidratado (MEHTA e MONTEIRO, 1994).....	11
Tabela 2	Vazios na pasta endurecida (MEHTA e MONTEIRO, 1994)	12
Tabela 3	Água na pasta endurecida (MEHTA e MONTEIRO, 1994).....	13
Tabela 4	Classificação do concreto quanto a sua porosidade	18
Tabela 5	Volume de poros em argamassas em função do diâmetro do poro, para água/cimento constante e igual a 0,60 (FELDMAN, 1986)	22
Tabela 6	Volume de poros da pasta em função do grau de hidratação de início da descontinuidade dos poros	28
Tabela 7	Determinação do coeficiente de permeabilidade k e resistência à penetração m.....	50
Tabela 8	Valores máximos admissíveis para o coeficiente de permeabilidade k de concretos	51
Tabela 9	Classificação dos concretos em função da profundidade de penetração	52
Tabela 10	Classificação dos concretos segundo sua permeabilidade à água	53
Tabela 11	Influência das dosagens de cimento e de água na retração do concreto ao fim de 24 horas (L'HERMITE (1962) Apud COUTINHO).....	92
Tabela 12	Características dos traços	103
Tabela 13	Moldagem dos corpos-de-prova	104
Tabela 14	Resultados obtidos no concreto fresco	106
Tabela 15	Resultados do ensaio de resistência à compressão	107
Tabela 16	Absorção de água por capilaridade	115
Tabela 17	Critérios para classificação qualitativa do concreto com base na carga passante segundo AASHTO T277-83/ ASTM C1202-91	117
Tabela 18	Resultados do ensaio de penetração de íons cloreto	118
Tabela 19	Carga total passante segundo ASTM C 1202/91 para 2 horas de ensaio ..	119
Tabela 20	Massa específica e índice de vazios	120
Tabela 21	Cálculo do volume dos corpos-de-prova ensaiados.....	124
Tabela 22	Massas e volume de agregado graúdo dos corpos-de-prova	125
Tabela 23	Volumes de agregados nos corpos-de-prova	126
Tabela 24	Porosidade da amostra 5T30	127
Tabela 25	Porosidade da amostra 7T35	130
Tabela 26	Porosidade da amostra 5T55	133
Tabela 27	Porosidade da amostra 7T60	136
Tabela 28	Quadro resumo dos ensaios de intrusão de mercúrio.....	139
Tabela 29	Avaliação do coeficiente de permeabilidade ou resistência à penetração das amostras 5T30, 7T35, 5T55 e 7T60.....	148
Tabela 30	Raio capilar e coeficiente de capilaridade calculados.....	150
Tabela 31	Classificação das amostras conforme ASTM C1202-91	151
Tabela 32	Comparativo das faixas de poro que representam maior volume	153
Tabela 33	Volume de pasta e de mercúrio intrudido nas amostras ensaiadas.....	154
Tabela 34	Características do concreto e sua retração.....	155

Tabela 35	Comparativo do volume de poros que contribuem para o transporte de massa.....	159
Tabela 36	Compostos resistentes e não resistentes da pasta dos concretos segundo teoria de Powers, com 28 dias.....	161
Tabela 37	Comparativo da relação volume de poros/ volume de pasta entre a Teoria de Powers e resultados obtidos no estudo.....	163
Tabela 38	Caracterização física do agregado graúdo.....	178
Tabela 39	Limites granulométricos de agregado graúdo: % em massa retida – NBR 7211/83.....	179
Tabela 40	Caracterização física do agregado miúdo.....	180
Tabela 41	Limites granulométricos de agregado miúdo: % em massa retida acumulada – NBR 7211/83.....	180
Tabela 42	Ensaio físicos do cimento.....	181

LIMA, E. P. **Influência do volume de pasta na zona de transição pasta/agregado com relação às propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto.** São Paulo, 2000. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, PCC/USP.

RESUMO

Sabe-se que a entrada no concreto de agentes agressivos presentes no meio, dá-se por diversos mecanismos que dependem das características do concreto, entre elas, principalmente, da distribuição dos poros, do volume de poros e da sua interconexão. Alguns pesquisadores acreditam que a zona de transição pasta/agregado tem participação fundamental nas propriedades do concreto. Por meio de estudos teóricos e modelos computacionais chegaram à conclusão que a região de interface pasta/agregado, pode interconectar-se sempre que os volumes de pasta sejam pequenos, abaixo de 50%. Assim, acreditam que quanto maior o volume de agregados e menor o volume de pasta, maior o transporte de agentes agressivos ao interior do concreto e, conseqüentemente, menor a sua durabilidade.

O presente trabalho estudou concretos com volumes de pasta variado de 30%, 35%, 55% a 60% e relações água/cimento de 0,5 e 0,7, em relação às suas propriedades mecânicas e de durabilidade. Estas propriedades compreenderam a resistência à compressão axial, a penetração de água sob pressão, a capilaridade, a penetração de cloretos, a porosidade pelo método de intrusão de mercúrio e a análise de imagens obtidas por meio de microscópio eletrônico de varredura.

Os resultados obtidos são indicativos que o efeito do volume de pasta nas características da zona de transição pasta/agregado e nas propriedades do concreto, é bem menor que o esperado e que o agregado até tem efeito benéfico nas propriedades do concreto, enquanto que a pasta aumenta a probabilidade de microfissuras no interior do concreto e pode reduzir o seu desempenho final.

LIMA, E. P. **Influence of the paste volume in the paste/aggregate transition zone with relationship to the mechanical and durability properties of the concrete.** São Paulo, 2000. Dissertation (Master). Polytechnic School of the University of São Paulo, PCC/USP.

ABSTRACT

It is known that the entrance in the concrete of the aggressive agents present in the environment, takes place for several mechanisms that depend on the characteristics of the concrete, among them, mainly, of the pore size distribution, of the volume of pores and of the its interconnection. Some researchers believe that the paste/aggregate transition zone has fundamental participation in the properties of the concrete. By means of theoretical studies and models computacionais they arrived the conclusion that the area of interface paste/aggregate can interconnection itself whenever the paste volumes are small, below 50%. Like this, they believe that as larger the aggregate volume and smaller the paste volume, larger the transport of aggressive agents inside the concrete and, consequently, smaller its durability. The present work studied concretes with paste volumes varied of 30%, 35%, 55%, 60% and relationships water/cement of 0,5 and 0,7, in relation to its mechanical and durability properties. These properties understand the axial compressive strength, the penetration of water under pressure, the capillarity, the chloride penetration, the porosity for the method of mercury intrusion and the analysis of images obtained by back-scattered electron imaging (SEM). The results obtained are indication that the effect of the paste volume in the characteristics of the paste/aggregate transition zone and in the properties of the concrete, it is much smaller than the expected and that the aggregate until can has beneficial effect in the properties of the concrete while that the paste increases the probability of microfissures inside the concrete and it can reduce its final performance.

INTRODUÇÃO

Justificativa e importância do tema

No começo do século, quando as construções em concreto começaram a prosperar, acreditava-se que as estruturas de concreto projetadas para vida útil de 40 a 50 anos, atenderiam essa duração com pouca ou nenhuma manutenção. Até 1970, alguns casos de deterioração prematura do concreto foram tratados como exceções, como sendo causadas por especificação não apropriada ou uso incorreto de materiais e na prática de construção. Nesse período, foram levantados nos Estados Unidos, alguns problemas de deterioração em estruturas de pontes com menos de 20 anos. Para evitar esses acontecimentos, a partir de 1970 iniciou-se nos Estados Unidos, a prática de concretos de alta resistência. Todavia, não teve o resultado esperado pois alta resistência não significa necessariamente baixa porosidade e alta durabilidade. Somente em 1993, foi definido concreto de alto desempenho como um concreto que atende requisitos de desempenho e durabilidade, os quais nem sempre são atingidos pelo uso de materiais convencionais e prática normal de construção¹.

Ainda nos últimos anos tem crescido o número de estruturas de concreto armado com manifestações patológicas, principalmente com problemas de corrosão de armaduras, como resultado do envelhecimento precoce das construções existentes². MEHTA³ (1986) cita que nos países desenvolvidos aproximadamente 40% do total dos recursos destinados às construções de edifícios se revertem em reparo e manutenção das estruturas existentes e apenas 60% na construção de novos edifícios. Na Europa, os gastos em reparo de pontes cresceu em aproximadamente 65% no período de 1985 a 1990⁴.

¹ MEHTA, K., Durability – critical issues for the future, *Concrete International*, pp. 27-33, July 1997.

² HELENE, P.R.L., *Vida útil das estruturas de concreto*, São Paulo, Simpósio sobre Durabilidade do Concreto, IBRACON-USP, 1998.

³ MEHTA, P.K., *Concrete Structure, Properties and Materials*, New Jersey: Prentice-Hall, INC. 1986, pp. 105-169.

⁴ ESTÉVEZ, J.M.G., GARCIA, F.R., Permeabilidad del Hormigon: Influência de la dosificación y métodos de ensayo. *Laboratório Central de Estructuras y Materialis – CEDEX.MOPU, Madrid.s.d. Apud REGATTIERI.*

Em 1969 Levitt⁵ alertou a comunidade técnica para a importância de se estabelecer parâmetros de durabilidade, além da resistência à compressão axial. Ele propôs limites, baseado no ensaio de absorção de água superficial do concreto, segundo a norma BS 1881 part 5⁶. Também, Illston⁷ em 1976, concluiu que os conhecimentos sobre os efeitos da porosidade, grau de hidratação, tipo de cimento e microestrutura deveriam ser empregados com maior frequência na tecnologia do concreto, associados a uma menor quantidade de modelos matemáticos com alto grau de complexidade. Atualmente, há alguns documentos de referência que tratam do tema durabilidade: CEB-FIP Model Code 90⁸, CEB Design Guide⁹, ACI COMMITTEE 201¹⁰, o projeto de norma europeia ENV-206¹¹, o projeto de revisão e calibragem da NBR 6118¹².

A maioria dos processos de deterioração que afetam estruturas de concreto, envolvem o transporte de agentes agressivos no interior dos mesmos¹³. O concreto está em contato com o meio ambiente que contém umidade e substâncias químicas com as quais pode reagir. Há uma troca contínua de água, de vapor de água e gases entre concreto e ambiente devido a sua propriedade hidrófila e higroscópica, causada pela alta superfície específica e condições de umidade dos poros pequenos¹⁴.

A penetração de fluidos e íons através do concreto pode se dar por meio de vários mecanismos, dependendo do estado inicial do material poroso e das características do

⁵ LEVITT, M., Non-destructive testing of concrete by the initial surface absorption method. In: Symposium on non-destructive testing of concrete and timber, London, 11-12, **Proceedings** pp. 23-26, June 1969.

⁶ BS 1881: Methods of Testing Concrete Part 5: Methods of testing hardened concrete for other than strength. British Standards Institution, London, 1970.

⁷ ILLSTON, J.M., Aspects of the behaviour of the cement paste phase of composite materials, with reference to the practical problems of concrete technology. In: International Conference on Hydraulic Cement Pastes, **Proceeding**, University of Sheffield, pp. 232-247, 1976.

⁸ COMITE EURO-INTERNATIONAL du BETON. CEB-FIP Model Code 1990. Design Code. Lausanne, CEB, May 1993. 437p. (Bulletin D'Information, 213-214).

⁹ COMITE EURO-INTERNATIONAL du BETON. Durable Concrete Structures. Design Guide. Lausanne, Thomas Telford, 1992.

¹⁰ AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Guide to Durable Concrete: reported by ACI Committee 201. ACI Materials Journal, v.88, n.5, Sept./Oct. 1991. P. 544-82.

¹¹ EUROPEAN NORMALIZATION VOLUNTAIRE. ENV-206 Performance, Production, Mise en Ouvre et Critères de Conformité du Béton, 1992.

¹² Revisão da NBR 6118/78 (NB-1 da ABNT) – Projeto e Execução de obras de concreto armado.

¹³ BUENFELD, N. R., OKUNDI, E., Effect of cement content on transport in concrete, **Magazine of Concrete Research**, 50, N. 4, 1998.

fluido, do íon e dos gases percolantes, bem como das condições de temperatura e pressão. Powers e Brownard¹⁵ (1948) acreditam que para um material ser considerado poroso ou não, dependerá muito dos métodos empregados para determinar sua porosidade.

O transporte de fluidos no concreto pode atuar¹⁶:

- Sem gradiente de pressão pelo fenômeno de capilaridade ou difusão;
- Em presença de um gradiente de pressão pela permeabilidade;

Sendo que a passagem pode ser através:

- Da pasta de cimento;
- Do agregado;
- Da superfície de ligação pasta/agregado (interface ou zona de transição);
- De fissuras, poros e outros defeitos existentes no concreto.

Assim, os parâmetros mais importantes para o controle de penetração de agentes externos são¹⁷:

- A distribuição e o tamanho dos poros e das microfissuras bem como sua conectividade;
- A zona de transição pasta/agregado e sua reatividade com espécies químicas.

No princípio do século, as regras para a busca de uma mistura compacta eram inteiramente empíricas e provinham de tradições da fabricação da argamassa¹⁸. Adotava-se até então, regras fixas, independentes da natureza dos componentes, que asseguravam uma compacidade elevada com excesso nítido de ligante.

¹⁴ REINHARDT, H. W., Transport of Chemicals Through Concrete, **Materials Science of Concrete III**.

¹⁵ POWERS, T.C, BROWNYARD, T.L., Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste. Portland Cement Association, Research Department, Bulletin 22, Chicago, March, 1948.

¹⁶ COUTINHO, A. S., GONÇALVES, A., **Fabrico e Propriedades do Betão**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Vol. III, Lisboa, 1994.

¹⁷ OLLIVIER, J.P., MASSAT, M., The effect of the transition zone on transfer properties of concrete, **Interfacial Transition Zone in Concrete**, RILEM REPORT 11, Part 3, 7, 1996.

¹⁸ HELENE, P., TERZIAN, P., **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo: PINI; Brasília, DF: SENAI, 1992.

Somente em 1881, PRÉAUDEAU¹⁹ apresentou formalmente um método de cálculo da composição do concreto e argamassa, em função do volume de vazios dos agregados. Propõe que seja determinado o volume de vazios da areia e que o volume da pasta aglomerante seja 5% superior ao volume de vazios encontrado no agregado miúdo. A seguir, dever-se-ia determinar o volume de vazios da pedra, a partir do qual se calcula o volume da argamassa como sendo 10% superior ao volume de vazios do agregado graúdo.

Em 1948, os franceses Robert L'Hermite e Tournon²⁰ apresentaram seus estudos sobre a vibração e reologia do concreto fresco, dando início a uma nova forma de enfocar os estudos de dosagem dos concretos.

A partir de 1956, deu-se início também ao estudo da microestrutura do concreto. Farran²¹ observou que no concreto, a interface pasta/agregado apresentava diferente mineralogia e microestrutura. Com isso passou-se a estudar a formação e desenvolvimento da zona interfacial entre diferentes tipos de agregados e pasta de cimento. Dentre alguns possíveis fatores causadores da zona de transição, foram considerados o efeito parede, a exsudação e a retração. Paralelamente, deu-se início à avaliação de alguns modelos geométricos que correlacionassem a porosidade com as propriedades de transporte, entre eles, Katz-Thompson²², Carman-Kozeny²³ e alguns modelos estatísticos. Também surgiram modelos relacionados com as propriedades mecânicas. Vile²⁴ (1965) foi provavelmente o primeiro a propor um modelo que

¹⁹ PRÉAUDEAU Apud HELENE, P., TERZIAN, P., **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo: PINI; Brasília, DF: SENAI, p. 57, 1992.

²⁰ L'HERMITE, R., TOURNON, G., **La vibration du béton frais**. Paris, Cerilh, 1948. (Pub.; tech.,2.) Apud HELENE, P., TERZIAN, P., **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo: PINI; Brasília, DF: SENAI, p. 63, 1992.

²¹ FARRAN, J., Contribution minéralogique à l'étude de l'adhérence entre les constituants hydratés des ciments et les matériaux enrobés, **Matériaux et constructions**, 490-491, p. 155-172, 1956.

²² KATZ, A.J. and THOMPSON, A.H., Phys. Rev. B 34, 8179, 1986 Apud GARBOCZI, E. J., Permeability, diffusivity and microstructural parameters: a critical review, **Cement and Concrete Research**, Vol. 20, p. 596, 1990.

²³ P.C. CARMAN, **Flow of gases through porous media**, Academic, New York, 1956 Apud GARBOCZI, E. J., Permeability, diffusivity and microstructural parameters: a critical review, **Cement and Concrete Research**, Vol. 20, p. 593, 1990.

²⁴ VILE, G.W.D., Behaviour of concrete under simple and combined stress. Ph.D. Thesis, University London, London, 1965, Apud STROEVEN, P., Some mechanical effects of interface debonding in plain concrete, **Interfaces in Cementitious Composites**, RILEM, Proceedings 18, pp.187-196, London, 1992.

correlacionasse a compressão direta do concreto com suas fissuras. Nesse período, observou-se início da aplicação de ferramentas computacionais para o estudo do concreto. A partir de estudos numéricos, surgiram modelos computacionais que estimam a influência do teor de agregado nas propriedades da zona de transição pasta/agregado.

Houst *et al.*²⁵ concluíram, com base no estudo de argamassas, que acima de 50% de volume de areia houve um aumento no coeficiente de difusão de CO₂ e O₂. Por meio de modelo computacional, esse aumento foi justificado pela ocorrência de interconexão das zonas de transição. Também Snyder *et al.*²⁶ compararam dados obtidos por meio do porosímetro de mercúrio em argamassas com simulações de modelo computacional em 1 cm³ de argamassa, consistindo de aproximadamente 10.000 partículas de agregado. O objetivo desse estudo foi prever o volume de areia necessária para a interconexão das zonas de transição. O modelo também foi aplicado em amostra de concreto com volume igual a 27 cm³. Os autores concluíram que para valores iguais ou superiores a 49% de volume de areia, as zonas de transição são totalmente interligadas, com fração conectada próxima de 100%.

Os estudos evoluíram nesse campo, entretanto, parece que essa interconexão não ocorre na prática, de maneira que não se tem conhecimento exato da influência dessa zona de transição nas propriedades do concreto. Alguns pesquisadores tais como os acima citados, os quais estudaram a influência do teor de agregado, acreditam que quanto maior o volume de pasta, menor a probabilidade de ocorrer a interconexão. Assim, não há ainda consenso de qual a melhor proporção de agregado e pasta, bem como da relação água/cimento, para obtenção de um concreto compacto, durável e econômico.

²⁵ HOUST, Y.F., SADOUKI, H., WITTMANN, F.H., Influence of aggregate concentration on the diffusion of CO₂ and O₂, **Interfaces in Cementitious Composites**, RILEM International Conference, **Proceedings 18**, Part 2.2, Maso, J.C. Ed., E & FN SPON, Toulouse, 1992.

²⁶ SNYDER, K.A., WINSLOW, D.N., BENTZ, D.P., GARBOCZI, E.J., Interfacial zone percolation in cement-aggregate composites, **Interfaces in Cementitious Composites**, RILEM International Conference, **Proceedings 18**, Part 2.2, Maso, J.C. Ed., E & FN SPON, Toulouse, 1992.

Sabe-se que a espessura da zona interfacial (ZT) varia entre 25 a 100 μm ^{27 28 29 30}. Se assim for, considerando que a zona de transição ocorra próxima a todos os agregados (embora na prática nem sempre ocorre), isto poderia representar aproximadamente 30 a 50% do volume total da pasta no concreto³¹. Diante deste fato, o estudo da zona de transição faz-se essencial para compreensão da sua efetiva influência nas propriedades do concreto.

Centros de pesquisa e pesquisadores sobre o tema no Brasil e exterior

No Brasil existem três grupos de estudo sobre a microestrutura do concreto. Um deles está localizado na Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP, onde a Geóloga Dra. Silvia Vieira tem estudado as diferenças entre o concreto comum e de alto desempenho. O outro grupo está localizado na EPUSP, onde os estudos são desenvolvidos no Centro de Pesquisas e Desenvolvimento em Construção Civil, CPqDCC da EPUSP cujas atividades são lideradas pela pesquisadora Dra. Neide Sato. Também a UNICAMP tem estudado a zona de transição, onde o Prof. Dr. Vladimir Paulon coordena os estudos.

No exterior vários centros de pesquisa estudam aspectos da zona de transição. Entre estes pode-se citar como principais a Universidade de Berkeley, Imperial College, Universidade de Paul Sabatier, em Toulouse, na França.

Vale salientar que a RILEM³² possui dois Comitês Técnicos na área de zona de transição: TC 159-ETC - Engineering of the Interfacial Transition Zone in Cementitious Composites, coordenado por M. Alexander (South África) e A. Bentur (Israel) e TC

²⁷ GRANDET, J., OLLIVIER, J.P., Nouvelle méthode d'étude des interfaces ciment-granulats, **7th International Congress on the Chemistry of Cement**, Vol. III, Paris, 1980.

²⁸ STRUBLE, L., Microstructure and fracture at the cement paste-aggregate interface. In **Proceedings Materials Research Society Symposium**, Edited by S. Mindess and S. Shah, Vol. 114, pp. 11-20, 1988.

²⁹ MASSAZZA, F., COSTA, U., Bond: paste-aggregate, paste-reinforcement and paste-fibres, **8th Congresso Internacional de Química do Cimento**, Vol. 1, Rio de Janeiro, 1986.

³⁰ WINSLOW, D.N., COHEN, M.D., Percolation and pore structure in mortars and concrete, **Cement and Concrete Research**, Vol. 24, pp. 25-37, 1994.

³¹ LARBI, J. A., Microstructure of the interfacial zone around aggregate particles in concrete, **HERON**, Vol.38, 1993.

163-TPZ, Transport Properties of the Interfacial Transition Zone, coordenado por G. Arliguie (França). Na 2nd Conferência Internacional³³ promovida por esses comitês, foram levantados e discutidos os seguintes temas³⁴:

- a) Quantificação e caracterização da estrutura e propriedades da zona de transição;
- b) Modelos dessas características e sua influência no comportamento da matriz de vários tipos de compostos cimentícios;
- c) Características de durabilidade e sua dependência da zona de transição, em particular com respeito às características de transporte (difusão e permeabilidade);
- d) Faixa da zona de transição em sistemas específicos: pasta reforçada com fibra, concretos com agregados especiais, concretos com aditivos especiais, sistemas de reparo e ligações;
- e) Influência na durabilidade e ligação da zona de transição ao redor de armaduras em concreto armado.

Também em simpósios e congressos sobre concreto de alto desempenho, a zona de transição tem sido discutida com relação ao uso de adições. Esse tema aborda amplo campo de estudo, no qual percebe-se a necessidade de melhor entendimento da formação e influência da zona de transição nas propriedades do concreto.

Objetivo

O principal objetivo deste programa de pesquisa é estudar a influência do volume de pasta, por metro cúbico, em algumas propriedades dos concretos tanto no estado fresco quanto, principalmente, no estado endurecido. Atualmente não se tem conhecimento do teor de agregado adequado para obter-se um concreto durável. Segundo alguns pesquisadores^{35 36 37 38}, volumes de pasta abaixo de 50% do volume total de concreto ou

³² RILEM – The International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Construction.

³³ 2nd International RILEM Conference on the Interfacial Transition Zone in Cementitious Composites, 8-12 March 1998 – Haifa, Israel.

³⁴ BENTUR, A., 2nd International RILEM Conference on the Interfacial Transition Zone in Cementitious Composites, **Materials and Structures/ Matériaux et Constructions**, Vol. 31, p. 575-576, October, 1998.

³⁵ OLLIVIER, J. P., **Durability of Concrete**, São Paulo, EPUSP, 1998. 129p., Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/192.

argamassa, poderiam ensejar a interconexão das zonas de transição observadas nos agregados e interferir negativamente nas propriedades dos concretos.

Esta dissertação pretende avaliar a influência do maior ou menor volume de pasta nos concretos, por meio de dados experimentais, buscando compreender melhor a efetiva influência da zona de transição nas propriedades tecnológicas do concreto.

Conteúdo e estrutura da dissertação

A estrutura prevista para a dissertação é composta por uma introdução seguida de 4 capítulos e pelas considerações finais.

A **introdução** apresenta a importância técnico-econômica do tema, o objetivo, a citação dos principais centros de pesquisa do assunto no Brasil e no exterior e conteúdo com descrição sucinta dos capítulos.

No **capítulo I** são abordadas a estrutura interna do concreto e sua influência nas propriedades tecnológicas. É apresentada a visão atual da bibliografia sobre a influência das três fases do concreto: pasta, agregado e zona de transição nas propriedades mecânicas (resistência à compressão) e de durabilidade (porosidade, permeabilidade, capilaridade, carbonatação e penetração de ions cloreto) do concreto.

O **capítulo II** apresenta os mecanismos de formação da zona de transição e sua microestrutura, segundo a bibliografia disponível. Também são abordados os principais fatores que influenciam na formação da zona de transição e formação de microfissuras na pasta do concreto.

³⁶ HOUST, Y.F., SADOUKI, H., WITTMANN, F.H., Influence of aggregate concentration on the diffusion of CO₂ and O₂, **Interfaces in Cementitious Composites**, RILEM International Conference, **Proceedings 18**, Part 2.2, Maso, J.C. Ed., E & FN SPON, Toulouse, 1992.

³⁷ SNYDER, K.A., WINSLOW, D.N., BENTZ, D.P., GARBOCZI, E.J., Interfacial zone percolation in cement-aggregate composites, **Interfaces in Cementitious Composites**, RILEM International Conference, **Proceedings 18**, Part 2.2, Maso, J.C. Ed., E & FN SPON, Toulouse, 1992.

³⁸ WINSLOW, D.N., COHEN, M.D., Percolation and pore structure in mortars and concrete, **Cement and Concrete Research**, Vol. 24, pp. 25-37, 1994.

O **capítulo III** descreve o programa experimental executado, incluindo as variáveis consideradas, caracterização tecnológica dos materiais empregados, ensaios executados, contemplando a metodologia utilizada e os resultados obtidos.

No **capítulo IV** está apresentada a discussão dos resultados obtidos.

Finalizando, são apresentadas as principais conclusões obtidas no estudo, as sugestões para continuidade das pesquisas que contribuirão para melhor entendimento do assunto, seguidos da relação das referências bibliográficas consultadas e dos anexos.

O **Anexo A** apresenta os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais empregados no programa experimental.

CAPÍTULO I

A ESTRUTURA INTERNA DO CONCRETO E SUA INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS

Considerações iniciais

Na busca cada vez maior de concretos duráveis, faz-se necessário maior conhecimento das suas relações estrutura-propriedade de maneira a permitir certo controle sobre o material. O concreto tem estrutura interna heterogênea e complexa, o que dificulta estabelecer correlações exatas.

Do ponto de vista microscópico, pode-se considerar que o concreto é um material trifásico constituído pela pasta, agregado e zona de transição.

A resistência à compressão dá uma idéia geral da qualidade do concreto pois ela está diretamente relacionada com a estrutura da pasta de cimento hidratado³⁹. A microestrutura da pasta, resultante de transformações químicas do cimento, contribui para as propriedades do concreto pois as variações locais na relação água/cimento resultam em uma estrutura mais porosa e heterogênea, influenciando negativamente nas propriedades do concreto⁴⁰. Assim, vale lembrar os sólidos, vazios e água presentes na pasta de cimento hidratado, buscando reunir fatores que possam contribuir para a heterogeneidade do concreto. Nas Tabelas 1, 2 e 3 estão apresentados as estruturas dos sólidos, vazios e águas presentes na pasta endurecida, respectivamente.

³⁹ NEVILLE, A. M., **Propriedades do Concreto**, 2 ed., São Paulo: PINI, 1997.

⁴⁰ MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**, São Paulo, PINI, 1994.

Tabela 1 Sólidos na pasta de cimento hidratado (MEHTA e MONTEIRO, 1994)

Morfologia - Propriedades

Sólidos na pasta	Percentual do volume de sólidos	Morfologia - Propriedades
Silicato de cálcio hidratado	50 a 60 %	Fibras pouco cristalinas a um reticulado cristalino. Intervalo dimensional de agregação de partículas de C-S-H está entre 0,6 μm a 3 μm . Os modelos propostos são: <i>Powers - Brunauer</i> : estrutura em camada com área específica elevada. A resistência do material é principalmente atribuída a forças de Van der Waals, sendo o tamanho dos poros do gel ou a distância sólido-sólido ao redor de 0,0018 μm . Este modelo não parece ser comumente encontrado. <i>Feldman - Sereda</i> : estrutura composta de um arranjo irregular e dobrado de camadas ao acaso, de modo a formar espaços interlamelares de forma e tamanho diferentes (0,0005 μm a 0,0025 μm). Este modelo parece ser o mais provável.
Hidróxido de cálcio	20 a 25%	Tende a formar cristais grandes, sob a forma de prismas hexagonais distintos. A morfologia dos cristais varia bastante, apresentando desde formas não definidas até pilhas de placas geometricamente bem definidas. É afetada pelo espaço disponível, temperatura de hidratação e impurezas presentes no sistema. A área específica é menor em relação ao C-S-H, conseqüentemente com limitada contribuição para a resistência devido a baixas forças de Van der Waals. O intervalo dimensional dos cristais está entre 0,6 μm a 3 μm .
Sulfoaluminatos de cálcio	15 a 20%	A relação iônica sulfato/alumina da solução geralmente favorece a formação de trissulfato hidratado, $\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$, denominado etringita, o qual forma cristais prismáticos aciculares. A etringita transforma-se eventualmente em monossulfato hidratado, $\text{C}_4\text{ASH}_{18}$, que cristaliza em placas hexagonais.
Grãos de clinquer hidratado no local (topoquímica; inner)		Durante a hidratação, são dissolvidas as partículas menores e as partículas maiores são reduzidas. Por causa do espaço disponível limitado entre as partículas, os produtos de hidratação tendem a cristalizar-se muito próximo das partículas do clinquer em hidratação, formando revestimento ao redor delas. Em idades posteriores, devido a falta de espaço disponível, a hidratação <i>in loco</i> de partículas do clinquer resulta na formação de um produto de hidratação muito denso, semelhante à partícula do clinquer original.

Tabela 2 Vazios na pasta endurecida (MEHTA e MONTEIRO, 1994)

Vazio	Definição	Propriedade
Espaço interlamelar no C-S-H	Corresponde a 28% da porosidade capilar no C-S-H sólido. Intervalo dimensional entre 0,001 μm à 0,004 μm .	Embora o tamanho de vazio seja pequeno para influenciar negativamente a resistência e a permeabilidade da pasta, a retirada da água presente neste espaço pode contribuir com o aumento da retração por secagem e fluência.
Vazios capilares	Representa o espaço não ocupado pelo cimento ou pelos produtos de hidratação, varia entre 0,01 μm à 1 μm .	Macroporos: vazios capilares maiores do que 0,05 μm de uma pasta. São prejudiciais à resistência e à impermeabilidade. O melhor critério para se avaliar suas características é através da distribuição de tamanho de poros e não pela porosidade capilar total. Microporos: vazios menores do que 0,05 μm . São mais importantes para a retração por secagem e a fluência.
Ar incorporado	Os vazios são esféricos e obtidos por meio de aditivos.	O intervalo dimensional dos vazios de ar aprisionado está entre 1 mm à 4 mm, podendo afetar negativamente a resistência e impermeabilidade da pasta, reduzindo porém, a sua absorção capilar.

Tabela 3 Água na pasta endurecida (MEHTA e MONTEIRO, 1994)

Água	Definição
Capilar e livre	Volume de água presente nos vazios maiores do que 0,005 μm e que sofre pouca influência das forças de atração exercidas pela superfície sólida. A água presente nos vazios maiores que 0,05 μm é considerada água livre porque a sua remoção não causa variação significativa do volume. A água presente nos vazios de 0,005 a 0,05 μm , é retida por tensão capilar e pode causar a retração do sistema caso seja removida.
Adsorvida ou de gel	Representa a água que estando próxima da superfície do sólido está sob a influência de forças de atração. Tendo em vista que as energias de ligação de moléculas individuais de água diminuem com a distância em relação à superfície do sólido, uma porção maior da água adsorvida pode ser perdida por secagem da pasta a 30% (MEHTA e MONTEIRO, 1994) ou 50% (MINDESS e YOUNG, 1981) de umidade relativa, sendo a principal responsável pela retração da pasta na secagem.
Interlamelar ou de gel	Está presente entre as camadas do C-S-H, através de camada monomolecular de água fortemente ligada por pontes de hidrogênio. A água interlamelar é perdida somente por secagem forte (abaixo de 11% de umidade), sendo que a estrutura do C-S-H retrai de maneira considerável. Seu movimento e perda influem na retração e fluência.
Quimicamente combinada	Integra a estrutura de vários produtos hidratados do cimento. Esta água não é perdida por secagem porém é liberada quando os produtos hidratados são decompostos por aquecimento a temperaturas acima de 200°C.

1.1 Porosidade

Segundo Coutinho, 1994⁴¹ a porosidade pode ser entendida como a relação entre o volume de vazios e o volume total, aparente, do material. Para ele, existem dois tipos de porosidade:

- porosidade fechada, quando os vazios não se intercomunicam;
- porosidade aberta, quando os vazios se intercomunicam por canais ou capilares.

Segundo Neville⁴², na pasta, considera-se a porosidade em função do volume total de todos os poros maiores do que os poros de gel (água adsorvida e água interlamelar) expresso em porcentagem do volume total da pasta.

Em geral, adota-se a porosidade total como parâmetro básico da estrutura do material, porém não parece ser uma medida significativa para avaliar propriedades como a permeabilidade à água, porque o fluxo de água é influenciado mais pela distribuição dos poros do que por seu volume total^{43 44}.

Assim, no presente trabalho, o termo porosidade terá um significado mais amplo pois vai considerar o volume total, a distribuição e a continuidade dos poros.

Para caracterizar a distribuição de poros, considera-se grande variedade de parâmetros de tamanho de poro (poros de tamanho médio):

- Raio hidráulico^{45 46} que representa a relação entre o volume e a superfície de poro;

⁴¹ COUTINHO, A. S., GONÇALVES, A., **Fabrico e Propriedades do Betão**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Vol. III, Lisboa, 1994.

⁴² NEVILLE, A. M., **Propriedades do Concreto**, 2 ed., São Paulo: PINI, 1997.

⁴³ NYAME, B.K., ILLSTON, J.M., Relationships between permeability and pore structure of hardened cement paste, **Magazine of Concrete Research**, Vol. 33, N. 116, 1981.

⁴⁴ LI, S., ROY, D.M., Investigation of relations between porosity, pore structure, and Cl⁻ diffusion of fly ash and blended cement pastes, **Cement and Concrete Research**, Vol. 16, pp. 749-759, 1986.

⁴⁵ NYAME, B.K., ILLSTON, J.M., Relationships between permeability and pore structure of hardened cement paste, **Magazine of Concrete Research**, Vol. 33, N. 116, 1981.

- Diâmetro limiar^{47 48 49 50 51} que corresponde ao tamanho de poro mínimo geometricamente contínuo;
- Raio de poro contínuo máximo⁵² que é definido como o valor máximo obtido pela relação entre o diferencial do volume de mercúrio intrudido e da pressão aplicada;
- Raio de poro crítico⁵³, definido como a menor dimensão de poro acima da qual se estabelece uma trajetória de poros conectados de uma extremidade a outra da amostra;
- Raio de poro médio, o qual em geral tem valor semelhante ao raio de poro crítico⁵⁴;
- Porosidade relevante, a qual é considerada como o volume de poros disponíveis para o transporte de água⁵⁵ (poros com raio acima de 0,1 μm)⁵⁶.

Na Figura 1 estão representados alguns dos parâmetros.

⁴⁶ MIKHAIL, R.Sh., TURK, D.H., BRUNAUER, S., Dimensions of the average pore, the number of pores, and the surface area of hardened Portland cement paste, **Cement and Concrete Research**, Vol. 5, pp. 433-442, 1975.

⁴⁷ HUGHES, D.C., Pore structure and permeability of hardened cement paste, **Magazine of Concrete Research**, Vol. 37, No. 133, pp. 227-233, December 1985.

⁴⁸ MEHTA, P. K., MANMOHAN, D., Pore size distribution and permeability of hardened cement pastes, **Proceedings of the Seventh International Congress on the Chemistry of Cements**, Vol III, Paris, 1980.

⁴⁹ BENTZ, D.P., GARBOCZI, E.J., Percolation of phases in a three-dimensional cement paste microstructural model, **Cement and Concrete Research**, Vol. 21, pp. 325-344, 1991.

⁵⁰ COOK, R.A., HOVER, K.C., Mercury porosimetry of hardened cement pastes, **Cement and Concrete Research**, 29, pp. 933-943, 1999.

⁵¹ WINSLOW, D.N., COHEN, M.D., Percolation and pore structure in mortars and concrete, **Cement and Concrete Research**, Vol. 24, pp. 25-37, 1994.

⁵² NYAME, B. K., ILLSTON, J. M., Capillary pore structure and permeability of hardened cement paste, **Proceedings of the Seventh International Congress on the Chemistry of Cements**, Vol III, Paris, 1980.

⁵³ ROY, D.M., Relationships between permeability, porosity, diffusion and microstructure of cement pastes, mortar and concrete at different temperatures, R.L. Roberts and J.P. Skalny, Ed., **Materials Research Society Symposium, Proceedings**, 137, Boston, 1988 Apud BÁGEL'.

⁵⁴ BÁGEL', L', ZIVICA, V., Relationship between pore structure and permeability of hardened cement mortars: on the choice of effective pore structure parameter, **Cement and Concrete Research**, Vol. 27, N.8, 1997.

⁵⁵ MENG, B., Resolution-dependent characterization of interconnected pore systems: development and suitability of a new method, **Materials and Structures**, 27, pp. 63-70, 1994.

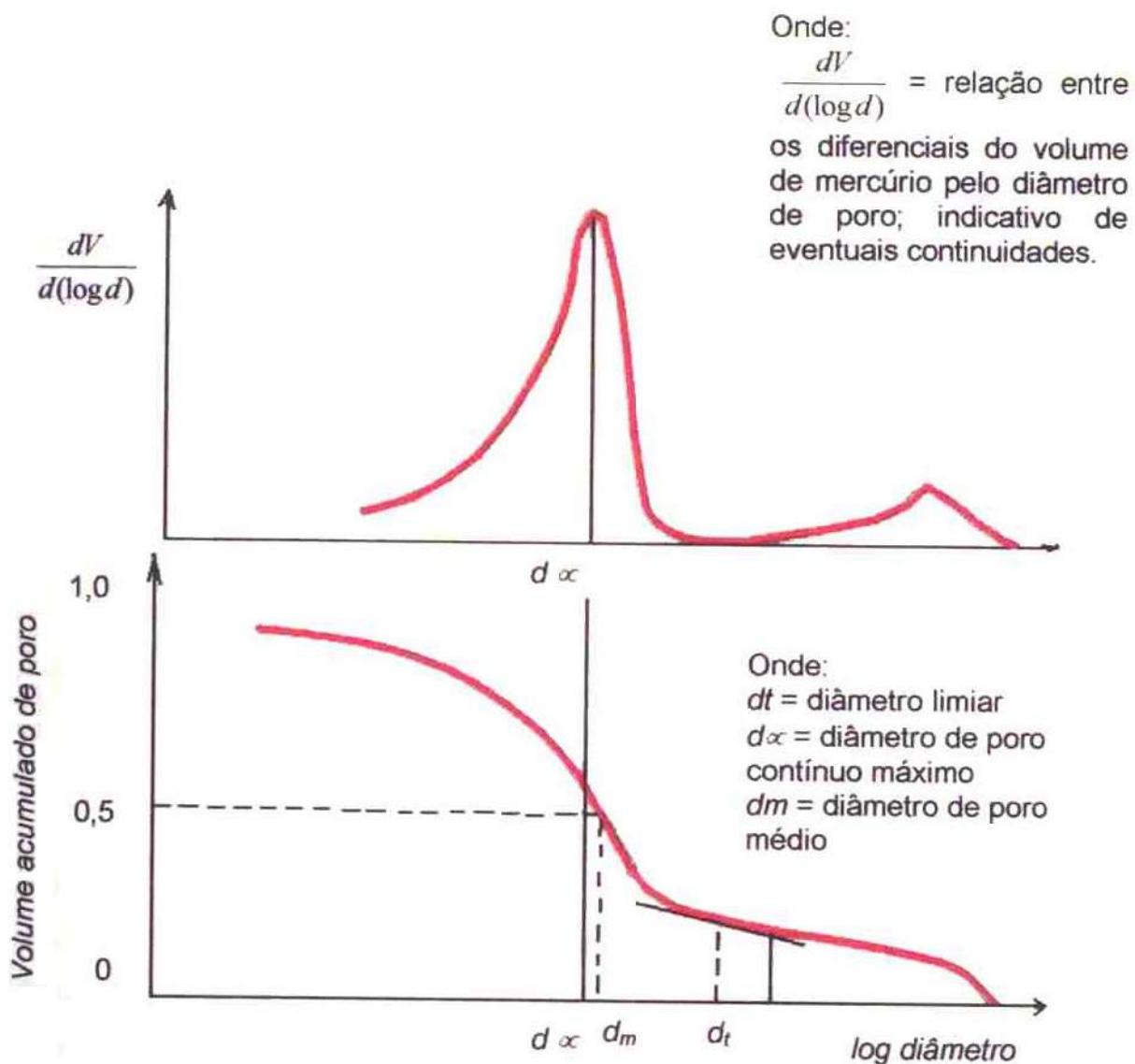


Figura 1 Definição de alguns parâmetros em função da curva obtida por porosimetria através de intrusão de mercúrio (BUIL e OLLIVIER, 1992)⁵⁷.

⁵⁶ MENG, B., Calculation of moisture transport coefficients on the basis of relevant pore structure parameters, **Materials and Structures**, 27, pp. 125-134, 1994.

Os poros caracterizam-se por terem quantidade, formas e dimensões variadas. Para se relacionar as propriedades com a porosidade, é necessário classificar os poros quanto ao tamanho, pois é uma das características dos poros que mais influencia nas propriedades da pasta e conseqüentemente, do concreto. Na Figura 2 estão apresentadas algumas classificações:

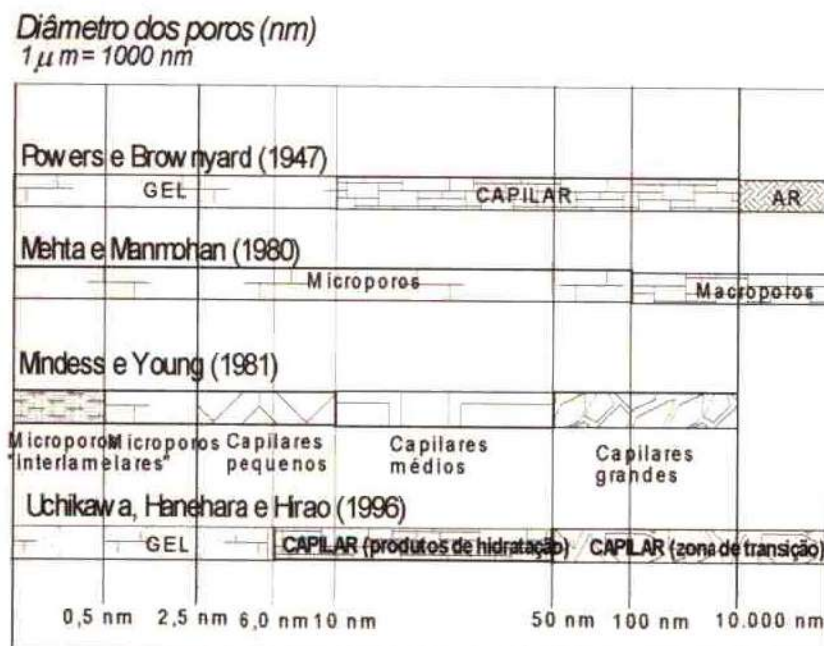


Figura 2 Classificação dos poros quanto ao tamanho

Por conveniência, adota-se a forma esférica para os poros sendo que somente os macroporos ($\varnothing > 100 \text{ nm}$) é que são aproximadamente esféricos⁵⁸.

Num concreto de boa qualidade, conforme classificação apresentada na Tabela 4, às primeiras idades, o volume de vazios intercomunicáveis pode ser de 20% a 25% e, a uma idade madura, entre 10% e 15%.

⁵⁷ BUIL, M., OLLIVIER, J.P., Conception des bétons: La structure poreuse, in La Durabilité des Bétons, Edited by J. Baron and J.P.Ollivier, Presses de l'Écoles Nationales des Ponts et Chaussées, Paris, France, 1992, pp. 57-106 Apud MARCHAND, J., GÉRARD, B., New developments in the modeling of mass transport processes in cement – based composites: a review, Advances in Concrete Technology, SP 154-10, **Proceedings**, Second CANMET/ACI International Symposium, Las Vegas, Nevada, 1995.

⁵⁸ NEVILLE, A. M., **Propriedades do Concreto**, 2 ed., São Paulo: PINI, 1997.

Quando utilizado agregado denso, o concreto poderá ter porosidade ou volume de vazios entre 10 e 20%, dependendo da relação água/cimento, teor de cimento e grau de hidratação⁵⁹.

Os concretos podem ser classificados de acordo com a sua porosidade, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 Classificação do concreto quanto a sua porosidade.

Pesquisador	Qualidade do concreto	Volume de vazios intercomunicáveis (%)
Gorisse ⁶⁰ (1980)	Excelente	< 11
	Boa	11 a 15
	Satisfatória	16 a 18
	Mediocre	19 a 22
	Ruim a muito ruim	> 22
C. ANDRADE ⁶¹	Boa qualidade e bem compacto	< 10
	Não adequado para ambientes agressivos	10 a 15
	Inadequados para proteger a armadura	> 15

1.1.1 Influência do agregado

A maioria dos estudos experimentais publicados sobre a porosidade da pasta de cimento hidratado foram feitos em amostras de pasta de cimento pura ou em argamassas. Porém, é conhecido que no concreto as características dos poros são diferentes devido à

⁵⁹ REINHARDT, H. W., Transport of Chemicals Through Concrete, **Materials Science of Concrete III**, Edited by Jan Skalny, The American Ceramic Society, Westerville, OH, pp. 209-241, 1992.

⁶⁰ GORISSE, F., Essais et controle des bétons. Barcelona, Editores Técnicos Associados, 1980 Apud CAMPITELI.

⁶¹ ANDRADE, C., **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**, Tradução e adaptação Antonio Carmona e Paulo Helene, São Paulo: PINI, 1992.

influência das partículas de agregado graúdo sobre a pasta de cimento situada nas suas proximidades.

A pasta no concreto tem uma estrutura com maior volume de poros em relação à mesma pasta isolada, sendo que na argamassa esta diferença de porosidade é menor⁶². Nas Figuras 3 e 4 estão apresentadas correlações entre os diâmetros dos poros e o volume de poros em função do volume de pasta em amostras de concreto, argamassa e pasta, com relações água/cimento iguais a 0,45 e 0,55, analisadas com maior e menor grau de hidratação, segundo estudos de WINSLOW (1990).

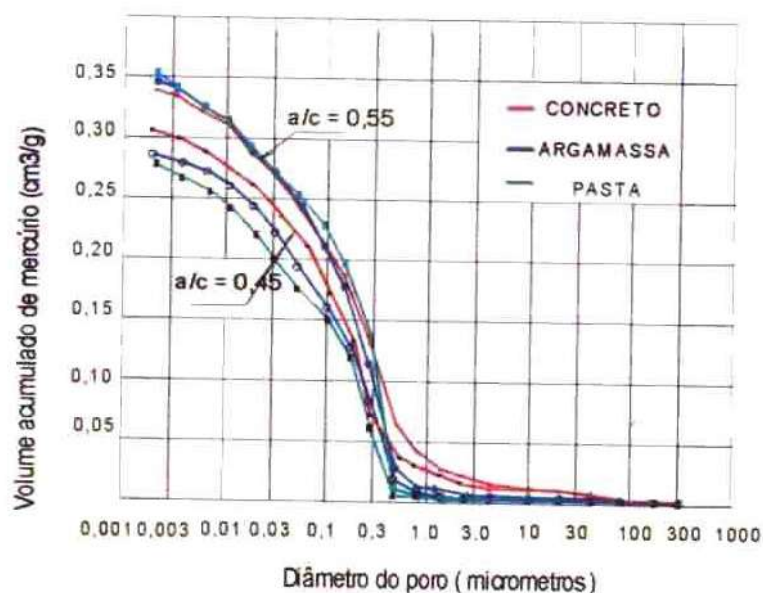


Figura 3 Distribuição e volume de poros em amostras com reduzido grau de hidratação (9,5% de teor de água não evaporável) (WINSLOW, 1990). (Medições à baixas idades, inferior a 3 dias).

⁶² WINSLOW, D., LIU, D., The pore structure of paste in concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 20, p. 227-235, 1990.

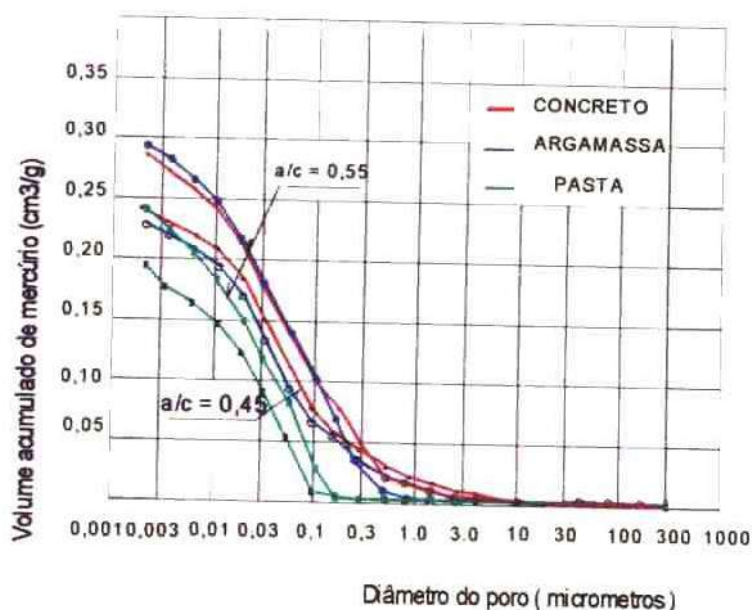


Figura 4 Distribuição e volume de poros em amostras com elevado grau de hidratação (14,5% de teor de água não evaporável) (WINSLOW, 1990). (Medições em idades de 7 à 21 dias).

Da figura 3 é possível observar que para relação a/c igual a 0,55 com menor grau de hidratação, o concreto, argamassa e pasta apresentam percentual de volume e distribuição de poros muito próximos. A influência do agregado é melhor evidenciada com maior grau de hidratação, conforme apresentado na Figura 4, ainda que o volume de poros seja reduzido em todas as amostras.

Detwiler⁶³ observou que quando o grau de hidratação de argamassas aumentou de 50% a 73%, o raio do poro reduziu de 0,065 μm para 0,017 μm (redução de 74%) para argamassa com relação água/ cimento de 0,4 e de 0,14 μm para 0,02 μm (redução de 86%) para relação $a/c= 0,5$. Como era de se esperar, o aumento do grau de hidratação reduz significativamente a porosidade dos concretos e argamassas.

⁶³ HALAMICKOVA, P., DETWILER, R. J., Water permeability and chloride ion diffusion in Portland cement mortars: relationship to sand content and critical pore diameter, **Cement and Concrete Research**, Vol. 25, p. 790-802, 1995.

A microestrutura do concreto não é alterada significativamente pela hidratação acelerada ou retardada por mudanças de temperatura^{64 65}. Entretanto, a relação água/cimento é fator dominante para a porosidade^{66 67 68}.

Pasta de cimento com o mesmo grau de hidratação e uma relação água/cimento baixa, produz poucos poros e de pequeno tamanho, porém a alta relação água/cimento, acarreta maior volume e maior tamanho de poros⁶⁹.

Em geral, o volume de poros do concreto e argamassa é dependente do volume de pasta pois considera-se que o agregado, em primeira instância, é compacto e sem poros. Entretanto, há que se ressaltar que a porosidade dos agregados é de grande importância para a qualidade dos concretos e que é necessário especificar a qualidade dos agregados em função da sua porosidade além de outras propriedades relevantes dos agregados^{70 71}.

Embora a maioria dos agregados possuem porosidade menor do que a pasta, a penetrabilidade de líquidos e gases depende da distribuição dos poros e da sua

⁶⁴ WINSLOW, D., LIU, D., The pore structure of paste in concrete, **Cement and Concrete Research**, Vol. 20, p. 227-235, 1990.

⁶⁵ PATEL, H. H., BLAND, C. H., POOLE, A. B., The microstructure of concrete cured at elevated temperatures, **Cement and Concrete Research**, Vol. 25, p. 485-490, 1995.

⁶⁶ WINSLOW, D., LIU, D., The pore structure of paste in concrete, **Cement and Concrete Research**, Vol. 20, p. 227-235, 1990.

⁶⁷ BOZHINOV, G., BAROVSKY, N., Pore structure of cement stone and its influence on the mechanical properties of concrete, Seventh International Congress on the Chemistry of Cements, **Proceedings**, Vol. III, Paris, 1980.

⁶⁸ REINHARDT, H. W., Transport of Chemicals Through Concrete, **Materials Science of Concrete III**, Edited by Jan Skalny, The American Ceramic Society, Westerville, OH, pp. 209-241, 1992.

⁶⁹ REINHARDT, H. W., Transport of Chemicals Through Concrete, **Materials Science of Concrete III**, Edited by Jan Skalny, The American Ceramic Society, Westerville, OH, pp. 209-241, 1992.

⁷⁰ GORISSE, F., Essais et controle des bétons. Barcelona, Editores Técnicos Associados, 1980. Apud CAMPITELI.

⁷¹ LYDON, F.D., Effect of coarse aggregate and water/cement ratio on intrinsic permeability of concrete subject to drying, **Cement and Concrete Research**, Vol. 25, n. 8, pp. 1737-1746, 1995.

⁷² ZHANG, M., GJØRV, O.E., Microstructure of the interfacial zone between lightweight aggregate and cement paste, **Cement and Concrete Research**, Vol. 20, pp. 610-618, 1990.

conectividade. Se o agregado é mais poroso do que a pasta, as partículas de agregado podem resultar um caminho mais curto através do concreto⁷³. Caso contrário, os agregados atuam como obstáculo ao transporte, aumentando a tortuosidade do caminho e reduzindo a seção transversal efetiva^{74 75 76}. Isso pode ser uma das causas da diferença observada entre os modelos e estudos experimentais que prevêm a influência da zona de transição nas propriedades de transporte. Os modelos sugerem um limite para o teor de agregado acima do qual o transporte aumentaria significativamente, o que nem sempre é comprovado na prática⁷⁷.

Com isso, a porosidade seria maior na pasta quando considerado o volume total de pasta e agregados. Na Tabela 5 estão apresentados resultados obtidos por Feldman⁷⁸ quanto a distribuição de poros em função dos volume de pasta e de argamassa, com variadas relações areia/cimento. Na Figura 5, estão apresentados graficamente os dados da Tabela 5.

Tabela 5 Volume de poros em argamassas em função do diâmetro do poro, para água/cimento constante e igual a 0,60 (FELDMAN, 1986).

Diâmetro dos poros (micrometros)	Traço cimento / areia											
	1: 0,0		1: 1,5		1: 1,8		1: 2,0		1: 2,25		1: 3,0	
	Volume de poros em %											
	pasta	arg.	pasta	arg.	pasta	arg.	pasta	arg.	pasta	arg.	pasta	arg.
97 - 0,875	0,57	0,29	0,18	2,88	1,64	2,10	1,14	2,37	1,22	4,04	1,79	
0,875 - 0,175	0,55	2,79	1,71	7,67	4,37	6,25	3,40	4,47	2,30	8,79	3,89	
0,175 - 0,0175	19,84	19,00	11,66	16,83	9,65	17,37	9,45	21,08	10,85	16,15	7,15	
0,0175 - 0,0029	14,88	13,36	8,20	9,44	5,38	9,67	5,26	11,29	5,81	11,00	4,60	
Total	35,84	35,44	21,75	36,82	21,04	35,39	19,25	39,21	20,18	39,98	17,43	

⁷³ BUENFELD, N. R., OKUNDI, E., Effect of cement content on transport in concrete, **Magazine of Concrete Research**, 50, N. 4, 1998.

⁷⁴ BUENFELD, N. R., OKUNDI, E., Effect of cement content on transport in concrete, **Magazine of Concrete Research**, 50, N. 4, 1998.

⁷⁵ BENTUR, A., 2nd International RILEM Conference on the Interfacial Transition Zone in Cementitious Composites, **Materials and Structures/ Matériaux et Constructions**, Vol. 31, p. 575-576, October, 1998.

⁷⁶ FAGERLUND, G., On the capillarity of concrete, **Nordic Concrete Research**, Publication n. 1, 6.1 – 6.20, Trykt hos Moberg & Helli A/S, Oslo, 1982.

⁷⁷ BENTUR, A., 2nd International RILEM Conference on the Interfacial Transition Zone in Cementitious Composites, **Materials and Structures/ Matériaux et Constructions**, Vol. 31, p. 575-576, October, 1998.

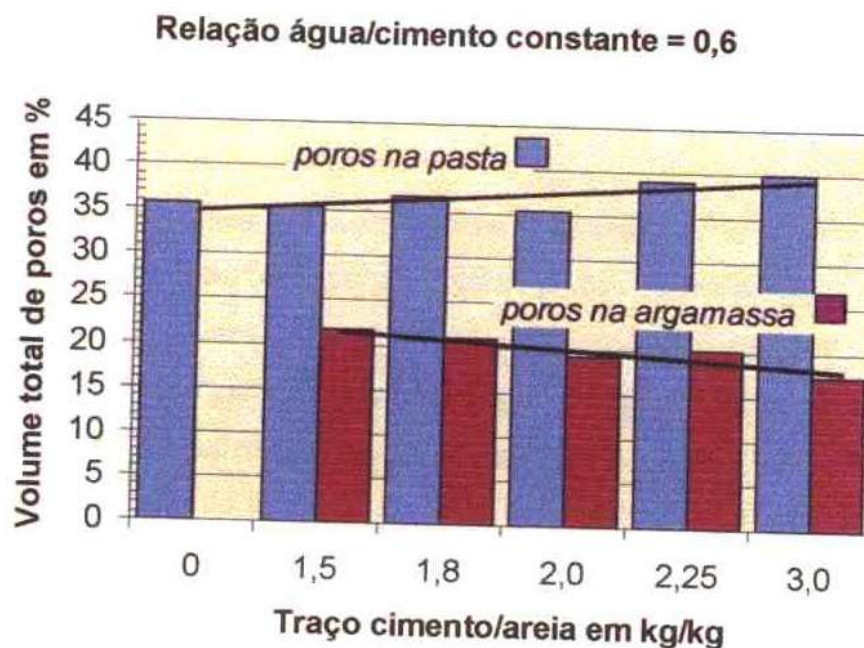


Figura 5 Volume total de poros em argamassas com relação areia/cimento de 0,0 a 3,0 (FELDMAN, 1986).

Da Figura 5 é possível observar que à medida que aumenta o teor de areia, o percentual do volume de poros na argamassa aumenta quando em função do volume de pasta e diminui quando calculado em função do volume total de argamassa. Isso significa que, embora teoricamente aumentando a zona de transição em consequência do aumento do volume de agregado, a porosidade na argamassa é menor.

Do estudo de Bozhinov e Barovsky⁷⁹, os resultados foram concordantes em relação aos obtidos por Feldman. Segundo eles, o volume total de poros diminui com o aumento das relações areia/cimento e agregado graúdo/cimento.

⁷⁸ FELDMAN, R. F., The effect of sand/cement ratio and silica fume on the microstructure of mortars, **Cement and Concrete Research**, Vol. 16, p. 31-39, 1986.

⁷⁹ BOZHINOV, G., BAROVSKY, N., Pore structure of cement stone and its influence on the mechanical properties of concrete, **Proceedings of the Seventh International Congress on the Chemistry of Cements**, Vol. III, Paris, 1980.

Também Kayyali⁸⁰ (1987) estudou a influência da zona de transição na porosidade. O ensaio com porosímetro por intrusão de mercúrio foi realizado em amostras de pasta, agregado triturado e micro-concreto. Os resultados permitiram as seguintes conclusões pelo autor:

- O volume de poros total é reduzido com o grau de hidratação;
- O micro-concreto apresenta menor volume total de poros do que a pasta;
- A porosidade do composto (pasta + agregados triturados) foi significativamente menor que seria suposto a partir de valores conhecidos da pasta e agregado isolados;
- Explica-se a menor porosidade no micro-concreto: a porosidade da interface deve ser menor que da matriz da pasta ou a influência do agregado foi mascarada pela interface e a intrusão não foi efetivada (impedindo que o agregado contribuisse para a porosidade total);
- Assim, a despeito das conclusões teóricas da maioria dos estudos computacionais de simulação realizados por outros pesquisadores, os quais observam alta porosidade na interface, é possível que o duplo filme ou algo similar deve prevenir os agregados de contribuir para a porosidade do compósito.

A última conclusão apresentada acima também foi observada em estudos realizados em concreto com agregado leve. Dependendo da porosidade e umidade da superfície do agregado, a zona interfacial pode ser mais densa e homogênea. Isso explica-se pela penetração da pasta nos poros do agregado, a qual, após hidratação, deve promover uma boa ligação mecânica entre a pasta e o agregado^{81 82}.

⁸⁰ KAYYALI, O.A., Porosity of concrete in relation to the nature of the paste-aggregate interface, **Materials and Structures/ Matériaux et Construction**, Vol. 20, N. 115, pp. 19-26, 1987.

⁸¹ ZHANG, M., GJØRV, O.E., Backscattered electron imaging studies on the interfacial zone between high strength lightweight aggregate and cement paste, **Advances in Cement Research**, 2, n. 8, pp. 141-146, 1989.

⁸² ZHANG, M., GJØRV, O.E., Microstructure of the interfacial zone between lightweight aggregate and cement paste, **Cement and Concrete Research**, Vol. 20, pp. 610-618, 1990.

Detwiler⁸³ *et al.* estudaram a relação entre o teor de areia e o diâmetro dos poros, relacionando-a com a permeabilidade à água e difusão de ions cloreto em argamassas. O estudo correlaciona graficamente o grau de hidratação com o raio dos poros, para argamassas e pastas com relação água/ cimento de 0,4 e 0,5. A pasta apresentou raio de poro menor que a argamassa para ambas as relações água/ cimento. Para a relação água/ cimento de 0,4 é possível observar que para grau de hidratação até aproximadamente 52%, quanto maior o teor de areia (55% do volume total da mistura), maior os raios dos poros. A partir deste valor, há uma tendência dos raios de poros da argamassa com maior teor de areia aproximarem-se dos valores da pasta. No caso da relação água/ cimento de 0,5 não há um comportamento uniforme.

No presente estudo, a areia foi substituída em 50% (em massa) por pó calcário e, para avaliação da sua influência, cita-se o estudo de Uchikawa *et al.*⁸⁴. Nesse estudo, a porosidade de concretos preparados com 34,3% do volume do agregado miúdo substituído por pó calcário foi praticamente igual à porosidade dos concretos sem substituição, conforme apresentada na Figura 6. Entretanto, a distribuição de poros é diferente, sendo maior o volume de poros com diâmetro acima de 0,1 μm para concretos sem substituição do agregado miúdo. Esta diferença pode ser resultado de uma estrutura densa em concreto que utiliza pó calcário, o que inibe o movimento da solução no poro, a deposição de grandes cristais de portlandita e a formação da zona de transição⁸⁵.

⁸³ HALAMICKOVA, P., DETWILER, R. J., Water permeability and chloride ion diffusion in Portland cement mortars: relationship to sand content and critical pore diameter, **Cement and Concrete Research**, Vol. 25, p. 790-802, 1995.

⁸⁴ UCHIKAWA, H., HANEHARA, S., HIRAO, H., Influence of microstructure on the physical properties of concrete prepared by substituting mineral powder for part of fine aggregate, **Cement and Concrete Research**, Vol. 26, N.1, 1996.

⁸⁵ UCHIKAWA, H., HANEHARA, S., HIRAO, H., Influence of microstructure on the physical properties of concrete prepared by substituting mineral powder for part of fine aggregate, **Cement and Concrete Research**, Vol. 26, N.1, 1996.

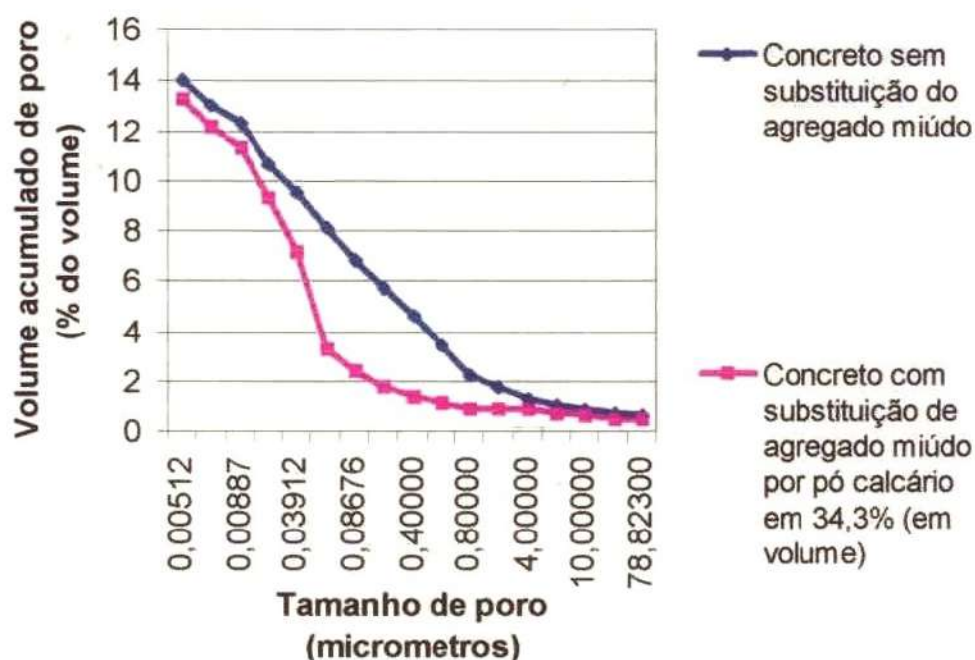


Figura 6 Volume e distribuição de poro em função do diâmetro em concretos com e sem substituição do agregado por pó calcário (UCHIKAWA *et al.* (1996).

1.1.2 Influência da pasta

Pastas com altos teores de água tendem a desenvolver canais verticais durante o período de exsudação. Esses canais provavelmente não são completamente preenchidos com os produtos de hidratação⁸⁶. Antes do início da hidratação e enquanto se mantém plástica, a pasta de cimento é um sólido cujas forças entre as partículas são muito fracas. Após o estado plástico, quando começam as reações finais de endurecimento, os canais capilares da pasta no estado fresco começam a ser preenchidos pelos produtos de hidratação. Este processo reduz rapidamente o volume e tamanho dos capilares, mas não implica necessariamente na interrupção de sua continuidade⁸⁷.

⁸⁶ POWERS, T.C., COPELAND, L.E., HAYES, J.C., MANN, H.M., Permeability of Portland cement paste, *Journal of the American Concrete Institute*, pp. 285-298, November 1954.

⁸⁷ POWERS, T.C., BROWNYARD, T.L., Studies of the physical properties of hardened plant cement past, Part 9, **Proceedings**, American Concrete Institute, Vol. 43 In: *Journal of the American Concrete Institute*, Detroit, Michigan, ACI, April 1947.

Concretos com menores volumes de pasta podem ter melhor desempenho em relação aos de maiores volumes de pasta⁸⁸. Alguns fatores devem ser considerados para obtenção de menor porosidade da pasta e conseqüentemente, do concreto:

- Quanto maior o teor de cimento no concreto, maior a temperatura e o risco de microfissuras térmicas na idade inicial⁸⁹;
- Quanto maior a temperatura, maior o risco de atraso na formação da etringita⁹⁰;
- Para relação água/cimento constante, concretos com baixos teores de cimento tem menor retração por secagem e menor exsudação^{91 92}.

1.1.3 Influência da Zona de transição

A zona de transição porosa formada na interface pasta/agregado afeta a distribuição do tamanho dos poros⁹³. Na Figura 7 observa-se a variação da porosidade em função da distância do agregado. Assim, considerando-se que o início da continuidade dos poros na pasta unicamente se dá com 18%⁹⁴ ou 30%⁹⁵ de volume de poro ou entre 31% a 41%, conforme observações de Powers⁹⁶ e apresentados na Tabela 6, ter-se-ia que o início de continuidade seria antes na pasta que na zona de transição, exceto para 18% do volume

⁸⁸ BUENFELD, N. R., OKUNDI, E., Effect of cement content on transport in concrete, **Magazine of Concrete Research**, 50, N. 4, 1998.

⁸⁹ HARRISON, T.A., Early-age thermal crack control in concrete. **CIRIA Report 91**, 1992, Revised Edition Apud BUENFELD.

⁹⁰ LAWRENCE, C.D., Mortar expansions due to delayed ettringite formation. Effects of curing period and temperature, **Cement and Concrete Research**, Vol. 25, No. 4, pp. 903-914, 1995.

⁹¹ BERKE, N.S., DALLAIRE, M.P., HICKS, M.C. and MACDONALD, A.C., Holistic approach to durability of steel reinforced concrete. Concrete in the service of Mankind – Radical Concrete Technology, 24-25, 1996 Apud BUENFELD.

⁹² POPOVICS, S., Analysis of the concrete strength versus water-cement ratio relationship, **ACI Materials Journal**, Vol. 87, N. 5, pp. 517-529, September-October, 1990.

⁹³ HALAMICKOVA, P., DETWILER, R. J., Water permeability and chloride ion diffusion in Portland cement mortars: relationship to sand content and critical pore diameter, **Cement and Concrete Research**, Vol. 25, p. 790-802, 1995.

⁹⁴ BENTZ, D.P., GARBOCZI, E.J., Percolation of phases in a three-dimensional cement paste microstructural model, **Cement and Concrete Research**, Vol. 21, pp. 325-344, 1991.

⁹⁵ MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**, p. 125, São Paulo, PINI, 1994.

total. Entretanto, sabe-se que em concreto ou argamassa, a relação água/ cimento na pasta matriz é reduzida pelo seu aumento na zona de transição, e conseqüentemente, há redução do volume de poros. Com essas observações, pode-se deduzir que, à medida que se aumenta o volume de pasta na argamassa ou concreto, maior a probabilidade da pasta ser fator condicionante da continuidade do conjunto pasta-agregado.

Tabela 6 Volume de poros da pasta em função do grau de hidratação de início da descontinuidade dos poros.

Volume dos compostos ⁹⁷ em função de α ⁹⁸	Valores obtidos por POWERS (1959)			
	a/c=0,4 $\alpha=0,49$	a/c=0,5 $\alpha=0,71$	a/c=0,6 $\alpha=0,92$	a/c=0,7 $\alpha=1,0$
V. sólidos = 0,48 . α	0,235	0,341	0,442	0,480
V. água gel = 0,19 . α	0,093	0,135	0,175	0,190
V. água cap.= a/c - 0,41 . α	0,199	0,209	0,223	0,290
V. ret. química 0,06 . α	0,029	0,043	0,055	0,060
V. total	0,556	0,728	0,895	1,020
V. poros (%)	41	35	31	34

⁹⁶ POWERS, T.C., COPELAND, L.E., MANN, H.M., Capillary continuity or discontinuity in cement pastes, Journal Portland Cement Association Research and Development Laboratories, 1, n.2, pp. 38-48, May 1959.

⁹⁷ HELENE, P. R. L., **Estrutura interna do concreto**, notas de aula do curso de pós graduação em engenharia civil da EPUSP Materiais de Construção, p. 17, 1998.

⁹⁸ α = grau de hidratação do cimento.

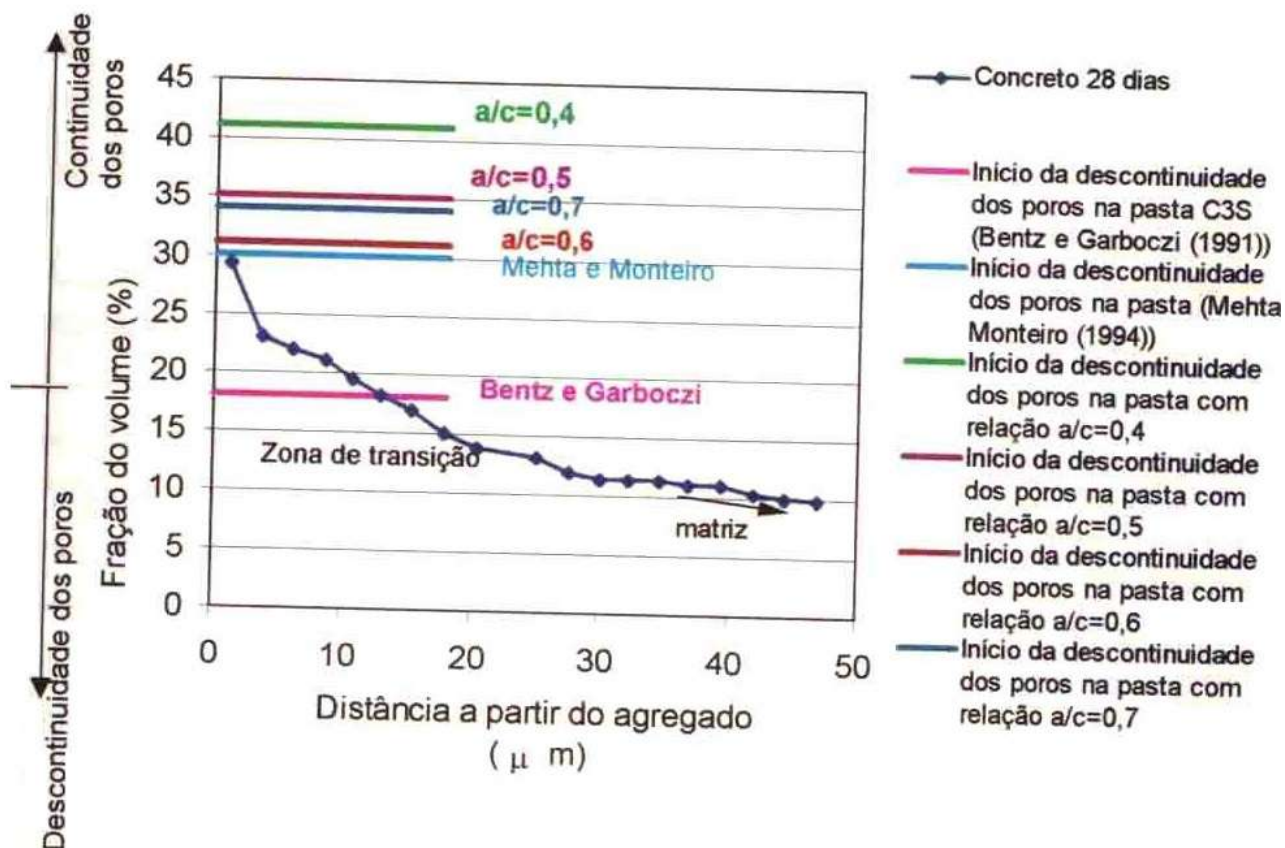


Figura 7 Distribuição média da porosidade na zona de transição em concreto com relação água/cimento igual a 0,4 (CRUMBIE (1994) Apud SCRIVENER).

Scrivener⁹⁹ observou em amostras de concreto, por meio de intrusão de “Wood’s metal”¹⁰⁰, que a área de maior concentração do metal foi na interface pasta/agregado, embora nem toda a região estivesse preenchida. Isso pode ser um indicativo de alguma descontinuidade em determinadas áreas dentro da zona de transição. A espessura preenchida pelo metal variou entre 30 a 100 μm , porém, não apresentou microfissuras se interconectando entre os poros. Scrivener sugere que deve ocorrer interconexão das zonas de transição com espessuras de pelo menos 20 μm , tendo em vista que supõe-se

⁹⁹ SCRIVENER, K. L., NEMATY, K. M., The percolation of pore space in the cement paste/aggregate interfacial zone of concrete, **Cement and Concrete Research**, Vol. 26, N.1, 1996.

¹⁰⁰ Wood’s metal é metal fundível sendo que na fase líquida é não molhante, com tensão de superfície em torno de 400 N/m. Possui módulo de Young de 9,7 GPa e densidade de 9,4 g/cm^3 .

que o início da continuidade dos poros na pasta dá-se com 18% de porosidade, conforme apresentado na Figura 7.

Tognon e Cangiano¹⁰¹ também estudaram a porosidade da zona de transição, porém em argamassas com traço 1:1,8 a/c igual a 0,4. Dos resultados obtidos, observa-se que o volume total de poros é menor quando utiliza-se agregado calcário em relação ao quartzo. Todavia, o volume total de poros da zona de transição com agregado calcário foi maior em relação ao quartzo; correspondente a 27,2% e 22,2% do volume total de poros, respectivamente. Esses valores podem ser uma indicação de que a zona de transição, embora com maior volume de poros, não tem influência principal na determinação da porosidade da argamassa. Os valores do volume de poros para a zona de transição foram obtidos pela diferença entre os volumes de poro medido na argamassa e calculado a partir dos volumes de poro da pasta e do agregado isoladamente.

Os autores também concluíram que a influência da zona de transição é evidenciada na faixa de poros com raio entre 0,015 μm e 0,030 μm , pois nessa faixa ocorreu um pico no gráfico comparativo da distribuição e frequência de distribuição de poro entre a pasta, agregado e argamassa. Essa faixa de poros, a qual evidencia a influência da zona de transição, pode ser resultado da continuidade da zona de transição¹⁰².

Alguns pesquisadores^{103 104 105} observaram que a maior mudança na porosidade da pasta ocorre entre 15 μm e 20 μm ao redor do agregado. Da Figura 7, esta distância corresponde a 13,4% a 17,2% de volume de poro.

¹⁰¹ TOGNON, G. P., CANGIANO, S., Interface phenomena and durability of concrete, **Proceedings of the Seventh International Congress on the Chemistry of Cements**, Vol III, Paris, 1980.

¹⁰² TOGNON, G. P., CANGIANO, S., Interface phenomena and durability of concrete, **Proceedings of the Seventh International Congress on the Chemistry of Cements**, Vol III, Paris, 1980.

¹⁰³ SCRIVENER, K.L., PRATT, P.L., Characterisation of interfacial microstructure, **Interfacial Transition Zone in Concrete**, RILEM REPORT 11, Part 1, 1, 1996.

¹⁰⁴ WINSLOW, D.N., COHEN, M.D., Percolation and pore structure in mortars and concrete, **Cement and Concrete Research**, Vol. 24, pp. 25-37, 1994.

Assim, do estudo realizado por Nyame e Illston¹⁰⁶, pode-se comparar a faixa de continuidade da zona de transição e da pasta unicamente pelo raio de poro. A continuidade dos poros na Figura 8 pode ser evidenciada pela mudança de direção das linhas do gráfico. É possível observar que a continuidade dos poros na pasta unicamente se dá com maior raio e volume de poro em relação a zona de transição em argamassa. Vale lembrar que a pasta na argamassa tem relação a/c efetiva menor.

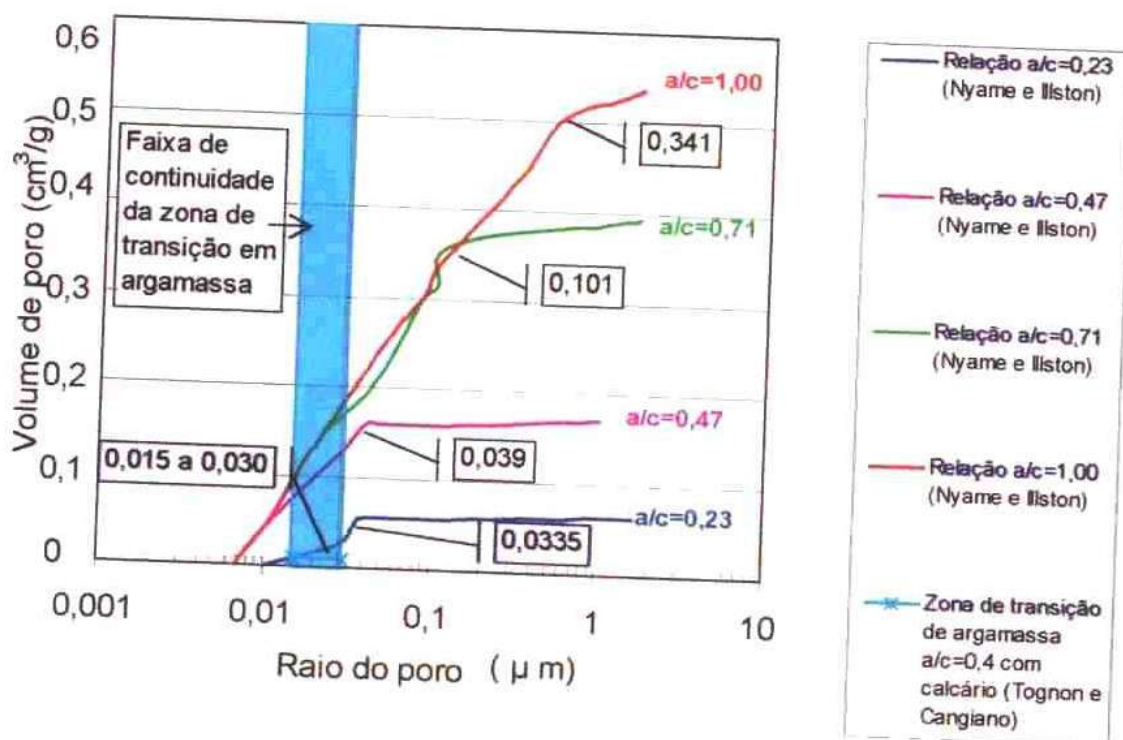


Figura 8 Comparativo da continuidade na pasta e da zona de transição em amostras curadas em água à 20°C aos 28 dias.

¹⁰⁵ SNYDER, K.A., WINSLOW, D.N., BENTZ, D.P., GARBOCZI, E.J., Interfacial zone percolation in cement-aggregate composites, *Interfaces in Cementitious Composites*, RILEM International Conference, *Proceedings* 18, Part 2.2, Maso, J.C. Ed., E & FN SPON, Toulouse, 1992.

¹⁰⁶ NYAME, B. K., ILLSTON, J. M., Capillary pore structure and permeability of hardened cement paste, *Proceedings of the Seventh International Congress on the Chemistry of Cements*, Vol III, Paris, 1980.

As mudanças do raio máximo dos poros com a relação água/cimento e hidratação sugere que é representativo o espaço entre os grãos de cimento, os quais são parcialmente preenchidos com os produtos de hidratação. A hidratação após 28 dias consiste de uma densificação da estrutura existente antes de deposição de novo material dentro dos canais de poro contínuo entre grãos adjacentes¹⁰⁷.

Concretos curados em altas temperaturas apresentam concentrações de cristais grandes em microfissuras, em especial na zona de transição e poros. Entretanto, não há diferença significativa na espessura das cascas de C-S-H formado ao redor dos grãos de clínquer¹⁰⁸.

A microdureza é um parâmetro utilizado por alguns pesquisadores para avaliar o grau de compactação da pasta. Este método consiste de amostras colocadas em pequeno tubo plástico com rocha em forma de prisma no meio. As superfícies da rocha são polidas antes do ensaio. A amostra é submetida ao marcador em forma de pirâmide na microdureza estabelecida. Das impressões feitas, são calculados os valores de microdureza de Vickers da pasta na zona de transição. Os valores baixos indicam alta porosidade¹⁰⁹.

O primeiro estudo sobre microdureza da zona de transição foi realizado com diferentes rochas e cimentos¹¹⁰. Os resultados mostraram uma variação da interface do agregado para a pasta, sendo que à distância de 2 a 3 μm da superfície do agregado, foi observada uma alta microdureza ($H_v \approx 20$). Entre 3 a 10 μm foi observada uma região com alta porosidade ($H_v \approx 5$) e entre 10 a 50 μm , uma microdureza constante em torno de 10.

¹⁰⁷ NYAME, B. K., ILLSTON, J. M., Capillary pore structure and permeability of hardened cement paste, **Proceedings** of the Seventh International Congress on the Chemistry of Cements, Vol III, Paris, 1980.

¹⁰⁸ PATEL, H. H., BLAND, C. H., POOLE, A. B., The microstructure of concrete cured at elevated temperatures, **Cement and Concrete Research**, Vol. 25, p. 485-490, 1995.

¹⁰⁹ LARBI, J. A., Microstructure of the interfacial zone around aggregate particles in concrete, **HERON**, Vol.38, 1993.

¹¹⁰ LYUBIMOVA, T. YU. and PINUS, E.R., Crystallization structure in the contact zone between aggregate and cement in concrete. **Colloid Journal, USSR**, 1962, Vol. 24, no. 5, pp. 491-498, Apud LARBI, 1993, pg. 15.

Monteiro¹¹¹ estudou o efeito da idade nos valores da microdureza da zona de transição. Observou que houve um aumento de 25% entre amostras com 30 e 100 dias de idade. Isto sugere que os produtos de hidratação preenchem gradualmente a zona de transição.

1.2 Resistência à compressão

Na prática de engenharia, considera-se que a resistência de um concreto a uma certa idade, curado em água a uma temperatura estabelecida, depende de apenas dois fatores: a relação água/cimento e o grau de adensamento¹¹². Estes fatores levam à formação da porosidade.

1.2.1 Influência da pasta

Na pasta a fonte principal de resistência nos produtos sólidos é a existência de forças de atração de Van der Waals. Assim, os pequenos cristais de C-S-H, de sulfoaluminatos de cálcio hidratados e de aluminatos de cálcio hidratados hexagonais possuem área específica e capacidade de adesão elevadas. Estes produtos de hidratação do cimento Portland tendem a aderir fortemente, não somente uns aos outros, mas também a sólidos de área específica baixa, tais como o hidróxido de cálcio, grãos de clínquer anidro, e partículas de agregado miúdo e graúdo¹¹³.

Na prática, a resistência da pasta endurecida parece não ser fortemente dependente da natureza da microestrutura do C-S-H, numa escala atômica. A resistência parece depender das características estruturais em escala maior (meso e macroestrutura)¹¹⁴. Ensaios de fratura em pastas revelam que a fratura se dá antes ao redor dos grãos de

¹¹¹ MONTEIRO, P. J. M., **Microstructure of concrete and its influence on the mechanical properties**, Department of Civil Engineering, University of Califórnia, Berkeley, Report No. UCB/SESM-85/06, July, 1985.

¹¹² NEVILLE, A. M., **Propriedades do Concreto**, 2 ed., São Paulo: PINI, 1997.

¹¹³ MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**, São Paulo, PINI, 1994.

¹¹⁴ MINDESS, S., Relationships between strength and microstructure for cement-based materials: an overview, **Materials Research Society**, Vol.42, 1985.

cimento hidratado que através deles. Muitas fissuras com espessura menor que $1\mu\text{m}$ podem ocorrer ao redor dos grãos de cimento hidratado, podendo a retração ter contribuído para isso¹¹⁵. Também o teor de sulfatos (SO_3) do cimento tem influência significativa na resistência à compressão, pois altera o volume de vazios¹¹⁶.

Assim, é fundamental a relação de dependência entre a resistência da pasta de cimento hidratado e o volume de poros e distribuição de tamanho de poros^{117 118 119}. Poros com diâmetro menor do que $0,020\mu\text{m}$ ¹²⁰ ou $0,010\mu\text{m}$ ¹²¹ não afetam significativamente a resistência. Geralmente, para um mesmo volume total de poros, poros com diâmetros menores resultam resistência maior da pasta¹²².

A relação água/cimento afeta não somente a porosidade total, mas também a natureza dos produtos hidratados; com relação água/cimento baixa parece que os produtos hidratados tem maior capacidade de ligação¹²³. O tipo de cimento também altera a resistência de ligação da interface pasta/agregado¹²⁴. A tensão de ligação pasta/agregado, avaliada em argamassas de acordo com a norma ANSI/ASTM C234/80,

¹¹⁵ DIAMOND, S., MINDESS, S., SEM investigations of fracture surfaces using stereo pairs: I. fracture surfaces of rock and of cement paste, **Cement and Concrete Research**, Vol. 22, pp. 67-78, 1992.

¹¹⁶ SERSALE, R., CIOFFI, R., Relationship between gypsum content, porosity and strength in cement. I. Effect of SO_3 on the physical microstructure of Portland cement mortars, **Cement and Concrete Research**, Vol. 21, pp. 120-126, 1991.

¹¹⁷ NEVILLE, A. M., **Propriedades do Concreto**, 2 ed., São Paulo: PINI, 1997.

¹¹⁸ MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**, São Paulo, PINI, 1994.

¹¹⁹ MINDESS, S., Relationships between strength and microstructure for cement-based materials: an overview, **Materials Research Society**, Vol.42, 1985.

¹²⁰ ODLER, I., RÖBLER, M., Investigations on the relationship between porosity, structure and strength of hydrated Portland cement pastes. II. Effect of pore structure and of degree of hydration, **Cement and Concrete Research**, Vol. 15, p. 401-410, 1985.

¹²¹ SERSALE, R., CIOFFI, R., Relationship between gypsum content, porosity and strength in cement. I. Effect of SO_3 on the physical microstructure of Portland cement mortars, **Cement and Concrete Research**, Vol. 21, pp. 120-126, 1991.

¹²² NEVILLE, A. M., **Propriedades do Concreto**, 2 ed., São Paulo: PINI, 1997.

¹²³ MINDESS, S., Relationships between strength and microstructure for cement-based materials: an overview, **Materials Research Society**, Vol.42, 1985.

¹²⁴ IWASAKI, N., TOMIYAMA, Y., Bond strength between cement paste and aggregate, **Review of the twenty-eighth general meeting-Technical Session**, The cement association of Japan, Tokyo, Japan, 1974.

é dobrada quando 12 a 13% do cimento é substituído por microssilica. Substituições acima de 13% afetam negativamente a tensão de ligação¹²⁵.

Também Valenta (1961) observou que para uma mesma relação cimento/agregado porém, com relação água/cimento reduzida em 50% por adição de superplastificante, a resistência à compressão é triplicada, atingindo, aproximadamente, 32 a 84 MPa, ou seja, comprovou as conhecidas leis de Abrams, de Ferét e de Powers de que a relação a/c é o parâmetro mais importante.

Sabe-se que há uma relação inversa entre porosidade e resistência de um sólido. A influência do volume de poros sobre a resistência do concreto tem sido representada por uma função exponencial, equação 1:

$$f_c = f_{c,o} (1 - p)^n \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

p = volume de poros expresso como fração do volume total do concreto;

f_c = resistência do concreto com volume de poros p ;

$f_{c,o}$ = resistência do concreto com volume de poros zero;

n = um coeficiente não necessariamente constante¹²⁶.

Entretanto, é incerta a forma exata dessa relação¹²⁷. Tem-se observado que a correlação linear é a forma que melhor expressa o relacionamento entre resistência da pasta e volume de poros^{128 129} bem como da argamassa e o volume de poros¹³⁰. Esta variação

¹²⁵ BÜRGE, T.A., Densified cement matrix improves bond with reinforcing steel, Bond in Concrete, (ed. P.J.M. Bartos), **Proceedings of International Conference**, Paisley, 14-16 June 1982, Applied Science Publishers, London, pp. 32-5 Apud MASSAZZA, 1996.

¹²⁶ GRUDEMÓ, Á., Development of strength properties of hydrating cement pastes and their relation to structural features, **Proceedings Symposium on Some Recent Research on Cement Hydration**, 8pp., Cembureau, 1975.

¹²⁷ NEVILLE, A. M., **Propriedades do Concreto**, 2 ed., São Paulo: PINI, 1997.

¹²⁸ ODLER, I., RÖßLER, M., Investigations on the relationship between porosity, structure and strength of hydrated Portland cement pastes. II. Effect of pore structure and of degree of hydration, **Cement and Concrete Research**, Vol. 15, p. 401-410, 1985.

linear ocorre para pastas com volume de poro em torno de 2 a 25%¹³¹, entre 10 e 35%^{132 133} ou 5 e 28%¹³⁴. Em argamassas, há boa correlação linear ($r=0,955$ a $0,932$) entre volume de poro e resistência à compressão quando relacionados apenas aos poros com raio maior que 10 nm¹³⁵. A correlação linear também existe entre as resistências do concreto, pasta e de ligação pasta/agregado, sendo que o coeficiente de resistência da pasta é aproximadamente o dobro da resistência de ligação¹³⁶.

1.2.2 Influência da zona de transição

Um resumo dos vários tipos de ligações pasta/agregado observadas por pesquisadores podem ser descritas:

- *Ligação mecânica*

Em escala macroscópica, por rugosidade superficial do inerte na qual os cristais dos componentes hidratados do cimento envolvem as protuberâncias e as asperezas, muito maiores, da superfície dos agregados^{137 138}.

¹²⁹ MAI, Y. W., COTTERELL, B., Porosity and mechanical properties of cement mortar, **Cement and Concrete Research**, Vol. 15, p. 995-1002, 1985.

¹³⁰ SERSALE, R., CIOFFI, R., Relationship between gypsum content, porosity and strength in cement. I. Effect of SO₃ on the physical microstructure of Portland cement mortars, **Cement and Concrete Research**, Vol. 21, pp. 120-126, 1991.

¹³¹ ROY, D. M., GOUDA, G. R., Porosity – strength relation in cementitious materials with very high strengths, **Journal American Ceramic Society**, 53, No. 10, pp. 549-550, 1973.

¹³² FELDMAN, R.F., BEAUDOIN, J.J., Microstructure and strength of hydrated cement, **Cement and Concrete Research**, Vol. 6, pp. 389-400, 1976.

¹³³ WATSON, K.L., A simple relationship between the compressive strength and porosity of hydrated Portland cement, **Cement and Concrete Research**, Vol. 11, pp. 473-476, 1981.

¹³⁴ ODLER, I., RÖßLER, M., Investigations on the relationship between porosity, structure and strength of hydrated Portland cement pastes. II. Effect of pore structure and of degree of hydration, **Cement and Concrete Research**, Vol. 15, p. 401-410, 1985.

¹³⁵ SERSALE, R., CIOFFI, R., Relationship between gypsum content, porosity and strength in cement. I. Effect of SO₃ on the physical microstructure of Portland cement mortars, **Cement and Concrete Research**, Vol. 21, pp. 120-126, 1991.

¹³⁶ ALEXANDER, K.M., WARDLAW, J., GILBERT, D.J., Aggregate-cement bond, cement paste strength and the strength of concrete. International Conference on the Structure of Concrete, Cement and Concrete Association, London, 59-81 Apud STRUBLE, L., SKALNY, J., MINDESS, S., 1980.

¹³⁷ FARRAN, J., Contribution minéralogique à l'étude de l'adhérence entre les constituants hydratés des ciments et les matériaux enrobés, **Matériaux et constructions**, 490-491, p. 155-172, 1956.

¹³⁸ COUTINHO, A. S., GONÇALVES, A., **Fabrico e Propriedades do Betão**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Vol. I, Lisboa, 1997.

- *Aderência devido à absorção*

O agregado absorve a água contendo parte do cimento dissolvido, o qual, após penetrar na superfície da partícula, cristaliza ao mesmo tempo que a pasta, ligando-se a ela^{139 140}.

- *Ligação física*

Existe uma atração, sem continuidade da estrutura, entre a pasta de cimento e a superfície do agregado, por forças de Van der Waals^{141 142 143}.

- *Ligação epitaxial*

Observações deste tipo de ligação ainda são insuficientes para afirmar a sua existência. Todavia, Farran¹⁴⁴ (1956) observou um tipo de ligação pasta/agregado onde ocorria a continuidade da estrutura cristalina do agregado nos produtos de hidratação do cimento, por crescimento epitáxico com ou sem formação de soluções sólidas intermediárias. Era uma espécie de ligação na qual os cristais dos componentes do cimento hidratado prolongavam os do agregado, com os quais tinha em comum as suas redes cristalinas. Estes constituintes hidratados epitaxialmente eram pouco resistentes, não podendo ser demonstrada mecanicamente.

- *Ligação química*

São devidas as reações entre os produtos da hidratação do cimento e a superfície do agregado^{145 146}.

¹³⁹ BERTRANDY, R., Les granulats calcaires dans les mortiers et bétons, Travaux, n. 400, Julho-Agosto, 1968, p. 767 Apud COUTINHO, A. S., GONÇALVES, A., **Fabrico e Propriedades do Betão**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Vol. I, p. 27, Lisboa, 1997.

¹⁴⁰ ZHANG, M., GJØRV, O.E., Microstructure of the interfacial zone between lightweight aggregate and cement paste, **Cement and Concrete Research**, Vol. 20, pp. 610-618, 1990.

¹⁴¹ MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**, São Paulo, PINI, 1994.

¹⁴² COUTINHO, A. S., GONÇALVES, A., **Fabrico e Propriedades do Betão**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Vol. I, Lisboa, 1997.

¹⁴³ GIACCIO, G., ZERBINO, R., Factors affecting cement paste-aggregate bond, **8º Congresso Internacional de Química do Cimento**, Vol. VI, Rio de Janeiro, 1986.

¹⁴⁴ FARRAN, J., Contribution minéralogique à l'étude de l'adhérence entre les constituants hydratés des ciments et les matériaux enrobés, **Matériaux et constructions**, 490-491, p. 155-172, 1956.

¹⁴⁵ COUTINHO, A. S., GONÇALVES, A., **Fabrico e Propriedades do Betão**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Vol. I, Lisboa, 1997.

¹⁴⁶ ZHANG, M., GJØRV, O.E., Microstructure of the interfacial zone between lightweight aggregate and cement paste, **Cement and Concrete Research**, Vol. 20, pp. 610-618, 1990.

A determinação da resistência da ligação pasta/agregado pode ser avaliada por meio de medição da tensão de aderência por tração pura na superfície de ligação ou até por tração indireta, à flexão, conforme Figura 9.

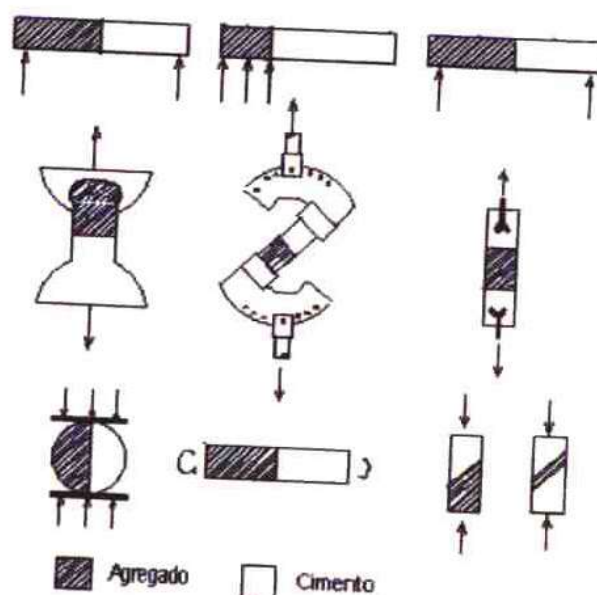


Figura 9 Esquema de ensaios para determinação da tensão de aderência entre a pasta e o agregado (ALEXANDER, WARDLAW e GILBERT, 1965)¹⁴⁷.

Vile¹⁴⁸ (1968) desenvolveu um modelo de distribuição de tensões ao redor das partículas de agregado na matriz da pasta, sob tensão de compressão. Para o caso geral do agregado ser mais resistente que a pasta, a ordem para a ruptura é:

- Tensão de tração na ligação pasta/agregado;
- Cisalhamento na ligação;
- Cisalhamento e tração na matriz;
- Ruptura ocasional do agregado.

¹⁴⁷ ALEXANDER, K.M., WARDLAW, J. and GILBERT, D.J., Aggregate-cement bond, cement paste strength and the strength of concrete, The structure of concrete and its behaviour under load, Eds. Brooks, A.E. and Newman, K., Cement and Concrete Association, London, pp. 59-61, 1965.

¹⁴⁸ VILE, G.W.D., The strength of concrete under short-term static biaxial stress, The structure of concrete and its behaviour under load, Eds. Books, A.E. and Newman, K., Cement and Concrete Association, London, pp. 275-288, 1968.

Geralmente a resistência de ligação aumenta com a idade mas não na mesma razão que da pasta^{149 150 151}. Com a variação da relação água/cimento da pasta, a resistência de ligação é menos sensível do que a resistência da pasta¹⁵².

O aumento da resistência de ligação pasta/agregado tem como conseqüência o aumento da resistência do concreto, seja tração, compressão ou flexão. À passagem da resistência de ligação de nula à perfeita, a resistência do concreto aumenta geralmente de 15 a 40%, com maior aumento da resistência à tração que compressão^{153 154}. Assim, melhorando a resistência de ligação da interface, aumenta a resistência à tração e, em menor escala, a resistência à compressão do concreto^{155 156 157 158 159}. Isso leva a pensar que em termos de resistência à compressão, a interface pasta/agregado pode não ser o fator mais

¹⁴⁹ ALEXANDER, M.G., The effects of ageing on the interfacial transition zone in concrete, **Interfacial Transition Zone in Concrete**, RILEM REPORT 11, Part 3, 9, 1996.

¹⁵⁰ GIACCIO, G., ZERBINO, R., Factors affecting cement paste-aggregate bond, **8° Congresso Internacional de Química do Cimento**, Vol. VI, Rio de Janeiro, 1986.

¹⁵¹ IWASAKI, N., TOMIYAMA, Y., Bond strength between cement paste and aggregate, **Review of the twenty-eighth general meeting-Technical Session**, The cement association of Japan, Tokyo, Japan, 1974.

¹⁵² GIACCIO, G., ZERBINO, R., Factors affecting cement paste-aggregate bond, **8° Congresso Internacional de Química do Cimento**, Vol. VI, Rio de Janeiro, 1986.

¹⁵³ MINDESS, S., Tests to determine the mechanical properties of the interfacial zone, **Interfacial Transition Zone in Concrete**, RILEM REPORT 11, Part 2, 3, 1996.

¹⁵⁴ BENTUR, A., 2nd International RILEM Conference on the Interfacial Transition Zone in Cementitious Composites, **Materials and Structures/ Matériaux et Constructions**, Vol. 31, p. 575-576, October, 1998.

¹⁵⁵ HSU, T.T.C., SLATE, F.O., STURMAN, G.M., WINTER, G., Microcracking of plain concrete and the shape of the stress-strain curve, **Journal of the American Concrete Institute**, No. 60-14, February, 1963.

¹⁵⁶ CHEN, Z. Y., WANG, J. G., Effect of bond strength between aggregate and cement paste on the mechanical behaviour of concrete, **Bonding in cementitious composites**, Eds. Mindess, S. and Shah, S.P., Materials Research Society, Vol. 114, pp. 41-47, 1988.

¹⁵⁷ FAGERLUND, G., Strength and porosity of concrete, **Proceedings of the International Symposium on Pore Structure and Properties of Materials**, RILEM/ IUPAC, Prague, pp. D51-D73, 1973 Apud MINDESS, 1996.

¹⁵⁸ PERRY, C., GILLOTT, J.E., The influence of mortar-aggregate bond strength on the behaviour of concrete in uniaxial compression, **Cement and Concrete Research**, Vol. 7, pp. 553-564, 1977.

¹⁵⁹ SCHORN, H., Numerical simulation of altering mechanical properties of concrete due to material behaviour of the interfaces, **Interfaces in Cementitious Composites**, Edited by J.C.Maso.Proceedings of the RILEM International Conference, 18, pp. 159-168, E & FN Spon, London, 1992.

importante em concretos com alta resistência¹⁶⁰ e também em concretos normais¹⁶¹, sendo dependente principalmente da resistência da matriz¹⁶².

A Equação 2 apresenta uma simples relação entre as resistências de ligação e compressão¹⁶³:

$$f_c = b_0 + b_1 m_1 + b_2 m_2 \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

f_c = resistência à compressão do concreto

b_0, b_1, b_2 = coeficientes obtidos por regressão linear e correspondem a 480, 2.08, 1.02, respectivamente

m_1, m_2 = resistências (como módulos de ruptura) expresso em lb/pol² (psi) da pasta e da ligação pasta/agregado, respectivamente.

Também reduções na resistência da ligação pasta/agregado causam pequenas reduções no módulo de elasticidade e resistência à compressão do concreto normal¹⁶⁴.

Assim, os efeitos da interface não devem ser super estimados até porque na mecânica da fratura, a resistência do concreto é governada por imperfeições de tamanho entre 10^2 μm (10^5 nm) a 10^3 μm (10^6 nm) e superiores^{165 166}.

¹⁶⁰ MINDESS, S., Relationships between strength and microstructure for cement-based materials: an overview, **Materials Research Society**, Vol.42, 1985.

¹⁶¹ FAGERLUND, G., Strength and porosity of concrete, **Proceedings of the International Symposium on Pore Structure and Properties of Materials**, RILEM/ IUPAC, Prague, pp. D51-D73, 1973 Apud STRUBLE.

¹⁶² SCHLANGEN, E., van MIER, J.G.M., Numerical study of the influence of interfacial properties on the mechanical behaviour of cement-based composites, **Interfaces in Cementitious Composites**, Edited by J.C. Maso. Proceedings of the RILEM International Conference, 18, pp. 237-246, E & FN Spon, London, 1992.

¹⁶³ ALEXANDER, K.M., TAPLIN, J.H., Concrete strength, paste strength, cement hydration and maturity rule, *Australian Journal of Applied Science*, 1962, Vol. 13, n. 4, pp. 277-84, e, ALEXANDER, K.M., TAPLIN, J.H., Analysis of the strength and fracture of concrete based on unusual insensitivity of cement-aggregate bond to curing temperature, *Australian Journal of Applied Science*, 1964, Vol. 15, n. 3, pp. 160-170, Apud MINDESS, 1996.

¹⁶⁴ DARWIN, D., SLATE, F.O., Effect of paste-aggregate bond strength on behavior of concrete, **Journal of Materials**, JMLSA, Vol. 5, No. 1, pp. 86-98, March 1970.

Existem diferenças inevitáveis das propriedades mecânicas do agregado e da pasta, em conjunto, com retração e variações térmicas, resultando fissuras muito finas na interface, mesmo antes de aplicação do carregamento^{167 168 169}. A quantidade de microfissuras depende de inúmeros parâmetros, incluindo a distribuição granulométrica e tamanho do agregado, teor de cimento, relação água/cimento, grau de adensamento do concreto fresco, condições de cura e umidade ambiente¹⁷⁰.

A baixa resistência da zona de transição no concreto resulta além da presença de microfissuras, do grande volume de vazios capilares e de cristais orientados de hidróxido de cálcio, os quais possuem menor capacidade de adesão, não somente pela área específica menor e forças de atração de Van der Waals correspondentemente mais fracas, mas também porque servem como pontos de clivagem preferencial, devido à sua estrutura orientada¹⁷¹. Essa visão de uma influência decisiva da zona de transição no comportamento dos concretos parece estar mudando. Os defensores de uma influência forte, freqüentemente consideram que a parte mais fraca da zona de transição encontra-se entre 5 μm a 10 μm do agregado, com o caminho de fratura seguindo os planos de clivagem dos cristais orientados da portlandita¹⁷².

Nas primeiras idades do concreto, mesmo de baixa relação água/cimento, o volume e tamanho de vazios serão maiores do que na matriz de argamassa, o que resulta em baixa

¹⁶⁵ WITTMANN, F.H., *Creep and Shrinkage in Concrete Structures*, John Wiley & Sons Ltd., 1982, p. 129 Apud MINDESS, 1985.

¹⁶⁶ MINDESS, S., Tests to determine the mechanical properties of the interfacial zone, **Interfacial Transition Zone in Concrete**, RILEM REPORT 11, Part 2, 3, 1996.

¹⁶⁷ HSU, T.T.C., SLATE, F.O., STURMAN, G.M., WINTER, G., Microcracking of plain concrete and the shape of the stress-strain curve, **Journal of the American Concrete Institute**, No. 60-14, February, 1963.

¹⁶⁸ MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**, São Paulo, PINI, 1994.

¹⁶⁹ FRIGIONE, G., MARCHESI, B., SERSALE, R., Microcrackings propagation in flexural loaded Portland and high slag cement concretes, **8º Congresso Internacional de Química do Cimento**, THEME 2, Vol. III, pp. 478-484, 1986.

¹⁷⁰ MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**, São Paulo, PINI, 1994.

¹⁷¹ MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**, São Paulo, PINI, 1994.

resistência da zona de transição¹⁷³. Com o aumento da idade, a resistência da zona de transição pode tornar-se igual ou mesmo superior à resistência da matriz de argamassa^{174 175}. Isto poderia acontecer como resultado da cristalização de novos produtos nos vazios da zona de transição através de reações químicas lentas entre constituintes da pasta de cimento e o agregado. Estas interações contribuem para a resistência porque tendem também a reduzir a concentração de hidróxido de cálcio na zona de transição¹⁷⁶.

Assim, a resistência última do concreto não é fortemente dependente da resistência de ligação. Todavia, aumentando a resistência de ligação, aumenta o nível de tensão no qual as microfissuras iniciam sua extensão^{177 178}.

A interface também pode possuir maior energia de fratura em relação à pasta unicamente, em qualquer idade¹⁷⁹. Isto pode ser explicado tendo em vista que o caminho da fratura é usualmente restrito pelo agregado, ou pelo menos segue parcialmente a sua superfície, podendo ser diretamente ou a certa distância. A ruptura

¹⁷² MINDESS, S., Tests to determine the mechanical properties of the interfacial zone, **Interfacial Transition Zone in Concrete**, RILEM REPORT 11, Part 2, 3, 1996.

¹⁷³ MONTEIRO, P. J. M., **Microstructure of concrete and its influence on the mechanical properties**, Ph.D. THESIS, Department of Civil Engineering, University of Califórnia, Berkeley, Califórnia, 1985.

¹⁷⁴ MONTEIRO, P. J. M., **Microstructure of concrete and its influence on the mechanical properties**, Ph.D. THESIS, Department of Civil Engineering, University of Califórnia, Berkeley, Califórnia, 1985.

¹⁷⁵ MINDESS, S., Tests to determine the mechanical properties of the interfacial zone, **Interfacial Transition Zone in Concrete**, RILEM REPORT 11, Part 2, 3, 1996.

¹⁷⁶ MONTEIRO, P. J. M., **Microstructure of concrete and its influence on the mechanical properties**, Ph.D. THESIS, Department of Civil Engineering, University of Califórnia, Berkeley, Califórnia, 1985.

¹⁷⁷ HSU, T.T.C., SLATE, F.O., STURMAN, G.M., WINTER, G., Microcracking of plain concrete and the shape of the stress-strain curve, **Journal of the American Concrete Institute**, No. 60-14, February, 1963.

¹⁷⁸ PERRY, C., GILLOTT, J.E., The influence of mortar-aggregate bond strength on the behaviour of concrete in uniaxial compression, **Cement and Concrete Research**, Vol. 7, pp. 553-564, 1977.

¹⁷⁹ ALEXANDER, M. G., Effects of aging on mechanical properties of the interfacial zone between cement paste and rock, **Cement and Concrete Research**, Vol. 24, N.7, 1994.

com agregado resulta em superfície mais rugosa e tortuosa que a superfície da pasta fraturada¹⁸⁰.

Também o nível de tensão no qual se iniciam as microfissuras é função da resistência da argamassa inicialmente e, a resistência de ligação influencia no controle do teor de microfissuras necessárias para atingir a ruptura¹⁸¹.

O concreto apresenta microfissuras na interface pasta/agregado durante o carregamento de acordo com várias regiões, apresentadas na Figura 10.

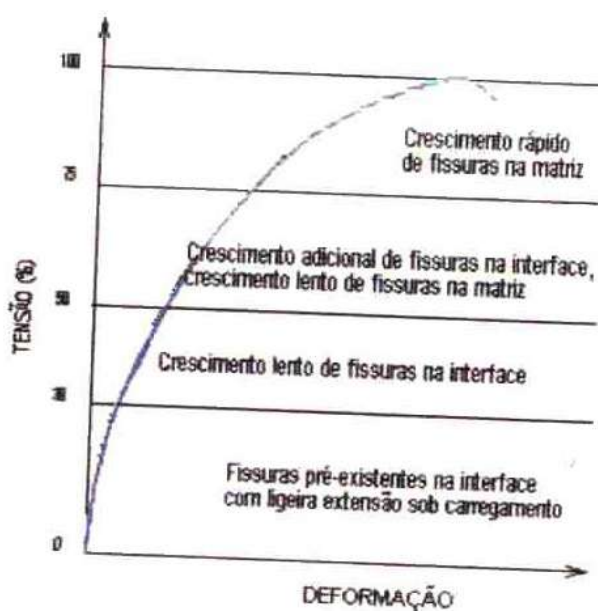


Figura 10 Curva típica tensão – deformação para concreto (GLUCKLICH, 1968)¹⁸².

As cargas de impacto de curta duração, retração por secagem e cargas mantidas a elevados níveis de tensão aumentarão o tamanho e número de microfissuras. A níveis de tensão maiores do que 70% da resistência última, as concentrações de tensão nos poros

¹⁸⁰ DIAMOND, S., MINDESS, S., SEM investigations of fracture surfaces using stereo pairs: I. fracture surfaces of rock and of cement paste, **Cement and Concrete Research**, Vol. 22, pp. 67-78, 1992.

¹⁸¹ SCHOLER, C.F., **The role of mortar-aggregate bond in the strength of concrete**, A Symposium on Concrete Strength, Highway Research Board, Número 210, 1967.

¹⁸² GLUCKLICH, J., The effect of microcracking in time-dependent deformations and the long-term strength of concrete. International Conference on the Structure of Concrete, Cement and Concrete Association, London, 82-92, 1968.

grandes da matriz de argamassa tornam-se suficientemente grandes até iniciar novas fissuras. Com tensões crescentes, essas novas fissuras da matriz propagam-se gradativamente até se unirem às fissuras originadas na zona de transição. O sistema de fissuras torna-se contínuo e o material rompe^{183 184}.

Essa continuidade, obtida em torno de 70% da resistência última, pode ser uma explicação para o fato de microfissuras induzidas pela aplicação de carga em amostras de concreto, não acarretarem aumento da permeabilidade e absorção para níveis de até 75% da resistência máxima¹⁸⁵.

1.2.3 Influência do agregado

A fase agregado não tem influência direta sobre a resistência do concreto, exceto nos casos de agregados altamente porosos e fracos. Entretanto, o tamanho e a forma do agregado gráudo podem afetar a resistência de modo indireto. Quanto maior o tamanho do agregado no concreto e mais elevada a proporção de partículas lamelares¹⁸⁶ e alongadas¹⁸⁷, maior será a tendência do filme de água se acumular próximo à superfície do agregado, enfraquecendo assim a zona de transição pasta-agregado¹⁸⁸.

Na interface pasta/agregado gráudo estão localizadas as primeiras microfissuras, onde o agregado gráudo impede a abertura de uma fissura única mais larga, atuando como controladores de fissuras¹⁸⁹. Também em pastas de cimento com escória, pode-se observar que os grãos de escória não hidratada funcionam como controladores de

¹⁸³ MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**, São Paulo, PINI, 1994.

¹⁸⁴ HSU, T.T.C., SLATE, F.O., STURMAN, G.M., WINTER, G., Microcracking of plain concrete and the shape of the stress-strain curve, **Journal of the American Concrete Institute**, No. 60-14, February, 1963.

¹⁸⁵ SAMAHA, H.R., HOVER, K.C., Influence of microcracking on the mass transport properties of concrete, **ACI Materials Journal**, Title n. 89-M46, pp. 416-424, 1992.

¹⁸⁶ Partículas lamelares são aquelas em que a relação espessura/largura é menor do que 0,5.

¹⁸⁷ Partículas alongadas são aquelas em que a relação comprimento/largura é superior a 1,5.

¹⁸⁸ MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**, São Paulo, PINI, 1994.

¹⁸⁹ NEVILLE, A. M., **Propriedades do Concreto**, 2 ed., São Paulo: PINI, 1997.

fissuras. Assim, um maior número de superfície de fratura favorece um comportamento mais dúctil da pasta¹⁹⁰. Todavia, em argamassas, o início das fissuras podem ter origem na interface pasta/agregado assim como nos poros dentro da pasta¹⁹¹.

A tensão à qual se inicia fissuras depende muito das propriedades do agregado graúdo: seixos arredondados e lisos mostram fissuras a tensões menores do que pedras britadas angulosas e ásperas, provavelmente devido ao fato de que a aderência mecânica seja influenciada pelas características superficiais, até certo ponto, e pela forma do agregado graúdo¹⁹². Assim, a rugosidade superficial tem mais influência no início da propagação das fissuras do que na resistência final¹⁹³.

A influência do tipo de agregado graúdo sobre a resistência varia em grandeza e depende da relação água/cimento da mistura. Misturas com uma relação água/cimento muito baixa e um teor de cimento muito alto ($> 530 \text{ kg/m}^3$) exibem uma redução de resistência quando se usam agregados com grande tamanho¹⁹⁴. Isso pode ser devido a tensões induzidas pela retração, que contidas pelas partículas de agregado resultam fissuras da pasta de cimento e uma perda da aderência entre a pasta e o agregado¹⁹⁵. Para uma mesma relação água/cimento, tipo e graduação do agregado, uma mistura mais pobre resulta resistência maior^{196 197 198}, conforme apresentada na Figura 11.

¹⁹⁰ FRIGIONE, G., MARCHESE, B., SERSALE, R., Microcrackings propagation in flexural loaded Portland and high slag cement concretes, **8º Congresso Internacional de Química do Cimento**, THEME 2, Vol. III, pp. 478-484, 1986.

¹⁹¹ MAI, Y. W., COTTERELL, B., Porosity and mechanical properties of cement mortar, **Cement and Concrete Research**, Vol. 15, p. 995-1002, 1985.

¹⁹² JONES, R., KAPLAN, M.F., The effect of coarse aggregate on the mode of failure of concrete in compression and flexure. Road Research Laboratory – Department of Scientific and Industrial Research, **Magazine of Concrete Research**, August 1957.

¹⁹³ PERRY, C., GILLOTT, J.E., The influence of mortar-aggregate bond strength on the behaviour of concrete in uniaxial compression, **Cement and Concrete Research**, Vol. 7, pp. 553-564, 1977.

¹⁹⁴ NEVILLE, A. M., **Propriedades do Concreto**, 2 ed., São Paulo: PINI, 1997.

¹⁹⁵ NATIONAL SAND AND GRAVEL ASSOCIATION, Joint Tech. Information Letter n. 155, Washington DC, 29 April 1959, Apud NEVILLE, 1997, p. 278.

¹⁹⁶ ERNTROY, H.C., SHACKLOCK, B.W., Design of high-strength concrete mixes, Proceedings of a Symposium on Mix Design and Quality Control of Concrete, pp. 55-73, Cement and Concrete Association, London, 1954 Apud NEVILLE, 1997.

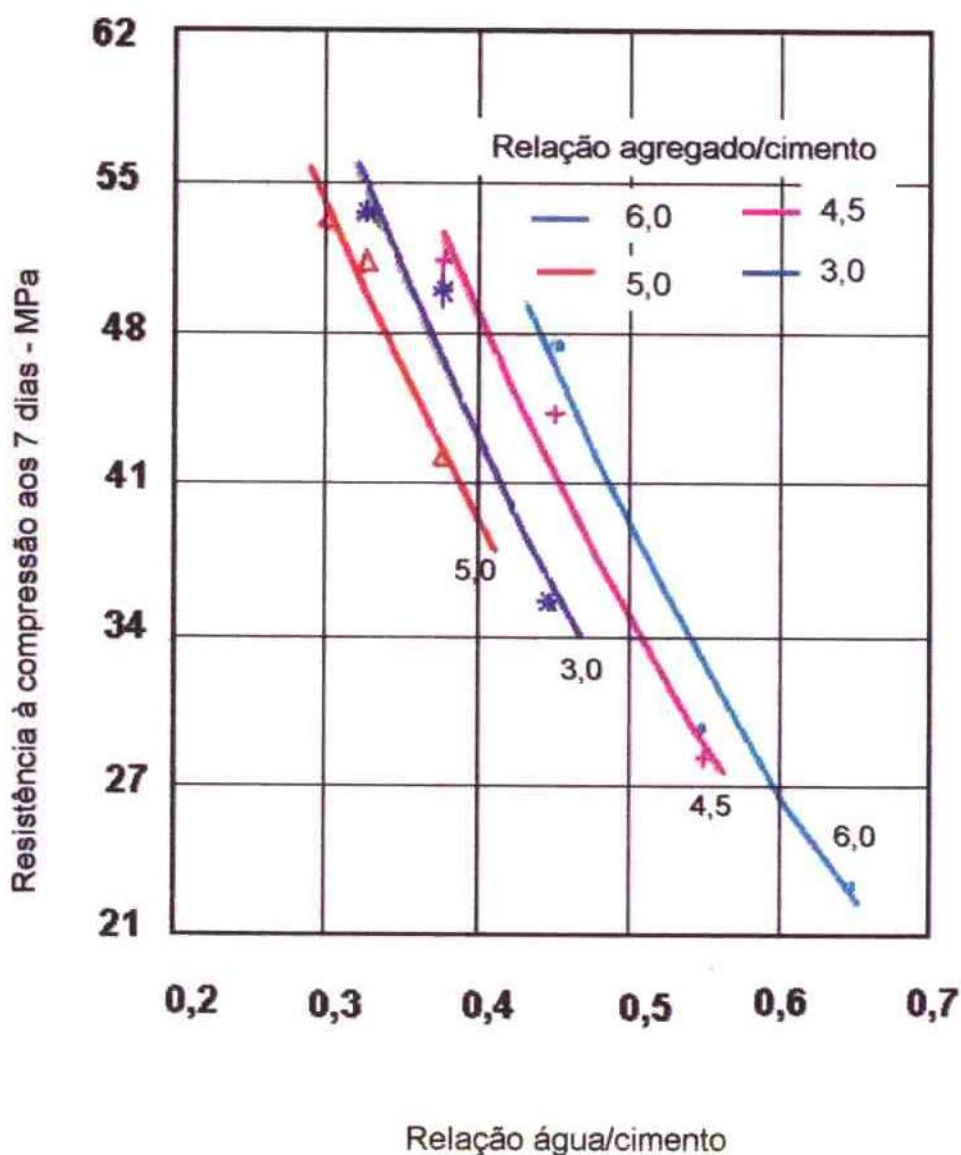


Figura 11 Influência da relação agregado/cimento sobre a resistência do concreto (SINGH, 1958).

Do gráfico acima é possível observar também que, quanto maior o teor de agregado, maior a resistência para uma mesma relação água/cimento. Portanto, a zona de transição

¹⁹⁷ SINGH, B.G., Specific surface of aggregates related to compressive and flexural strength of concrete, *Journal of the American Concrete Institute*, Vol. 29, No. 10, pp. 897-907, April 1958.

¹⁹⁸ BUENFELD, N. R., OKUNDI, E., Effect of cement content on transport in concrete, *Magazine of Concrete Research*, 50, N. 4, 1998.

tem pouca influência na resistência à compressão, tendo em vista que quanto maior o teor de agregado, maior a área de zona de transição. Já a relação água/cimento tem grande influência pois para valores maiores como 0,6, há tendência de que a diferença entre as resistências sejam reduzidas, podendo ser um indicativo de que a resistência da pasta é fator determinante.

Algumas hipóteses foram apresentadas para explicar o fato¹⁹⁹:

- Maior teor de agregado resultaria menor retração e menor exsudação e, conseqüentemente, menor dano à aderência entre o agregado e a pasta;
- Menores as variações térmicas devidas ao calor de hidratação do cimento;
- Teor total de água/m³ de concreto é menor em uma mistura pobre e assim, os vazios constituem uma fração menor do volume total do concreto²⁰⁰.

Também vale lembrar que o aumento da resistência com o aumento do volume de agregado foi confirmado no item 1.1.1. Na Figura 5 foi apresentada correlação entre volume total de poros e teor de agregados, a qual indica que maior volume de agregado e menor consumo de cimento, resulta em menor volume de vazios. Todavia, deve haver um consumo mínimo de cimento, suficiente para envolver os agregados.

Sabe-se que a relação água/cimento tem grande influência na porosidade do concreto. O aumento da relação água/cimento, diminui a influência do agregado, possivelmente devido a que a resistência da pasta de cimento hidratado se torne um fator predominante²⁰¹. Esta observação concorda com a afirmação de que, a variação da relação água/cimento da pasta tem maior influência na resistência da pasta à de ligação pasta/agregado, conforme apresentado no item 1.2.2.

¹⁹⁹ POPOVICS, S., Analysis of the concrete strength versus water-cement ratio relationship, *ACI Materials Journal*, Vol. 87, N. 5, pp. 517-529, September-October, 1990.

²⁰⁰ NEVILLE, A. M., *Propriedades do Concreto*, 2 ed., São Paulo: PINI, 1997.

²⁰¹ KUCZYNSKI, W., Wplyw kruszywa grubego na wytrzymałość betonu, L'influence de l'emploi d'agrégats gros sur la résistance du beton. *Archiwum Inzynierii Ladowej*, 4, n. 2, pp. 181-209, 1958 Apud NEVILLE, 1997, p.293.

Acredita-se que a resistência à compressão do concreto é maior do que a da argamassa devido ao intertravamento mecânico entre os agregados graúdo²⁰².

A resistência à compressão de concretos que utilizam o pó calcário substituindo parte do agregado miúdo é maior que em concretos sem substituição, conforme apresentada na Figura 12²⁰³.

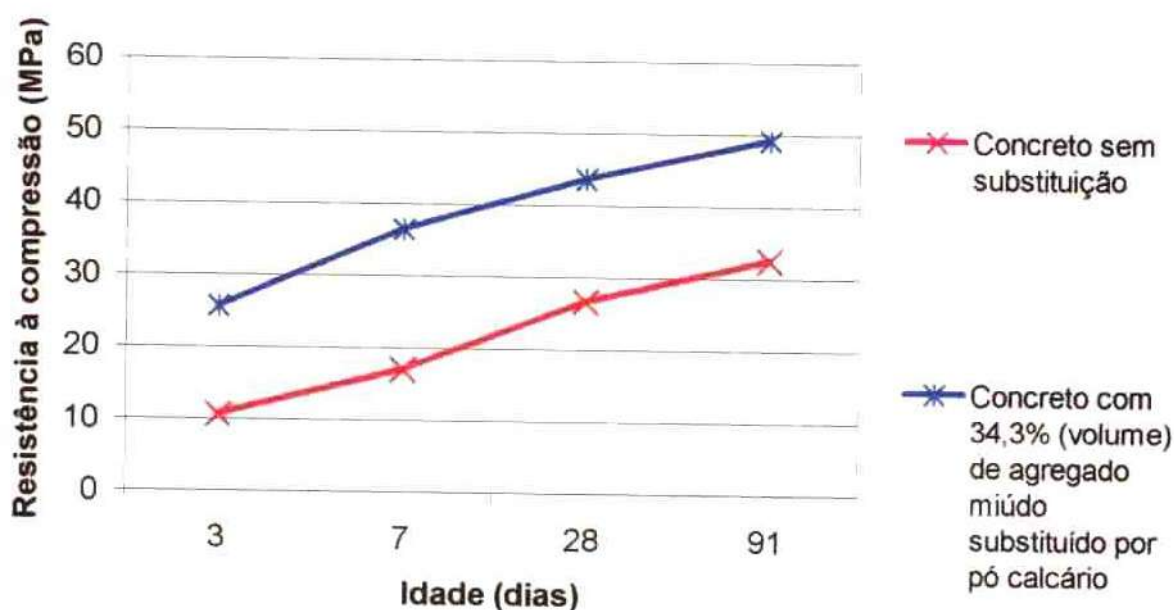


Figura 12 Comparativo das resistências à compressão de concretos com e sem substituição de parte do agregado miúdo por pó calcário (UCHIKAWA *et al.*, 1996).

²⁰² KAPLAN, M.F., Flexural and compressive strength of concrete as affected by the properties of coarse aggregates, **Journal of the American Concrete Institute**, pp. 1193-1208, May 1959.

²⁰³ UCHIKAWA, H., HANEHARA, S., HIRAO, H., Influence of microstructure on the physical properties of concrete prepared by substituting mineral powder for part of fine aggregate, **Cement and Concrete Research**, Vol. 26, N.1, 1996.

1.3 Permeabilidade

A permeabilidade refere-se ao escoamento de um fluido através de um meio poroso por gradiente de pressão^{204 205 206}. Assim, a permeabilidade é um indicativo da facilidade com que um fluido pode escoar através de um sólido. Portanto, a porosidade do concreto, ou seja, o tamanho e a continuidade dos poros na estrutura do sólido determinam a sua permeabilidade.

No concreto, o escoamento de água sob pressão, considerando em regime laminar e permanente, segue a lei de Darcy, conforme eq.3²⁰⁷:

$$\frac{Q}{A} = k \cdot \frac{H}{L}$$

Equação 3

Onde:

Q = vazão de água, m³/s

A = área da superfície através da qual ocorre a vazão, m²

k = coeficiente de permeabilidade, m/s

H = pressão de água aplicada à superfície, em m.c.a

L = caminho percorrido pela água, m.

O coeficiente de permeabilidade (k) também pode ser determinado de acordo com as equações e em função de parâmetros apresentados na Tabela 7.

²⁰⁴ NEVILLE, A. M., **Propriedades do Concreto**, 2 ed., São Paulo: PINI, 1997.

²⁰⁵ KHATIB, J.M., MANGAT, P.S., Absorption characteristics of concrete as a function of location relative to casting position, **Cement and Concrete Research**, Vol. 25, n. 5, pp. 999-1010, 1995.

²⁰⁶ MARCHAND, J., GÉRARD, B., New developments in the modeling of mass transport processes in cement – based composites: a review, **Advances in Concrete Technology**, SP 154-10, **Proceedings**, Second CANMET/ACI International Symposium, Las Vegas, Nevada, 1995.

Tabela 7 Determinação do coeficiente de permeabilidade k e resistência à penetração m

Pesquisadores	Equações	Parâmetros
Valenta (1969) ²⁰⁸	$k = \frac{e^2 v}{2ht}$	k = coeficiente de permeabilidade, m/s; e = profundidade de penetração, m; h = altura da coluna hidráulica, m; t = tempo sob pressão, s; v = fração do volume do concreto ocupado pelos poros; representa os poros discretos, como bolhas de ar, que não são preenchidos com água, exceto sob pressão, sendo considerados na parte do concreto onde houve penetração de água; valores típicos estão entre 0,02 e 0,06.
Fagerlund (1982) ²⁰⁹	$t = m z^2$	t = tempo (s); m = resistência à penetração de água; z = profundidade de penetração (m).
Vuorinen (1985) ²¹⁰	$k = \frac{x^2}{2ht}$	k = coeficiente de permeabilidade; x = profundidade de penetração; h = coluna hidráulica; t = tempo.
Garboczi (1990) ²¹¹	$k = d_c^2 \phi \theta$	k = permeabilidade em área (exemplo, m ²); d_c = diâmetro do poro que influencia o transporte do fluido; ϕ = % do volume de poro; θ = tortuosidade e continuidade dos poros; igual a 1 significa linha reta, ou seja, o caminho percorrido pelo fluido é igual a espessura do corpo de prova.

²⁰⁷ COUTINHO, A. S., GONÇALVES, A., **Fabrico e Propriedades do Betão**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Vol. III, Lisboa, 1994.

²⁰⁸ VALENTA, O., Kinetics of water penetration into concrete as an important factor of its deterioration and of reinforcement corrosion, RILEM International Symposium on the Durability of Concrete, Prague, Part I, pp. 177-193, 1969 Apud NEVILLE, 1997, p. 492.

²⁰⁹ FAGERLUND, G., On the capillarity of concrete, **Nordic Concrete Research**, Publication n. 1, 6.1 – 6.20, Trykt hos Moberg & Helli A/S, Oslo, 1982.

²¹⁰ VUORINEN, J., Applications of diffusion theory to permeability tests on concrete, Part 1: depth of water penetration into concrete and coefficient of permeability, **Magazine of Concrete Research**, September, Vol. 37, No. 132, 1985 Apud EMERSON, 1990.

²¹¹ GARBOCZI, E. J., Permeability, diffusivity and microstructural parameters: a critical review, **Cement and Concrete Research**, Vol. 20, 1990.

Alguns pesquisadores estabelecem valores máximos admissíveis para o coeficiente de permeabilidade, conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 Valores máximos admissíveis para o coeficiente de permeabilidade k de concretos

Pesquisadores	Limites
Ruettgers, Vidal e Wing (1935) ²¹²	$k \leq 2,78 \times 10^{-10}$ m/s
McMillan e Inge Lyse (1930) ²¹³	Seções delgadas $\Rightarrow k < 0,14 \times 10^{-10}$ m/s Concreto massa $\Rightarrow 0,027 \leq k \leq 0,417 \times 10^{-10}$ m/s

Em concretos com baixa permeabilidade, inferior a 10^{-5} m/h, a permeabilidade é determinada pela profundidade de penetração do fluido sob pressão²¹⁴. A norma alemã DIN 1048²¹⁵ estabelece o ensaio de cubos que se submetem a água sob pressão numa das faces, medindo-se a profundidade de penetração do fluido no final do ensaio.

Os concretos são classificados conforme a profundidade de penetração da água, de acordo com a Tabela 9.

²¹² RUETTGER, A., VIDAL, E.N. and WING, S.P., An investigation of the permeability of mass concrete with particular reference to Boulder Dam, Proceedings American Concrete Institute, 1935, Vol. 21, p. 382 Apud COUTINHO, A. S., GONÇALVES, A., **Fabrico e Propriedades do Betão**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Vol. III, Lisboa, 1994, p. 317.

²¹³ MC MILLAN, F.R. and INGE LYSE, Some permeability studies on concrete, Proceedings American Concrete Institute, 1930, Vol. 26, p. 101 Apud COUTINHO, A. S., GONÇALVES, A., **Fabrico e Propriedades do Betão**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Vol. III, Lisboa, 1994, p. 318.

²¹⁴ COUTINHO, A. S., GONÇALVES, A., **Fabrico e Propriedades do Betão**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Vol. III, Lisboa, 1994.

²¹⁵ DIN 1048 – Testing of hardened concrete specimens prepared in moulds, Deutsche Normen, Part 5, 1991.

Tabela 9 Classificação dos concretos em função da profundidade de penetração

Norma	Classificação dos concretos	Profundidade de penetração
DIN 1048	Impermeáveis à água	≤ 50 mm
	Resistentes ao gelo/ degelo	≤ 50 mm
	Resistentes a intenso ataque químico	≤ 30 mm
	Resistentes à água do mar	≤ 50 mm
NP ENV 206 ²¹⁶ ISO 7031	Alta resistência à penetração se atender as duas condições abaixo:	
	<ul style="list-style-type: none"> • Penetração máxima de água • Penetração média 	<div style="text-align: right;">< 50 mm</div> <div style="text-align: right;">< 20 mm</div>
Bonzel (1966) ²¹⁷	Impermeável	< 50 mm
	Impermeável em condições agressivas	< 30 mm
Helene (1988) ²¹⁸	De compactidade baixa	qualquer
	De compactidade normal	qualquer
	De compactidade alta	≤ 40 mm
	Impermeável	≤ 10 mm

A classificação da permeabilidade à água dos concretos, a partir de correlação com a penetração de ions cloreto segundo a AASHTO T-277, está apresentada na Tabela 10:

²¹⁶ ENV 206:1992 Concrete: Performance; production, placing and compliance criteria.

²¹⁷ BONZEL, J., Der Einfluss des Zements, des W/Z Wertes, des alters und der Lagerung auf die Wasserundurchlässigkeit des Betons, Beton, n. 9, pp. 379-83, n. 10, pp. 4417-21, 1966 Apud NEVILLE, 1997, p. 493.

²¹⁸ HELENE, P.R.L., Durabilidade do concreto *versus* agressividade do meio (2ª parte). **Tecnologia de Edificações**, Projeto de Divulgação Tecnológica Lix da Cunha – São Paulo: PINI: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Divisão de Edificações do IPT, 1988.

Tabela 10 Classificação dos concretos segundo sua permeabilidade à água²¹⁹

Classificação quanto à permeabilidade	Permeabilidade à água (m / s) x 10 ⁻¹⁵
Negligenciável	-----
Muito baixa	< 25
Baixa	25 – 65
Moderada	65 – 115
Alta	> 115

1.3.1 Influência da pasta

A porosidade representada pelo espaço interlamelar do C-S-H e pequenos capilares não contribuem para a permeabilidade da pasta. Com o aumento do grau de hidratação, embora haja um aumento considerável no volume de poros, devido ao espaço interlamelar do C-S-H e pequenos capilares, a permeabilidade é acentuadamente reduzida²²⁰.

Na pasta foi notada uma relação direta entre a permeabilidade e o volume de poros com diâmetros maiores do que 0,132 μm ²²¹. Isto ocorre provavelmente porque o sistema de poros, formado principalmente de pequenos poros, tende a tornar-se descontínuo^{222 223}. Já em argamassas, a faixa de raio de poros relevantes para a permeabilidade à água se

²¹⁹ ARMAGHANI, J. M., BLOOMQUIST, D. G., Durability specification and ratings for concrete, **Concreto 2000 Economic and durable construction through excellence**, V.1, Design, Materials, Construction, pp. 23-36.

²²⁰ MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**, São Paulo, PINI, 1994.

²²¹ MEHTA, P. K., MANMOHAN, D., Pore size distribution and permeability of hardened cement pastes, **Proceedings of the Seventh International Congress on the Chemistry of Cements**, Vol III, Paris, 1980.

²²² MEHTA, P. K., MANMOHAN, D., Pore size distribution and permeability of hardened cement pastes, **Proceedings of the Seventh International Congress on the Chemistry of Cements**, Vol III, Paris, 1980.

²²³ MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**, São Paulo, PINI, 1994.

encontra acima de $7,5 \mu\text{m}^{224}$. Isto concorda com a suposição apresentada no item 1.1.3, da Figura 7, quanto à continuidade da pasta e zona de transição em argamassa.

Em pastas normais de cimento a descontinuidade na rede capilar é geralmente alcançada quando a porosidade capilar está em torno de 18%²²⁵, 30%²²⁶ ou entre 31% a 41% conforme apresentado no item 1.1.3. Explica-se que a redução da porosidade inferior a 30% resulta em pequena queda na permeabilidade, pois no início, à medida que o processo de hidratação do cimento progride, mesmo um pequeno decréscimo na porosidade capilar total é associada com considerável segmentação de grandes poros, reduzindo em grande escala o tamanho e o número de canais de fluxo na pasta de cimento. A porosidade correspondente a 30% representa um ponto em que as interconexões entre os poros já se tornaram tão tortuosas que um decréscimo adicional na porosidade da pasta não é acompanhado por um decréscimo substancial no coeficiente de permeabilidade.

1.3.2 Influência do agregado

Teoricamente, a adição de agregados com baixa permeabilidade na pasta, deve reduzir a permeabilidade total devido à interrupção do canal de conectividade na matriz, principalmente no caso de pasta com alta relação água/cimento e conseqüentemente maior porosidade capilar. Assim, concreto e argamassa de mesma idade e teor de água devem ser menos permeáveis que a pasta pura.

A permeabilidade da argamassa pode ser menor com areia de granulometria grossa desde que não haja deficiência de cimento. Argamassas com areia fina podem resultar coeficientes de permeabilidade baixos empregando-se mais cimento e, mesmo assim,

²²⁴ BÄGEL, L., ZIVICA, V., Relationship between pore structure and permeability of hardened cement mortars: on the choice of effective pore structure parameter, **Cement and Concrete Research**, Vol. 27, N.8, 1997.

²²⁵ BENTZ, D.P., GARBOCZI, E.J., Percolation of phases in a three-dimensional cement paste microstructural model, **Cement and Concrete Research**, Vol. 21, pp. 325-344, 1991.

²²⁶ MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**, São Paulo, PINI, p. 125, 1994.

nunca são tão baixos como os obtidos com areia grossa²²⁷. Assim, o aumento do teor de agregado graúdo no concreto tem efeito benéfico, reduzindo a permeabilidade²²⁸.

O volume de poros na maioria dos agregados naturais está normalmente abaixo de 3 por cento e raramente excede 10 por cento²²⁹. Todavia, mesmo no caso de agregados com baixa porosidade, a sua permeabilidade pode ser maior do que em pasta de cimento pois o tamanho dos poros capilares nos agregados é normalmente maior do que na pasta²³⁰²³¹²³²²³³. A baixa permeabilidade da pasta (similar à rocha densa), mesmo com alto volume total de poros, pode ainda ser explicada pela descontinuidade do sistema de poros capilares²³⁴. O sistema contínuo de poros capilares através do qual ocorre o fluxo de água, torna-se descontínuo pela disposição dos produtos de hidratação. A maioria dos poros capilares em uma pasta de cimento hidratada situa-se na faixa de 10 a 100 µm, enquanto os poros nos agregados são, em média, maiores que 10 µm²³⁵²³⁶.

A diferença de difusibilidade e permeabilidade entre a pasta e argamassa, tende a ser maior quanto maior for o grau de hidratação, o que sugere a existência de diferente estrutura de poro desenvolvida na presença de areia²³⁷. Detwiler *et al.* também observaram que a percolação da zona de transição ocorreu entre 35 e 45% de areia para

²²⁷ COUTINHO, A. S., GONÇALVES, A., **Fabrico e Propriedades do Betão**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Vol. III, Lisboa, 1994.

²²⁸ SAMAHA, H.R., HOVER, K.C., Influence of microcracking on the mass transport properties of concrete, **ACI Materials Journal**, Title n. 89-M46, pp. 416-424, 1992.

²²⁹ MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**, São Paulo, PINI, 1994.

²³⁰ MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**, São Paulo, PINI, 1994.

²³¹ CAMPITELI, V., **Porosidade do Concreto**, São Paulo, EPUSP, 1987. 16p. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT-09/87.

²³² NEVILLE, A. M., **Propriedades do Concreto**, 2 ed., São Paulo: PINI, 1997.

²³³ POWERS, T.C., COPELAND, L.E., HAYES, J.C., MANN, H.M., Permeability of Portland cement paste, *Journal of the American Concrete Institute*, pp. 285-298, November 1954.

²³⁴ POWERS, T.C., COPELAND, L.E., HAYES, J.C., MANN, H.M., Permeability of Portland Cement Paste, *ACI Journal, Proceedings*, Vol. 51, April 1955, pp. 285-298 Apud YOUNG, 1988.

²³⁵ MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**, São Paulo, PINI, 1994.

²³⁶ FAGERLUND, G., On the capillarity of concrete, **Nordic Concrete Research**, Publication n. 1, 6.1 – 6.20, Trykt hos Moberg & Helli A/S, Oslo, 1982.

relação água/ cimento igual a 0,4. A diferença na permeabilidade é significativa entre a pasta e argamassa para qualquer teor de areia assim como entre argamassas com 35% e 45-55% de areia porém, torna-se insignificante entre argamassas com teores de 45% e 55%.

Buenfeld²³⁸ observou que o concreto pode ter permeabilidade inferior à argamassa com as mesmas relações água/cimento e areia/cimento. Em seu estudo, foi avaliada a permeabilidade de concretos ao oxigênio, com vários tipos e volumes de agregados (agregados com diferentes valores de absorção de água). A conclusão do estudo foi que o agregado pode ter efeito benéfico à argamassa que o circunda, pelos seguintes mecanismos:

- O agregado pode ser, posteriormente, “fonte de água” por estar saturado, permitindo a hidratação mais prolongada próxima às partículas de cimento²³⁹;
- O módulo de elasticidade do agregado pode resultar em menores microfissuras da argamassa durante a secagem²⁴⁰;
- Diminui a retração.

1.3.3 Influência da zona de transição

A existência de microfissuras na zona de transição pasta/agregado pode fazer o concreto ser mais permeável do que a pasta ou a argamassa correspondente^{241 242}. As fissuras na zona de transição são muito pequenas para serem vistas a olho nu, mas tem largura

²³⁷ HALAMICKOVA, P., DETWILER, R. J., Water permeability and chloride ion diffusion in Portland cement mortars: relationship to sand content and critical pore diameter, **Cement and Concrete Research**, Vol. 25, p. 790-802, 1995.

²³⁸ BUENFELD, N. R., OKUNDI, E., Effect of cement content on transport in concrete, **Magazine of Concrete Research**, 50, N. 4, 1998.

²³⁹ BUENFELD, N. R., OKUNDI, E., Effect of cement content on transport in concrete, **Magazine of Concrete Research**, 50, N. 4, 1998.

²⁴⁰ BUENFELD, N. R., OKUNDI, E., Effect of cement content on transport in concrete, **Magazine of Concrete Research**, 50, N. 4, 1998.

²⁴¹ MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**, São Paulo, PINI, 1994.

maior que a maioria das cavidades capilares presentes na matriz da pasta de cimento sendo capazes de estabelecer as interconexões que aumentam a permeabilidade do sistema²⁴³

As fissuras na interface ocorrem sob tensões locais causadas por desequilíbrio térmico entre pasta e agregado ou restrição da retração da pasta pelo agregado²⁴⁴.

Todavia, a região de contato entre diferentes rochas ou argamassa não apresentam um caminho preferencial para o fluxo de água^{245 246}. As fissuras presentes na matriz argamassa tem maior participação no aumento da razão de transporte de massa no concreto, em relação às fissuras da zona de transição²⁴⁷.

É difícil a correlação de parâmetros microestruturais dos produtos de cimento com a difusibilidade ou a permeabilidade. Em materiais como o concreto, com numerosas microfissuras, um fator da propriedade de transporte da estrutura de poros satisfatório é de difícil determinação devido a mudanças imprevisíveis na estrutura de poros, quando da penetração de um fluido externo. A propriedade de transporte da estrutura dos poros do material muda continuamente devido aos ciclos de estreitamento e alargamento de poros e microfissuras a partir das interações físico-químicas entre o fluido que penetra e os minerais da pasta de cimento²⁴⁸.

²⁴² YOUNG, J. F., **A Review of the Pore Structure of Cement Paste and Concrete and its Influence on Permeability**, ACI – SP 108-1, Detroit, Michigan, 1988.

²⁴³ MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**, São Paulo, PINI, 1994.

²⁴⁴ YOUNG, J. F., **A Review of the Pore Structure of Cement Paste and Concrete and its Influence on Permeability**, ACI – SP 108-1, Detroit, Michigan, 1988.

²⁴⁵ SKALNY, J., MINDESS, S., **Physico-chemical phenomena at the cement paste-aggregate interface**, 10th **International Symposium on Reactivity of Solids**, Dijon, 1984.

²⁴⁶ WAKELEY, L. D., ROY, D. M., **A method for testing the permeability between grout and rock**, **Cement and Concrete Research**, Vol. 12, p. 533-534, 1982.

²⁴⁷ SAMAHA, H.R., HOVER, K.C., **Influence of microcracking on the mass transport properties of concrete**, **ACI Materials Journal**, Title n. 89-M46, pp. 416-424, 1992.

²⁴⁸ GARBOCZI, E. J., **Permeability, diffusivity and microstructural parameters: a critical review**, **Cement and Concrete Research**, Vol. 20, 1990.

Ensaio realizado em amostras conforme Figura 13, revelam que a permeabilidade na interface pasta/agregado depende da pressão hidrostática, do estado da superfície do agregado e do tempo de cura da amostra. Foi concluído que²⁴⁹:

- Com o aumento gradual da pressão hidrostática na interface, a permeabilidade da água aumenta por consequência;
- A permeabilidade é menor quando a pasta é lançada em superfície quebrada do que em superfície lisa do mesmo agregado;
- A cura prolongada aumenta a ligação pasta/agregado, reduzindo significativamente a permeabilidade da interface, sendo que, amostras curadas ao ar, a uma baixa pressão hidrostática (em torno de 2 atm) é suficiente para destacar a pasta de cimento da superfície do agregado.

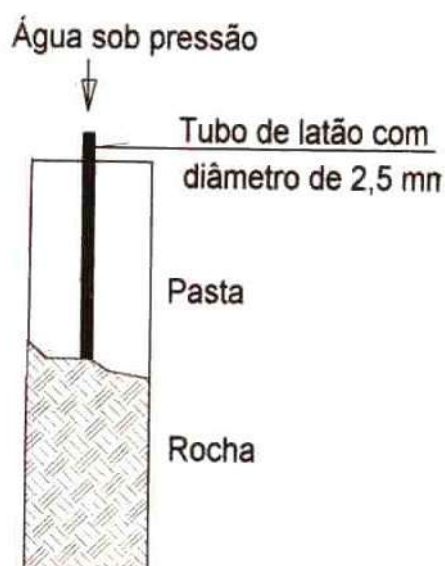


Figura 13 Ensaio de permeabilidade da zona interfacial pasta/agregado (VALENTA, 1961).

²⁴⁹ VALENTA, O., The significance of the aggregate-cement bond for the durability of concrete, *Durabilite des Betons*, RILEM Colloque International, Praha, Vol. I, pp. 53-87, 1961 Apud MASSAZZA, F., Action of environmental conditions, *Interfacial Transition Zone in Concrete*, RILEM REPORT 11, Part 3, 8, p. 139, 1996.

1.4 Capilaridade

A capilaridade 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.

Em princípio, quanto menor o diâmetro dos poros capilares, maiores serão as pressões capilares, e, conseqüentemente, maior a altura de ascensão capilar. Por outro lado, quanto maior o diâmetro dos capilares menor será a ascensão capilar, porém, a quantidade total de água absorvida será maior por unidade de área²⁵⁰.

A pressão da ascensão capilar é dada pela lei de Jurin, conforme eq. 4 e demonstrada na Figura 14.

$$P = \frac{2\gamma}{r}$$

Equação 4

Sendo:

P = pressão de ascensão capilar

γ = tensão superficial do líquido

r = raio do capilar

²⁵⁰ HELENE, P. R. L., **Estrutura interna do concreto**, notas de aula do curso de pós graduação em engenharia civil da EPUSP Materiais de Construção, 1998.

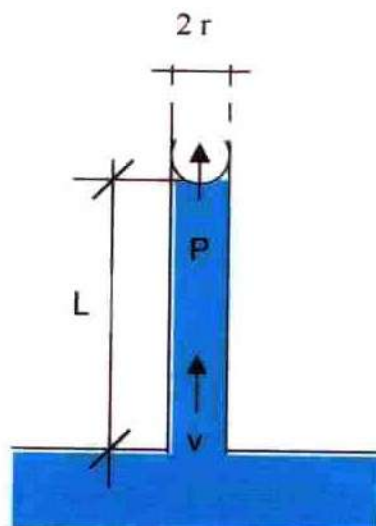


Figura 14 Ascensão num capilar de raio r , sob ação da pressão P (COUTINHO, 1994)²⁵¹.

No caso do raio capilar ser suficientemente grande em relação à trajetória média das moléculas do fluido (superior à $0,1 \mu\text{m}$), a velocidade do movimento do fluido no capilar é dada pela lei de Poiseuille, eq. 5:

$$v = \frac{r^2}{8\eta} \cdot \frac{P}{L}$$

Equação 5

Onde:

v = velocidade do movimento do fluido no capilar

r = raio do capilar

η = viscosidade do líquido

P = pressão que faz mover o líquido

L = comprimento do capilar que contém o líquido

²⁵¹ COUTINHO, A. S., GONÇALVES, A., **Fabrico e Propriedades do Betão**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Vol. III, Lisboa, 1994.

Tendo em vista que em regime estacionário, a velocidade é dada pela eq. 6:

$$v = \frac{L}{t} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

t = tempo que demora a ascensão capilar

O comprimento L é determinado igualando-se as equações 5 e 6, resultando a eq. 7:

$$L = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\gamma t r}{\eta}} \quad \text{Equação 7}$$

Para o caso da água²⁵²,

$$\gamma = 75 \times 10^{-3} \text{ g cm}^{-1}$$

$$\eta = 13 \times 10^{-6} \text{ g s cm}^{-2}$$

Assim, o tempo t, em segundos, para o escoamento da água através de capilares de raio r, numa espessura L do material é dada pela eq. 8:

$$t = \frac{L^2}{2880r} \quad \text{Equação 8}$$

Da Figura 14, a altura da ascensão capilar pode ser determinada igualando-se a equação 4 ao peso da coluna de líquido que a equilibra, no fim do movimento, conforme eq. 9:

$$\frac{2\gamma}{r} = dh \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

d = peso específico do líquido

h = altura de ascensão

²⁵² COUTINHO, A. S., GONÇALVES, A., **Fabrico e Propriedades do Betão**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Vol. III, Lisboa, 1994.

L'HERMITE e FERET²⁵³ introduziram um coeficiente de capilaridade K_c , segundo eq. 10, obtido pela quantidade de água absorvida por unidade de área, em amostras de forma geométrica definida.

$$K_c = 100 \times \frac{P}{S\sqrt{t}} \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

p = quantidade de água absorvida

S = área de contato com a água

t = tempo

Se as bolhas provenientes de ar aprisionado no concreto são maiores que $1 \mu\text{m}$, elas permanecerão cheias de ar por um longo período de tempo até que este ar seja dissolvido pela água dos poros. Estes poros não participam do processo de absorção capilar, sendo considerados inertes²⁵⁴. Também os poros capilares são controladores do processo de absorção em idades iniciais sendo que, os poros de gel e pequenos poros limitam a razão de fluxo em idades mais avançadas²⁵⁵.

1.4.1 Influência da pasta

A análise do fluxo através do concreto é complexo por diversos fatores^{256 257}:

- A água pode reagir com sólidos da pasta, causando mudanças na estrutura dos poros e composição da solução do poro;

²⁵³ L'HERMITE, R., FERET, L., Essais et recherches sur les pierres de taille, Ann. Inst. Tech. Bat. Trav. Publ., Circ. Série D, n.6, Nov. 1943 Apud COUTINHO, A. S., GONÇALVES, A., **Fabrico e Propriedades do Betão**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Vol. III, Lisboa, 1994, p. 306.

²⁵⁴ FAGERLUND, G., On the capillarity of concrete, **Nordic Concrete Research**, Publication n. 1, 6.1 – 6.20, Trykt hos Moberg & Helli A/S, Oslo, 1982.

²⁵⁵ MARTYS, N.S., FERRARIS, C.F., Capillary transport in mortars and concrete, **Cement and Concrete Research**, Vol. 27, no. 5, pp. 747-760, 1997.

²⁵⁶ MARTYS, N.S., FERRARIS, C.F., Capillary transport in mortars and concrete, **Cement and Concrete Research**, Vol. 27, no. 5, pp. 747-760, 1997.

²⁵⁷ MARTYS, N.S., FERRARIS, C.F., Capillary transport in mortars and concrete, **Cement and Concrete Research**, Vol. 27, no. 5, pp. 747-760, 1997.

- Redução do diâmetro do poro pela hidratação proporcionando lenta absorção de água;
- A lixiviação tende a aumentar o diâmetro dos poros e sua conexão.

A absorção de água por capilaridade em concreto aumenta, com relação água/cimento constante e sem utilização de aditivo, à medida que o teor de cimento aumenta, porém, a velocidade da frente de penetração não é alterada²⁵⁸. Isso significa que quanto maior o volume de pasta em um concreto, maior a absorção de água por capilaridade^{259 260}.

A absorção capilar depende da finura do cimento: diminui quando a finura aumenta; da relação a/c: aumenta quando a/c aumenta; da idade: diminui quando a idade aumenta; da duração de cura úmida: diminui quando a duração aumenta²⁶¹.

1.4.2 Influência do agregado

Os agregados tem influência no processo de absorção promovendo aumento da tortuosidade, ou seja, do comprimento efetivo de migração da água que penetra o corpo-de-prova²⁶².

A absorção capilar aumenta com uma elevada percentagem de finos, inertes, sem atividade pozolânica²⁶³.

²⁵⁸ BUENFELD, N. R., OKUNDI, E., Effect of cement content on transport in concrete, *Magazine of Concrete Research*, 50, N. 4, 1998.

²⁵⁹ BUENFELD, N. R., OKUNDI, E., Effect of cement content on transport in concrete, *Magazine of Concrete Research*, 50, N. 4, 1998.

²⁶⁰ COUTINHO, A. S., GONÇALVES, A., *Fabrico e Propriedades do Betão*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Vol. III, Lisboa, 1994.

²⁶¹ COUTINHO, A. S., GONÇALVES, A., *Fabrico e Propriedades do Betão*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Vol. III, Lisboa, 1994.

²⁶² FAGERLUND, G., On the capillarity of concrete, *Nordic Concrete Research*, Publication n. 1, 6.1 – 6.20, Trykt hos Moberg & Helli A/S, Oslo, 1982.

²⁶³ COUTINHO, A. S., GONÇALVES, A., *Fabrico e Propriedades do Betão*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Vol. III, Lisboa, 1994.

1.4.3 Influência da zona de transição

Não há estudo específico da influência da zona de transição na capilaridade de argamassas e concretos. Entretanto, Hall²⁶⁴ estudou a sorvitividade²⁶⁵ de água em argamassas e concretos. Os resultados apresentados demonstraram que em concretos, quanto maior o teor de agregado menor o coeficiente de sorvitividade. Isso pode ser um indicativo de que a zona de transição não tem influência significativa na capilaridade.

1.5 Carbonatação

A elevada alcalinidade do concreto é devida à presença de hidróxidos dissolvidos na fase aquosa ou precipitados, como o Ca(OH)_2 , o NaOH e o KOH. Tendo em vista que o Ca(OH)_2 é menos solúvel que os outros álcalis, encontra-se normalmente na forma de cristais enquanto os outros estão dissolvidos na forma de íons. A solubilidade do Ca(OH)_2 depende da concentração de OH^- na solução intersticial. Assim, a carbonatação começa através dos álcalis NaOH e KOH passando a seguir ao Ca(OH)_2 ²⁶⁶.

Com relação à durabilidade, a importância da carbonatação reside no fato de que ela reduz o pH da água dos poros da pasta de cimento de valores entre 12,6 e 13,5 para cerca de 9. Quando todo o Ca(OH)_2 se carbonata, o pH é reduzido a 8,3²⁶⁷.

²⁶⁴ HALL, C., Water sorptivity of mortars and concretes: a review, **Magazine of Concrete Research**, 41, N. 147, pp. 51-61, June 1989.

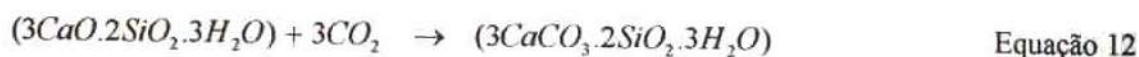
²⁶⁵ Sorvitividade é uma propriedade que caracteriza a tendência de um material poroso absorver e transmitir água por capilaridade, expressa em profundidade / $\sqrt{\text{tempo}}$.

²⁶⁶ HELENE, P. R. L., **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**, Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Professor Livre Docente junto ao Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 1993.

A carbonatação ocorre em três estágios²⁶⁸:

- a) difusão de CO₂ nos pequenos poros capilares;
- b) dissolução do CO₂ no filme de água;
- c) neutralização da Ca(OH)₂ pelo ácido carbônico.

Assim, as principais reações de carbonatação no concreto são pela conversão dos Ca(OH)₂ e do CaO do C-S-H do cimento hidratado, em carbonato de cálcio, conforme as equações 11 e 12:



A carbonatação envolve uma interação entre difusão do CO₂ e capilaridade (presença de umidade) através do sistema de poros. É possível representar a profundidade da carbonatação pela equação 13:

$$D = k t^{0.5} \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

D = profundidade de carbonatação, mm;

k = coeficiente de carbonatação, mm/ano^{0,5}; freqüentemente maiores do que 3 ou 4 mm/ano^{0,5} para concretos de baixa resistência²⁶⁹.

t = tempo, anos.

A carbonatação depende de vários fatores entre eles a qualidade do concreto e as condições de exposição. Os fatores ambientais mais importantes são concentração de

²⁶⁷ PAPADAKIS, V.G., FARDIS, M.N., VAYENAS, C.G., Effect of composition, environmental factors and cement-lime mortar coating on concrete carbonation, **Materials and Structures**, 25, pp. 293-304, 1992.

²⁶⁸ JUNGERMANN Apud ROY, D. M., Mechanisms of cement paste degradation due to chemical and physical factors, **8th Congresso Internacional de Química do Cimento**, V1., pp. 362-376, Rio de Janeiro, 1986.

²⁶⁹ CURRIE, R.J., Carbonation depths in structural-quality concrete. Building Research Establishmeizt Report, 19 pp., Watford, U.K., 1986 Apud NEVILLE, 1997, p. 497.

CO₂, umidade e temperatura²⁷⁰. Em atmosferas rurais, o teor de CO₂ encontra-se entre 0,03% a 0,05% e, em locais de tráfego pesado, de 0,1% a 1,2%. O grau de saturação do poro é um fator de controle da carbonatação pois a água bloqueia os poros, reduzindo a difusão de CO₂. Por outro lado, a água é um meio de dissolução do CO₂, carbonatando o Ca(OH)₂ e C-S-H. A água é também produzida pela reação de carbonatação conforme apresentado na equação 11 e consumida pela hidratação ou atividade pozolânica²⁷¹.

Vários estudos mostram que a razão de carbonatação diminui a baixos e altos teores de umidade sendo que a máxima razão geralmente ocorre em umidade entre 50 a 70%. Todavia, a máxima razão de carbonatação pode ocorrer em umidade superior em concretos com alta porosidade²⁷².

A carbonatação é relativamente lenta e provoca uma série de alterações na pasta endurecida, alterando a sua estrutura e reduzindo a porosidade. O carbonato de cálcio formado contribui para obstruir os poros diminuindo principalmente os poros menores, alterando menos os poros de maiores dimensões. Assim, a carbonatação reduz a difusividade e a permeabilidade, e o seu efeito é maior nos materiais de menor relação a/c²⁷³.

1.5.1 Influência da pasta

A velocidade da carbonatação do concreto aumenta com o teor de CO₂, principalmente com relações água/cimento altas, ocorrendo o transporte através do sistema de poros da

²⁷⁰ HO, D.W.S., LEWIS, R.K., Carbonation of concrete and its prediction, **Cement and Concrete Research**, Vol. 17, pp. 489-504, 1987.

²⁷¹ PAPADAKIS, V.G., FARDIS, M.N., VAYENAS, C.G., Effect of composition, environmental factors and cement-lime mortar coating on concrete carbonation, **Materials and structures**, 25, pp. 293-304, 1992.

²⁷² PARROT, L. J., Carbonation, moisture and empty pores, **Advances in Cement Research**, 4, No. 15, pp. 111-118, 1991/92.

²⁷³ BAROGHEL (1994) *et al.* SATO, N.M.N., **Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concretos**, Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Engenharia, São Paulo, 1998.

pasta de cimento endurecida²⁷⁴. Assim, são importantes o tipo de cimento, a relação água/cimento e o grau de hidratação, cujos fatores influenciam também na resistência do concreto. A cura tem efeito fundamental sobre a carbonatação pois define a microestrutura da pasta de cimento na parte externa do concreto.

Para concretos com limitada cura inicial, a relação água/cimento é o parâmetro mais confiável para a previsão da resistência do concreto à carbonatação^{275 276}.

Em concreto com relação água/cimento constante e sem utilização de aditivos, a profundidade de carbonatação aumenta com o aumento do teor de cimento^{277 278 279}.

Dos componentes da pasta de cimento, o que reage mais rapidamente com o CO_2 é o Ca(OH)_2 , resultando CaCO_3 , porém outros componentes também são decompostos. Quando se esgota o Ca(OH)_2 , também é possível a carbonatação do C-S-H, resultando além do CaCO_3 , o gel de sílica, com poros grandes, maiores do que 100 nm, o que facilita a carbonatação subsequente²⁸⁰. Assim, o tipo de cimento tem influência na carbonatação. Essa influência é significativamente diferente entre os cimentos, como por exemplo, CP II-E/CPIII e o CPV. O cimento CPV tem alto teor de C_3S e possui uma

²⁷⁴ SCHUBERT, P. and WESCHE, K., Einfluss der Karbonatisierung auf die Eigenschaften von Zementmörteln; Research Report n. F16, 28 pp. Institut für Bauforschung BWTH Aachen, Nov. 1974 Apud NEVILLE, 1997, p. 495.

²⁷⁵ HO, D.W.S., LEWIS, R.K., Carbonation of concrete and its prediction, **Cement and Concrete Research**, Vol. 17, pp. 489-504, 1987.

²⁷⁶ HELENE, P. R. L., **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**, Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Professor Livre Docente junto ao Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 1993.

²⁷⁷ BUENFELD, N. R., OKUNDI, E., Effect of cement content on transport in concrete, **Magazine of Concrete Research**, 50, N. 4, 1998.

²⁷⁸ BASHEER, P.A.M. CLAM Permeability Tests for Assessing the Durability of Concrete. PhD thesis, The Queen's University of Belfast, 1991 Apud BUENFELD, N. R., OKUNDI, E., 1998.

²⁷⁹ HO, D.W.S., LEWIS, R.K., Carbonation of concrete and its prediction, **Cement and Concrete Research**, Vol. 17, pp. 489-504, 1987.

²⁸⁰ BIER, T.A., Influence of type of cement and curing on carbonation progress and pore structure of hydrated cement paste, **Materials Research Society Symposium**, 85, pp. 123-134, 1987.

reserva alcalina elevada, o que reduz a espessura de carbonatação²⁸¹. À medida que na solução intersticial do concreto há uma maior concentração de hidróxido de cálcio, o CO₂ não penetra com a mesma velocidade pois necessita primeiro rebaixar o pH e depois reagir com todo o hidróxido de cálcio presente para então seguir penetrando e precipitando o carbonato de cálcio na solução dos poros²⁸².

1.5.2 Influência do agregado

Sabe-se que a carbonatação está fortemente associada à quantidade de hidróxido de cálcio presente na solução intersticial do concreto. Assim, considerando o que foi apresentado no item 1.1, influência do agregado na porosidade, salienta-se que o efeito da porosidade do concreto nos processos de carbonatação não pode ser analisado sem se considerar o tipo de cimento empregado. Todavia, a porosidade contribui no transporte de umidade para a formação do ácido carbônico.

Os concretos de mesma relação a/c, com maior quantidade de poros menores, apresentam maior quantidade de umidade ao ser exposto ao vapor de água presente na atmosfera.

1.5.3 Influência da zona de transição

Sob o mesmo raciocínio do item 1.5.2, a carbonatação com vista a influência da zona de transição é baseada na porosidade resultante no concreto. Sabe-se também, que há grande concentração de Ca(OH)₂ na zona de transição. Todavia, Helene²⁸³ salienta que

²⁸¹ HELENE, P. R. L., MITIDIERI FILHO, C. V., THOMAZ, E., Influência do tipo de cimento e da relação a/c na carbonatação do concreto: estimativa da vida útil de projeto, 37^o REIBRAC – IBRACON, Goiânia, 1995.

²⁸² HELENE, P. R. L., **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**, Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Professor Livre Docente junto ao Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 1993.

²⁸³ HELENE, P. R. L., **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**, Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Professor Livre Docente junto ao Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 1993.

o importante é a quantidade na solução intersticial, e não a quantidade total de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ num m^3 de concreto.

Os íons sódio e potássio, bem como outros íons, migram para a zona de transição, porém, parece concentrarem na região rica em C-S-H, o que pode ser explicado pelo fato do C-S-H ser um mineral que tende a absorver álcalis²⁸⁴.

1.6 Penetração de íons cloreto

Uma das causas de redução da durabilidade de uma estrutura de concreto é a questão da corrosão da armadura. A presença de quantidade suficiente de íons cloreto pode despassivar o aço e promover a corrosão da armadura.

Algumas normas estabelecem limites para o teor total de cloreto no concreto, qualquer que seja a sua origem. As normas BS 8110:Parte 1:1985²⁸⁵ e ENV 206:1992²⁸⁶, limitam o total de íon cloreto, em concreto armado, em 0,40% em relação à massa de cimento. A NBR 6118 estabelece limite de 500 ppm para o teor de íons cloreto na água de amassamento do concreto. A abordagem do ACI 318-89²⁸⁷ considera somente os íons cloreto hidrossolúveis, os quais são parte do total de cloretos, ou seja, os cloretos livres na água dos poros. Para concreto armado é fixado em 0,15% da massa de cimento.

Os cloretos que penetram no concreto podem dar origem à formação de cloreto de cálcio, composto extremamente solúvel. Devido a esta elevada solubilidade, o composto é carregado, aumentando a porosidade e conseqüentemente a taxa de penetração de

²⁸⁴ BRETON, D., CARLES-GIBERGUES, A., BALLIVY, G., GRANDET, J., Contribution to the formation mechanism of the transition zone between rock-cement paste, *Cement and Concrete Research*, Vol. 23, pp. 335-346, 1993.

²⁸⁵ BS 8110: Part 1:1985 Structural use of concrete: code of practice for design and construction.

²⁸⁶ ENV 206:1992 Concrete: Performance; production, placing and compliance criteria.

²⁸⁷ ACI 318 – 89 Revised 1992: Building code requirements for structural plain concrete, ACI Manual of Concrete Practice, Part 3: Use of Concrete in Building, 14 pp., Detroit, Michigan, 1994.

cloretos. Porém, nem todos os íons cloreto que penetram no concreto permanecem livres na solução dos poros. Alguns reagem com os produtos hidratados e formam cloroaluminato hidratado, outros são absorvidos por vários hidratos do cimento e o restante permanece livre²⁸⁸. É esta porção que permanece livre que causa dano às estruturas de concreto.

1.6.1 Influência da pasta

A relação água/cimento tem grande influência na cinética do processo de ataque do concreto por agentes químicos²⁸⁹. Sabe-se que o coeficiente de penetração de cloretos diminui com a redução da relação água/cimento. A redução da relação água/cimento aumenta a capacidade de fixação dos íons nos poros, reduzindo a migração dos mesmos. Embora a penetrabilidade aos cloretos seja controlada diretamente pela relação água/cimento e pelo grau de hidratação, a capacidade de fixação do cloreto é função do tipo e quantidade de aglomerante. O teor de cloreto livre a partir do qual dá-se o início do processo de corrosão independe do teor de C_3A , porém, esse influencia no teor de cloreto total. Todavia, para um teor de cloreto total constante, o teor de cloreto livre depende dos teores de C_3A e álcali do cimento, do teor de sulfatos presentes no cimento hidratado e da temperatura de exposição²⁹⁰.

O tempo de iniciação da corrosão em barras de aço inseridas em argamassas expostas em ambientes com cloretos, aumenta com o aumento do teor de C_3A do cimento²⁹¹.

Estudos de porosidade e distribuição de poros revelem que a zona de transição pasta/agregado é mais porosa que a matriz da pasta, todavia, a análise matemática de

²⁸⁸ DELAGRAVE, A., PIGEON, M., MARCHAND, J., REVERTÉGAT, É., Influence of chloride ions and pH level on the durability of high performance cement pastes (Part II), **Cement and Concrete Research**, Vol. 26, N.5, pp. 749-760, 1996.

²⁸⁹ DELAGRAVE, A., PIGEON, M., MARCHAND, J., REVERTÉGAT, É., Influence of chloride ions and pH level on the durability of high performance cement pastes (Part II), **Cement and Concrete Research**, Vol. 26, N.5, pp. 749-760, 1996.

²⁹⁰ DHIR, R.K., JONES, M.R., MCCARTHY, M.J., Binder content influences on chloride ingress in concrete, **Cement and Concrete Research**, Vol. 26, n. 12, pp. 1761-1766, 1996.

²⁹¹ HUSSAIN, S.E., AL-GAHTANI, A.S., RASHEEDUZZAFAR, Chloride threshold for corrosion of reinforcement in concrete, **ACI Materials Journal**, pp. 534-538, Nov-Dec. 1996.

resultados de ensaios de difusão de íons Cl^- e Na^+ em argamassa e pasta correspondente e com as mesmas condições de cura, revelam que a zona de transição desempenha menor parte na difusão de íons no concreto. Isto sugere que a pasta é uma fase contínua e a zona de transição isoladas pelo volume de pasta²⁹².

1.6.2 Influência do agregado

A penetração de íons cloreto é maior em argamassas do que no concreto pois a presença do agregado graúdo reduz a penetração. Algumas hipóteses explicam o fato: os agregados bloqueiam os poros impedindo o movimento dos íons, aumentam a tortuosidade do sistema de poro ou, devido a redução do volume de pasta que em geral é mais permeável que o agregado²⁹³.

Os cloretos presentes no concreto podem ser oriundos de agregado contaminado. A norma BS 882:1992²⁹⁴ contém orientação sobre o teor máximo de íons cloreto. Para concreto armado, o teor de cloreto do agregado não deve ultrapassar a 0,05% em relação à massa total de agregado. Esse limite é reduzido a 0,03% quando se usa cimento resistente a sulfatos. Para concreto protendido o número correspondente é 0,01%.

1.6.3 Influência da zona de transição

Para avaliar o nível de influência da zona de transição, Tognon e Cangiano²⁹⁵ submeteram amostras de argamassa à condutividade elétrica, sujeitas à penetração de solução de NaCl. Duas células para leitura foram situadas na zona de transição e argamassa. O processo de montagem do ensaio está apresentado na Figura 15.

²⁹² LARBI, J. A., **Microstructure of the interfacial zone around aggregate particles in concrete**, HERON, Vol.38, 1993.

²⁹³ SAMAHA, H.R., HOVER, K.C., Influence of microcracking on the mass transport properties of concrete, **ACI Materials Journal**, Title n. 89-M46, pp. 416-424, 1992.

²⁹⁴ BS 882:1992 Specification for aggregates from natural sources for concrete.

²⁹⁵ TOGNON, G. P., CANGIANO, S., Interface phenomena and durability of concrete, **Proceedings of the Seventh International Congress on the Chemistry of Cements**, Vol III, Paris, 1980.

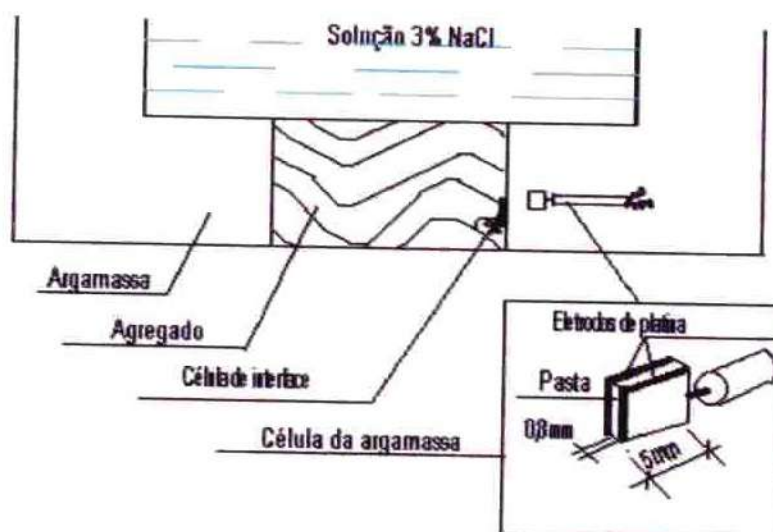


Figura 15 Montagem do ensaio para determinação da penetração de cloreto na zona de transição em argamassa (TOGNON e CANGIANO, 1980).

O aumento na condutividade foi inicialmente observada na célula da zona de transição e posteriormente na argamassa. Isto pode significar que a zona de transição constitui um caminho preferencial para penetração²⁹⁶. Todavia, testes de penetrabilidade à cloreto em amostras de concreto mostram que as fissuras presentes na zona de interface pasta/agregado tem pouca influência²⁹⁷.

Também avaliações por meio de condutividade elétrica tem mostrado que a zona interfacial é menos compacta e mais permeável que a pasta quando o agregado é inerte (como quartzo), sendo o oposto quando o agregado é reativo²⁹⁸.

²⁹⁶ TOGNON, G. P., CANGIANO, S., Interface phenomena and durability of concrete, **Proceedings** of the Seventh International Congress on the Chemistry of Cements, Vol III, Paris, 1980.

²⁹⁷ SAMAHA, H.R., HOVER, K.C., Influence of microcracking on the mass transport properties of concrete, **ACI Materials Journal**, Title n. 89-M46, pp. 416-424, 1992.

²⁹⁸ XIE PING and MING-SHU, T., Effetto dell'interfaccia pasta di cemento Portland-aggregato sulla conduttività elettrica e sulla resistenza alla corrosione chimica della malta, **Il Cemento**, Vol. 1, pp. 33-42 Apud MASSAZZA, 1996, p. 135.

CAPÍTULO II

ZONA DE TRANSIÇÃO

2.1 Microestrutura da zona de transição pasta/agregado

Em 1956, Jacques Farran²⁹⁹ foi o primeiro a observar no concreto uma zona que apresentava diferente mineralogia e microestrutura na interface pasta/ agregado. Ele estudou a natureza da ligação entre diferentes tipos de rochas e pastas de cimento Portland. A partir do princípio de ligação dos mineralogistas, Farran imaginou dois tipos de aderência pasta/ agregado:

- a) uma aderência mecânica em escala grosseira, ou aderência por rugosidade superficial do agregado, onde as partículas finamente cristalizadas do cimento hidratado encerram as protuberâncias e asperezas da superfície dos agregados.
- b) Uma aderência em escala de dimensões reticulares, seria o vínculo ideal, na qual os cristais de cimento dariam prolongamento àqueles do agregado.

O resultado do estudo mostrou que a resistência de ligação entre calcita (agregado calcário) de granulometria fina foi superior em relação a de granulometria graúda e que ocorreu uma espécie de “corrosão” na superfície do agregado. O aparecimento desta corrosão foi explicado pela dissolução da superfície da calcita com conseqüente formação epitaxial de hidróxido de cálcio. Farran salienta que boa resistência de ligação não significa um contato geométrico mais estreito, pois o cimento pode estabelecer vínculos com a superfície do agregado por meio de fraca coesão interna, incapaz de resistir a esforços elevados, ao contrário, pode ocorrer forte ancoragem resultante da rugosidade.

Algumas hipóteses de constituição da zona de transição foram apresentadas:

²⁹⁹ FARRAN, J., Contribution minéralogique à l'étude de l'adhérence entre les constituants hydratés des ciments et les matériaux enrobés, **Matériaux et constructions**, 490-491, p. 155-172, 1956.

Maso³⁰⁰ estabeleceu a hipótese de que a zona de transição ocorre devido a difusão diferente de íons na pasta de cimento próxima ao agregado. Há formação de uma película ao redor das partículas grandes de agregado, podendo elevar a relação água/cimento. Os íons de cálcio, sulfato, hidroxila e aluminato formados pela dissolução dos compostos de sulfato e de aluminato de cálcio, combinam-se para formar etringita e hidróxido de cálcio. Devido à relação água/cimento elevada, estes produtos cristalinos vizinhos ao agregado gráudo consistem de cristais relativamente grandes, formando uma estrutura mais porosa do que na matriz de pasta de cimento ou na matriz de argamassa.

Hadley³⁰¹ descreveu a formação de produtos de hidratação na interface, constituído por dois níveis. O primeiro nível é formado por um filme de CH precipitado com o eixo C perpendicular à superfície do agregado e, sobre este, é formada uma camada de C-S-H, constituindo um “duplo filme”. Este filme será ligado ao volume de pasta pelo crescimento de grandes cristais de CH decorrentes do processo contínuo de hidratação. Barnes *et al.*³⁰² observaram aspecto similar em estudo da zona de transição pasta/agregado de vidro.

Zimbelmann³⁰³, Iwasaki *et al* Struble³⁰⁴, Zhang *et al.*³⁰⁵, concluíram que inicialmente aparecem agulhas de etringita na superfície do agregado. A etringita é envolvida por cristais de hidróxido de cálcio com eixo C perpendicular à superfície do agregado. Há,

³⁰⁰ MASO, J.C., La Nature Minéralogique des Agrégats, Facteur Essentiel de la Résistance des Bétons à la Rupture et à l'Action du Gel. Thèse, Toulouse, 1967 Apud MONTEIRO, P. J. M., **Microstructure of concrete and its influence on the mechanical properties**, Ph.D. THESIS, Department of Civil Engineering, University of Califórnia, Berkeley, Califórnia, 1985.

³⁰¹ HADLEY, D.H., The Nature of the Paste-Aggregate Interface. PhD. Thesis. Purdue University, 1972 Apud MONTEIRO, P. J. M., **Microstructure of concrete and its influence on the mechanical properties**, Ph.D. THESIS, Department of Civil Engineering, University of Califórnia, Berkeley, Califórnia, 1985.

³⁰² BARNES, B. D., DIAMOND, S., DOLCH, W. L., The contact zone between Portland cement paste and glass "aggregate" surfaces, **Cement and Concrete Research**, Vol. 8, 1978.

³⁰³ ZIMBELMANN, R., A contribution to the problem of cement-aggregate bond, **Cement and Concrete Research**, Vol. 15, 1985.

³⁰⁴ STRUBLE, L., SKALNY, J., MINDESS, S., A review of the cement-aggregate bond, **Cement and Concrete Research**, Vol. 10, p. 277-286, 1980.

³⁰⁵ ZHANG, M., GJØRV, O.E., Microstructure of the interfacial zone between lightweight aggregate and cement paste, **Cement and Concrete Research**, Vol. 20, pp. 610-618, 1990.

então, a formação de grandes cristais de hidróxido de cálcio, de tamanho entre 10 μm a 30 μm ³⁰⁶. Explica-se³⁰⁷ que a grande concentração de etringita na região próxima à superfície do agregado deve-se ao fato de haver maior concentração de água nessa região, fazendo com que íons de cálcio, sulfatos e aluminatos possam facilmente difundir-se em direção à superfície do agregado.

A microestrutura da zona de transição é determinada pelo empacotamento de grãos de cimento anidro próximos às grandes partículas de agregado que, pelo “efeito parede” resulta teor próximo de zero. A espessura resultante do efeito parede é de pelo menos o tamanho da maior partícula de cimento, a qual pode ser superior a 100 μm . Todavia, com a migração de íons resulta numa deposição de produtos hidratados na zona de transição, reduzindo sua espessura para 35-45 μm ³⁰⁸.

A falta de grãos anidros na zona de transição indica alta porosidade nesta região.

Scrivener³⁰⁹ *et al.* observaram, por meio de imagens de elétrons retro-espalhados, que a porosidade entre 20 μm a 3 μm da face do agregado, aumenta duas vezes. Esta técnica também identifica cimento anidro, hidróxido de cálcio e outros produtos da hidratação, conforme apresentado na Figura 16.

³⁰⁶ ZIMBELMANN, R., A contribution to the problem of cement-aggregate bond, **Cement and Concrete Research**, Vol. 15, 1985.

³⁰⁷ PAULON, V. A., **Estudos da microestrutura da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado**, Tese apresentada à Escola Politécnica da USP para obtenção do Título de Doutor em Engenharia, São Paulo, 1991.

³⁰⁸ SCRIVENER, K. L., NEMATI, K. M., The percolation of pore space in the cement paste/aggregate interfacial zone of concrete, **Cement and Concrete Research**, Vol. 26, N.1, 1996.

³⁰⁹ SCRIVENER, K.L., PRATT, P.L., Characterisation of interfacial microstructure, **Interfacial Transition Zone in Concrete**, RILEM REPORT 11, Part 1, 1, 1996.

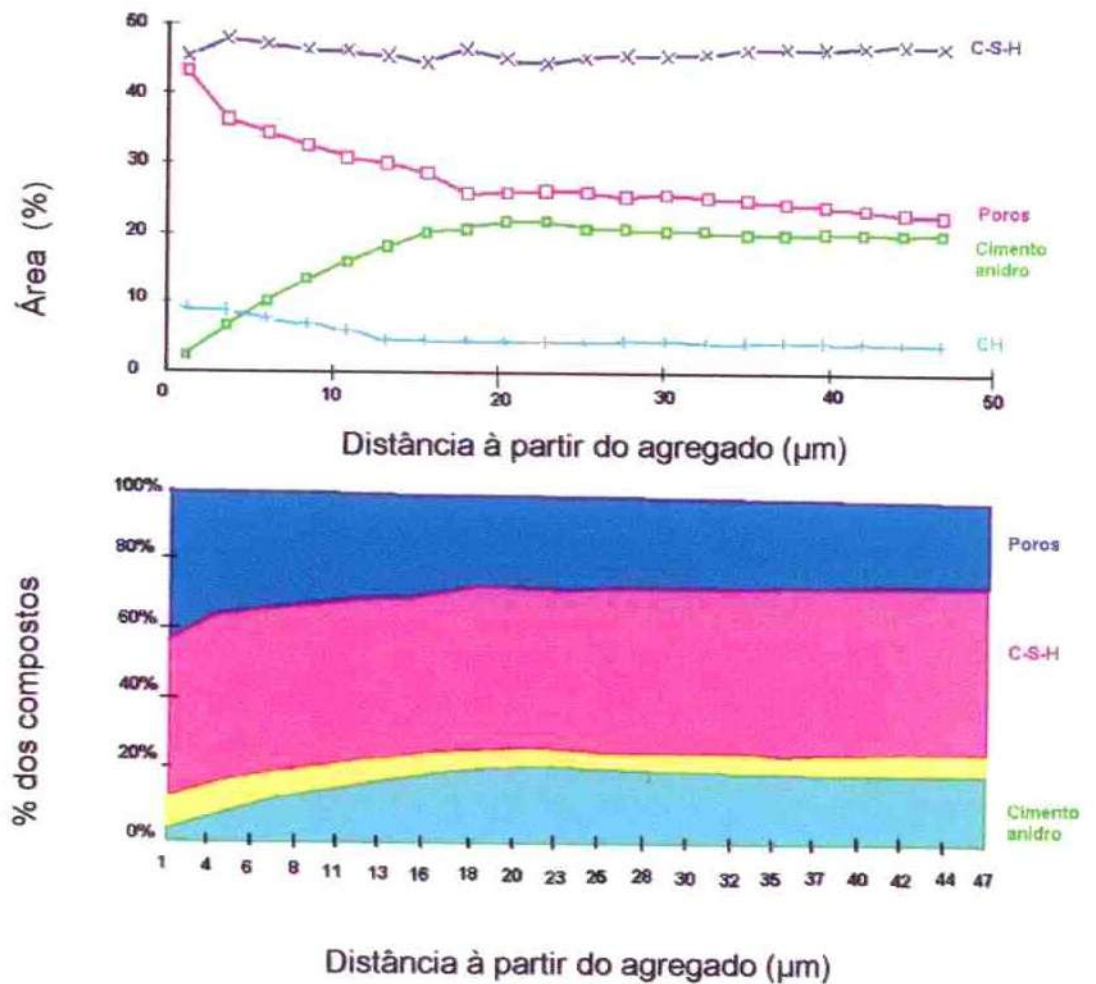


Figura 16 Distribuição de constituintes microscópicos na região interfacial em concreto com 1 dia de idade (ESCADEILLAS *et al.* (1990)³¹⁰).

³¹⁰ ESCADEILLAS, G.C. and MASO, J.C., Approach of the initial state in cement paste, mortar and concrete, *Advances in Cementitious Materials*, ed. S. Mindess, American Ceramics Society, Ceramic Transactions, 1990, Vol. 16, pp. 169-84 Apud SCRIVENER and PRATT, 1996, p. 10.

A penetrabilidade de um concreto deve depender também da continuidade ou não da zona de transição³¹¹. Assim, o estudo da zona de transição é essencial para o entendimento do comportamento do concreto frente as solicitações do meio.

2.2 Mecanismo de formação da zona de transição pasta/agregado

Acredita-se que as fissuras no concreto iniciam dentro da zona de transição pasta/agregado e que sua propagação inicial é ao redor da superfície do agregado graúdo. A ligação entre estas fissuras ocorre num estágio posterior, no processo de hidratação³¹². Assim, pode-se sintetizar alguns fatores principais para o mecanismo de formação da zona de transição, conforme apresentado na Figura 17.

³¹¹ BUENFELD, N. R., OKUNDI, E., Effect of cement content on transport in concrete, **Magazine of Concrete Research**, 50, N. 4, 1998.

³¹² DIAMOND, S., MINDESS, S., LOVELL, J., On the spacing between aggregate grains in concrete and the dimensions of the aureole de transition, Colloque International Toulouse-France, RILEM, 1982.

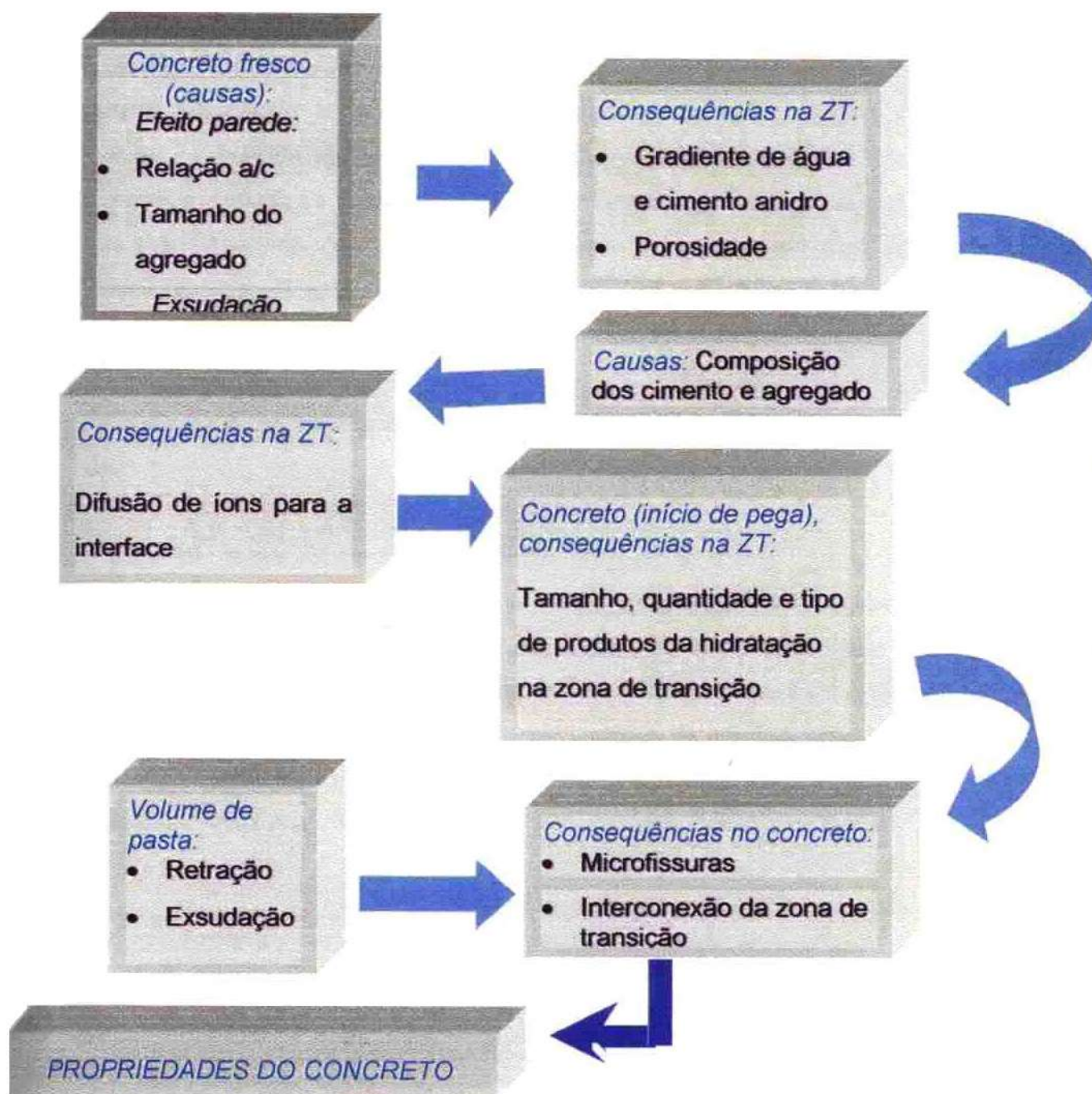


Figura 17 Representação esquemática de formação da zona de transição.

2.2.1 Efeito Parede

O agregado é uma parede contra a qual os grãos de cimento devem ser acomodados³¹³. Durante lançamento do concreto, os grãos anidros tornam-se dispersos na região próxima do agregado. Assim, no concreto fresco a porosidade e a relação água/cimento aumenta no sentido da pasta para a superfície dos agregados. Explica-se ainda, que durante a vibração do concreto até antes do início de pega, ocorre exsudação levando ao acúmulo de água sob as partículas de agregado^{314 315}. A pasta fresca localizada ao redor de grãos de agregado exibe gradientes de água e de cimento anidro^{316 317}.

Em concreto, o consumo de cimento à 1 mm de distância da superfície do agregado é superior em 85%, em relação ao volume distante do agregado (maior que 20 mm)³¹⁸.

O efeito de parede foi posto em evidência por Caquot (1937)³¹⁹, o qual passou a considerar que junto a uma superfície qualquer a que o concreto esteja sujeito durante o lançamento, havia uma camada das partículas mais finas. Este efeito influi na compacidade pois a quantidade de argamassa necessária para preencher o espaço entre as partículas maiores do agregado e a parede, é maior do que no interior da massa, e portanto é preciso prever excesso de argamassa no concreto. Este excesso faz-se necessário quanto maior for a relação entre a superfície da peça e o seu volume.

³¹³ SCRIVENER, K.L., PRATT, P.L., Characterisation of interfacial microstructure, **Interfacial Transition Zone in Concrete**, RILEM REPORT 11, Part 1, 1, 1996.

³¹⁴ MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**, São Paulo, PINI, 1994.

³¹⁵ CAMPITELI, V., **Porosidade do Concreto**, São Paulo, EPUSP, 1987. 16p. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT-09/87.

³¹⁶ MASO, J.C., The bond between aggregates and hydrated cement paste, **7th International Congress on the Chemistry of Cement**, Vol. I, Sub-theme VII-1, Paris, 1980.

³¹⁷ BUENFELD, N. R., OKUNDI, E., Effect of cement content on transport in concrete, **Magazine of Concrete Research**, 50, N. 4, 1998.

³¹⁸ HIGGINS, D.D., The effect of some test variables on chloride profiles. Proceedings of the RILEM International Workshop on Chloride Penetration into Concrete, eds. L.O.Nilsson and J.P.Ollivier, RILEM, Paris, 1997, pp. 234-242 Apud BUENFELD, N. R., OKUNDI, E., 1998.

O aumento dos intervalos entre o agregado resultante do efeito parede, e que é necessário preencher com excesso de argamassa, é função da área A , do plano P em contato com o concreto, e da máxima dimensão do agregado, D^{320} , conforme Figura 18.

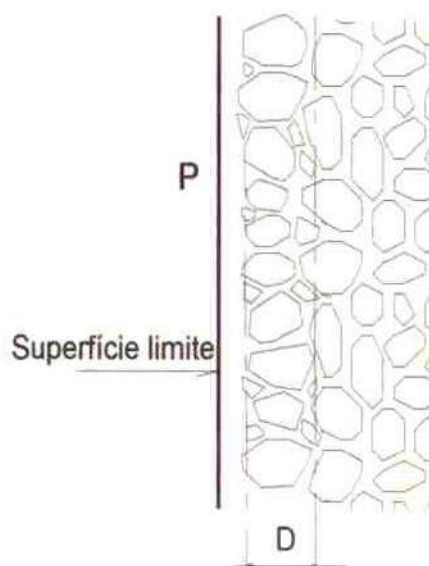


Figura 18 Efeito parede (FAURY, 1958)

A área em contato com o concreto pode ser representada por meio do chamado raio hidráulico ou raio médio, R , segundo a eq. 14:

$$R = \frac{\text{volume a encher}}{\text{área total das paredes e das armaduras contidas no molde}} \quad \text{Equação 14}$$

A função que caracteriza o efeito de parede a que está sujeito o concreto está apresentada na eq. 15:

³¹⁹ CAQUOT, A., Le rôle des matériax inertes dans le béton, Mem. Soc. Ing. Civils de France, Julho-Agosto 1937, Vol. 90, n. 4, p. 562 Apud COUTINHO, A. S., GONÇALVES, A., **Fabrico e Propriedades do Betão**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Vol. II, Lisboa, 1997, p. 13.
³²⁰ FAURY, Le Béton, 3^a ed., Paris, Ed. Dunod, 1958 Apud COUTINHO, A. S., GONÇALVES, A., **Fabrico e Propriedades do Betão**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Vol. II, Lisboa, 1997, p. 13.

$$\frac{R}{D} = \frac{\text{raio médio do molde}}{\text{máxima dimensão do agregado do concreto}} \quad \text{Equação 15}$$

Assim, considerando esta teoria proposta e extrapolando para o efeito de parede que o agregado graúdo pode promover no concreto, para um mesmo volume a moldar, tem-se que, quanto maior o volume de agregado graúdo (consequentemente menor área específica), maior o raio médio. Consequentemente, a dimensão máxima do agregado miúdo deve ser aumentada. No caso de não alterar a granulometria do agregado miúdo, convém diminuir a proporção da pasta, de maneira a aumentar D.

Sabe-se também que diferenças de densidade, massa volumétrica, dimensões entre outros fatores, influem na segregação. O aumento do volume de pasta e conseqüente redução de D, pode aumentar a exsudação e retração por secagem. Estes casos estão apresentados nos itens 2.2.2. e 2.2.5.

2.2.2 Relação água/cimento

Por exsudação entende-se a tendência da água, o componente mais leve, a separar-se dos outros. Ao segregar, a água cria caminhos que ficam gravados no interior do concreto, pois devido ao movimento impede a cristalização originando uma rede de capilares, mais importantes junto à parte superior, onde, acumulando-se, contribui para a diluição da pasta de cimento, aumentando a relação água/cimento³²¹.

O aumento da relação água/cimento, causado pela exsudação da água, provocará o descolamento entre a pasta e os agregados e o aumento da porosidade da pasta nessa região. O principal fator que influi na exsudação é, além da dosagem de água, o teor de

³²¹ COUTINHO, A. S., GONÇALVES, A., **Fabrico e Propriedades do Betão**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Vol. II, Lisboa, 1997.

finos para a reterem³²². A espessura da zona de transição é maior quanto maior for a relação água/ cimento^{323 324}.

A espessura da zona de transição praticamente não muda com o tempo e depende unicamente da espessura do filme líquido que se forma nas proximidades dos agregados³²⁵.

2.2.3 Agregados

A ligação entre a pasta de cimento e o agregado, do ponto de vista das resistência mecânica, porosidade e durabilidade, resulta de um entrelaçamento mecânico dos produtos de hidratação do cimento com o agregado e da reação química entre esse e a pasta de cimento^{326 327}. Outro aspecto importante a ser considerado para a resistência de ligação, é a área superficial efetiva que o agregado apresenta³²⁸.

O tipo de agregado também contribui para as características da zona de transição. O grau de orientação do hidróxido de cálcio na região interfacial é afetado pela natureza

³²² COUTINHO, A. S., GONÇALVES, A., **Fabrico e Propriedades do Betão**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Vol. II, Lisboa, 1997.

³²³ OLLIVIER, J. P., **Durability of Concrete**, São Paulo, EPUSP, 1998. 129p., Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/192.

³²⁴ ZHANG, M., GJØRV, O.E., Backscattered electron imaging studies on the interfacial zone between high strength lightweight aggregate and cement paste, **Advances in Cement Research**, 2, n. 8, pp. 141-146, 1989.

³²⁵ CARLES-GIBERGUES, A., GRANDET, J. and OLLIVIER, J.P., Evolution dans le temps de l'aureole de transition de pâtes contenant des ajouts, International RILEM Colloquium, Liaisons Pâtes de Ciment/Matériaux Associés, Toulouse, 1982, November, B-11-6 Apud MASSAZZA, 1996. P. 141.

³²⁶ SCHOLER, C.F., **The role of mortar-aggregate bond in the strength of concrete**, A Symposium on Concrete Strength, Highway Research Board, Número 210.

³²⁷ STRUBLE, L., SKALNY, J., MINDESS, S., A review of the cement-aggregate bond, **Cement and Concrete Research**, Vol. 10, p. 277-286, 1980.

³²⁸ OZOL, M.A., Shape, surface texture, surface area, and coatings. Ch. 35 in tests and properties of concrete, 1979, ASTM STP 169B, Philadelphia, 584-628 Apud STRUBLE, L., SKALNY, J., MINDESS, S., 1980.

mineralógica do agregado usado³²⁹. Todavia, CRUMBIE (1994)³³⁰ observou que o tipo de agregado pouco influenciou no gradiente da microestrutura em concreto.

O teor de sílica do agregado é um fator importante para a resistência de ligação, resultando forte ligação química com os agregados mais silicosos^{331 332}. Todavia, CHATTERJI e JEFFERY (1971)³³³ observaram situação contrária por meio de microscopia eletrônica de varredura. Segundo eles, não ocorre ligação química entre o cimento e agregados silicosos.

No concreto, a espessura da zona de transição é determinada pela intensidade dos efeitos produzidos pela superfície do agregado. A espessura é maior para agregados graúdos sendo também função do tamanho e forma das partículas de areia. O efeito de superfície originado pelas partículas de areia interfere com aqueles causados pelo agregado graúdo e a intensidade desta interferência determina a espessura final da zona de transição³³⁴.

O tamanho da zona de transição não muda com o tempo, embora o índice de orientação da portlandita mude significativamente com o tempo³³⁵.

³²⁹ GRANDET, J., OLLIVIER, J.P., Nouvelle méthode d'étude des interfaces ciment-granulats, **7th International Congress on the Chemistry of Cement**, Vol. III, Paris, 1980.

³³⁰ CRUMBIE, A.K., PhD Thesis, University of London, 1994 Apud SCRIVENER, K.L., PRATT, P.L., 1996, p. 12.

³³¹ ALEXANDER, K.M., GILBERT, D., WARDLAW, J., Discussion of effect of aggregate properties on strength of concrete by D.L. Bloem and R.D. Gaynor. Proceedings American Concrete Institute, Vol. 61, n. 6, Disc. 60-62, pp. 2035-2043, June 1964 Apud SCHOLER, 1967, p.109.

³³² MINDESS, S., Tests to determine the mechanical properties of the interfacial zone, **Interfacial Transition Zone in Concrete**, RILEM REPORT 11, Part 2, 3, 1996.

³³³ CHATTERJI, S., and JEFFERY, J.W., The nature of the bond between different types of aggregates and Portland cement, Indian Concr. J. 45(8): 346-349, 1971 Apud STRUBLE, L., SKALNY, J., MINDESS, S., 1980, p. 281.

³³⁴ MONTEIRO, P. J. M., **Microstructure of concrete and its influence on the mechanical properties**, Ph.D. THESIS, Department of Civil Engineering, University of Califórnia, Berkeley, Califórnia, 1985.

³³⁵ CARLES-GIBERGUES, A., GRANDET, J., OLLIVIER, J.P., Evolution dans le temps de l'aureole de transition de pates contenant des ajouts, International RILEM Colloquium, Liaisons

Quanto ao volume de agregado, Snyder *et al.*³³⁶ estudaram a porosidade da zona de transição em argamassas com relação a/c constante igual a 0,4, em função do teor de areia. Concluíram que para altos teores de areia (acima de 45% do volume da argamassa), a zona de transição apresenta maior volume de poros. Esse aumento foi justificado como a sua interconexão, todavia, foi visto no item 1.1.3 que a zona de transição, embora apresente maior volume de poros, pode não apresentar microfissuras se interconectando.

Estudo similar foi desenvolvido por Ollivier³³⁷ em argamassas com teor variável de areia e conseqüente variação na espessura da zona de transição. Observou que para teores de volume de areia superiores a 38% do volume total da argamassa, com 20 µm de espessura média da zona de transição, ocorreu um aumento significativo e repentinamente da porosidade total da argamassa.

Também Bourdette³³⁸ estudou a conectividade de poros em argamassas. Argamassas com volume de areia de 52% do volume total resultaram, para espessura média de zona de transição igual a 20 µm, 85% de interconexão da zona de transição, o que corresponde a 5,7% do volume de argamassa. Os resultados do estudo de porosidade permitiram observar que a porosidade da pasta da argamassa na zona de transição foi de 48 ± 2 % sendo que para a pasta fora desta região resultou em 19 ± 1 %. A porosidade obtida na mesma pasta utilizada na argamassa porém, sem adição de agregados, foi de

Pâtes de Ciment/Matériaux Associés, Toulouse, November, B-11-6, 1982 Apud MASSAZZA, 1996.

³³⁶ SNYDER, K.A., WINSLOW, D.N., BENTZ, D.P., GARBOCZI, E.J., Interfacial zone percolation in cement-aggregate composites, **Interfaces in Cementitious Composites**, RILEM International Conference, **Proceedings 18**, Part 2.2, Maso, J.C. Ed., E & FN SPON, Toulouse, 1992.

³³⁷ OLLIVIER, J. P., **Durability of Concrete**, São Paulo, EPUSP, 1998. 129p., Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/192.

³³⁸ BOURDETTE, B., RINGOT, R., OLLIVIER, J.P., Modelling of the transition zone porosity. To be published in **Cement and Concrete Research** Apud OLLIVIER, J. P., **Durability of Concrete**, São Paulo, EPUSP, 1998. 129p., Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/192, p.20.

22 %, confirmando que a relação água/ cimento efetivo da pasta na argamassa fora da zona de transição é menor devido ao seu aumento na zona de transição.

Acredita-se que ocorrem tensões de tração na pasta ao redor do agregado^{339 340 341}. Esta tensão é decorrente da retração durante hidratação e secagem, causando fissuras quando resulta em tensão superior à admissível, dependendo do tamanho do agregado. Agregados com dimensão máxima superior a 8mm estão mais propensos ao fenômeno da separação pasta/agregado³⁴². Isto significa que mais vazios devem ocorrer em misturas que utilizam agregado graúdo.

Também a rugosidade da superfície dos agregados promove forte resistência sobre a retração, gerando assim, tensões na interface argamassa/agregado³⁴³. Todavia, do estudo realizado por Alexander³⁴⁴ pode-se dizer que há outro fator a ser considerado, pois, para uma mesma textura de superfície em diferentes tipos rochas, a resistência de ligação varia em fator superior a dois.

Da mesma maneira, Valenta (1969)³⁴⁵, mediu a resistência à flexão e durabilidade em função de aderência entre a pasta de cimento com rochas de vários tipos e com superfícies lisas e fraturadas. A durabilidade foi igual ou superior em superfície

³³⁹ REINHARDT, H. W., Transport of Chemicals Through Concrete, **Materials Science of Concrete III**, Edited by Jan Skalny, The American Ceramic Society, Westerville, OH, pp. 209-241, 1992.

³⁴⁰ DELOYE, F. X., Deterioration mechanisms of concrete and mortars, **Proceedings International Seminar**, Brasília, 1997.

³⁴¹ MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**, São Paulo, PINI, 1994.

³⁴² REINHARDT, H. W., Transport of Chemicals Through Concrete, **Materials Science of Concrete III**, Edited by Jan Skalny, The American Ceramic Society, Westerville, OH, pp. 209-241, 1992.

³⁴³ SCHOLER, C.F., **The role of mortar-aggregate bond in the strength of concrete**, A Symposium on Concrete Strength, Highway Research Board, Número 210.

³⁴⁴ ALEXANDER, K.M., WARDLAW, J., GILBERT, D.J., Aggregate-cement bond, cement paste strength and the strength of concrete. International Conference on the Structure of Concrete, Cement and Concrete Association, London, 1968, 59-81 Apud STRUBLE, L., SKALNY, J., MINDESS, S., 1980, p. 280.

³⁴⁵ VALENTA, O., Durability of concrete, Proceedings of the 5th International Congress on the Chemistry of Cement, Cement Association of Japan, Tokyo, vol. 3, pp. 193-225 Apud PAULON, 1991.

fraturada do que em superfície lisa, porém, a resistência à flexão não teve uma dependência clara. Esses resultados permitiram concluir que a natureza morfológica da ligação tem maior influência na durabilidade, enquanto que a natureza química tem maior influência na resistência da ligação.

Diamond e Mindess³⁴⁶ observaram que para concreto com alto teor de cimento e areia de granulometria graúda, as distâncias mínimas médias de separação entre grãos variam em torno de 75 μm a 100 μm , para as relações agregado graúdo / areia iguais a 1 e 2, respectivamente. Isso pode significar que o caminho para a interconexão das zonas de transição são aumentadas com maior relação agregado graúdo/ areia. Também, é bem provável que apenas os primeiros 10 a 30 μm desta zona tem diferença significativa das propriedades da pasta.

Combinações químicas ou aderências epitaxiais estabelecem uma passagem contínua entre as redes dos produtos hidratados dos cimento e agregado, enquanto a aderência por rugosidade se traduz por contatos localizados e pelo aparecimento eventual de fissuras intersuperficiais mais ou menos finas e extensas³⁴⁷.

A textura do agregado também pode contribuir para o aumento da porosidade na interface. No caso de agregados porosos e secos quando em contato com a pasta, ocorre uma sucção de parte da água da pasta. Com isso ocorre uma concentração mais elevada de produtos hidratados correspondentes aos íons de maior mobilidade, entre eles, a etringita³⁴⁸. Todavia, a zona de transição resultante da utilização de agregado leve pode

³⁴⁶ DIAMOND, S., MINDESS, S., LOVELL, J., **On the spacing between aggregate grains in concrete and the dimensions of the aureole de transition**, Colloque International Toulouse-France, RILEM, 1982.

³⁴⁷ COUTINHO, A. S., GONÇALVES, A., **Fabrico e Propriedades do Betão**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Vol. I, Lisboa, 1997.

³⁴⁸ COUTINHO, A. S., GONÇALVES, A., **Fabrico e Propriedades do Betão**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Vol. I, Lisboa, 1997.

ser mais densa que em agregado normal e isso pode ser resultado de absorção de água livre que se acumula ao redor do agregado^{349 350}.

Também Bem-Othman *et al.* (1988)³⁵¹ observaram que a espessura da zona de transição quando utilizado agregado com superfície rugosa, indica ligeiro estreitamento. Tal diferença ocorre provavelmente devido às partículas rugosas terem maior tendência a adquirir cobertura com pequenas partículas de cimento durante a mistura. Também no caso de agregado leve com superfície bastante irregular deve amenizar o gradiente da microestrutura na interface. Assim, Wu *et al.* (1988)³⁵² observaram que concretos que utilizam agregados pré-cobertos apresentam melhores propriedades mecânicas.

O presente estudo foi realizado em concreto substituindo parte do agregado miúdo por pó calcário. Segundo observações de Uchikawa *et al.*³⁵³, o teor de água combinada e portlandita são praticamente iguais em ambos os casos, conforme apresentado na Figura 19.

³⁴⁹ ZHANG, M., GJØRV, O.E., Backscattered electron imaging studies on the interfacial zone between high strength lightweight aggregate and cement paste, **Advances in Cement Research**, 2, n. 8, pp. 141-146, 1989.

³⁵⁰ ZHANG, M., GJØRV, O.E., Microstructure of the interfacial zone between lightweight aggregate and cement paste, **Cement and Concrete Research**, Vol. 20, pp. 610-618, 1990.

³⁵¹ BEN-OTHMAN, B., SCRIVENER, K.L., BUENFELD, N.R., Permeability and microstructure of lightweight aggregate concrete, presented at Institute of Ceramics, Annual Convention, Durham, April, 1988 Apud SCRIVENER, K.L., PRATT, P.L., 1996, p. 12.

³⁵² WU, X., LI, D., MINSHU, T., Modification of interfacial zone between aggregate and cement paste, *Bonding in Cementitious Composites*, eds S. Mindess and S.P. Shah, Materials Research Society, Vol. 114, pp. 35-40 Apud SCRIVENER, K.L., PRATT, P.L., 1996, p. 12.

³⁵³ UCHIKAWA, H., HANEHARA, S., HIRAO, H., Influence of microstructure on the physical properties of concrete prepared by substituting mineral powder for part of fine aggregate, **Cement and Concrete Research**, Vol. 26, N.1, 1996.

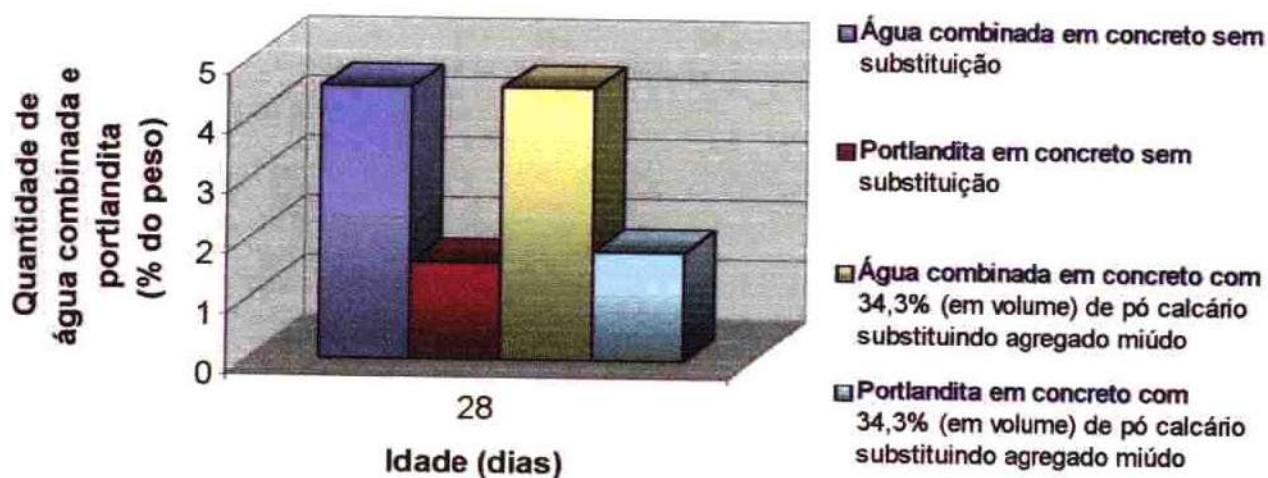


Figura 19 Teor de água combinada e portlandita em concretos com e sem substituição de parte do agregado miúdo por pó calcário (UCHIKAWA *et al.*, 1996).

Em concretos com substituição de parte do agregado miúdo por pó mineral, o espaço ocupado pela água livre, o qual será ocupado pelos produtos de hidratação, é preenchido pelo pó mineral. Assim, deposição de portlandita ao redor dos agregados é significativamente reduzida pela inibição do movimento da solução do poro para o agregado bem como há redução da relação água/cimento efetiva³⁵⁴.

2.2.4 Cimento

Sabe-se que a relação água/cimento tem influência sobre a porosidade do concreto. Com a diminuição da relação água/cimento para 0,30, conforme utilizada nos concretos de alto desempenho, os grãos de cimento ficam muito próximos, não havendo espaço disponível suficiente para o crescimento dos cristais formados durante a hidratação. Estes então apresentam-se como cristais morfológicamente atípicos e diminutos, resultando uma pasta uniforme e densa, cujos constituintes são dificilmente

³⁵⁴ UCHIKAWA, H., HANEHARA, S., HIRAO, H., Influence of microstructure on the physical properties of concrete prepared by substituting mineral powder for part of fine aggregate, *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, N.1, 1996.

individualizáveis³⁵⁵. 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 interface³⁵⁶.

Baixas relações água/cimento e alta relação agregado/cimento parece promover empacotamento eficiente das partículas do cimento ao redor dos agregados, minimizando a largura da zona interfacial. Alta relação água/cimento e baixa relação agregado/cimento permitem arranjar os grãos de cimento sobre distâncias maiores resultando larga zona interfacial. Todavia, a proporção de constituintes da microestrutura até 5 µm da superfície do agregado é pouco afetado por estas relações³⁵⁷.

Acredita-se que a composição química do cimento afeta a resistência de ligação da interface pasta/agregado³⁵⁸. A resistência de ligação em amostras que utilizam cimento com alto teor de escória é maior que nas de cimento Portland³⁵⁹. Monteiro *et al.*³⁶⁰ estudaram a microestrutura da zona interfacial formada na presença de cimento expansivo tipo K. Tais zonas foram caracterizadas por alta concentração de etringita. A orientação dos cristais de portlandita foi reduzida sendo que a resistência de ligação aumentou. Segundo Mehta³⁶¹, os cimentos modernos são mais propensos a causar fissuras porque são mais finos e contém altos teores de sulfato e álcalis. Cimentos com alto teor de álcali geralmente produz C-S-H mais gelatinoso e mais propenso à retração

³⁵⁵ VIEIRA, S. R. S. S., Concretos comum e de alto desempenho: análise do comportamento através da microscopia eletrônica de varredura, 40^o Congresso Brasileiro do Concreto, Rio de Janeiro, 1998.

³⁵⁶ FELDMAN, R. F., The effect of sand/cement ratio and silica fume on the microstructure of mortars, **Cement and Concrete Research**, Vol. 16, p. 31-39, 1986.

³⁵⁷ CRUMBIE, A.K., PhD Thesis, University of London, 1994 Apud SCRIVENER, K.L., PRATT, P.L., 1996, p. 13.

³⁵⁸ ALEXANDER, K.M., WARDLAW, J., GILBERT, D.J., Aggregate-cement bond, cement paste strength and the strength of concrete. International Conference on the Structure of Concrete, Cement and Concrete Association, London, 1968, 59-81 Apud STRUBLE, L., SKALNY, J., MINDESS, S., 1980, p. 280.

³⁵⁹ FRIGIONE, G., MARCHESE, B., SERSALE, R., Microcrackings propagation in flexural loaded Portland and high slag cement concretes, **8^o Congresso Internacional de Química do Cimento**, THEME 2, Vol. III, pp. 478-484, 1986.

³⁶⁰ MONTEIRO, P.J.M., MEHTA, P.K., Etringite formation on the aggregate-cement paste interface, **Cement and Concrete Research**, Vol. 15, pp. 378-380, 1985.

³⁶¹ MEHTA, K., Durability – critical issues for the future, **Concrete International**, pp. 27-33, July 1997.

por secagem. A retração por secagem deve romper algumas ligações entre os poros de gel e o gel, aumentando a permeabilidade³⁶².

2.2.5 Retração

As propriedades de transporte do concreto depende não somente da difusão através da pasta de cimento (ou interface) mas do ingresso de água, gases e espécies iônicas através de fissuras macroscópicas induzidas pelas retração plástica ou de secagem. Estas fissuras e imperfeições são muito maiores que os 50 µm de espessura da zona de transição. Assim, estudos laboratoriais em amostras pequenas que são protegidas da retração, provavelmente superestimam a influência da zona de transição nas propriedades do material composto³⁶³.

A retração é uma propriedade importante dos materiais de construção, pois a oposição que lhe é imposta gera tensões de tração que por insuficiente relaxação, podem exceder a resistência, conduzindo ao aparecimento de fissuras mais ou menos importantes. As variações de volume a que está sujeito o concreto, à temperatura constante, podem ser³⁶⁴:

- Retração plástica (antes da pega): devido ao assentamento dos materiais que compõe o concreto e evaporação da água de superfície;
- Volume dos produtos de hidratação do cimento, inferior à soma dos volumes de água e componentes anidros;
- Retração (após à pega) por secagem, hidráulica ou simplesmente retração: movimento da água que pode sair por evaporação ou entrar por capilaridade, permeabilidade ou ainda por condensação capilar;

³⁶² POWERS, T.C., COPELAND, L.E., HAYES, J.C., MANN, H.M., Permeability of Portland cement paste, *Journal of the American Concrete Institute*, pp. 285-298, November 1954.

³⁶³ MINDESS, S., Tests to determine the mechanical properties of the interfacial zone, **Interfacial Transition Zone in Concrete**, RILEM REPORT 11, Part 2, 3, 1996.

³⁶⁴ COUTINHO, A. S., GONÇALVES, A., **Fabrico e Propriedades do Betão**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Vol. III, Lisboa, 1994.

- Retração autógena: passagem da água livre do interior das pastas de cimento, argamassa e concreto, a combinada, adsorvida, devido à hidratação contínua do cimento, e que se verifica na ausência de trocas de umidade com o exterior;
- Retração por carbonatação.

No presente trabalho, dar-se-á atenção apenas às retrações plástica e por secagem, por serem as mais evidenciadas.

2.2.5.1 Retração plástica

As fissuras devidas ao assentamento dos sólidos que compõem o concreto dá-se normalmente nos primeiros minutos após a colocação e observa-se mesmo debaixo da película de água exsudada. Deve-se à presença de armaduras ou de agregado de maiores dimensões, que impedem o assentamento do conjunto. Também é consequência da velocidade de evaporação da água livre do concreto ser superior à da superfície devida à exsudação. Disso resulta o aparecimento de uma compressão que exerce na superfície da massa devido ao aparecimento de tensões capilares e tem, como consequência, deformações vertical e lateral. Quando a deformação lateral é impedida, pelas armaduras ou pelas grandes partículas de agregado, formam-se fissuras³⁶⁵.

2.2.5.2 Retração por secagem

A retração inicial de secagem, que é um pouco maior do que a expansão devido à molhagem subsequente, varia entre $0,2 \times 10^{-3}$, nos concretos pobres e com bons agregados, até $1,0 \times 10^{-3}$ nas argamassas ricas, ou em alguns concretos com agregados de má qualidade³⁶⁶.

A influência dos teores de cimento e água pode ser visualizada na Figura 20, a qual complementa os dados da Tabela 11.

³⁶⁵ COUTINHO, A. S., GONÇALVES, A., **Fabrico e Propriedades do Betão**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Vol. II, Lisboa, 1997.

Tabela 11 Influência das dosagens de cimento e de água na retração do concreto ao fim de 24 horas (L'HERMITE (1962) Apud COUTINHO³⁶⁷).

Consumo de cimento (kg/m ³)	Retração ao fim de 24 horas m/m x (10 ⁻³)	Consumo de água no concreto com C = 350 kg/m ³	Retração ao fim de 24 horas m/m x (10 ⁻³)
200	-0,8	158	-1,00
350	-1,6	175	-1,55
500	-2,3	192	-1,60

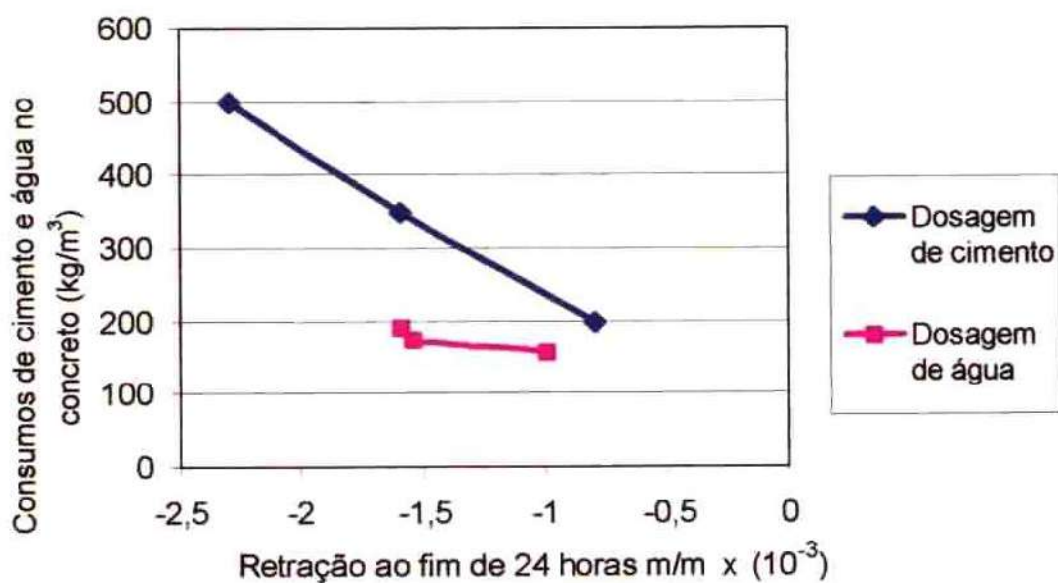


Figura 20 Influência dos consumos de cimento e de água na retração do concreto ao fim de 24 horas

³⁶⁶ COUTINHO, A. S., GONÇALVES, A., **Fabrico e Propriedades do Betão**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Vol. III, Lisboa, 1994.

³⁶⁷ COUTINHO, A. S., GONÇALVES, A., **Fabrico e Propriedades do Betão**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Vol. III, Lisboa, 1994.

Da Figura 20 observa-se que o teor de água tem maior influência na retração. Vale lembrar que partículas mais finas, exigem maior quantidade de água para obtenção de mistura com igual trabalhabilidade.

A retração do concreto resulta da retração da própria pasta de cimento, a qual exerce tensões sobre o agregado³⁶⁸.

Sousa Coutinho (1947)³⁶⁹ avaliou o nível de tensões impostas a uma inclusão circular contida numa placa de pasta de cimento, com dimensões suficientemente grandes, contraindo-se uniformemente em todas as direções. Simplificadamente chegou-se a eq. 16:

$$-\sigma_r = \sigma_\theta = \frac{\delta E_i E_c}{E_c (1 - \nu_i) + E_i (1 + \nu_c)} \quad \text{Equação 16}$$

Onde:

$-\sigma_r$ = pressão normal exercida pela pasta sobre a inclusão circular

σ_θ = tração na pasta na direção tangencial

δ = contração da placa (em extensão unitária)

E_c = módulo de elasticidade da pasta

ν_c = coeficiente de Poisson da pasta

E_i = módulo de elasticidade do material da inclusão

ν_i = coeficiente de Poisson do material da inclusão.

Todavia, o módulo de elasticidade da pasta de cimento a ser utilizado não poderia ser o que se determina num ensaio clássico, sobre a pasta endurecida. Devido ao fenômeno da

³⁶⁸ COUTINHO, A. S., GONÇALVES, A., **Fabrico e Propriedades do Betão**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Vol. III, Lisboa, 1994.

³⁶⁹ SOUSA COUTINHO, A., Determinação de tensões no betão pelo método do tensómetro fotoelástico, Técnica, Dez. 1946 e Jan. 1947 Apud COUTINHO, A. S., GONÇALVES, A., **Fabrico e Propriedades do Betão**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Vol. III, Lisboa, 1994, p. 240.

relaxação das tensões na pasta de cimento, o módulo de elasticidade a ser adotado é menor (de 1/5 a 1/10)³⁷⁰.

Pode-se supor que em concretos, o agregado se encontra sujeito a uma compressão hidrostática provocada pela pasta, a qual fica sujeita a uma tração, também hidrostática³⁷¹. Assim, a retração do concreto se correlaciona com a retração da pasta pela eq. 17:

$$\delta_c = \frac{\delta}{1 + \frac{v_i \chi_c}{v_c \chi_i}} \quad \text{Equação 17}$$

Onde:

v_i = volume do agregado por unidade de volume do concreto

v_c = volume do cimento por unidade de volume do concreto

χ_c = compressibilidade da pasta de cimento

χ_i = compressibilidade do agregado.

Sendo:

$$\chi_i = \frac{3(1 - 2\nu_i)}{E_i} \cdot \sigma_r \quad \text{e} \quad \chi_c = \frac{3(1 - 2\nu_c)}{E_c} \cdot \sigma_\theta$$

Assim, considerando os valores:

Granito $\Rightarrow E_i = 38.900 \text{ MPa}$ ³⁷²

Pasta $\Rightarrow E_c = 25.000 \text{ MPa}$ ³⁷³ $\Rightarrow \delta = 220 \times 10^{-5}$ ³⁷⁴

³⁷⁰ COUTINHO, A. S., GONÇALVES, A., **Fabrico e Propriedades do Betão**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Vol. III, Lisboa, 1994.

³⁷¹ L'HERMITE, R., Le retrait des ciments, mortiers et bétons, Ann. Inst. Tech. Bat. Trav. Publ. N. 251, Circulaire, série F, n. 37, 2 Julho 1947 Apud COUTINHO, A. S., GONÇALVES, A., **Fabrico e Propriedades do Betão**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Vol. III, Lisboa, 1994, p. 242.

³⁷² ANDRADE, W. P., **CONCRETOS - Ensaio e Propriedades**, São Paulo: PINI, 1997.

³⁷³ COUTINHO, A. S., GONÇALVES, A., **Fabrico e Propriedades do Betão**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Vol. III, Lisboa, 1994.

$$v_i = v_c = 0,2^{375}$$

O valor da pressão seria igual a 32 MPa.

Para PICKETT³⁷⁶, a retração do concreto pode ser determinada pela eq. 18:

$$S_c = S_p (1 - a)^n \quad \text{Equação 18}$$

Onde:

S_c = retração do concreto

S_p = retração da pasta

a = teor de agregado do concreto

n = valores obtidos experimentalmente; variam entre 1,2 e 1,7³⁷⁷.

O que influencia no aparecimento de fissuras devidas à retração é a capacidade de relaxação das tensões e não a grandeza da retração, pois, não está demonstrado que às maiores retrações correspondam as maiores tensões, quando a extensão por retração é impedida³⁷⁸. Quanto mais elevada a tensão de ruptura do cimento, maiores as tensões devidas à retração e portanto, é mais fissurável.

Algumas teorias³⁷⁹ interpretam as causas da retração, sendo:

- Tensões originadas na superfície de separação líquido-gás, nos poros do cimento hidratado com dimensões capilares;

³⁷⁴ HELENE, P. R. L., **Estrutura interna do concreto**, notas de aula do curso de pós graduação em engenharia civil da EPUSP Materiais de Construção, 1998.

³⁷⁵ COUTINHO, A. S., GONÇALVES, A., **Fabrico e Propriedades do Betão**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Vol. III, Lisboa, 1994.

³⁷⁶ PICKETT, G., Effect of aggregate on shrinkage of concrete and a hypothesis concerning shrinkage, Journal of the American Concrete Institute, Title No. 52-36, January 1956.

³⁷⁷ L'HERMITE, R., Volume, changes of concrete, Proceedings 4th International Symposium on the Chemistry of Cement, Washington DC, pp. 659-94, 1960 Apud NEVILLE, 1997, p. 429.

³⁷⁸ COUTINHO, A. S., GONÇALVES, A., **Fabrico e Propriedades do Betão**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Vol. III, Lisboa, 1994.

- Pressão de adsorção nas superfícies dos poros do cimento hidratado e ações repulsivas e atrativas entre estas superfícies;
- Entrada e saída de água de gel do cimento hidratado.

A retração relativa da pasta, da argamassa e do concreto é da ordem de 5 para 2 e para 1, respectivamente³⁸⁰.

2.3 Porosidade e Microfissuras

Na zona de transição pasta/agregado existem três tipos de microfissuras³⁸¹:

- As que ocorrem preferencialmente ao longo da interface entre partículas de areia e pasta;
- As que ocorrem na pasta de cimento;
- As que seguem através de grandes placas ou cristais de hidróxido de cálcio dentro da pasta.

No concreto, existem três tipos de microfissuras^{382 383 384}:

- De interface ou adesão;
- Da argamassa ou pasta;
- Do agregado, com maior probabilidade de ocorrer em agregado graúdo porém algumas vezes ocorre também no agregado miúdo.

³⁷⁹ COUTINHO, A. S., GONÇALVES, A., **Fabrico e Propriedades do Betão**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Vol. III, Lisboa, 1994.

³⁸⁰ COUTINHO, A. S., GONÇALVES, A., **Fabrico e Propriedades do Betão**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Vol. III, Lisboa, p. 247, 1994.

³⁸¹ LARBI, J. A., Microstructure of the interfacial zone around aggregate particles in concrete, **HERON**, Vol.38, 1993.

³⁸² HSU, T.T.C., SLATE, F.O., STURMAN, G.M., WINTER, G., Microcracking of plain concrete and the shape of the stress-strain curve, **Journal of the American Concrete Institute**, No. 60-14, February, 1963.

³⁸³ SHAH, S.P. and SLATE, F.O., Internal microcracking, mortar-aggregate bond and stress-strain curve of concrete. In *Proceedings Structure of Concrete*, edited by Brooks, A.E. and Newman, K., pp. 82-92, 1968 Apud Larbi, 1993, p. 17.

³⁸⁴ BRANDT, I., JENSEN, A.D. and STRUNGE, H., Microcracking in concrete: Method to quantify micro-cracks on thin sections. Report – Building Technology, Technological Institute Taastруп, Denmark, 10 p., 1983 Apud LARBI, 1993, p. 17.

Os resultados de ensaios em microscópio eletrônico revelam que a maioria das fissuras na zona de transição parecem resultar da retração associada com a secagem das amostras para o ensaio³⁸⁵ ou causadas pela ação mecânica de corte ou polimento³⁸⁶ e secagem. Todavia, investigações evidenciam que também existem fissuras de retração na interface pasta/agregado em amostras úmidas e antes da aplicação de carregamento^{387 388 389}. Estas microfissuras são causadas provavelmente pela retração que é associada com a hidratação do cimento. Porém, nem todas as microfissuras que ocorrem na argamassa estão presentes na pasta isolada. Na pasta ocorrem microfissuras tortuosas e finas³⁹⁰.

Outra explicação para o aparecimento de microfissuras seria que o fato do agregado e a pasta de cimento possuírem propriedades térmicas e mecânicas diferentes, o que provoca concentração de tensões na interface pasta/ agregado^{391 392}. Além da retração, as microfissuras podem ser resultado da hidratação do cimento^{393 394}. Assim, podem ser consequência da eliminação de adesão entre agregado e a pasta, em algumas regiões,

³⁸⁵ LARBI, J. A., Microstructure of the interfacial zone around aggregate particles in concrete, *HERON*, Vol.38, 1993.

³⁸⁶ PAULON, V. A., **Estudos da microestrutura da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado**, Tese apresentada à Escola Politécnica da USP para obtenção do Título de Doutor em Engenharia, São Paulo, 1991.

³⁸⁷ HSU, T.T.C., SLATE, F.O., STURMAN, G.M., WINTER, G., Microcracking of plain concrete and the shape of the stress-strain curve, *Journal of the American Concrete Institute*, No. 60-14, February, 1963.

³⁸⁸ MINDESS, S. and DIAMOND, S., A device for direct observation of cracking of cement paste or mortar under compressive loading within a scanning electron microscope. *Cement and Concrete Research*, Vol. 12, pp. 569-576, 1982 Apud LARBI, 1993, P. 39.

³⁸⁹ KAYYALI, O.A., Porosity of concrete in relation to the nature of the paste-aggregate interface, *Materials and Structures/ Matériaux et Construction*, Vol. 20, N. 115, pp. 19-26, 1987.

³⁹⁰ LARBI, J. A., Microstructure of the interfacial zone around aggregate particles in concrete, *HERON*, Vol.38, 1993.

³⁹¹ OLLIVIER, J. P., **Durability of Concrete**, São Paulo, EPUSP, 1998. 129p., Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/192.

³⁹² MONTEIRO, P. J. M., **Microstructure of concrete and its influence on the mechanical properties**, Ph.D. THESIS, Department of Civil Engineering, University of Califórnia, Berkeley, Califórnia, 1985.

³⁹³ WINSLOW, D., LIU, D., The pore structure of paste in concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 20, p. 227-235, 1990.

pela pressão³⁹⁵ devida a cristalização de novos painéis de hidróxido de cálcio³⁹⁶, perpendiculares à superfície do agregado ou etringita³⁹⁷, durante o processo de hidratação. Com isso, mantendo quando possível, baixos teores de água e material cimentício e, aumentando o teor de agregado, tem-se um caminho para reduzir as retrações térmica e de secagem bem como as fissuras provenientes da retração³⁹⁸.

A matriz argamassa dentro do concreto também está sujeita à presença de produtos formados posteriormente. A presença de microfissuras no concreto aumenta a mobilidade da umidade, a qual resulta gradiente de densidade dentro da matriz levando à microfissuras adicionais. O domínio da matriz pela rede de microfissuras conduz a formação de etringita secundária^{399 400 401}.

Em idades iniciais, essas microfissuras tendem a propagar-se nas regiões de alta porosidade, ou seja, na zona de transição pasta/ agregado. Todavia, em idades avançadas, esta região tende a ser preenchida pelos produtos de hidratação e com isso o caminho a ser percorrido pela fratura será através dos cristais originados. Dependendo da mineralogia e planos de clivagem do agregado, tamanho dos cristais e concentração dos produtos de hidratação, a zona de transição pode não ser a região mais fraca⁴⁰².

³⁹⁴ GRUDEM, A., On the role of pore size and shape in strength – structure relationships of cement pastes, **RILEM/ IUPAC Symposium**, Prague, September, 1973.

³⁹⁵ GRUDEM, A., On the role of pore size and shape in strength – structure relationships of cement pastes, **RILEM/ IUPAC Symposium**, Prague, September, 1973.

³⁹⁶ ZIMBELMANN, R., A contribution to the problem of cement-aggregate bond, **Cement and Concrete Research**, Vol. 15, 1985.

³⁹⁷ DELOYE, F. X., Deterioration mechanisms of concrete and mortars, **Proceedings International Seminar**, Brasília, 1997.

³⁹⁸ MEHTA, K., Durability – critical issues for the future, **Concrete International**, pp. 27-33, July 1997.

³⁹⁹ PATEL, H. H., BLAND, C. H., POOLE, A. B., The microstructure of concrete cured at elevated temperatures, **Cement and Concrete Research**, Vol. 25, p. 485-490, 1995.

⁴⁰⁰ IDORN, G.M., JOHANSEN, V., THAULOW, N., Research innovations for durable concrete, **Concrete International**, pp. 19-24, July 1992.

⁴⁰¹ LAWRENCE, C.D., Mortar expansions due to delayed ettringite formation. Effects of curing period and temperature, **Cement and Concrete Research**, Vol. 25, No. 4, pp. 903-914, 1995.

⁴⁰² MONTEIRO, P. J. M., **Microstructure of concrete and its influence on the mechanical properties**, Ph.D. THESIS, Department of Civil Engineering, University of Califórnia, Berkeley, Califórnia, 1985.

Diamond e Mindess⁴⁰³ estudaram os processos de formação e propagação de fissuras em amostras de argamassa quando submetidas a carregamentos. Observaram que as fissuras se localizaram na zona de transição (30 ou 40 μ m) sendo restritas pela areia. Os resultados deste trabalho mostraram que quanto menor a relação agregado graúdo/ areia, menor a distância média de separação entre os grãos de agregado.

A cura é um fator importante no que diz respeito à fissuras. Em geral, a espessura das microfissuras no concreto aumentam de 5 μ m a 50 μ m com o aumento da temperatura de cura. Em altas temperaturas de cura, as microfissuras do concreto são preenchidas com produtos de hidratação, o que não ocorre quando curado em temperatura ambiente⁴⁰⁴. Na prática, com a estrutura em uso, concretos expostos em ambiente agressivo e carregamento cíclico, fissuras com largura superior a 0,3mm raramente cicatrizam. Ao contrário, elas tendem a alargar devido ao efeito da tensão e lixiviação. Assim, o comitê 224 do ACI, recomenda 0,15mm como limite máximo de espessura das fissuras na face tracionada das estruturas em concreto armado, sujeitas a ciclos de molhagem e secagem ou ambiente marinho⁴⁰⁵.

Young⁴⁰⁶ observa que a pasta ou argamassa deve ser totalmente seca antes do ensaio para determinação da porosidade por intrusão de mercúrio. A secagem afeta significativamente a estrutura dos poros principalmente em pastas com estrutura de poros menores.

⁴⁰³ DIAMOND, S., MINDESS, S., LOVELL, J., On the spacing between aggregate grains in concrete and the dimensions of the aureole de transition, Colloque International Toulouse-France, RILEM, 1982.

⁴⁰⁴ PATEL, H. H., BLAND, C. H., POOLE, A. B., The microstructure of concrete cured at elevated temperatures, **Cement and Concrete Research**, Vol. 25, p. 485-490, 1995.

⁴⁰⁵ MEHTA, K., Durability – critical issues for the future, **Concrete International**, pp. 27-33, July 1997.

⁴⁰⁶ YOUNG, J. F., **A Review of the Pore Structure of Cement Paste and Concrete and its Influence on Permeability**, ACI – SP 108-1, Detroit, Michigan, 1988.

CAPÍTULO III

PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Planejamento da pesquisa

Estudos sobre a interface pasta/agregado, realizados por pesquisadores de diversos países, demonstram que ainda não há um consenso sobre sua influência nas propriedades do concreto. A maioria desses estudos foram realizados em pastas e argamassas, outros foram simulações, não sendo muito conhecidos, experimentalmente, os resultados em concretos.

A zona de transição pasta/agregado, em especial a influência do volume de pasta, ainda não foi totalmente abordada do ponto de vista macroscópico. O presente estudo busca correlacionar dados de microestrutura com as propriedades macroscópicas. Os resultados são discutidos em relação à influência do volume de pasta na microestrutura do concreto e sua implicação prática. Segundo alguns pesquisadores^{407 408 409 410 411}, em concretos e argamassas com volumes totais de pasta acima de aproximadamente 50% não há continuidade da zona de transição e as propriedades do concreto seriam, conseqüentemente, melhores.

⁴⁰⁷ OLLIVIER, J. P., **Durability of Concrete**, São Paulo, EPUSP, 1998. 129p., Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/192.

⁴⁰⁸ HOUST, Y.F., SADOUKI, H., WITTMANN, F.H., Influence of aggregate concentration on the diffusion of CO₂ and O₂, **Interfaces in Cementitious Composites**, RILEM International Conference, **Proceedings 18**, Part 2.2, Maso, J.C. Ed., E & FN SPON, Toulouse, 1992.

⁴⁰⁹ SNYDER, K.A., WINSLOW, D.N., BENTZ, D.P., GARBOCZI, E.J., Interfacial zone percolation in cement-aggregate composites, **Interfaces in Cementitious Composites**, RILEM International Conference, **Proceedings 18**, Part 2.2, Maso, J.C. Ed., E & FN SPON, Toulouse, 1992.

⁴¹⁰ WINSLOW, D.N., COHEN, M.D., Percolation and pore structure in mortars and concrete, **Cement and Concrete Research**, Vol. 24, pp. 25-37, 1994.

⁴¹¹ BOURDETTE, B., RINGOT, R., OLLIVIER, J.P., Modelling of the transition zone porosity. To be published in **Cement and Concrete Research** Apud OLLIVIER, J.P., **Durability of Concrete**, São Paulo, 1998, p. 20.

Para atingir o objetivo deste estudo foram realizados ensaios de porosimetria, resistência à compressão, absorção de água por capilaridade, penetração de água sob pressão, penetração de íons cloreto e microscopia eletrônica de varredura.

3.2 Variáveis consideradas

3.2.1 Variáveis independentes fixas

Foram utilizados os seguintes materiais:

- Cimento CP V-ARI PLUS de acordo com a NBR 5733/91;
- Agregado miúdo composto por 50% em peso de areia natural e 50% de pó calcário;
- Brita 1 proveniente de granito natural e são, peneirada;
- Condições de cura: foi adotada cura em câmara úmida de maneira a permitir hidratação completa do cimento evitando, tanto quanto possível, a retração por secagem e conseqüente formação precoce de microfissuras.

3.2.2 Variáveis independentes

Para melhor avaliar a influência do volume de pasta, foram estabelecidos traços que permitiram variar o volume de pasta em 30%, 35%, 55% e 60%. Nesses traços, as relações água/cimento adotadas foram 0,5 e 0,7.

As propriedades foram avaliadas tomando como referência a idade de 28 dias.

3.2.3 Variáveis dependentes

- Resistência à compressão: ensaio realizado segundo a NBR 5739/94;
- Absorção de água por capilaridade: ensaio realizado segundo a NBR 9779/95;
- Penetração de água sob pressão: ensaio realizado segundo a NBR 10787/94;
- Penetração de íons cloreto: ensaio realizado segundo a ASTM C1202-91;
- Massa específica e índice de vazios: ensaio realizado segundo a NBR 9778/87;

- Porosímetro de mercúrio: foi seguido o procedimento do LME – Laboratório de Microestrutura do Departamento de Engenharia de Construção Civil da Poli;
- Microscopia eletrônica de varredura: foi observada a microestrutura do concreto, principalmente a zona de transição pasta agregado, através de metodologia utilizada pela Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP.

3.2.4 Variáveis intervenientes

- Consistência: indica a maior ou menor facilidade com que o concreto é moldado, adensado e a facilidade com que se desagregará ou segregará, influenciando assim no aparecimento de vazios;
- Adensamento dos corpos de prova: foi realizado manualmente nos concretos com maior volume de pasta e mecanicamente, por meio de mesa vibratória, nos concretos com menor volume de pasta. O tempo e forma de compactação do concreto podem afetar na sua segregação ou formação de vazios, influenciando assim na porosidade;
- Consumo de cimento: tendo em vista a variação do volume de pasta, o consumo de cimento modificou-se;
- Consumo de água: influenciou além da consistência, a quantidade de água evaporável, segregação e exsudação com conseqüente formação de vazios e fissuras.

3.3 Caracterização tecnológica dos materiais empregados

No presente estudo foram utilizados 2 agregados:

- Graúdo: brita 1 proveniente de granito natural, peneirada, caracterizada pela NBR 7211/83. Os resultados estão apresentados na Tabela 38 do ANEXO A.
- Miúdo: foram utilizados 50% em peso de areia natural e 50% de pó calcário sendo a areia caracterizada pela NBR 7211/83. Os resultados estão apresentados na Tabela 40 do ANEXO A.

O aglomerante utilizado foi o cimento CPV ARI – PLUS, caracterizado segundo a NBR 5733/91.

A água foi proveniente da rede pública de abastecimento de água potável da SABESP, não sendo submetida a ensaios. Não foi utilizado aditivo.

No ANEXO A estão apresentadas as caracterizações dos materiais bem como os métodos de ensaio e especificações utilizadas.

3.4 Moldagem dos corpos de prova

3.4.1 Dosagem

A dosagem foi realizada no Laboratório de Concreto da ABCP com as seguintes condições ambientes:

- Temperatura: 22° - 23°C;
- Umidade relativa: 57% – 58%.

Foram utilizados concretos com variado volume de pasta, conforme apresentados na Tabela 12:

Tabela 12 Características dos traços

Traços em massa seca		Volume de pasta correspondente em relação ao volume total de concreto	Denominação do traço
cimento : areia: brita	a/c		
1 : 2 : 3	0,5	30%	5T30
1 : 2 : 3	0,7	35%	7T35
1 : 0,8 : 1	0,5	55%	5T55
1 : 0,8 : 1	0,7	60%	7T60

Para tentar obter consistência plástica nos traços com relação água/cimento igual a 0,7, teria de ser utilizado pó calcário de tal forma que isto condicionou o uso de pó calcário para todos os traços.

A mistura foi realizada em betoneira de eixo vertical com capacidade nominal de 60 litros. Os materiais foram colocados na betoneira após a imprimação desta com pequena quantidade de concreto. Inicialmente foram colocados o agregado graúdo e parte da água. Após misturar por 15 segundos, foram adicionados o agregado miúdo, cimento e restante da água, misturando durante 3 minutos.

3.4.2 Adensamento

A moldagem dos corpos-de-prova foi diferenciada, conforme apresentada na Tabela 13:

Tabela 13 Moldagem dos corpos-de-prova

Traços	Número de camadas e adensamento			Tipo de adensamento
	10 x 20 cm	15 x 30 cm	Massa específica	
5T30	1x45 segundos	1x45 segundos	2x45 segundos	Mesa vibratória
7T35	2 x 15 golpes	4 x 30 golpes	3 x 25 golpes	Manual
5T55	2 x 15 golpes	4 x 30 golpes	3 x 25 golpes	Manual
7T60*	“batidas” laterais	“batidas” laterais	“batidas” laterais	Leve

* O traço 7T60 resultou em concreto de consistência fluida.

Mesmo possuindo consistências diferentes, as amostras não apresentaram segregação de materiais, conforme demonstrado pela análise de corpos-de-prova cortados longitudinalmente somente para essa finalidade de observação da homogeneidade, mostrado na Figura 21.



Figura 21 Verificação da homogeneidade do concreto utilizado para os ensaios

3.4.3 Cura

As amostras moldadas foram cobertas por um filme plástico permanecendo na sala de dosagem por um período de 24 horas. Após este período, as amostras foram desmoldadas no Laboratório de Concreto da ABCP e levadas para a câmara úmida do Laboratório do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Construção Civil (CPqDCC) da Poli. A cura foi realizada através de névoa em câmara úmida ($23\pm 2^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} \geq 98\%$).

3.5 Resultados obtidos

3.5.1 Concreto fresco

Os concretos foram submetidos a ensaios para determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, teor de ar e massa específica. Os resultados estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 Resultados obtidos no concreto fresco

Traços	Abatimento (mm)	Ar aprisionado (%)	Massa específica (kg/m ³)
5T30	0	0,6	2411
7T35	130	0,5	2329
5T55	200	0,3	2235
7T60	≥ 250	0,2	2124

3.5.2 Concreto endurecido

3.5.2.1 Resistência à compressão

Os ensaios foram realizados em corpos-de-prova cilíndricos de 150 x 300 mm. Aos 28 dias de idade, foram ensaiados dois corpos-de-prova para cada traço, segundo a NBR 5739/94⁴¹². O capeamento foi feito com enxofre.

Os resultados estão apresentados na Tabela 15.

⁴¹² NBR 5739/94 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos – Método de Ensaio.

Tabela 15 Resultados do ensaio de resistência à compressão

Traços	Resistência à compressão (MPa)	Resistência média à compressão (MPa)
5T30	57,8	54,6
	51,4	
7T35	34,2	34,8
	35,4	
5T55	56,1	55,0
	53,8	
7T60	29,2	29,0
	28,7	

Nas Figuras 22 à 25 estão apresentados os tipos de ruptura característicos de todos os corpos-de-prova após o ensaio de resistência à compressão.

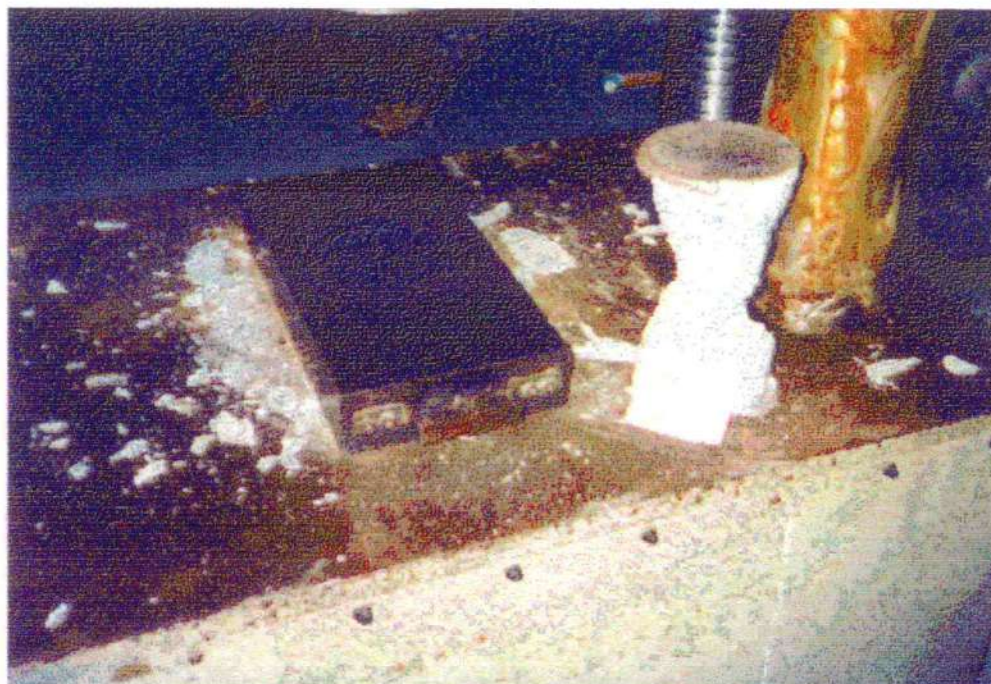


Figura 22 Ruptura de corpo-de-prova do traço 5T30; Tipo cones opostos



Figura 23 Ruptura de corpo-de-prova do traço 7T35; Tipo cones opostos



Figura 24 Ruptura de corpo-de-prova do traço 5T55; Tipo colunar



Figura 25 Ruptura de corpo-de-prova do traço 7T60; Tipo colunar

3.5.2.2 Penetração de água sob pressão

O ensaio foi realizado de acordo com o procedimento descrito no método NBR 10787/94⁴¹³. Os corpos-de-prova são prismáticos medindo 250 x 250 x 125 mm, sendo secos ao ar num período de 24 horas antes do início do ensaio. O ensaio consiste em fixar o corpo-de-prova entre dois perfis metálicos, conforme Figura 26, posicionado sobre um anel de borracha localizado no perfil inferior, através do qual é submetido água sob as seguintes pressões e períodos:

- $0,10 \pm 0,01$ MPa durante 48 horas (cerca de 10 m.c.a);
- $0,30 \pm 0,03$ MPa durante 24 horas (cerca de 30 m.c.a);
- $0,70 \pm 0,07$ MPa durante 24 horas (cerca de 70 m.c.a).

Após a aplicação de água sob pressão, o corpo-de-prova é partido ao meio, ortogonalmente à face onde foi exercida a pressão, medindo-se a profundidade máxima de penetração de água e o perfil de distribuição da água penetrada.

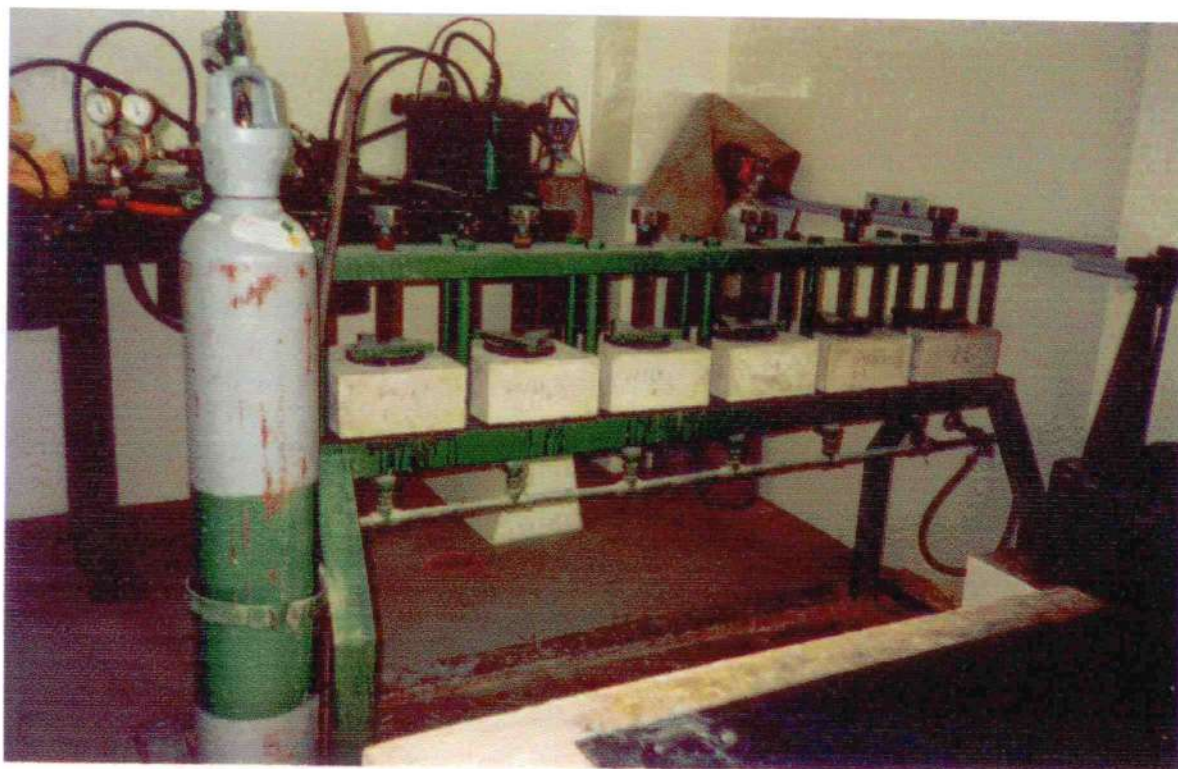
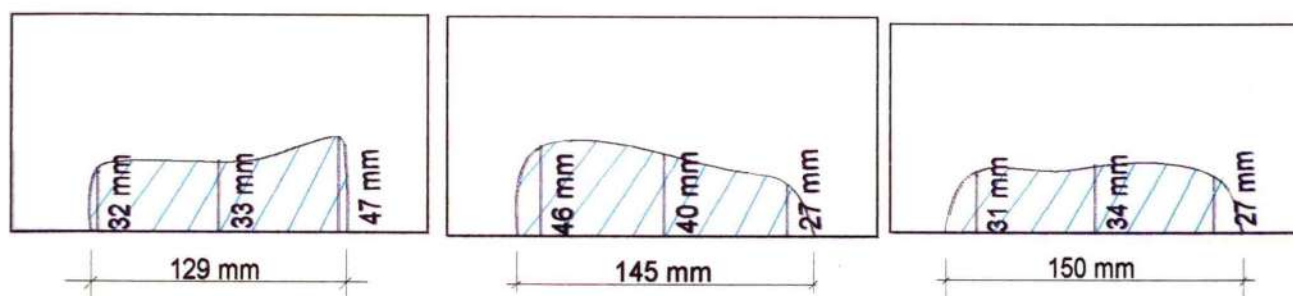


Figura 26 Determinação de penetração de água sob pressão (Laboratório do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo – IPT)

⁴¹³ NBR 10787/94 – Concreto endurecido – Determinação da penetração de água sob pressão – Método de Ensaio.

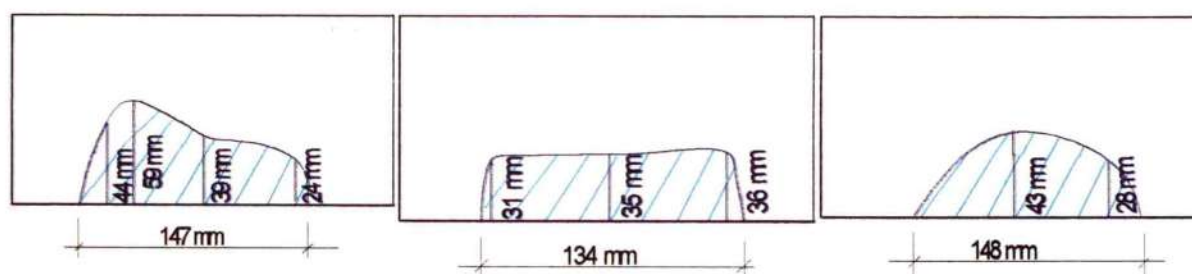
Os resultados obtidos no ensaio estão apresentados abaixo, bem como a área aproximada de penetração:

Amostra 5T30	Amostra 5T30	Amostra 5T30
Penetração máxima: 47mm	Penetração máxima: 46mm	Penetração máxima: 34mm
Área lateral aproximada de penetração: 4611mm ²	Área lateral aproximada de penetração: 5322mm ²	Área lateral aproximada de penetração: 4556mm ²



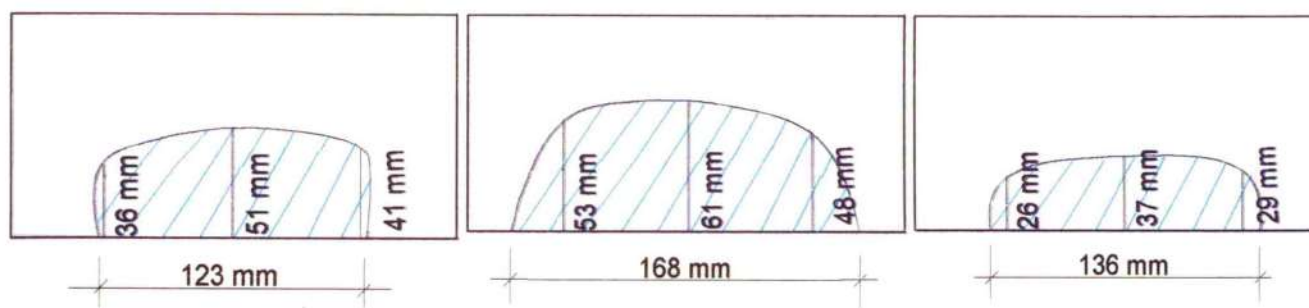
AMOSTRA 5T30 - Penetração média = 42 mm

Amostra 7T35	Amostra 7T35	Amostra 7T35
Penetração máxima: 59mm	Penetração máxima: 36mm	Penetração máxima: 43mm
Área lateral aproximada de penetração: 4923mm ²	Área lateral aproximada de penetração: 4466mm ²	Área lateral aproximada de penetração: 3981mm ²



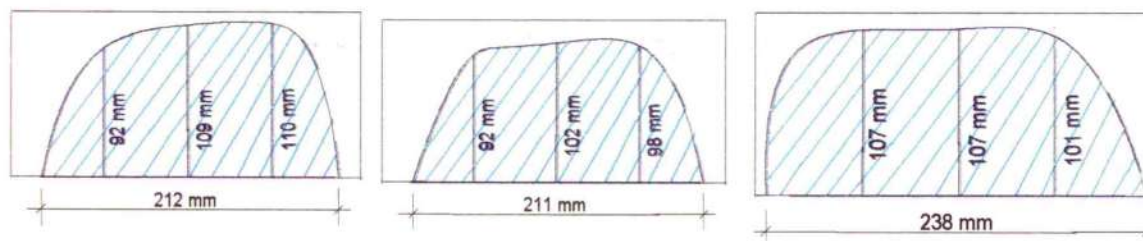
AMOSTRA 7T35 - Penetração média = 46 mm

Amostra 5T55	Amostra 5T55	Amostra 5T55
Penetração máxima: 51mm	Penetração máxima: 61mm	Penetração máxima: 37mm
Área lateral aproximada de penetração: 5959mm ²	Área lateral aproximada de penetração: 8733mm ²	Área lateral aproximada de penetração: 4479mm ²



AMOSTRA 5T55 – Penetração média = 49 mm

Amostra 7T60	Amostra 7T60	Amostra 7T60
Penetração máxima: 110mm	Penetração máxima: 102mm	Penetração máxima: 107mm
Área lateral aproximada de penetração: 19543mm ²	Área lateral aproximada de penetração: 17750mm ²	Área lateral aproximada de penetração: 22505mm ²



AMOSTRA 7T60 - Penetração média = 106 mm

3.5.2.3 Absorção de água por capilaridade

A determinação da absorção de água por capilaridade foi realizada conforme procedimento estabelecido no método NBR 9779/95⁴¹⁴. O ensaio consiste em colocar o corpo-de-prova cilíndrico de 100 x 200 mm apoiado de maneira que a superfície inferior tenha contato com a água a uma profundidade de 5 mm. A massa de água acumulada é determinada por meio de pesagens sucessivas dos corpos-de-prova superficialmente secos. As determinações são feitas no período de 3, 6, 24, 48 e 72 horas. Após o ensaio, os corpos-de-prova são rompidos diametralmente para leitura da altura máxima da ascensão capilar e perfil da distribuição de água. No presente estudo foram ensaiados 3 corpos-de-prova para cada traço, apoiados em perfis de madeira. Os perfis da distribuição de água nos corpos-de-prova estão apresentados na Figura 27.



Figura 27 Perfis de distribuição da água nas amostras 5T30 e 7T35

⁴¹⁴ NBR 9779/95 – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade – Método de Ensaio.

Na tabela 16 estão caracterizadas as amostras utilizadas no ensaio e apresentadas graficamente na Figura 28. A Figura 29 compara as alturas médias máximas de ascensão capilar entre as amostras.

Tabela 16 Absorção de água por capilaridade

		ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE AOS 28 DIAS															
		Identificação do traço															
Propriedades		5730	5T30	5T30	7T35	7T35	7T35	7T35	7T35	5T55	5T55	5T55	5T55	7T60	7T60	7T60	7T60
Massas (g)	Seca	3589,3	3602,3	3543,0	3425,0	3417,3	3407,0	3418,2	3214,5	3121,2	3100,1	2876,7	2856,4	2975,7			
	3 horas	3598,0	3608,1	3546,7	3445,2	3459,4	3418,2	3253,6	3168,2	3141,2	2930,8	2919,1	3030,2				
	6 horas	3603,1	3611,5	3548,7	3455,8	3477,4	3425,1	3270,5	3186,1	3162,5	2959,4	2947,6	3055,1				
	24 horas	3621,3	3624,6	3557,2	3495,6	3536,6	3453,1	3324,0	3245,0	3227,9	3043,9	3036,6	3135,9				
	48 horas	3633,7	3634,2	3564,5	3523,7	3577,6	3474,4	3364,3	3290,9	3274,8	3103,0	3097,0	3193,1				
	72 horas	3641,6	3641,1	3569,9	3541,2	3606,6	3489,5	3394,5	3325,8	3307,8	3145,9	3141,7	3236,3				
Absorção de água por capilaridade (g/ cm ²)	3 horas	0,1108	0,0738	0,0471	0,2572	0,536	0,1426	0,4978	0,5984	0,5233	0,6888	0,7983	0,6939				
	6 horas	0,1757	0,1171	0,0726	0,3922	0,7652	0,2305	0,7130	0,8263	0,7945	1,053	1,1612	1,011				
	24 horas	0,4074	0,2839	0,1808	0,8989	1,5190	0,5870	1,3942	1,5763	1,6272	2,1289	2,2944	2,0397				
	48 horas	0,5653	0,4062	0,2737	1,2567	2,041	0,8582	1,9073	2,1607	2,2243	2,8813	3,0634	2,768				
Altura da ascensão capilar máxima, após 72 h (cm)	72 horas	0,6659	0,494	0,3425	1,4795	2,4102	1,0504	2,2918	2,605	2,6445	3,4276	3,6326	3,3181				
	Média (mm)	6,5	6,0	Resultado descartado	10,5	7,0	6,0	12,2	13,2	11,8	14,8	14,8	14,2				
		63			78			124			146						

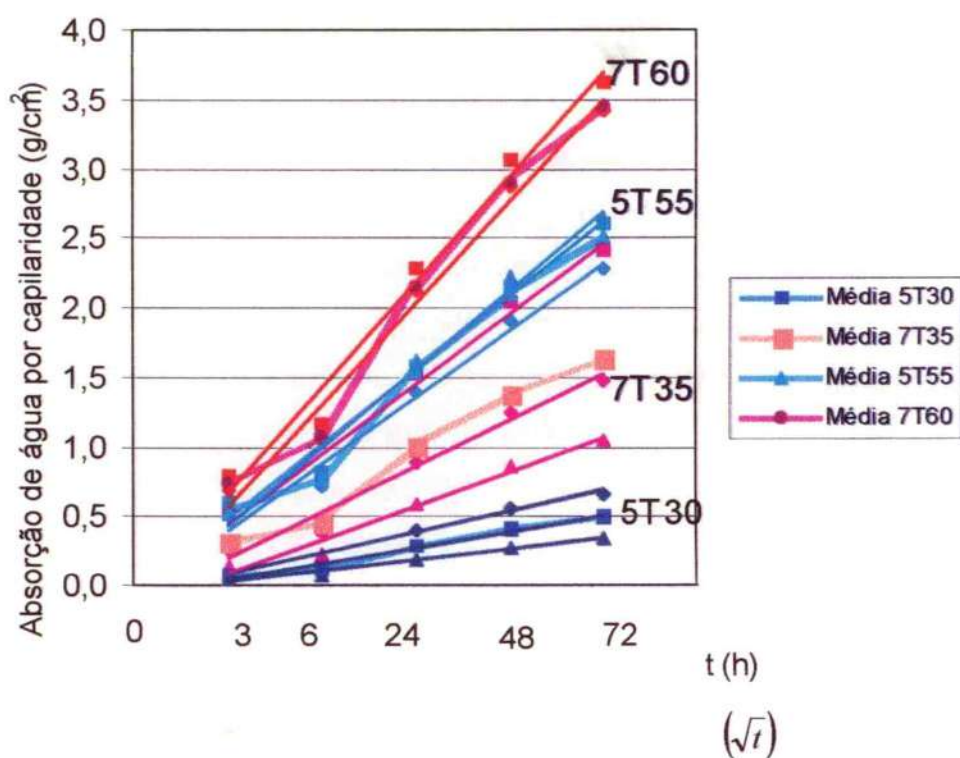


Figura 28 Taxa de absorção de água por capilaridade para os concretos de acordo com o método NBR 9779/95.

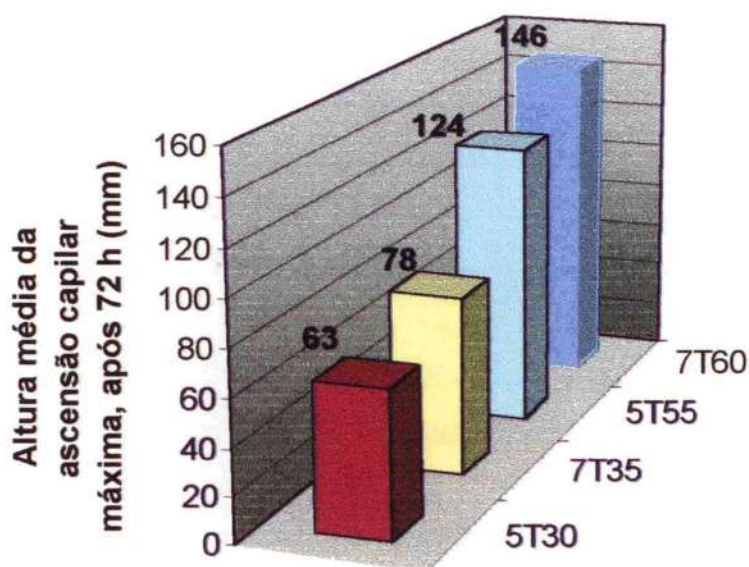


Figura 29 Comparativo das alturas médias máximas de absorção para os concretos.

3.5.2.4 Penetração de íons cloreto

O procedimento utilizado no ensaio baseia-se nas normas AASHTO T277-83⁴¹⁵ e ASTM C1202-91⁴¹⁶. Os corpos-de-prova utilizados são cilíndricos com 100mm de diâmetro e 50mm de espessura, retirados do centro de corpos de prova cilíndrico com 100mm de diâmetro e 200mm de altura. Estes corpos-de-prova são submetidos à penetração de íons cloretos por meio de corrente elétrica fornecida por diferença de potencial igual a 60 V. A corrente e a temperatura devem ser registradas a cada 30 minutos durante o período de 6 horas. Nesse período, o ensaio termina quando a temperatura atinge 90°C ou quando são atingidas as 6 horas.

A carga total passante é dada pela equação 19 e o concreto pode ser classificado conforme os critérios mostrados na Tabela 17.

$$Q = 900 \times (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{330} + I_{360}) \quad \text{Equação 19}$$

Onde:

I_0 = corrente inicial, em A;

I_n = corrente após n minutos de ensaio, em A;

I_{360} = corrente final, em A.

Tabela 17 Critérios para classificação qualitativa do concreto com base na carga passante segundo AASHTO T277-83/ ASTM C1202-91

Carga passante (Coulombs)	Penetrabilidade a cloretos
> 4000	Alta
2000 a 4000	Moderada
1000 a 2000	Baixa
100 a 1000	Muito baixa
< 100	Desprezível

Na Tabela 18 estão apresentados os resultados obtidos no ensaio.

⁴¹⁵ AASHTO T277/83 – The Rapid Chloride Permeability Test.

⁴¹⁶ ASTM C1202/91 – Standard Test Method for Electrical Indications of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.

Tabela 18 - Resultados do ensaio de penetração de íons cloreto

Dosagem	Número do cp	leitura inicial	30 min.	1 hora	1h 30min	2 horas	2h 30min.	3 horas	3h 30min.	4 horas	4h 30min.	5 horas	5h 30min.	6 horas
5T30	1	0,17 A 25° C	0,19 A 30° C	0,21 A 33° C	0,22 A 37° C	0,23 A 41° C	0,24 A 43° C	0,24 A 46° C	0,25 A 48° C	0,25 A 50° C	0,27 A 51° C	0,28 A 54° C	0,28 A 55° C	0,29 A 56° C
	2	0,16 A 25° C	0,19 A 30° C	0,20 A 33° C	0,22 A 37° C	0,23 A 41° C	0,23 A 43° C	0,25 A 46° C	0,25 A 48° C	0,25 A 50° C	0,27 A 51° C	0,28 A 54° C	0,28 A 55° C	0,29 A 56° C
	3	0,16 A 25° C	0,19 A 30° C	0,20 A 33° C	0,21 A 37° C	0,22 A 41° C	0,22 A 43° C	0,24 A 46° C	0,24 A 47° C	0,24 A 49° C	0,26 A 50° C	0,27 A 52° C	0,27 A 54° C	0,28 A 55° C
	4	0,17 A 25° C	0,19 A 30° C	0,21 A 33° C	0,23 A 37° C	0,24 A 41° C	0,25 A 43° C	0,26 A 47° C	0,26 A 49° C	0,26 A 50° C	0,29 A 53° C	0,29 A 55° C	0,30 A 56° C	0,30 A 58° C
7T35	1	0,33 A 25° C	0,42 A 36° C	0,47 A 44° C	0,51 A 52° C	0,54 A 59° C	0,56 A 64° C	0,57 A 69° C	0,62 A 75° C	0,62 A 78° C	0,70 A 82° C	0,75 A 85° C	0,81 A 90° C	-
	2	0,38 A 25° C	0,51 A 39° C	0,57 A 48° C	0,62 A 58° C	0,65 A 67° C	0,67 A 73° C	0,73 A 79° C	0,80 A 85° C	0,80 A 90° C	-	-	-	-
	3	0,37 A 25° C	0,50 A 37° C	0,58 A 49° C	0,66 A 59° C	0,68 A 68° C	0,71 A 76° C	0,75 A 81° C	0,82 A 87° C	0,85 A 90° C	-	-	-	-
	4	0,37 A 25° C	0,49 A 39° C	0,55 A 48° C	0,59 A 58° C	0,62 A 66° C	0,63 A 72° C	0,66 A 77° C	0,72 A 82° C	0,71 A 86° C	0,82 A 90° C	-	-	-
5T55	1	0,48 A 22° C	0,52 A 29° C	0,67 A 40° C	0,83 A 53° C	0,91 A 65° C	1,05 A 78° C	1,18 A 84° C	-	-	-	-	-	-
	2	0,42 A 22° C	0,46 A 29° C	0,58 A 41° C	0,67 A 49° C	0,75 A 57° C	0,88 A 69° C	0,92 A 76° C	1,01 A 83° C	1,13 A 90° C	-	-	-	-
	3	0,40 A 23° C	0,46 A 30° C	0,58 A 37° C	0,71 A 49° C	0,79 A 59° C	0,90 A 71° C	0,93 A 77° C	1,06 A 85° C	-	-	-	-	-
	4	0,39 A 23° C	0,41 A 29° C	0,48 A 35° C	0,58 A 45° C	0,64 A 53° C	0,74 A 62° C	0,81 A 70° C	0,84 A 76° C	0,92 A 84° C	1,02 A 90° C	-	-	-
7T60	1	0,80 A 24° C	0,89 A 37° C	1,11 A 52° C	1,14 A 71° C	1,24 A 81° C	1,54 A 90° C	-	-	-	-	-	-	-
	2	0,86 A 23° C	0,97 A 38° C	1,18 A 58° C	1,23 A 75° C	1,38 A 86° C	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	0,96 A 23° C	1,07 A 39° C	1,27 A 60° C	1,34 A 79° C	1,51 A 89° C	-	-	-	-	-	-	-	-
	4	0,69 A 23° C	0,74 A 35° C	0,93 A 48° C	1,02 A 67° C	1,05 A 76° C	1,17 A 84° C	-	-	-	-	-	-	-

Na Tabela 19 estão apresentadas as cargas totais passantes nos corpos-de-prova, calculadas para tempo de ensaio de 2 horas, tendo em vista que esse é o período máximo que a amostra 7T60 suportou.

Tabela 19 Carga total passante segundo ASTM C 1202/91 para 2 horas de ensaio

Dosagem	Amostra	Carga total passante Coulombs (C)
5T30	1	1.683
	2	1.656
	3	1.620
	4	1.719
	<i>média</i>	1.669
7T35	1	3.789
	2	4.572
	3	4.689
	4	4.383
	<i>média</i>	4.358
5T55	1	5.706
	2	4.806
	3	4.932
	4	4.149
	<i>média</i>	4.898
7T60	1	8.604
	2	9.342
	3	10.206
	4	7.353
	<i>média</i>	8.876

3.5.2.5 Massa específica e índice de vazios

As amostras utilizadas no ensaio de resistência à penetração de ions cloreto foram ensaiadas segundo o método prescrito na NBR 9778/87⁴¹⁷, para a determinação da massa específica e índice de vazios correspondentes. Esse método consiste em submeter a amostra em imersão à temperatura de $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ durante 72 horas, levando-se em seguida, à ebulição durante um período de 5 horas. A seguir, deixa-se a amostra perder naturalmente o calor, até a temperatura de $23\pm 2^{\circ}\text{C}$. Após completar a saturação, procede-se a pesagem em balança hidrostática, anotando-se a massa da amostra imersa em água. Na Tabela 20 estão apresentados os resultados obtidos no ensaio. A Figura 30 compara graficamente os resultados apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 Massa específica e índice de vazios

Dosagem	Amostra	Peso seco (g)	Peso saturado (g)	Peso imerso (g)	Massa específica (kg/m ³)	Índice de vazios (%)
5T30	1	912,2	947,0	558,0	2345,0	8,95
	2	942,7	981,0	553,0	2202,6	8,95
	3	930,2	966,0	569,0	2343,1	9,02
	4	940,5	979,0	575,0	2328,0	9,53
7T35	1	916,5	973,0	565,0	2246,3	13,85
	2	893,9	959,0	550,0	2185,6	15,92
	3	868,5	931,0	534,0	2187,7	15,74
	4	903,7	964,0	556,0	2215,0	14,78
5T55	1	800,8	877,0	484,0	2037,7	19,39
	2	792,0	839,0	522,0	2498,4	14,83
	3	815,9	888,5	495,0	2073,4	18,45
	4	848,5	918,5	517,0	2113,3	17,43
7T60	1	754,6	852,0	455,0	1900,8	24,53
	2	736,1	829,0	444,0	1911,9	24,13
	3	716,6	812,0	432,0	1885,8	25,11
	4	806,1	900,5	487,0	1949,5	22,83

⁴¹⁷ Massa específica e porosidade determinada segundo a NBR 9778/87 – Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica – Método de ensaio.

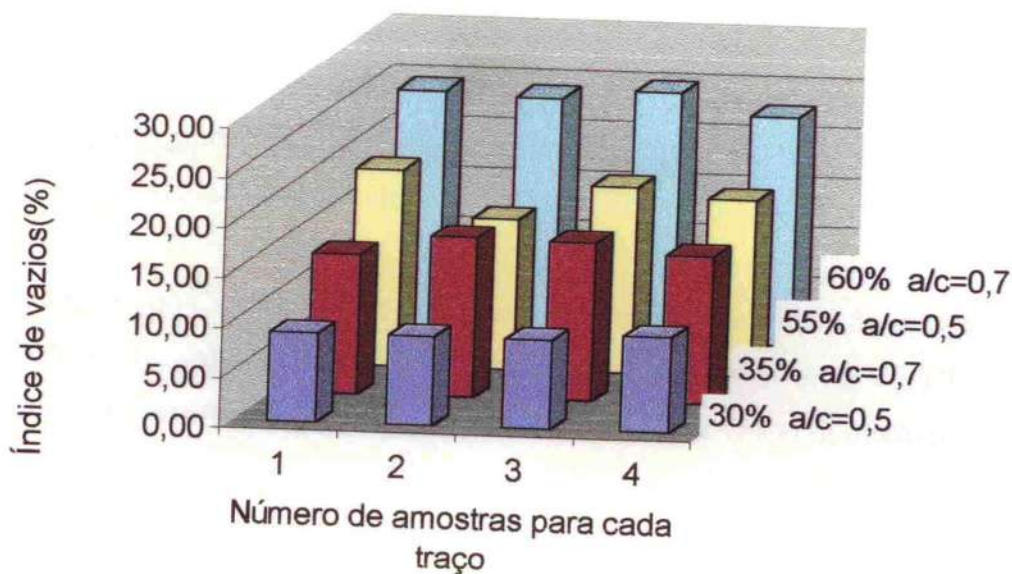


Figura 30 Comparativo do índice de vazios entre as amostras

3.5.2.6 Porosidade

Um dos métodos utilizados para determinar a distribuição dos poros em pastas de cimento é por porosimetria através de intrusão de mercúrio, porém, avalia melhor o sistema de poros capilares do que microporos⁴¹⁸. O método é baseado 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 a tensão superficial. Essa tensão superficial pode ser superada, exercendo-se uma certa pressão externa. Assim, o mercúrio é introduzido no sistema de poros segundo pressão externa aplicada em função do tamanho de poro. O tamanho do poro é relacionado com a pressão por meio da equação de Washburn (eq. 20), a qual assume a seção transversal circular.

$$P = - \frac{2 \gamma \cos \theta}{r}$$

Equação 20

⁴¹⁸ MINDESS, S., YOUNG, J. F., **Concrete**, USA, Prentice-Hall, 1981.

Onde

γ = tensão superficial do mercúrio (adotado 0,485 N/m)

θ = ângulo de contato (adotado 130°)

r = raio do poro

P = pressão absoluta exercida

A área específica do C-S-H pode ser determinada por meio de adsorção de nitrogênio ou vapor de água. Os valores de área superficial obtidos em pastas secas de silicato de cálcio utilizando adsorção de vapor de água estão entre 250 a 450 m²/g sendo reduzidos para 10 a 100 m²/g quando utilizado nitrogênio. Esta diferença torna-se um dado importante quando o valor de área específica for utilizado para calcular a distribuição de poros. Na avaliação do tamanho e distribuição dos poros existem dois fatores principais que influenciam nos resultados⁴¹⁹.

- a amostra deve estar seca antes do ensaio o que resulta na mudança da estrutura do poro;
- uma forma geométrica de poro deve ser adotada enquanto que resultados obtidos por meio de microscopia mostram que a forma dos poros é uma cadeia de poros formados irregularmente.

O volume de poros é afetado também pelas dimensões de acesso ao sistema de poros⁴²⁰. Assim, as características dos poros da zona de transição só poderão ser determinadas pelo porosímetro por intrusão de mercúrio se houver interconexão através da amostra até a superfície externa.

A pressão máxima utilizada neste estudo foi aproximadamente de 413 MPa, a qual permitiu medir diâmetro nominal de poros até 0,0032 μm .

⁴¹⁹ MINDESS, S., YOUNG, J. F., **Concrete**, USA, Prentice-Hall, 1981.

⁴²⁰ OLLIVIER, J. P., **Durability of Concrete**, São Paulo, EPUSP, 1998. 129p., Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/192.

Preparo da amostra:

As amostras utilizadas foram retiradas da parte central de corpos-de-prova cilíndricos de 100 x 200 mm. Para obter-se dimensões aproximadas de 20 x 20 x 10 mm, essas amostras foram cortadas em serra de corte de mesa com lâmina fina, à baixa velocidade. Foi ensaiada uma amostra para cada traço.

Para a determinação da porosidade é necessário retirar toda a água dos vazios, pois o método se baseia em medidas de massas saturadas de água e massas isentas de umidade. O método utilizado para secagem dos corpos-de-prova constitui-se de duas etapas:

- Retirada de água dos poros e substituição por solvente através da imersão total em isopropanol anidro técnico por um período mínimo de 10 dias;
- Para a desumidificação foi utilizado o processo de secagem em estufa a vácuo, 100°C, por 20 horas.

Determinação da porosidade:

A porosidade foi calculada a partir dos dados obtidos no porosímetro de mercúrio (Eq. 21):

$$POROSIDADE = \frac{\text{volume de vazios} \times 100}{\text{volume de vazios} + (\text{massa} / \text{massa específica}) \times 1000} \quad \text{Equação 21}$$

Onde

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

Massa da amostra seca foi determinada antes de iniciar o ensaio

Massa específica foi calculada pela Eq. 22:

$$G = \frac{A}{A - B} \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad \text{Equação 22}$$

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)

Determinação do volume de agregado e pasta nas amostras ensaiadas:

Para melhor avaliação dos resultados do ensaio de porosimetria, faz-se necessário o conhecimento dos volumes de agregado e pasta presentes nas amostras. Os volumes dos corpos-de-prova ensaiados foram calculados a partir do volume total do bulbo e da haste do equipamento e do volume de mercúrio utilizado. Na Tabela 21 estão apresentadas as massas e volumes correspondentes.

Tabela 21 Cálculo do volume dos corpos-de-prova ensaiados

Dados do ensaio	Traços			
	5T30	7T35	5T55	7T60
Vol. do bulbo (cm ³)	15,0000	15,0000	15,0000	15,0000
Vol. da haste (cm ³)	1,1310	1,8360	1,1310	1,8360
Volume do bulbo+haste (cm ³)	16,1310	16,8360	16,1310	16,8360
Peso do penetrômetro (g)	63,1350	76,4120	79,0380	60,4630
Peso da amostra (g)	7,5630	10,8880	7,2790	8,1820
Peso do penetrômetro+ amostra+mercúrio (g)	233,2800	248,0030	247,6920	247,0920
Peso de mercúrio (g)	162,5820	160,7030	161,3750	178,4470
Volume de mercúrio (cm ³)	12,0064	11,8676	11,9172	13,1780
Volume da amostra (cm ³)	4,12	4,97	4,21	3,66

As amostras foram imersas em solução de HCl⁴²¹, na concentração de 0,33% em massa, e posteriormente aquecidas a fim de dissolver o cimento do concreto. A solução foi filtrada de maneira a separar os agregados e o mercúrio do cimento. Para a hipótese de intrusão de mercúrio no agregado, o volume de agregado foi calculado a partir da massa específica determinada segundo Equação 23.

⁴²¹ SATO, N.M.N., **Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concretos**, Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Engenharia, São Paulo, 1998.

$$\text{Massa específica} = \frac{(c-a)}{(b-a)-(d-c)} \quad (\text{g/ml}) \quad \text{Equação 23}$$

Onde:

a = massa do picnômetro, g;

b = massa do picnômetro + água, g;

c = massa do picnômetro + amostra, g;

d = massa do picnômetro + amostra + água, g.

Na Tabela 22 estão apresentadas as massas a serem utilizadas na Equação 23 e volume de brita dos corpos-de-prova.

Tabela 22 Massas e volume de agregado graúdo dos corpos-de-prova

Massas (g)	Traços			
	5T30	7T35	5T55	7T60
Picnômetro	223,85			
Picnômetro+água	587,20			
Picnômetro+brita	226,61	229,23	226,50	229,48
Picnômetro+água+brita	588,00	590,50	588,80	590,60
Massa específica do agregado (g/cm ³)	1,4082	2,586	2,524	2,5247
Volume de brita (cm ³)	1,96	2,08	1,05	2,23
% em relação ao volume total da amostra	47,6%	41,9%	24,9%	60,9%

A diferença do volume de agregado graúdo calculado em função de sua massa específica, determinada antes e após o ensaio, mostrou ser insignificante. Assim, a determinação dos volumes dos agregados foram calculados em função da sua massa específica antes do ensaio, conforme ANEXO A. Os volumes calculados estão apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 Volumes de agregados nos corpos-de-prova

Dados do corpo-de-prova	Traços			
	5T30	7T35	5T55	7T60
Massa de brita (g)	4,7574	5,3835	2,6492	5,6339
Massa de areia (g)	3,0049	3,3071	2,5041	0,8842
Volume de brita (cm ³)	1,80	2,04	1,00	2,13
Volume de areia (cm ³)	1,14	1,26	0,95	0,34
Volume de agregados (cm ³)	2,94	3,30	1,96	2,47
% de agregado em relação ao volume total da amostra	71,4	66,4	46,4	67,5
% de volume de pasta em relação ao volume total	28,6	33,6	53,6	32,5

Nas Tabelas 24 à 27 estão apresentados os resultados obtidos no ensaio com o porosímetro de mercúrio.

Tabela 24 Porosidade da amostra 5T30

Diâmetro médio do poro(μm)	Volume (acumulado) de mercúrio (ml/g)	Volume (incremento) de mercúrio (ml/g)	Área (acumulada) de poro (m^2/g)	Área (incremento) de poro (m^2/g)
343,9828	0,0000	0,0000	0,000	0,000
289,2991	0,0003	0,0003	0,000	0,000
205,5670	0,0006	0,0002	0,000	0,000
163,1871	0,0007	0,0001	0,000	0,000
130,2286	0,0008	0,0002	0,000	0,000
103,1257	0,0009	0,0001	0,000	0,000
88,5472	0,0010	0,0001	0,000	0,000
70,3324	0,0012	0,0002	0,000	0,000
55,1713	0,0012	0,0001	0,000	0,000
47,1673	0,0013	0,0001	0,000	0,000
38,6884	0,0014	0,0001	0,000	0,000
30,6686	0,0015	0,0001	0,000	0,000
25,0322	0,0016	0,0001	0,000	0,000
19,7597	0,0018	0,0002	0,000	0,000
16,0155	0,0019	0,0001	0,000	0,000
14,8741	0,0020	0,0001	0,000	0,000
12,3768	0,0023	0,0003	0,000	0,000
8,9769	0,0030	0,0008	0,001	0,000
6,4292	0,0030	0,0000	0,001	0,000
4,6101	0,0030	0,0000	0,001	0,000
3,3778	0,0030	0,0000	0,001	0,000
2,4534	0,0030	0,0000	0,001	0,000
1,7758	0,0032	0,0001	0,001	0,000
1,2894	0,0032	0,0001	0,001	0,000
0,9383	0,0032	0,0000	0,001	0,000
0,6809	0,0033	0,0001	0,002	0,001
0,4931	0,0035	0,0001	0,003	0,001
0,3557	0,0037	0,0002	0,005	0,002
0,2569	0,0040	0,0003	0,010	0,005
0,1875	0,0044	0,0004	0,019	0,008
0,1356	0,0051	0,0007	0,038	0,020
0,0986	0,0058	0,0007	0,069	0,030
0,0715	0,0079	0,0021	0,187	0,118
0,0518	0,0180	0,0100	0,961	0,774
0,0376	0,0358	0,0178	2,858	1,897
0,0272	0,0410	0,0052	3,621	0,763
0,0197	0,0452	0,0042	4,475	0,853
0,0153	0,0470	0,0018	4,955	0,480
0,0130	0,0486	0,0016	5,442	0,487
0,0112	0,0502	0,0016	6,004	0,562
0,0095	0,0520	0,0019	6,800	0,795
0,0081	0,0536	0,0016	7,594	0,794
0,0069	0,0556	0,0019	8,727	1,134
0,0058	0,0574	0,0018	9,997	1,270
0,0050	0,0593	0,0018	11,491	1,493
0,0039	0,0628	0,0035	15,059	3,568
0,0032	0,0635	0,0007	15,942	0,882

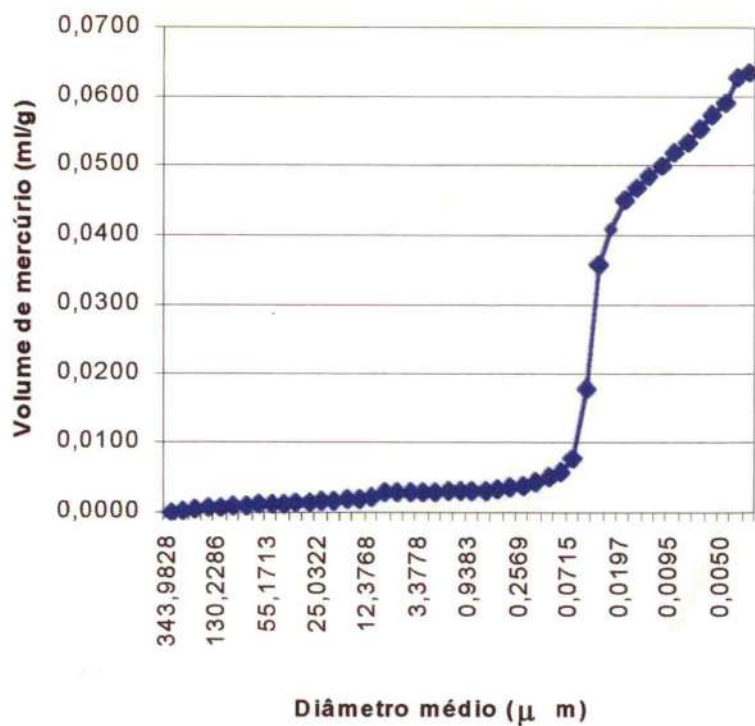


Figura 31 Volume de mercúrio x diâmetro médio de poro da amostra 5T30

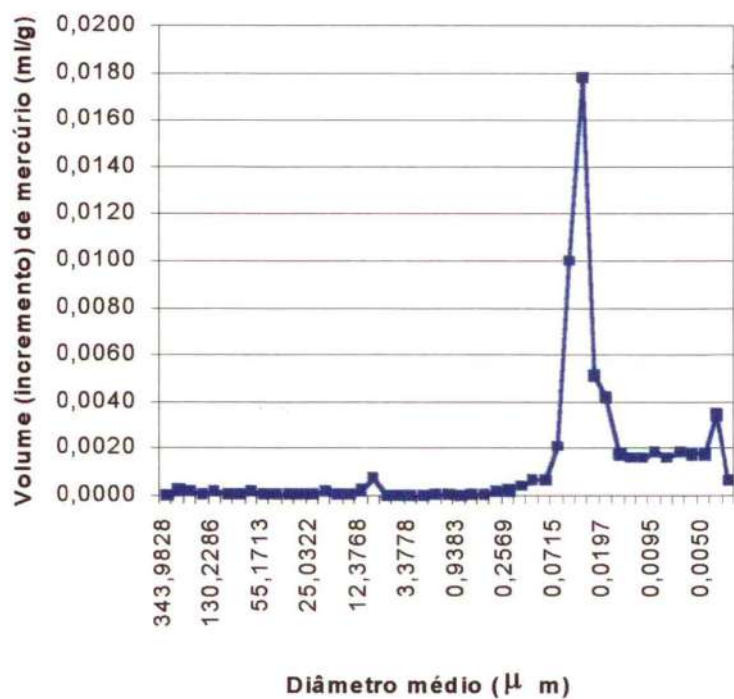


Figura 32 Incremento de volume de mercúrio x diâmetro médio da amostra 5T30

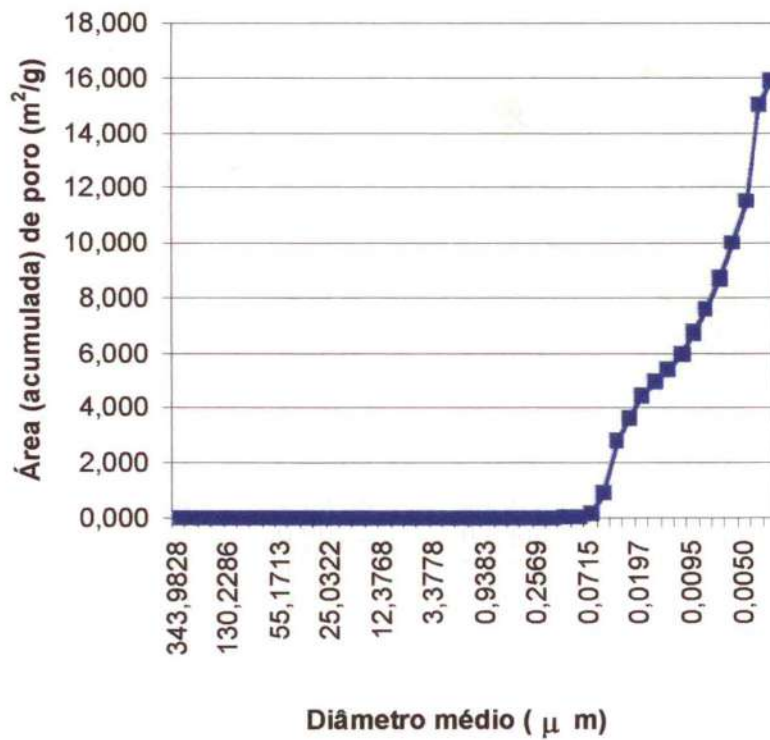


Figura 33 Área acumulada de poro x diâmetro médio da amostra 5T30

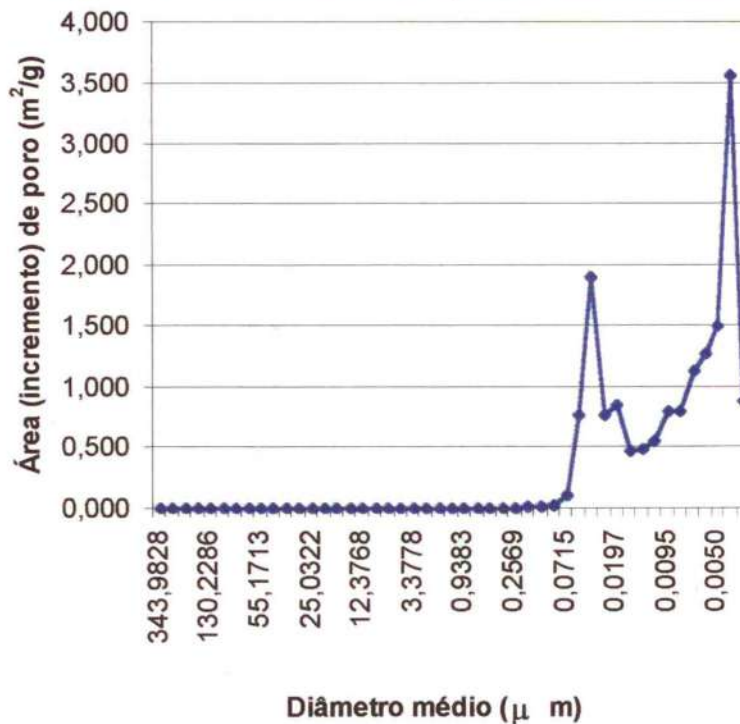


Figura 34 Incremento de área de poro x diâmetro médio da amostra 5T30

Tabela 25 Porosidade da amostra 7T35

Diâmetro médio do poro(μm)	Volume (acumulado) de mercúrio (ml/g)	Volume (incremento) de mercúrio (ml/g)	Área (acumulada) de poro (m^2/g)	Área (incremento) de poro (m^2/g)
343,9828	0,0000	0,0000	0,000	0,000
289,2991	0,0006	0,0006	0,000	0,000
205,5670	0,0009	0,0003	0,000	0,000
163,1871	0,0010	0,0001	0,000	0,000
130,2286	0,0011	0,0001	0,000	0,000
103,1257	0,0012	0,0001	0,000	0,000
88,5472	0,0012	0,0001	0,000	0,000
70,3324	0,0013	0,0001	0,000	0,000
55,1713	0,0014	0,0000	0,000	0,000
47,1673	0,0014	0,0001	0,000	0,000
38,6884	0,0015	0,0000	0,000	0,000
30,6686	0,0015	0,0000	0,000	0,000
25,0322	0,0016	0,0000	0,000	0,000
19,7597	0,0016	0,0001	0,000	0,000
16,0155	0,0017	0,0000	0,000	0,000
14,8741	0,0017	0,0000	0,000	0,000
12,3768	0,0018	0,0001	0,000	0,000
8,9769	0,0019	0,0001	0,000	0,000
6,4751	0,0019	0,0000	0,000	0,000
4,6497	0,0019	0,0000	0,000	0,000
3,3603	0,0019	0,0000	0,000	0,000
2,4543	0,0019	0,0000	0,000	0,000
1,7934	0,0024	0,0005	0,001	0,001
1,2992	0,0025	0,0001	0,002	0,000
0,9430	0,0027	0,0001	0,002	0,001
0,6832	0,0029	0,0003	0,004	0,002
0,4950	0,0033	0,0003	0,006	0,003
0,3578	0,0038	0,0005	0,012	0,006
0,2590	0,0045	0,0007	0,023	0,011
0,1881	0,0053	0,0009	0,042	0,019
0,1362	0,0069	0,0015	0,087	0,045
0,0986	0,0125	0,0056	0,313	0,227
0,0715	0,0250	0,0125	1,012	0,698
0,0518	0,0329	0,0079	1,625	0,613
0,0376	0,0401	0,0072	2,390	0,764
0,0272	0,0439	0,0039	2,957	0,567
0,0197	0,0475	0,0036	3,688	0,731
0,0153	0,0493	0,0018	4,161	0,473
0,0130	0,0506	0,0013	4,560	0,399
0,0112	0,0521	0,0014	5,077	0,516
0,0095	0,0544	0,0023	6,028	0,952
0,0081	0,0560	0,0016	6,835	0,807
0,0069	0,0580	0,0020	7,979	1,143
0,0058	0,0600	0,0020	9,382	1,403
0,0049	0,0621	0,0021	11,057	1,675
0,0039	0,0655	0,0034	14,519	3,462
0,0032	0,0662	0,0007	15,421	0,902

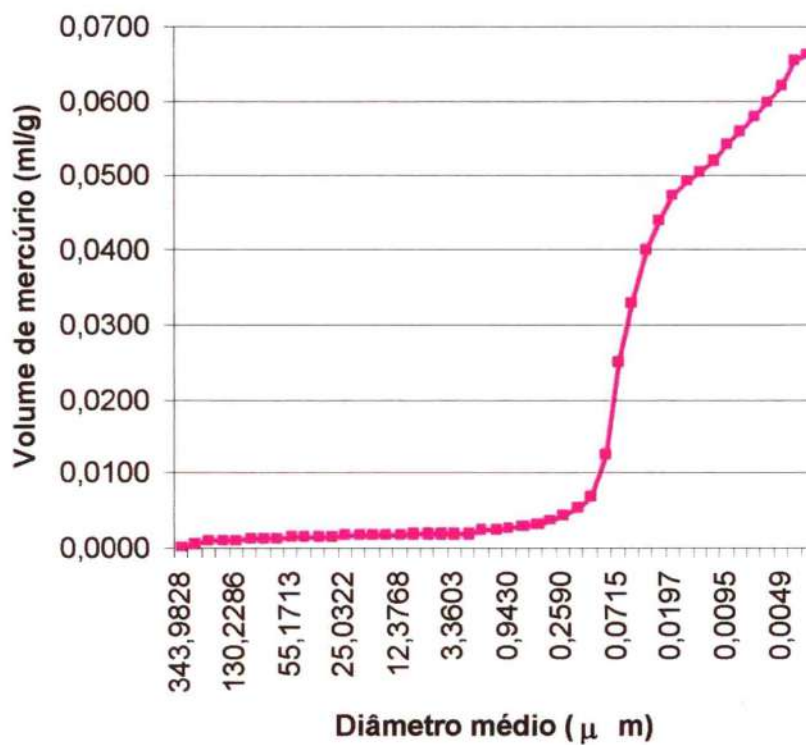


Figura 35 Volume de mercúrio x diâmetro médio de poro da amostra 7T35

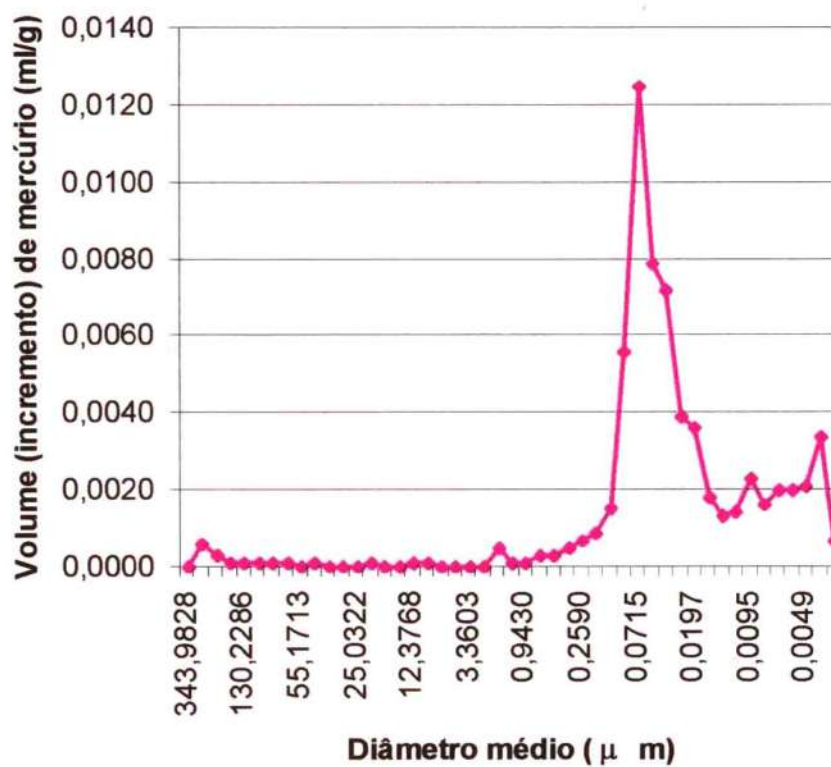


Figura 36 Incremento de volume de mercúrio x diâmetro médio da amostra 7T35

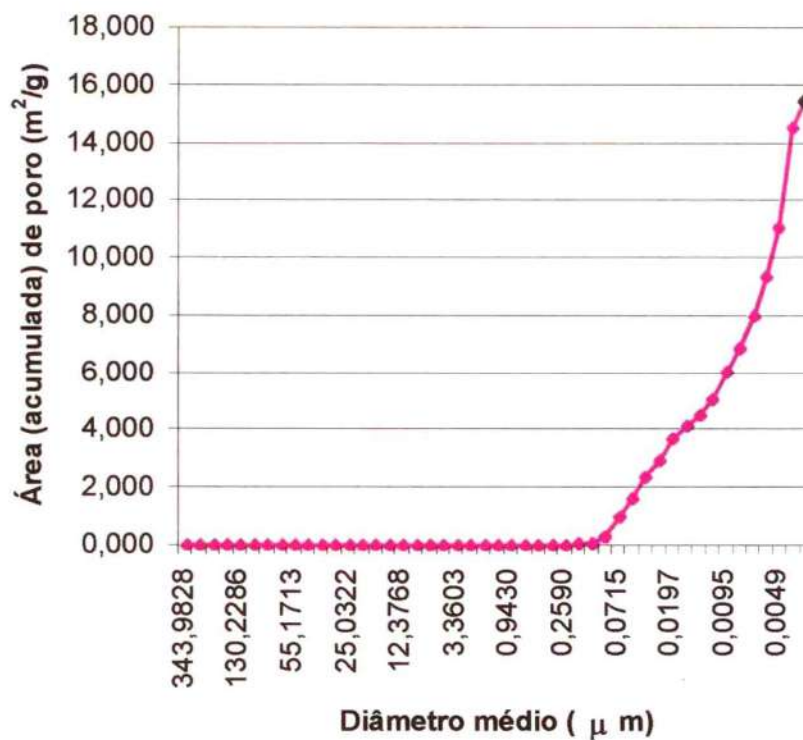


Figura 37 Área acumulada de poro x diâmetro médio de poro da amostra 7T35

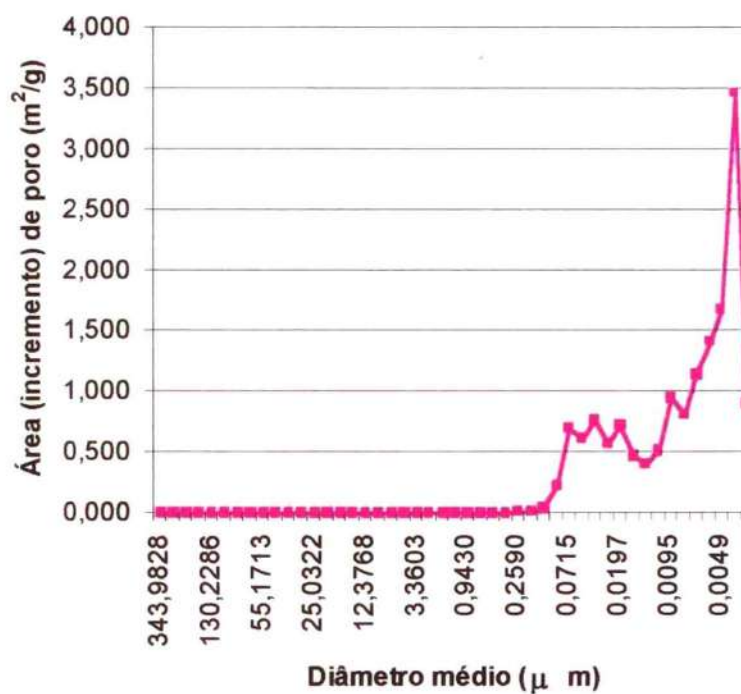


Figura 38 Incremento de área de poro x diâmetro médio da amostra 7T35

Tabela 26 Porosidade da amostra 5T55

Diâmetro médio do poro(μm)	Volume (acumulado) de mercúrio (ml/g)	Volume (incremento) de mercúrio (ml/g)	Área (acumulada) de poro (m^2/g)	Área (incremento) de poro (m^2/g)
344,1898	0,0000	0,0000	0,000	0,000
289,8496	0,0004	0,0004	0,000	0,000
207,0200	0,0006	0,0003	0,000	0,000
164,4938	0,0008	0,0002	0,000	0,000
130,6660	0,0010	0,0002	0,000	0,000
103,6252	0,0011	0,0001	0,000	0,000
88,7165	0,0012	0,0001	0,000	0,000
70,1551	0,0013	0,0001	0,000	0,000
55,2390	0,0013	0,0001	0,000	0,000
47,1968	0,0014	0,0001	0,000	0,000
38,7024	0,0014	0,0001	0,000	0,000
30,7153	0,0015	0,0001	0,000	0,000
25,0484	0,0016	0,0001	0,000	0,000
19,7631	0,0018	0,0002	0,000	0,000
16,0136	0,0018	0,0001	0,000	0,000
14,8757	0,0019	0,0001	0,000	0,000
12,3774	0,0021	0,0002	0,000	0,000
8,9776	0,0024	0,0003	0,000	0,000
6,4862	0,0024	0,0000	0,000	0,000
4,6800	0,0024	0,0000	0,000	0,000
3,3960	0,0024	0,0001	0,000	0,000
2,4600	0,0027	0,0003	0,001	0,000
1,7825	0,0033	0,0006	0,002	0,001
1,2956	0,0034	0,0002	0,003	0,001
0,9406	0,0038	0,0003	0,004	0,001
0,6826	0,0042	0,0004	0,006	0,002
0,4949	0,0048	0,0006	0,011	0,005
0,3533	0,0057	0,0010	0,022	0,011
0,2540	0,0073	0,0015	0,046	0,024
0,1866	0,0092	0,0020	0,088	0,042
0,1351	0,0122	0,0030	0,176	0,087
0,0987	0,0180	0,0058	0,412	0,236
0,0715	0,0293	0,0113	1,043	0,631
0,0518	0,0392	0,0099	1,809	0,766
0,0375	0,0495	0,0103	2,906	1,097
0,0272	0,0550	0,0055	3,719	0,813
0,0197	0,0596	0,0045	4,641	0,922
0,0153	0,0617	0,0021	5,196	0,555
0,0130	0,0636	0,0019	5,794	0,598
0,0112	0,0655	0,0019	6,466	0,672
0,0095	0,0679	0,0024	7,475	1,009
0,0081	0,0700	0,0021	8,528	1,053
0,0069	0,0726	0,0026	10,037	1,510
0,0058	0,0749	0,0022	11,572	1,535
0,0049	0,0771	0,0023	13,411	1,838
0,0039	0,0811	0,0039	17,398	3,988
0,0032	0,0821	0,0011	18,744	1,346

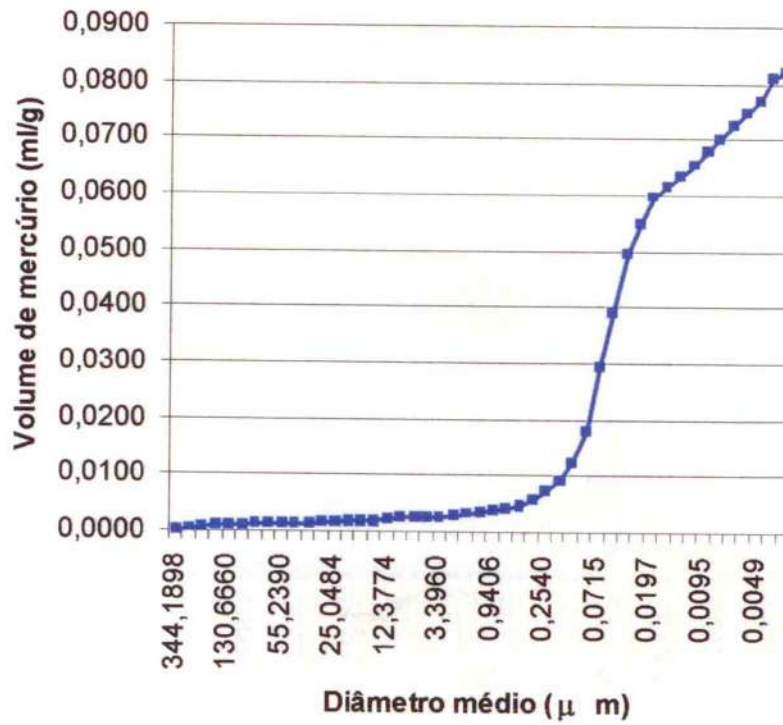


Figura 39 Volume de mercúrio x diâmetro médio da amostra 5T55

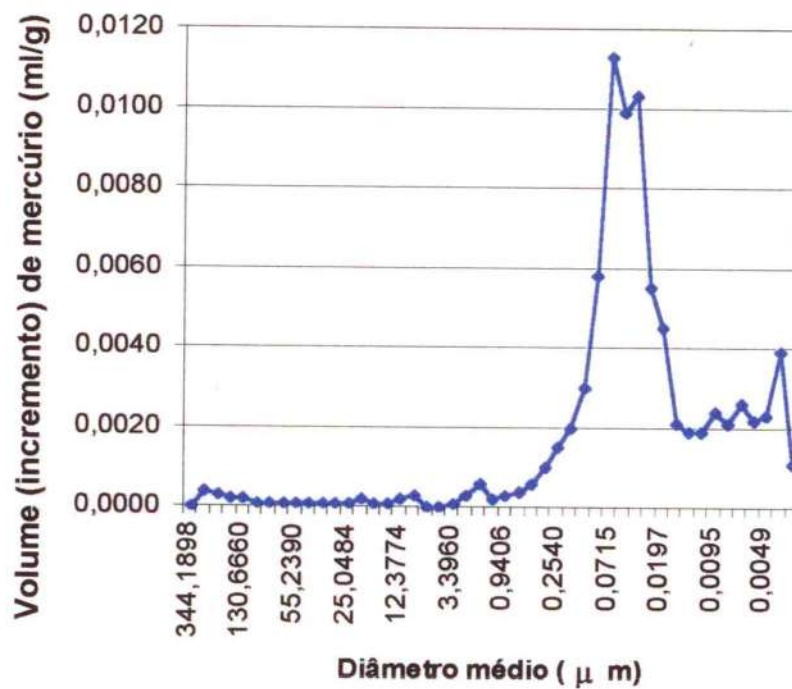


Figura 40 Incremento de volume de mercúrio x diâmetro médio da amostra 5T55

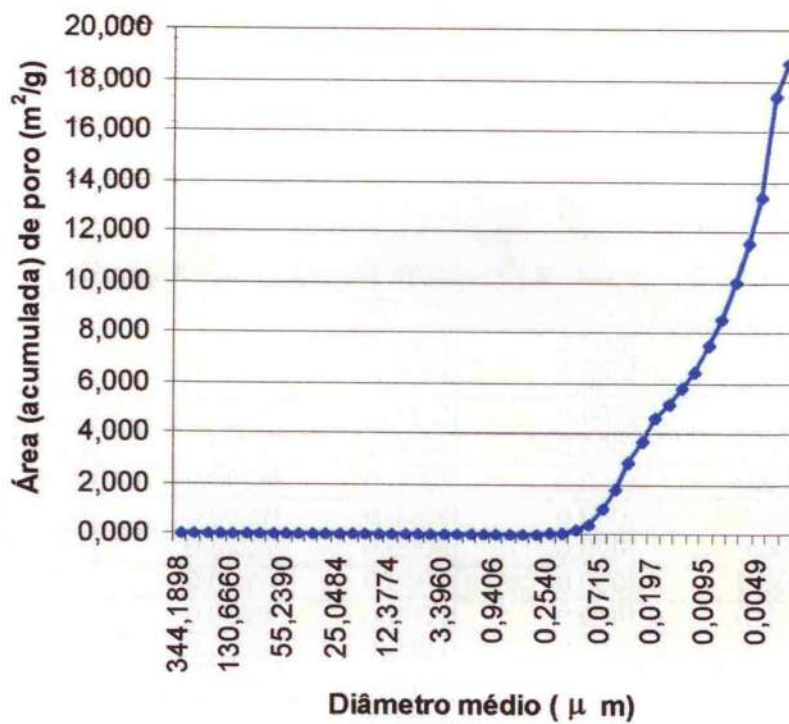


Figura 41 Área acumulada de poro x diâmetro médio de poro da amostra 5T55

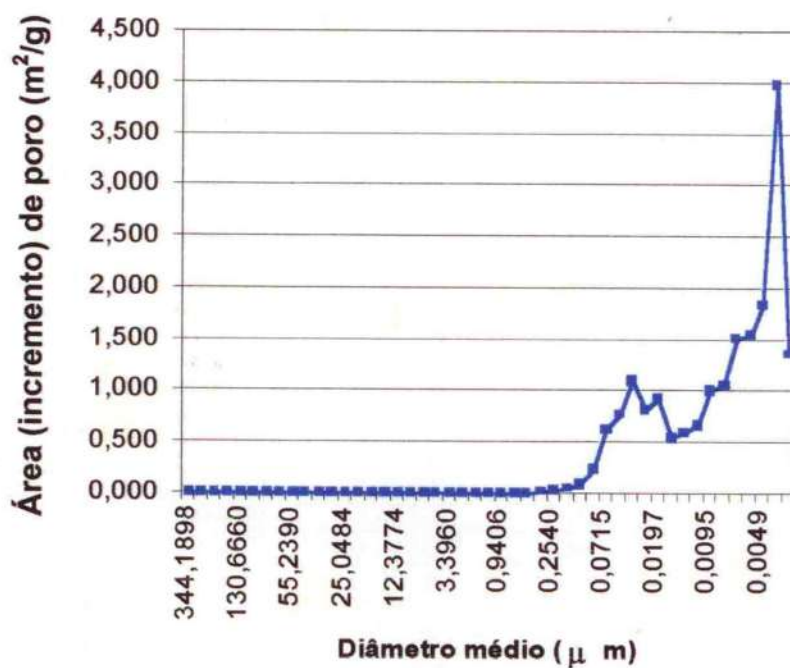


Figura 42 Incremento de área de poro x diâmetro médio da amostra 5T55

Tabela 27 Porosidade da amostra 7T60

Diâmetro médio do poro(μm)	Volume (acumulado) de mercúrio (ml/g)	Volume (incremento) de mercúrio (ml/g)	Área (acumulada) de poro (m^2/g)	Área (incremento) de poro (m^2/g)
344,1898	0,0000	0,0000	0,000	0,000
289,8496	0,0001	0,0001	0,000	0,000
207,0200	0,0013	0,0012	0,000	0,000
164,4938	0,0017	0,0004	0,000	0,000
130,6660	0,0020	0,0003	0,000	0,000
103,6252	0,0022	0,0002	0,000	0,000
88,7165	0,0025	0,0003	0,000	0,000
70,1551	0,0027	0,0003	0,000	0,000
55,2390	0,0028	0,0001	0,000	0,000
47,1968	0,0029	0,0001	0,000	0,000
38,7024	0,0031	0,0001	0,000	0,000
30,7153	0,0033	0,0002	0,000	0,000
25,0484	0,0034	0,0001	0,000	0,000
19,7631	0,0036	0,0002	0,000	0,000
16,0136	0,0036	0,0001	0,000	0,000
14,8757	0,0038	0,0001	0,000	0,000
12,3774	0,0041	0,0003	0,000	0,000
8,9776	0,0046	0,0005	0,001	0,000
6,4718	0,0046	0,0000	0,001	0,000
4,6597	0,0046	0,0000	0,001	0,000
3,3999	0,0046	0,0000	0,001	0,000
2,4762	0,0046	0,0000	0,001	0,000
1,7915	0,0050	0,0003	0,001	0,001
1,3007	0,0055	0,0005	0,003	0,001
0,9430	0,0060	0,0006	0,005	0,002
0,6826	0,0069	0,0009	0,010	0,005
0,4952	0,0086	0,0017	0,024	0,014
0,3558	0,0110	0,0025	0,052	0,028
0,2569	0,0132	0,0022	0,086	0,034
0,1873	0,0152	0,0020	0,128	0,042
0,1354	0,0178	0,0026	0,204	0,077
0,0988	0,0227	0,0049	0,404	0,199
0,0716	0,0286	0,0058	0,730	0,327
0,0519	0,0342	0,0057	1,168	0,438
0,0375	0,0403	0,0060	1,811	0,642
0,0272	0,0435	0,0033	2,292	0,481
0,0197	0,0467	0,0032	2,943	0,651
0,0153	0,0486	0,0019	3,431	0,488
0,0130	0,0501	0,0015	3,893	0,462
0,0112	0,0518	0,0017	4,494	0,602
0,0095	0,0540	0,0022	5,413	0,919
0,0081	0,0561	0,0021	6,443	1,030
0,0069	0,0585	0,0025	7,885	1,442
0,0058	0,0605	0,0020	9,256	1,371
0,0050	0,0623	0,0018	10,727	1,471
0,0039	0,0657	0,0034	14,181	3,454
0,0032	0,0668	0,0010	15,457	1,276

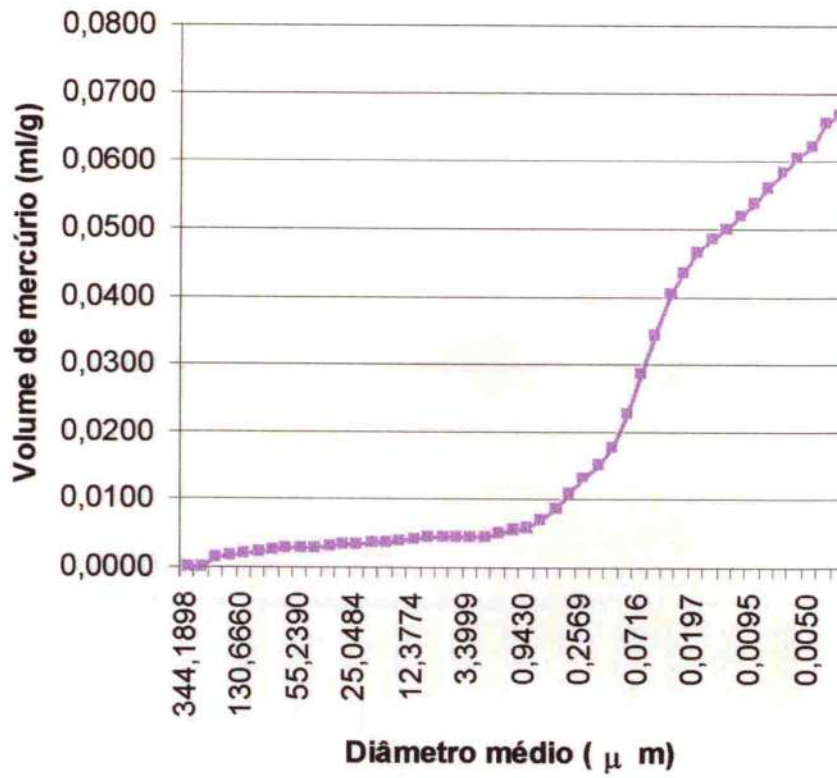


Figura 43 Volume de mercúrio x diâmetro médio de poro da amostra 7T60

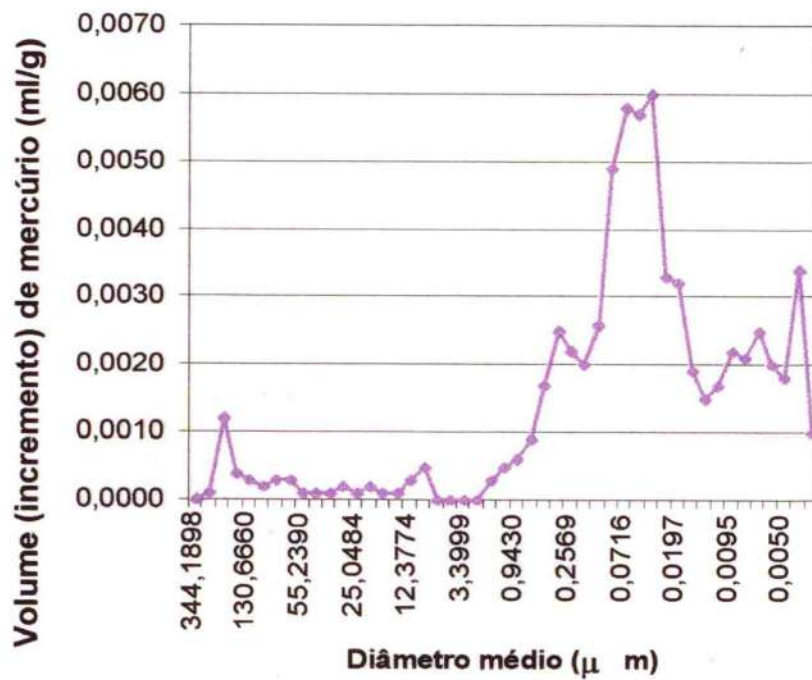


Figura 44 Incremento de volume de mercúrio x diâmetro de poro da amostra 7T60

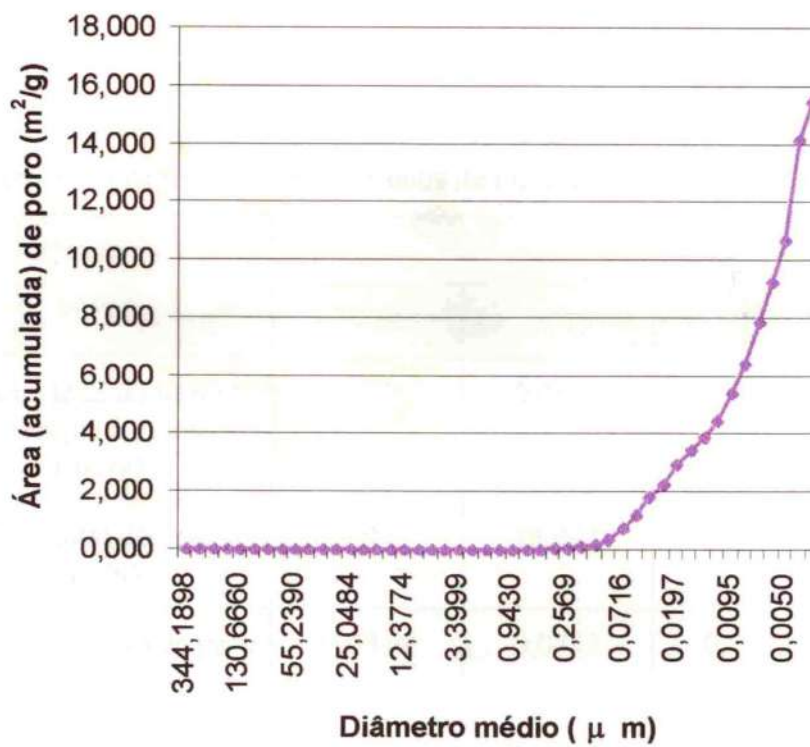


Figura 45 Área acumulada de poro x diâmetro médio da amostra 7T60

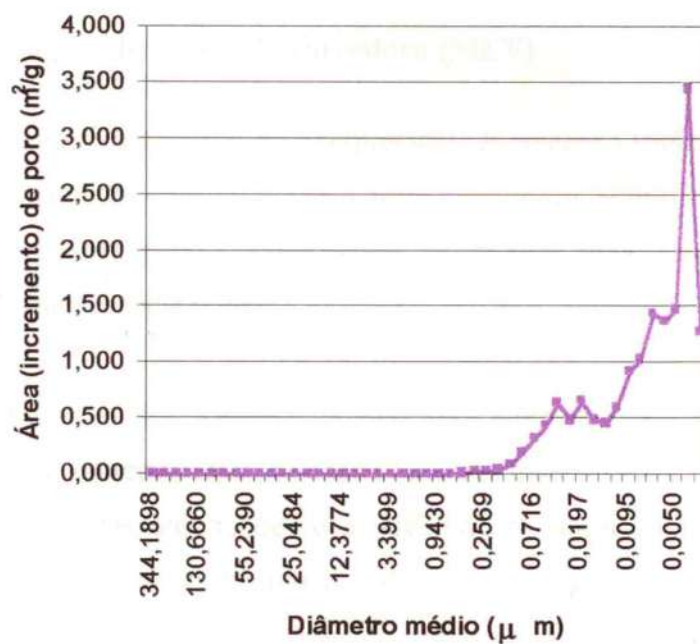


Figura 46 Incremento de área de poro x diâmetro médio da amostra 7T60

Tabela 28 Quadro resumo dos ensaios de intrusão de mercúrio

Dados do ensaio	Amostras			
	5T30	7T35	5T55	7T60
Volume total de intrusão em relação à amostra (mL/g)	0,0635	0,0662	0,0821	0,0668
Área total de poro (m ² /g)	15,942	15,421	18,744	15,457
Diâmetro médio de poro (volume) (µm)	0,0340	0,0432	0,0412	0,0455
Diâmetro médio de poro (área) (µm)	0,0070	0,0065	0,0068	0,0064
Média do diâmetro de poro (4V/A) (µm)	0,0159	0,0172	0,0175	0,0173
Volume usado (%)	42	39	53	30

3.5.2.7 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

É uma técnica analítica baseada na interpretação de imagens tridimensionais, formadas a partir da passagem de elétrons sobre a superfície de um sólido e cuja magnitude dos aumentos conseguidos, permite observações de detalhe, impossíveis de serem obtidas por técnicas de microscopia óptica⁴²².

De acordo com a mecânica quântica, os elétrons a alta velocidade tornam-se como uma onda, tendo um comprimento de onda que é inversamente proporcional à sua velocidade. As grandes ampliações e o poder de resolução desses microscópios são consequência de pequenos comprimentos de onda dos feixes de elétrons. A superfície da amostra examinada é varrida por um feixe de elétrons, o qual é refletido ou

⁴²² VIEIRA, S. R. S. S., **Concretos comum e de alto desempenho: análise do comportamento através da microscopia eletrônica de varredura**, 40^o Congresso Brasileiro do Concreto, Rio de Janeiro, 1998.

retroespalhado e coletado pelos detetores, sendo então, mostrado em um tubo de raio catódico (similar a tela de uma TV), numa mesma taxa de varredura. A imagem que aparece na tela, que pode ser fotografada, representa a superfície característica da amostra. Para aproveitar melhor o feixe retroespalhado, para produzir imagens da amostra examinada, é importante que a superfície seja muito bem polida. Em MEV os sinais de maior interesse referem-se usualmente às imagens de elétrons secundários (SE) e elétrons retroespalhados (BSE). Os elétrons retroespalhados (BSE) respondem bem ao contraste composicional ou por número atômico, quando há interações amostra-feixe de elétrons⁴²³. Diz-se que a quantidade de elétrons retroespalhados cresce com o aumento do número atômico (Z) e existe a relação de quanto maior o brilho na reflexão, maior é o número atômico. Desse modo, é possível a individualização de fases através de contraste de tons de cinza, em função do número atômico médio (GOLDSTEIN (1992) *et al.* MELO). Os elétrons secundários (SE) possibilitam a visualização da topografia da amostra e não são sensitivos ao número atômico comparado aos BSE. Assim, os SE são mais apropriados para exame de amostras fraturadas.

As amostras foram obtidas a partir das amostras utilizadas no ensaio de resistência à compressão. O estudo é composto de duas etapas: na primeira, foram preparadas amostras constituídas por um agregado e região próxima, para avaliar a microestrutura da zona de transição; na segunda, composta por dois agregados, permitiu estudar possível interconexão entre as zonas de transição. Nas Figuras 47 à 50 estão apresentadas a primeira etapa desse estudo e nas Figuras 51 à 54, a segunda etapa.

⁴²³ MELO, A. B., *Influência da cura térmica (vapor) sob pressão atmosférica no desenvolvimento da microestrutura dos concretos estruturais de cimento Portland*, Exame de qualificação de doutorado, São Carlos, 1999.



Figura 47 Traço 5T30: Interface pasta/agregado; Aumento 350x

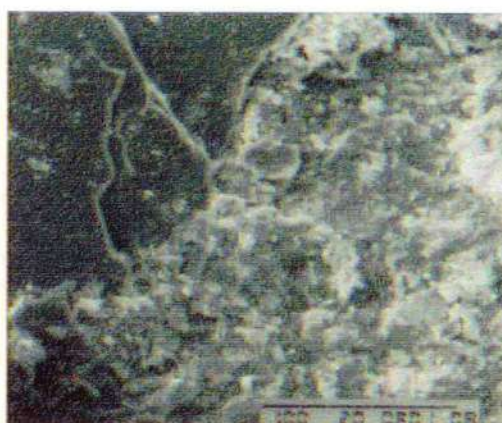


Figura 48 Traço 7T35: Interface pasta/agregado; sem fissura; Aumento 500x



Figura 49 Traço 5T55: Interface pasta/agregado, com fissura; Aumento 1000x.



Figura 50 Traço 7T60: Microfissuras na pasta; Aumento 500x.



Figura 51 Traço 5T30: Interface pasta/agregado; Aumento 750x.



Figura 52 Traço 5T30: Região entre dois agregados, sem interconexão; Aumento 200x.



Figura 53 Traço 5T55: Região entre dois agregados, com microfissura; Aumento 200x.



Figura 54 Traço 5T55: Região entre agregados, com microfissuras; Aumento 100x.

CAPÍTULO IV

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Resistência à compressão

Os resultados obtidos (vide Tabela 15) estão apresentados na Figura 55 que uma vez mais mostra que a relação água/cimento é o fator mais importante para a resistência à compressão do concreto. Quanto maior a relação a/c, menor a resistência à compressão axial. Porém, a resistência de ligação da interface pasta/agregado não parece ter grande influência, pois tem-se concreto 5T55 com 45% de volume de agregado com resistência próxima ao 5T30 de 70%. Também o concreto de traço 7T35, com 65% de volume de agregado, apresentou resistência superior ao de apenas 40% de volume de agregado em relação ao volume total de concreto.

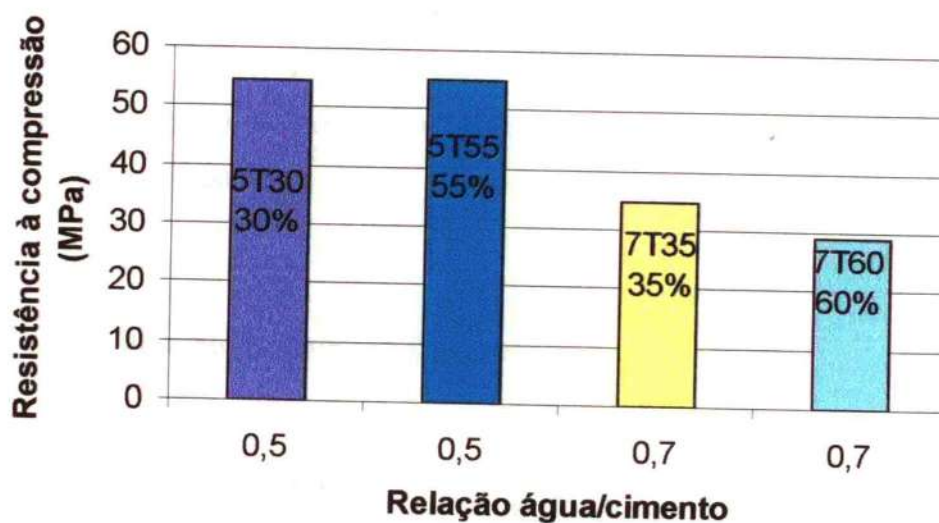


Figura 55 Comparativo da resistência à compressão em função do volume de pasta e da relação a/c.

Entretanto, quanto maior o número de superfície de fratura, ou seja, presença de agregado, mais dúctil será o comportamento da ruptura. Este fato não foi observado plenamente mas através da análise das Figuras 22 à 25, pode-se dizer que nos traços de maior teor de agregados 5T30 e 7T35, predominou a ruptura cônica (dúctil) enquanto

nos traços 5T55 e 7T60, de menor teor de agregados, predominou a ruptura colunar e por cisalhamento, típicos de materiais mais frágeis.

Em resumo pode-se concluir que neste caso, a relação a/c tem grande influência tendo em vista que, para maiores valores de a/c , há tendência de diminuir a resistência com o aumento do volume de pasta. Isso pode ser um indicativo de que a zona de transição não tem grande influência na resistência, sendo a resistência da pasta o fator determinante. Assim, os agregados têm até efeito benéfico na resistência do concreto quanto maior for a relação a/c e quanto maior a resistência do agregado.

Concordando com os resultados experimentais de SINGH, apresentados no item 1.2.3, na Figura 11, para uma mesma relação a/c , traços com maior volume de agregado apresentaram maior resistência à compressão axial.

Segundo a teoria de Abrams⁴²⁴, somente a qualidade da pasta controla a resistência dos concretos, independente de seu volume. Dos resultados obtidos por Popovics⁴²⁵, concretos com mesma relação a/c , a resistência foi menor quanto maior teor de cimento. A mudança na resistência do concreto foi, em geral, mais rápida quando a mudança na relação a/c foi acompanhada por um aumento no teor de pasta do que quando o teor de pasta é mantido constante.

4.2 Penetração de água sob pressão

Dos resultados apresentados no item 3.5.2.2, observa-se que os concretos com maior volume de pasta apresentam maior profundidade de penetração. Os valores de profundidade de penetração dos traços 7T35, 5T55 e 7T60 correspondem a 9%, 17% e 152% maior em relação ao traço 5T30, respectivamente.

Das Figuras 56 e 57, pode-se concluir que a relação a/c também é fator de maior importância na permeabilidade. Além desse, os volumes de pasta e agregado

⁴²⁴ ABRAMS, D.A., **Design of concrete mixtures**. Chicago, Structural Materials Research Laboratory, 1918 (Lewis Institute Bulletin, n.1.) Apud HELENE, P., TERZIAN, P., **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo: PINI; Brasília, DF: SENAI, p. 58, 1992.

⁴²⁵ POPOVICS, S., Analysis of the concrete strength versus water-cement ratio relationship, **ACI Materials Journal**, Vol. 87, N. 5, pp. 517-529, September-October, 1990.

influenciam de maneira secundária. Isto pode ser observado comparando-se os traços 5T30 (30% de volume de pasta) com 5T55 (55% de volume de pasta) e 7T35 (35%) com 7T60 (60%).

As amostras com maior volume de pasta, conseqüentemente menor teor de agregado, sempre apresentaram maior profundidade de penetração de água. Isto pode ser um indicativo de que a zona de transição pasta/agregado não tem influência significativa na permeabilidade do concreto.

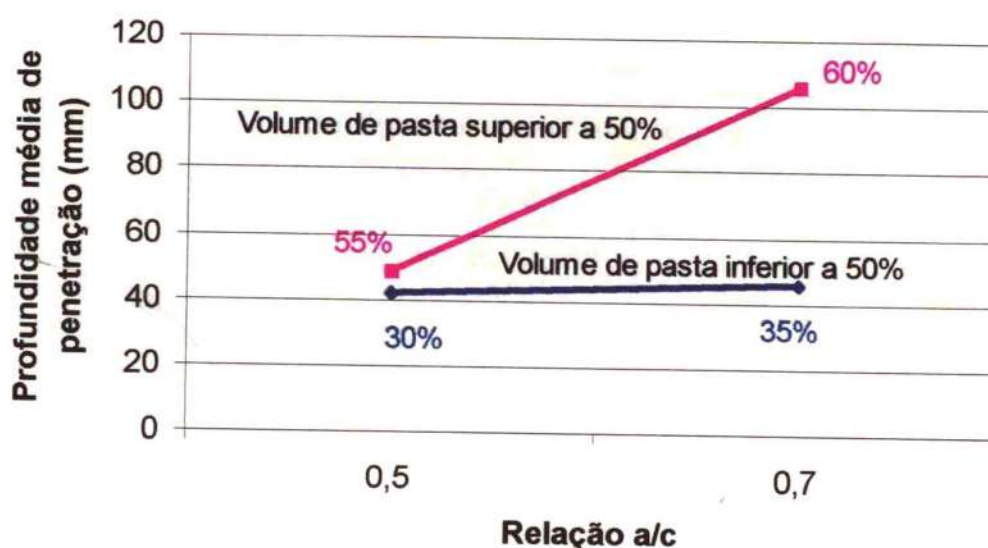


Figura 56 Comparativo das profundidades de penetração de água para os concretos ensaiados em função de a/c e do volume relativo de pasta por m³.

Segundo os critérios de classificação de concretos da norma DIN 1048 comentada no item 1.3, os concretos 5T30, 7T35 e 5T55 podem ser classificados como:

- Impermeáveis à água;
- Resistentes ao gelo/degelo;
- Resistentes à água do mar.

Enquanto o concreto 7T60 seria classificado como:

- Permeável à água;
- Sensível ao gelo/degelo;
- Sensível à água do mar.

Essa classificação também demonstra que a relação água/ cimento predomina em primeiro lugar, seguida pelo teor de pasta em volume que, ao crescer acima de 50%, reduz a capacidade dos concretos de alta relação a/c resistirem ao meio ambiente.

A partir da Tabela 7 apresentada no item 1.3, pode-se calcular o coeficiente de permeabilidade ou a resistência à penetração para os traços 5T30, 7T35, 5T55 e 7T60, com os resultados mostrados na Tabela 29:

Tabela 29 Avaliação do coeficiente de permeabilidade ou resistência à penetração das amostras 5T30, 7T35, 5T55 e 7T60

Pesquisadores	Coeficiente e resistência à penetração dos concretos			
	5T30*	7T35*	5T55*	7T60*
Fagerlund: resistência à penetração	$m=54,42 \times 10^3$ h/m ²	$m=45,37 \times 10^3$ h/m ²	$m=39,98 \times 10^3$ h/m ²	$m=8,54 \times 10^3$ h/m ²
Comparativo entre as amostras	adotada como referência	17% inferior em relação a 5T30	26% inferior em relação a 5T30	84% inferior em relação a 5T30
Vuorinen: coeficiente de permeabilidade	$k=3,06 \times 10^{-7}$ m/h**	$k=3,67 \times 10^{-7}$ m/h**	$k=4,17 \times 10^{-7}$ m/h**	$k=19,51 \times 10^{-7}$ m/h**
Comparativo entre as amostras	adotada como referência	20% superior em relação a 5T30	36% superior em relação a 5T30	537% superior em relação a 5T30

* Foi considerada a profundidade média de penetração;

** Foi adotada coluna hidráulica correspondente a 0,3 MPa, ou seja, 30 m.c.a, obtida pela média ponderada.

Da Figura 57, também pode-se observar a influência dos volumes de pasta e agregado, comparando-se os concretos 5T30, com 30% de volume de pasta e 5T55, com 55% de volume de pasta, de mesma relação a/c. A amostra com maior volume de pasta, conseqüentemente menor teor de agregado, apresentou menor resistência à penetração e maior coeficiente de permeabilidade. Este também pode ser um indicativo de que a zona de transição não contribui de maneira significativa para a permeabilidade do concreto.

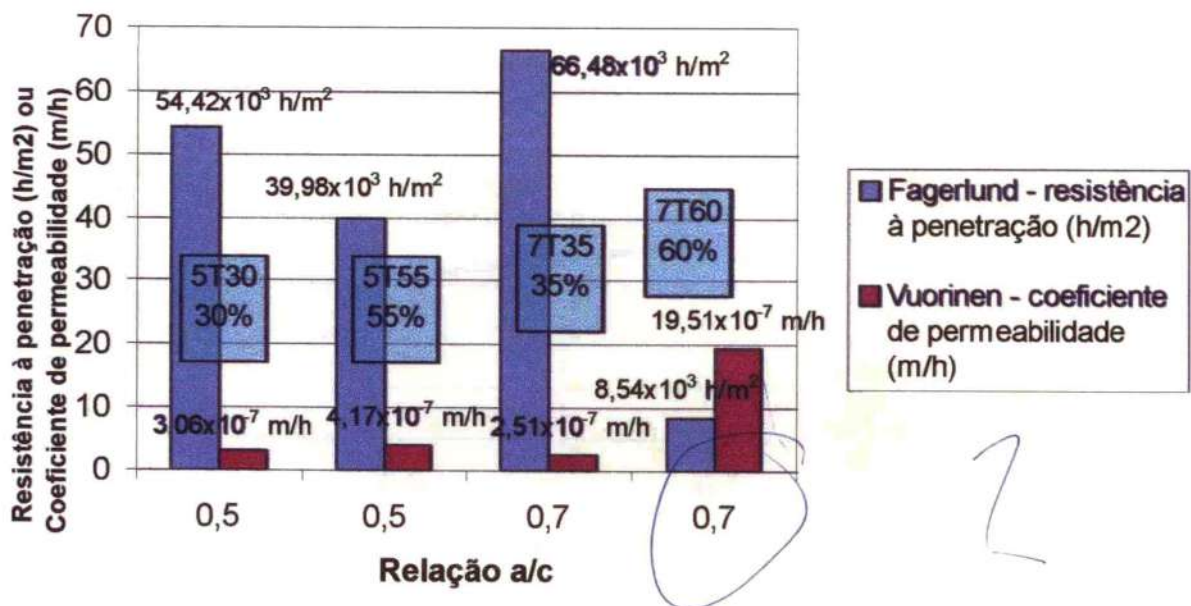


Figura 57 Comparativo entre os coeficientes de permeabilidade e resistência à penetração dos concretos.

4.3 Absorção de água por capilaridade

Das Figura 28 apresentada no item 3.5.2.3 e Figura 58, pode-se observar que o traço 7T60, o qual tem maior volume de pasta, apresentou maior absorção de água por capilaridade, concordando com o que foi apresentado no item 1.4.1.

A Figura 58 também indica que a relação a/c pode não ter influência significativa na capilaridade do concreto. Isto é observado comparando-se as amostras 5T55 (55% de volume de pasta) com 7T35 (35% de volume de pasta). Assim, o volume de pasta parece ser os fator determinante. Quanto maior o volume de pasta, maior a capilaridade do concreto.

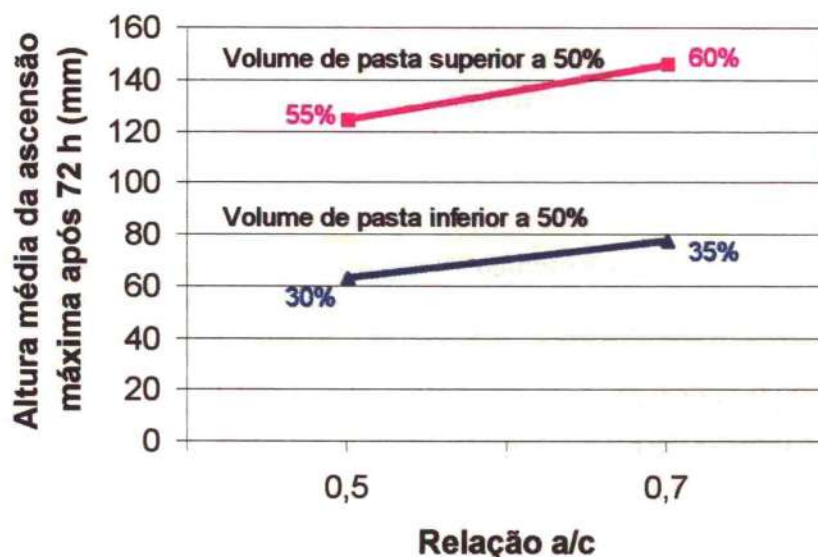


Figura 58 Altura da ascensão capilar máxima após 72 h de ensaio em função da relação a/c e do volume relativo de pasta por m^3 .

Também a partir das equações 8 e 10, apresentadas no item 1.4, tem-se que o raio capilar e coeficiente de capilaridade são maiores em concretos com maior volume de pasta. Os raios capilares calculados estão apresentados na Tabela 30.

Tabela 30 Raio capilar e coeficiente de capilaridade calculados

Propriedades do traço	5T30	7T35	5T55	7T60
L*	6,25	8,25	12,4	14,6
r (μm)	$5,23 \times 10^{-4}$	$9,12 \times 10^{-4}$	$2,06 \times 10^{-3}$	$2,86 \times 10^{-3}$
r (nm)	0,523	0,912	2,06	2,86
p [†] (m^3)	$4,55 \times 10^{-5}$	$9,93 \times 10^{-5}$	$1,97 \times 10^{-4}$	$2,72 \times 10^{-4}$
kc (m/s)	$1,14 \times 10^{-3}$	$2,48 \times 10^{-3}$	$4,94 \times 10^{-3}$	$6,79 \times 10^{-3}$

* O valor de L corresponde ao valor médio da altura da ascensão capilar máxima obtida após 72 horas de ensaio;

† O valor de p corresponde ao valor médio da quantidade de água absorvida após 72 horas de ensaio.

4.4 Penetração de íons cloreto

Na Tabela 31, as amostras estão classificadas a partir da Tabela 17, apresentada no item 3.5.2.4.

Tabela 31 Classificação das amostras conforme ASTM C1202-91

Amostras	Classificação
5T30	Baixa penetrabilidade de cloretos
7T35	Alta penetrabilidade de cloretos
5T55	Alta penetrabilidade de cloretos
7T60	Alta penetrabilidade de cloretos

Além da relação água/cimento ser o fator determinante para a penetração de íons cloreto no concreto, conforme demonstra a Figura 59, o volume relativo de pasta por m^3 foi determinante no aumento da carga passante. Todos os concretos de elevada relação a/c e de volume relativo de pasta > 50%, foram classificados como altamente penetráveis por cloretos, ou seja, de baixa resistência à penetração de cloretos.

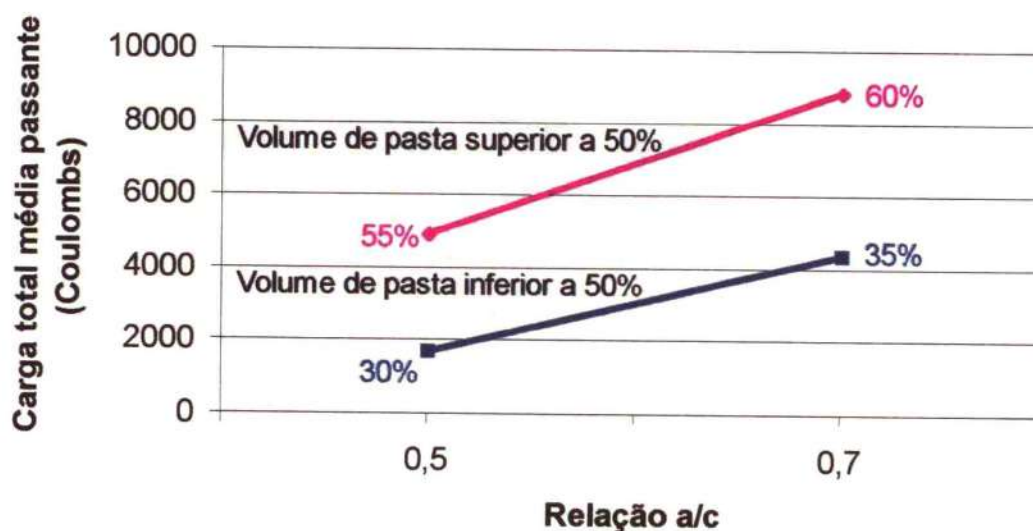


Figura 59 Carga total passante de íons cloreto nos concretos em função da relação a/c e do volume relativo de pasta.

Assim, o volume de pasta parece ter também elevada influência no comportamento do concreto. Quanto maior o volume de pasta, maior a carga passante. Portanto, uma vez mais a esperada influência negativa de uma maior zona de transição (maior teor relativo de agregados), não se confirmou macroscopicamente.

4.5 Porosidade

No item 1.2.1 foi visto que os poros com diâmetros iguais ou superiores a $0,020\ \mu\text{m}$ são importantes para a resistência à compressão. Das Tabelas 24 à 27 observa-se que quanto maior o volume de pasta no concreto, maior o volume de poros com diâmetro superior a $0,020\ \mu\text{m}$. A Figura 60 apresenta graficamente esse comparativo. Na Figura 61 está apresentada a influência da relação a/c no volume de poros superiores à $0,020\ \mu\text{m}$.

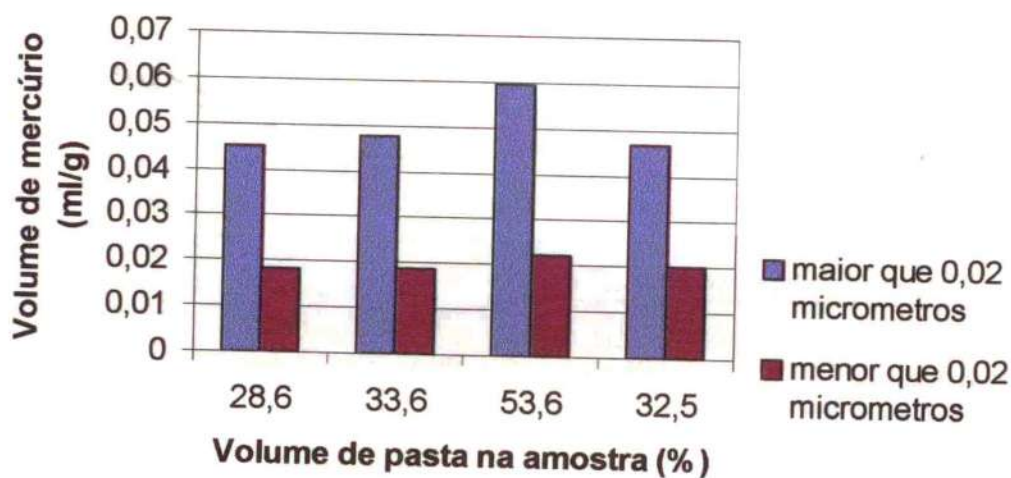


Figura 60 Efeito do volume de pasta no aumento do volume de poros com diâmetro igual ou superior à $0,020\ \mu\text{m}$.

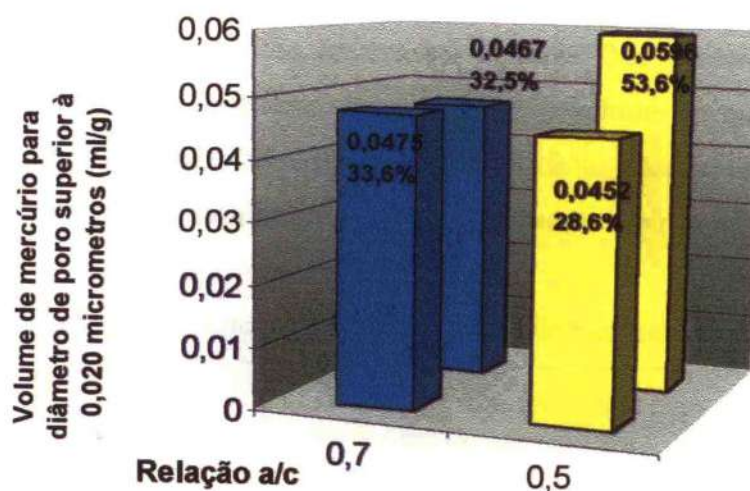


Figura 61 Influência da relação a/c no volume de poros com diâmetro igual ou superior à 0,020 μm .

O volume de pasta também influencia na faixa de maior volume de poro. A partir das Tabelas acima citadas e das Figuras 32, 36, 40 e 44, é possível chegar-se aos resultados apresentados na Tabela 32.

Tabela 32 Comparativo das faixas de poro que representam maior volume

Traços	Caracterização dos poros		
	Faixa de poro com maior volume (μm)	Volume de mercúrio (ml/g)	% correspondente ao volume total de mercúrio/g de amostra
5T30	0,0715 – 0,0153	0,0411	64,7%
7T35	0,0986 – 0,0153	0,0425	64,2%
5T55	0,254 – 0,0153	0,0559	68,1%
7T60	1,3007 – 0,0112	0,0470	70,3%

A Tabela acima demonstra que os concretos com maiores volumes de pasta (5T55 e 7T60) apresentaram maior concentração de poro maiores. Para o concreto 5T30, com menor volume de pasta, houve uma concentração de poros entre 0,0715 e 0,0153 μm . Já para o concreto 7T60, o pico de maior concentração de poro sofreu um deslocamento para a faixa entre 1,3007 a 0,0112 μm .

Conforme apresentado nos itens anteriores, a porosidade desempenha papel importante nas propriedades dos concretos, argamassas e pastas. Dos resultados obtidos no ensaio com o porosímetro de mercúrio, observa-se que o volume de mercúrio intrudido está relacionado com o volume de pasta da amostra. Quanto maior o volume de pasta, maior o volume de mercúrio intrudido. A Tabela 33 apresenta um resumo desses resultados.

Tabela 33 Volume de pasta e de mercúrio intrudido nas amostras ensaiadas

Traços	Características das amostras	
	Volume total de intrusão em relação à amostra (ml/g)	Volume de pasta (%)
5T30	0,0635	28,6
7T35	0,0662	33,6
5T55	0,0821	53,6
7T60	0,0668	32,5

A relação a/c é fator determinante na porosidade do concreto. Segundo estudo de Cook e Hover⁴²⁶, reduzindo a relação a/c em fator de 0,1, tem-se maior efeito na redução do tamanho de poro limiar e na porosidade total do que dobrando o período de cura.

4.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Das imagens obtidas através do microscópio eletrônico de varredura, não foi identificada a zona de transição pasta/agregado característica, mesmo para as amostras com volume de pasta de 60%. Isso talvez seja resultado da utilização de pó calcário, o qual permitiu uma estrutura mais densa nessa região.

Das Figuras 47 à 50 observa-se que os traços 5T30 e 7T35 (com volumes de pasta de 30 e 35%, respectivamente) não apresentaram microfissuras, porém, nos traços 5T55 e 7T60 (55 e 60% de volume de pasta) foram identificadas microfissuras. Tudo indica que essas microfissuras foram resultantes da retração da pasta, como sugere a Figura 50. Também na segunda etapa do estudo, apresentada nas Figuras 51 à 54, fica demonstrado

que os concretos com menor volume de pasta não apresentaram microfissuras significativas, ao contrário do que ocorre com os traços de maior volume de pasta. Entretanto, deve-se salientar que não foi visualizada a interconexão das zonas de transição, mas sim, a presença de microfissuras na pasta presente entre os agregados.

Conforme os modelos de L'Hermite e Pickett para previsão da retração em concretos, apresentados no item 2.2.5.2, os concretos utilizados no presente estudo, com as características apresentadas na Tabela 34 e graficamente na Figura 62, a retração correspondente seria:

Tabela 34 Características do concreto e sua retração

Traço do concreto	Retração	
	L'HERMITE	PICKETT
1:2:3 a/c=0,5 ⇒ Vol. cimento = 11,6% Vol. agregados = 68,8% (30% de pasta)	$\chi_c = 29,49 \times 10^{-4}$ $\chi_i = 9,28 \times 10^{-4}$ $\delta = 1,11 \times 10^{-4}$	$n=1,2 \rightarrow Sc=5,438 \times 10^{-4}$ $n=1,7 \rightarrow Sc=3,037 \times 10^{-4}$
1:2:3 a/c=0,7 ⇒ Vol. cimento = 10,8% Vol. agregados = 64,2% (35% de pasta)	$\chi_c = 30,11 \times 10^{-4}$ $\chi_i = 7,01 \times 10^{-4}$ $\delta = 8,29 \times 10^{-5}$	$n=1,2 \rightarrow Sc=6,4138 \times 10^{-4}$ $n=1,7 \rightarrow Sc=3,837 \times 10^{-4}$
1:0,8:1,0 a/c=0,5 ⇒ Vol. cimento = 21,0% Vol. agregados = 44,7% (55% de pasta)	$\chi_c = 22,27 \times 10^{-4}$ $\chi_i = -2,62 \times 10^{-4}$ $\delta = -1,29 \times 10^{-4}$	$n=1,2 \rightarrow Sc=1,081 \times 10^{-3}$ $n=1,7 \rightarrow Sc=8,036 \times 10^{-4}$
1:0,8:1,0 a/c=0,7 ⇒ Vol. cimento = 18,6% Vol. agregados = 39,6% (60% de pasta)	$\chi_c = 24,11 \times 10^{-4}$ $\chi_i = -5,13 \times 10^{-4}$ $\delta = -2,44 \times 10^{-4}$	$n=1,2 \rightarrow Sc=1,201 \times 10^{-3}$ $n=1,7 \rightarrow Sc=9,336 \times 10^{-4}$

⁴²⁶ COOK, R.A., HOVER, K.C., Mercury porosimetry of hardened cement pastes, **Cement and Concrete Research**, 29, pp. 933-943, 1999.

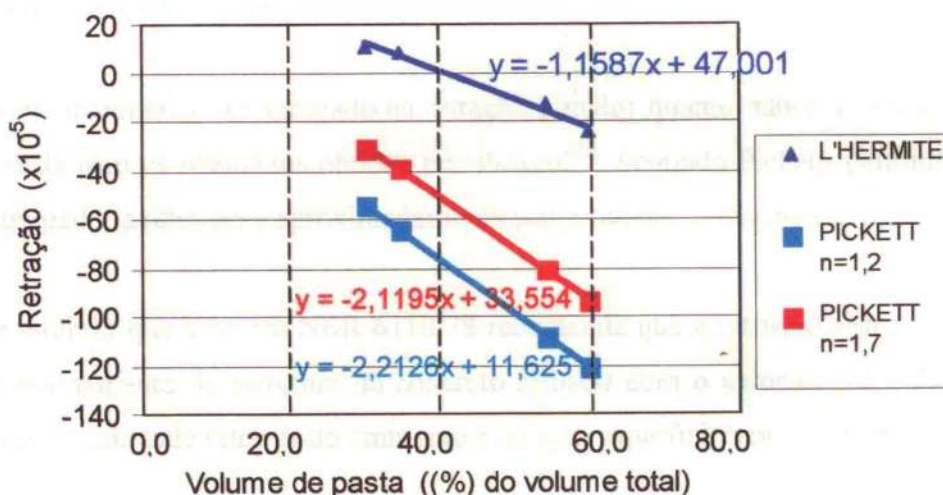


Figura 62 Influência do volume de pasta na retração do concreto

Os valores estimados pelos modelos são concordantes com as imagens obtidas por meio do microscópio eletrônico de varredura. Dos resultados pode-se observar que quanto maior o volume de pasta, maior é a retração resultante no concreto. De acordo com L'HERMITE, a retração é evidenciada em concretos com volume de pasta acima de 41%. Para PICKETT, adotando $n=1,7$, a retração iniciaria com 16% de volume de pasta e para $n=1,2$, com 5% de volume de pasta.

Assim, ao contrário do que afirmam alguns pesquisadores^{427 428 429 430 431} quanto a interconexão das zonas de transição em concretos com menor volume de pasta, ou seja,

⁴²⁷ OLLIVIER, J. P., **Durability of Concrete**, São Paulo, EPUSP, 1998. 129p., Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/192.

⁴²⁸ HOUST, Y.F., SADOUKI, H., WITTMANN, F.H., Influence of aggregate concentration on the diffusion of CO₂ and O₂, **Interfaces in Cementitious Composites**, RILEM International Conference, **Proceedings 18**, Part 2.2, Maso, J.C. Ed., E & FN SPON, Toulouse, 1992.

⁴²⁹ SNYDER, K.A., WINSLOW, D.N., BENTZ, D.P., GARBOCZI, E.J., Interfacial zone percolation in cement-aggregate composites, **Interfaces in Cementitious Composites**, RILEM International Conference, **Proceedings 18**, Part 2.2, Maso, J.C. Ed., E & FN SPON, Toulouse, 1992.

⁴³⁰ WINSLOW, D.N., COHEN, M.D., Percolation and pore structure in mortars and concrete, **Cement and Concrete Research**, Vol. 24, pp. 25-37, 1994.

⁴³¹ BOURDETTE, B., RINGOT, R., OLLIVIER, J.P., Modelling of the transition zone porosity. To be published in **Cement and Concrete Research** Apud OLLIVIER, J.P., **Durability of Concrete**, São Paulo, 1998, p. 20.

com maior volume de agregado, mais uma vez fica demonstrado o efeito benéfico do agregado para o concreto.

Esse efeito benéfico do agregado na retração é maior quanto maior a relação a/c, o que concorda com os resultados obtidos por Pickett⁴³². Segundo Pickett, para um dado teor de agregado, a retração é aproximadamente proporcional à relação a/c.

Vale lembrar que a norma NBR 6118/78 recomenda que a retração seja considerada no dimensionamento da estrutura de concreto armado com o valor de 15 a 25×10^{-5} m/m, segundo a umidade relativa do ambiente e relação superfície/volume da peça.

⁴³² PICKETT, G., Effect of aggregate on shrinkage of concrete and a hypothesis concerning shrinkage, Journal of the American Concrete Institute, Title No. 52-36, January 1956.

CONCLUSÕES

Já em 1979, Grudemo⁴³³ salientou que, para estudar parâmetros em um compósito, é mais relevante a análise das propriedades resistentes das pastas para conhecer o volume e distribuição dos poros que a porosidade total. Isso indica a importância da pasta em um compósito. No presente trabalho observou-se que quanto maior o teor de pasta no concreto, maior a porosidade resultante. Assim sendo, é bem provável que a pasta apresente maior grau de conectividade entre os vazios presentes. Este fato pode justificar a dificuldade de muitos pesquisadores para a extração da água do poro nos concretos, passando-se a estudar água do poro em argamassas e pastas⁴³⁴.

Poros com dimensões maiores que 0,1 μm contribuem para o transporte de massa por difusão, migração iônica, capilaridade e permeabilidade, enquanto que os poros menores influem apenas no processo de difusão gasosa e de difusão e migração iônicas⁴³⁵, conforme apresentado na Figura 63.

⁴³³ GRUDEMO, A., Strength – structure relationships of cement paste materials, Part 1. Methods and basic data for studying phase composition and microstructure, **Swedish Cement and Concrete Research Institute**, Sweden, N. 8, 130 páginas, 1979.

⁴³⁴ OLIVEIRA, C.T.A., **Água do poro de pastas de cimentos de escória**, Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Engenharia, p. 42/43, São Paulo, 2000.

⁴³⁵ MENG, B., Calculation of moisture transport coefficients on the basis of relevant pore structure parameters, **Materials and Structures**, 27, pp. 125-134, 1994.

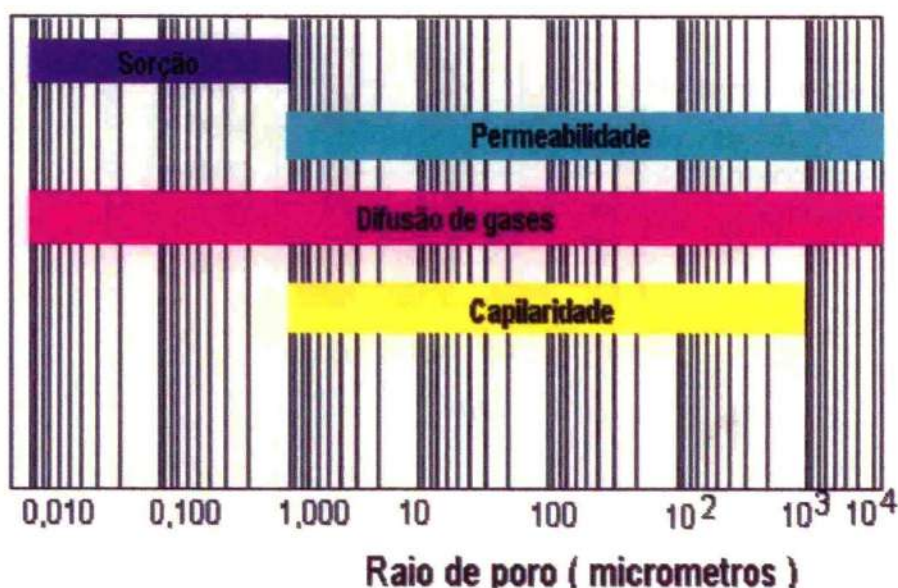


Figura 63 Raios de poro relevantes para diferentes meios de transporte de agentes agressivos (MENG, 1994).

Segundo essa classificação, o traço 5T30, com menor volume de pasta, é mais resistente ao transporte de massa pois, apresenta menor quantidade de poros com dimensões maiores e que mais contribuem no transporte de massa, como mostram a Tabela 35 e Figura 64. Essa observação concorda com os resultados obtidos no programa experimental.

Tabela 35 Comparativo do volume de poros que contribuem para o transporte de massa

Traços	Volume de poro		% do volume de poro $\geq 0,096 \mu\text{m}$
	$\geq 0,096 \mu\text{m}$	$< 0,096 \mu\text{m}$	
	Volume de mercúrio (ml/g)	Volume de mercúrio (ml/g)	
5T30	0,0058	0,0577	9 %
7T35	0,0125	0,0537	19 %
5T55	0,0180	0,0641	22 %
7T60	0,0227	0,0440	34 %

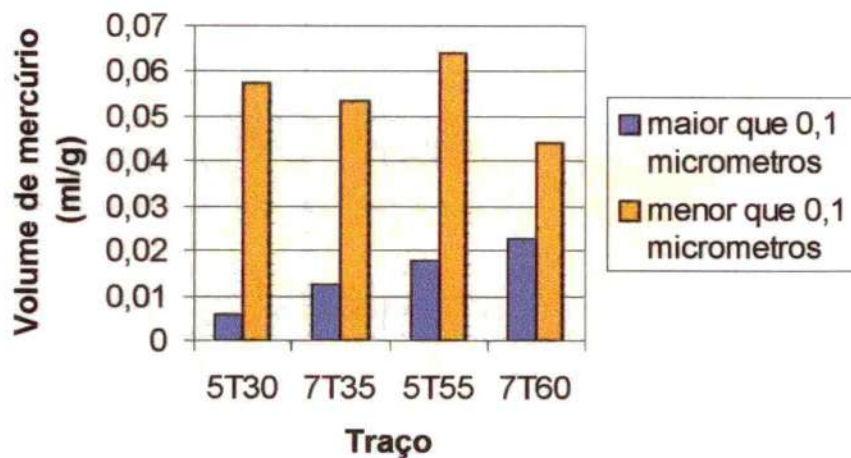


Figura 64 Volume de poros que contribuem para o transporte de massa das amostras ensaiadas.

Os dados da Tabela 35 permitem comparar concretos com mesma relação a/c e volumes de pasta diferentes. Com relação à fração de poros que contribuem para o transporte de massa, pode-se dizer que a qualidade da pasta é fator determinante. Essa qualidade é influenciada, além da relação a/c , pelo volume de pasta no concreto e não apenas na amostra. O traço teórico 7T60 possui maior volume de pasta em relação ao traço 7T35, embora de mesma relação a/c . Entretanto, a amostra ensaiada 7T60 apresentou volume de pasta menor em relação à amostra 7T35, mas mesmo assim, resultou maior quantidade de poros maiores, indicando que além do volume de pasta é fundamental a sua porosidade. Assim, pode-se dizer que concretos com maiores volumes de pasta, apresentam menor resistência ao transporte de massa.

Também Abrams observou que a resistência à compressão do concreto é função da relação a/c , porém, válido apenas para concreto em estado plástico. Concretos com volume de pasta acima de 50% tem maior probabilidade de resultar consistência fluida, o que altera as propriedades da pasta, mesmo que de igual relação a/c .

Segundo a teoria de Powers, concretos com maior volume de pasta resultam em maior volume de compostos não resistentes, quando calculados em função do volume total, conforme demonstra a Tabela 36.

Tabela 36 Compostos resistentes e não resistentes da pasta dos concretos segundo teoria de Powers, com 28 dias.

Compostos	Traço 5T30			Traço 7T35			Traço 5T55			Traço 7T60			
	Volume absoluto (dm ³)	Individual (%)	Total (%)	Volume absoluto (dm ³)	Individual (%)	Total (%)	Volume absoluto (dm ³)	Individual (%)	Total (%)	Volume absoluto (dm ³)	Individual (%)	Total (%)	
Compostos resistentes	Volume de sólidos (28 dias - 67%)	0,35	12,7	0,35	11,8		0,35	23,0		0,35	20,3		
	Volume de água de gel (28 dias - 67%)	0,14	5,1	0,14	4,7		0,14	9,2		0,14	8,1		
	Volume de areia	0,76	27,5	90,6	0,76	25,7	84,5	0,30	19,7	84,2	0,30	17,4	74,4
	Volume de brita	1,14	41,3		1,14	38,5		0,38	25,0		0,38	22,1	
	Volume de cimento anidro	0,11	4,0		0,11	3,7		0,11	7,2		0,11	6,4	
Compostos não resistentes	Volume de ar aprisionado	0,04	1,4	0,04	1,4		0,02	1,3		0,02	1,2		
	Volume de poros	0,04	1,4	9,4	0,04	1,4	15,5	0,04	2,6	15,8	0,04	2,3	25,6
	Volume de água capilar (28 dias - 67%)	0,18	6,5		0,38	12,8		0,18	11,8		0,38	22,1	
Volume total	2,76	100		2,96	100		1,52	100		1,72	100		

A Figura 65 complementa os dados da Tabela 36 e demonstra a influência benéfica do agregado no concreto.

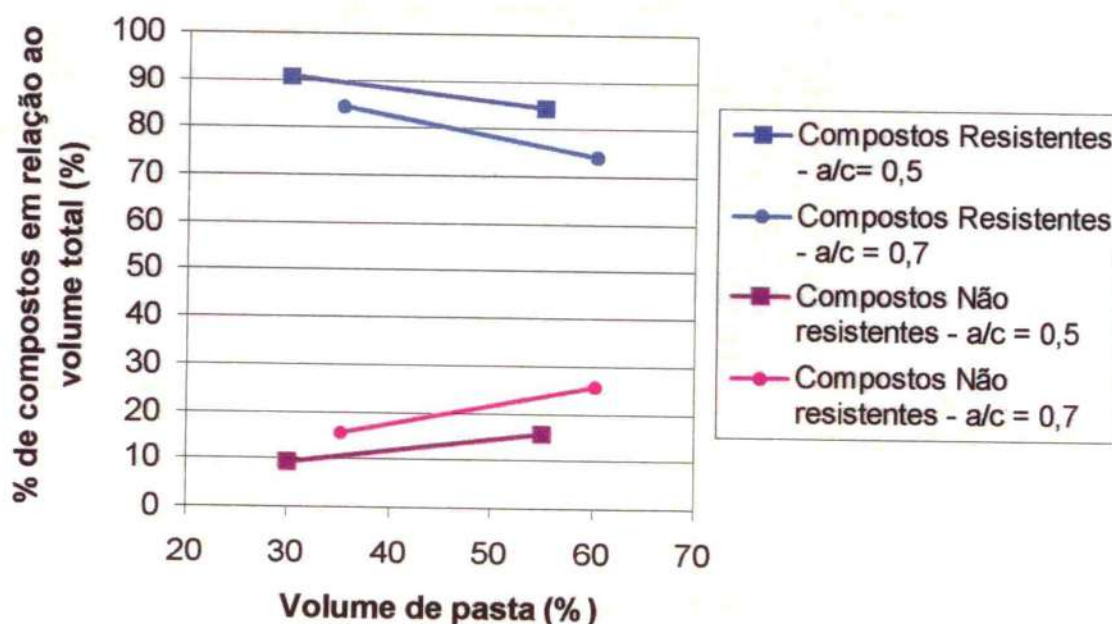


Figura 65 Influência da relação a/c e do volume de pasta nos compostos resistentes e não resistentes da pasta no concreto, com 28 dias.

Quanto menor o teor de agregado no concreto, maior o volume de compostos não resistentes. Assim sendo, mais uma vez observa-se a pouca influência da zona de transição pasta/agregado. Com isso pode-se dizer que a qualidade da pasta é a variável fundamental para as propriedades do concreto, no qual, o aumento de agregado com conseqüente redução da pasta, aumenta a probabilidade de obter-se concretos com melhores propriedades. Deve-se salientar, portanto, que essa influência benéfica do agregado é maior quanto mais alta for a relação a/c.

A análise do concreto a partir da Teoria de Powers tem boa correlação com dados experimentais conforme demonstra a Tabela 37.

Tabela 37 Comparativo da relação volume de poros/ volume de pasta entre a Teoria de Powers e resultados obtidos no estudo.

Dados	Características	5T30	7T35	5T55	7T60
Dados experimentais	Volume de poros (cm ³)	0,48	0,72	0,60	0,55
	% de volume de poro em relação ao volume total	11,64	14,51	14,18	14,94
	Volume total da pasta (cm ³)	1,18	1,67	2,26	1,19
	Vol. poros / Vol. total da pasta	0,41	0,43	0,26	0,46
Teoria de Powers	Volume de poros (cm ³)	0,26	0,46	0,24	0,44
	Volume de pasta (cm ³)	0,86	1,06	0,84	1,04
	Vol. poros / Vol. total da pasta	0,30	0,43	0,29	0,42
% em relação à Teoria de Powers		137	100	111	91

Transferência ao meio

Para divulgação deste trabalho, pretende-se publicar artigos em revistas técnicas especializadas, sendo uma nacional (Revista do IBRACON ou TÉCHNE) e outra internacional. Também está previsto a participação em Congressos e Seminários. Esta divulgação deverá ser concentrada nos anos de 2000 e 2001.

Continuidade dos estudos

Novos estudos deverão consolidar as conclusões obtidas no presente trabalho e abranger outras, mais especificamente, com relação à carbonatação do concreto. Na opinião desta pesquisadora, este ensaio exige um projeto de pesquisa mais detalhado, tendo em vista a necessidade de um procedimento que permita maior sensibilidade na avaliação. A diferença de porosidade entre os concretos faz com que seja necessária a determinação da umidade presente nas amostras no início do ensaio, de maneira a permitir melhor interpretação do avanço da frente de carbonatação.

Outra linha de pesquisa deverá contemplar a realização de estudos com agregados em estado úmido, o que poderá contribuir para a consolidação das conclusões obtidas neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI 318 – 89 Revised 1992: Building code requirements for structural plain concrete, ACI Manual of Concrete Practice, Part 3: Use of Concrete in Building, 14 pp., Detroit, Michigan, 1994.

AASHTO T277/83 – The Rapid Chloride Permeability Test.

ALEXANDER, K.M., WARDLAW, J. and GILBERT, D.J., Aggregate-cement bond, cement paste strength and the strength of concrete, The structure of concrete and its behaviour under load, Eds. Brooks, A.E. and Newman, K., Cement and Concrete Association, London, pp. 59-61, 1965.

ALEXANDER, M. G., Effects of aging on mechanical properties of the interfacial zone between cement paste and rock, **Cement and Concrete Research**, Vol. 24, N.7, 1994.

ALEXANDER, M.G., The effects of ageing on the interfacial transition zone in concrete, **Interfacial Transition Zone in Concrete**, RILEM REPORT 11, Part 3, 9, 1996.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Guide to Durable Concrete: reported by ACI Committee 201. ACI Materials Journal, v.88, n.5, Sept./Oct. 1991. P. 544-82.

ANDRADE, C., **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**, Tradução e adaptação Antonio Carmona e Paulo Helene, São Paulo: PINI, 1992.

ANDRADE, W. P., **CONCRETOS - Ensaios e Propriedades**, São Paulo: PINI, 1997.

ARMAGHANI, J. M., BLOOMQUIST, D. G., Durability specification and ratings for concrete, **Concreto 2000 Economic and durable construction through excellence** , V.1, Design, Materials, Construction, pp. 23-36.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 5733/91 – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial - Especificação.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 5739/94 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos – Método de Ensaio.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 6118/78 (NB-1 da ABNT) – Projeto e Execução de obras de concreto armado.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 7211/83 – Agregado para concreto – Especificação.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 7217/87 - Agregados – Determinação da composição granulométrica.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 7218/87 - Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 7219/87 - Agregados – Determinação do teor de materiais pulverulentos.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 7220/87 - Agregados – Determinação das impurezas orgânicas húmicas em agregado miúdo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 7251/82 - Agregados em Estado Solto – Determinação da Massa Unitária.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 9776/87 - Agregados – Determinação da Massa Específica de Agregados Miúdos por Meio do Frasco de Chapman.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 9778/87 - Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica – Método de ensaio.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 9779/95 - Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade – Método de Ensaio.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 9937/87 - Agregados – Determinação da absorção e da massa específica de agregados graúdos.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 10787/94 - Concreto endurecido – Determinação da penetração de água sob pressão – Método de Ensaio.

ASTM C1202/91 – Standard Test Method for Electrical Indications of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.

BÁGEL', L', ZIVICA, V., Relationship between pore structure and permeability of hardened cement mortars: on the choice of effective pore structure parameter, **Cement and Concrete Research**, Vol. 27, N.8, 1997.

BARNES, B. D., DIAMOND, S., DOLCH, W. L., The contact zone between Portland cement paste and glass "aggregate" surfaces, **Cement and Concrete Research**, Vol. 8, 1978.

BENTUR, A., ODLER, I., Development and nature of interfacial microstructure, **Interfacial Transition Zone in Concrete**, RILEM REPORT 11, Part 1, 2, 1996.

BENTUR, A., 2nd International RILEM Conference on the Interfacial Transition Zone in Cementitious Composites, **Materials and Structures/ Matériaux et Constructions**, Vol. 31, p. 575-576, October, 1998.

BENTZ, D.P., GARBOCZI, E.J., Percolation of phases in a three-dimensional cement paste microstructural model, **Cement and Concrete Research**, Vol. 21, pp. 325-344, 1991.

BIER, T.A., Influence of type of cement and curing on carbonation progress and pore structure of hydrated cement paste, **Materials Research Society Symposium**, 85, pp. 123-134, 1987.

BOZHINOV, G., BAROVSKY, N., Pore structure of cement stone and its influence on the mechanical properties of concrete, Seventh International Congress on the Chemistry of Cements, **Proceedings**, Vol. III, Paris, 1980.

BRETON, D., CARLES-GIBERGUES, A., BALLIVY, G., GRANDET, J., Contribution to the formation mechanism of the transition zone between rock-cement paste, **Cement and Concrete Research**, Vol. 23, pp. 335-346, 1993.

BS 882:1992 Specification for aggregates from natural sources for concrete.

BS 1881: Methods of Testing Concrete Part 5: Methods of testing hardened concrete for other than strength. British Standards Institution, London, 1970.

BS 8110: Part 1:1985 Structural use of concrete: code of practice for design and construction.

BUENFELD, N. R., OKUNDI, E., Effect of cement content on transport in concrete, **Magazine of Concrete Research**, 50, N. 4, 1998.

CAMPITELI, V., **Porosidade do Concreto**, São Paulo, EPUSP, 1987. 16p. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT-09/87.

CHEN, Z. Y., WANG, J. G., Effect of bond strength between aggregate and cement paste on the mechanical behaviour of concrete, Bonding in cementitious composites, Eds. Mindess, S. and Shah, S.P., Materials Research Society, Vol. 114, pp. 41-47, 1988.

COMITE EURO-INTERNATIONAL du BETON. Durable Concrete Structures. Design Guide. Lausanne, Thomas Telford, 1992.

COMITE EURO-INTERNATIONAL du BETON. CEB-FIP Model Code 1990. Design Code. Lausanne, CEB, May 1993. 437p. (Bulletin D'Information, 213-214).

- COOK, R.A., HOVER, K.C., Mercury porosimetry of hardened cement pastes, **Cement and Concrete Research**, 29, pp. 933-943, 1999.
- COUTINHO, A. S., GONÇALVES, A., **Fabrico e Propriedades do Betão**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Vol. III, Lisboa, 1994.
- COUTINHO, A. S., GONÇALVES, A., **Fabrico e Propriedades do Betão**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Vol. I, Lisboa, 1997.
- COUTINHO, A. S., GONÇALVES, A., **Fabrico e Propriedades do Betão**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Vol. II, Lisboa, 1997.
- CPC 18 – Measurement of hardened concrete carbonation depth, TC14-CPC, 1988.
- DARWIN, D., SLATE, F.O., Effect of paste-aggregate bond strength on behavior of concrete, **Journal of Materials**, JMLSA, Vol. 5, No. 1, pp. 86-98, March 1970.
- DELAGRAVE, A., PIGEON, M., MARCHAND, J., REVERTÉGAT, É., Influence of chloride ions and pH level on the durability of high performance cement pastes (Part II), **Cement and Concrete Research**, Vol. 26, N.5, pp. 749-760, 1996.
- DELOYE, F. X., Deterioration mechanisms of concrete and mortars, **Proceedings International Seminar**, Brasília, 1997.
- DHIR, R.K., JONES, M.R., McCARTHY, M.J., Binder content influences on chloride ingress in concrete, **Cement and Concrete Research**, Vol. 26, n. 12, pp. 1761-1766, 1996.
- DIAMOND, S., MINDESS, S., LOVELL, J., **On the spacing between aggregate grains in concrete and the dimensions of the aureole de transition**, Colloque International Toulouse-France, RILEM, 1982.
- DIAMOND, S., MINDESS, S., SEM investigations of fracture surfaces using stereo pairs: I. fracture surfaces of rock and of cement paste, **Cement and Concrete Research**, Vol. 22, pp. 67-78, 1992.
- DIN 1048 – Testing of hardened concrete specimens prepared in moulds, Deutsche Normen, Part 5, 1991.
- EMERSON, M., Mechanisms of water absorption by concrete, **Protection of Concrete**. E&F. N. Spon. 1990, pp. 689-700.
- ENV 206:1992 Concrete: Performance; production, placing and compliance criteria.
- ERNSTROY, H.C., SHACKLOCK, B.W., Design of high-strength concrete mixes, Proceedings of a Symposium on Mix Design and Quality Control of Concrete, pp. 55-73, Cement and Concrete Association, London, 1954.

FAGERLUND, G., Strength and porosity of concrete, **Proceedings of the International Symposium on Pore Structure and Properties of Materials**, RILEM/IUPAC, Prague, pp. D51-D73, 1973.

FAGERLUND, G., On the capillarity of concrete, **Nordic Concrete Research**, Publication n. 1, 6.1 – 6.20, Trykt hos Moberg & Helli A/S, Oslo, 1982.

FARRAN, J., Contribution minéralogique à l'étude de l'adhérence entre les constituants hydratés des ciments et les matériaux enrobés, **Matériaux et constructions**, 490-491, p. 155-172, 1956.

FELDMAN, R.F., BEAUDOIN, J.J., Microstructure and strength of hydrated cement, **Cement and Concrete Research**, Vol. 6, pp. 389-400, 1976.

FELDMAN, R. F., The effect of sand/cement ratio and silica fume on the microstructure of mortars, **Cement and Concrete Research**, Vol. 16, p. 31-39, 1986.

FRIGIONE, G., MARCHESE, B., SERSALE, R., Microcrackings propagation in flexural loaded Portland and high slag cement concretes, **8^o Congresso Internacional de Química do Cimento**, THEME 2, Vol. III, pp. 478-484, 1986.

GARBOCZI, E. J., Permeability, diffusivity and microstructural parameters: a critical review, **Cement and Concrete Research**, Vol. 20, 1990.

GIACCIO, G., ZERBINO, R., Factors affecting cement paste-aggregate bond, **8^o Congresso Internacional de Química do Cimento**, Vol. VI, Rio de Janeiro, 1986.

GLUCKLICH, J., The effect of microcracking in time-dependent deformations and the long-term strength of concrete. International Conference on the Structure of Concrete, Cement and Concrete Association, London, 82-92, 1968.

GRANDET, J., OLLIVIER, J.P., Nouvelle méthode d'étude des interfaces ciment-granulats, **7th International Congress on the Chemistry of Cement**, Vol. III, Paris, 1980.

GRUDEMÖ, Å., On the role of pore size and shape in strength – structure relationships of cement pastes, **RILEM/ IUPAC Symposium**, Prague, September, 1973.

GRUDEMÖ, Å., Development of strength properties of hydrating cement pastes and their relation to structural features, **Proceedings Symposium on Some Recent Research on Cement Hydration**, 8pp., Cembureau, 1975.

GRUDEMÖ, Å., Strength – structure relationships of cement paste materials, Part 1. Methods and basic data for studying phase composition and microstructure, **Swedish Cement and Concrete Research Institute**, Sweden, N. 8, 130 páginas, 1979.

- HALAMICKOVA, P., DETWILER, R. J., Water permeability and chloride ion diffusion in Portland cement mortars: relationship to sand content and critical pore diameter, **Cement and Concrete Research**, Vol. 25, p. 790-802, 1995.
- HALL, C., Water sorptivity of mortars and concretes: a review, **Magazine of Concrete Research**, 41, N. 147, pp. 51-61, June 1989.
- HELENE, P.R.L., Durabilidade do concreto *versus* agressividade do meio (2ª parte). **Tecnologia de Edificações**, Projeto de Divulgação Tecnológica Lix da Cunha – São Paulo: PINI: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Divisão de Edificações do IPT, 1988.
- HELENE, P., TERZIAN, P., **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo: PINI; Brasília, DF: SENAI, 1992.
- HELENE, P. R. L., **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**, Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Professor Livre Docente junto ao Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 1993.
- HELENE, P. R. L., MITIDIERI FILHO, C. V., THOMAZ, E., **Influência do tipo de cimento e da relação a/c na carbonatação do concreto: estimativa da vida útil de projeto**, 37º REIBRAC – IBRACON, Goiânia, 1995.
- HELENE, P. R. L., **Vida útil das estruturas de concreto**, Simpósio sobre Durabilidade do Concreto, IBRACON-USP, 1998.
- HELENE, P. R. L., **Estrutura interna do concreto**, notas de aula do curso de pós graduação em engenharia civil da EPUSP Materiais de Construção, 1998.
- HO, D.W.S., LEWIS, R.K., Carbonation of concrete and its prediction, **Cement and Concrete Research**, Vol. 17, pp. 489-504, 1987.
- HOUST, Y.F., SADOUKI, H., WITTMANN, F.H., Influence of aggregate concentration on the diffusion of CO₂ and O₂, **Interfaces in Cementitious Composites**, RILEM International Conference, **Proceedings 18**, Part 2.2, Maso, J.C. Ed., E & FN SPON, Toulouse, 1992.
- HSU, T.T.C., SLATE, F.O., STURMAN, G.M., WINTER, G., Microcracking of plain concrete and the shape of the stress-strain curve, **Journal of the American Concrete Institute**, No. 60-14, February, 1963.
- HUGHES, D.C., Pore structure and permeability of hardened cement paste, **Magazine of Concrete Research**, Vol. 37, No. 133, pp. 227-233, December 1985.

HUSSAIN, S.E., AL-GAHTANI, A.S., RASHEEDUZZAFAR, Chloride threshold for corrosion of reinforcement in concrete, **ACI Materials Journal**, pp. 534-538, Nov-Dec. 1996.

IDORN, G.M., JOHANSEN, V., THAULOW, N., Research innovations for durable concrete, **Concrete International**, pp. 19-24, July 1992.

ILLSTON, J.M., Aspects of the behaviour of the cement paste phase of composite materials, with reference to the practical problems of concrete technology. In: International Conference on Hydraulic Cement Pastes, **Proceeding**, University of Sheffield, pp. 232-247, 1976.

IWASAKI, N., TOMIYAMA, Y., Bond strength between cement paste and aggregate, **Review of the twenty-eighth general meeting-Technical Session**, The cement association of Japan, Tokyo, Japan, 1974.

JONES, R., KAPLAN, M.F., The effect of coarse aggregate on the mode of failure of concrete in compression and flexure. Road Research Laboratory – Department of Scientific and Industrial Research, **Magazine of Concrete Research**, August 1957.

KAPLAN, M.F., Flexural and compressive strength of concrete as affected by the properties of coarse aggregates, **Journal of the American Concrete Institute**, pp. 1193-1208, May 1959.

KAYYALI, O.A., Porosity of concrete in relation to the nature of the paste-aggregate interface, **Materials and Structures/ Matériaux et Construction**, Vol. 20, N. 115, pp. 19-26, 1987.

KHATIB, J.M., MANGAT, P.S., Absorption characteristics of concrete as a function of location relative to casting position, **Cement and Concrete Research**, Vol. 25, n. 5, pp. 999-1010, 1995.

LARBI, J. A., **Microstructure of the interfacial zone around aggregate particles in concrete**, HERON, Vol.38, 1993.

LAWRENCE, C.D., Mortar expansions due to delayed ettringite formation. Effects of curing period and temperature, **Cement and Concrete Research**, Vol. 25, No. 4, pp. 903-914, 1995.

LEVITT, M., Non-destructive testing of concrete by the initial surface absorption method. In: Symposium on non-destructive testing of concrete and timber, London, 11-12, **Proceedings** pp. 23-26, June 1969.

- LI, S., ROY, D.M., Investigation of relations between porosity, pore structure, and Cl⁻ diffusion of fly ash and blended cement pastes, **Cement and Concrete Research**, Vol. 16, pp. 749-759, 1986.
- LYDON, F.D., Effect of coarse aggregate and water/cement ratio on intrinsic permeability of concrete subject to drying, **Cement and Concrete Research**, Vol. 25, n. 8, pp. 1737-1746, 1995.
- MAI, Y. W., COTTERELL, B., Porosity and mechanical properties of cement mortar, **Cement and Concrete Research**, Vol. 15, p. 995-1002, 1985.
- MARCHAND, J., GÉRARD, B., New developments in the modeling of mass transport processes in cement – based composites: a review, *Advances in Concrete Technology*, SP 154-10, **Proceedings**, Second CANMET/ACI International Symposium, Las Vegas, Nevada, 1995.
- MARTYS, N.S., FERRARIS, C.F., Capillary transport in mortars and concrete, **Cement and Concrete Research**, Vol. 27, no. 5, pp. 747-760, 1997.
- MASO, J.C., The bond between aggregates and hydrated cement paste, 7th **International Congress on the Chemistry of Cement**, Vol. I, Sub-theme VII-1, Paris, 1980.
- MASO, J. C., **Interfacial Transition Zone in Concrete**, RILEM REPORT 11, 1996.
- MASSAZZA, F., Action of environmental conditions, **Interfacial Transition Zone in Concrete**, RILEM REPORT 11, Part 3, 8, 1996.
- MASSAZZA, F., COSTA, U., Bond: paste-aggregate, paste-reinforcement and paste-fibres, 8th **Congresso Internacional de Química do Cimento**, Vol. 1, Rio de Janeiro, 1986.
- MEHTA, P. K., MANMOHAN, D., Pore size distribution and permeability of hardened cement pastes, *Seventh International Congress on the Chemistry of Cements*, **Proceedings**, Vol III, Paris, 1980.
- MEHTA, P.K., **Concrete Structure, Properties and Materials**, New Jersey: Prentice-Hall, INC. pp. 105-169, 1986.
- MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**, São Paulo, PINI, 1994.
- MEHTA, K., Durability – critical issues for the future, **Concrete International**, pp. 27-33, July 1997.

- MELO, A. B., **Influência da cura térmica (vapor) sob pressão atmosférica no desenvolvimento da microestrutura dos concretos estruturais de cimento Portland**, Exame de qualificação de doutorado, São Carlos, 1999.
- MENG, B., Resolution-dependent characterization of interconnected pore systems: development and suitability of a new method, **Materials and Structures**, 27, pp. 63-70, 1994.
- MENG, B., Calculation of moisture transport coefficients on the basis of relevant pore structure parameters, **Materials and Structures**, 27, pp. 125-134, 1994.
- MIKHAIL, R.Sh., TURK, D.H., BRUNAUER, S., Dimensions of the average pore, the number of pores, and the surface area of hardened Portland cement paste, **Cement and Concrete Research**, Vol. 5, pp. 433-442, 1975.
- MINDESS, S., YOUNG, J. F., **Concrete**, USA, Prentice-Hall, 1981.
- MINDESS, S., Relationships between strength and microstructure for cement-based materials: an overview, **Materials Research Society**, Vol.42, 1985.
- MINDESS, S., Tests to determine the mechanical properties of the interfacial zone, **Interfacial Transition Zone in Concrete**, RILEM REPORT 11, Part 2, 3, 1996.
- MONTEIRO, P. J. M., **Microstructure of concrete and its influence on the mechanical properties**, Ph.D. THESIS, Department of Civil Engineering, University of Califórnia, Berkeley, Califórnia, 1985.
- MONTEIRO, P. J. M., **Microstructure of concrete and its influence on the mechanical properties**, Department of Civil Engineering, University of Califórnia, Berkeley, Report No. UCB/SESM-85/06, July, 1985.
- MONTEIRO, P.J.M., MEHTA, P.K., Ettringite formation on the aggregate-cement paste interface, **Cement and Concrete Research**, Vol. 15, pp. 378-380, 1985.
- NEVILLE, A. M., **Propriedades do Concreto**, 2 ed., São Paulo: PINI, 1997.
- NYAME, B. K., ILLSTON, J. M., Capillary pore structure and permeability of hardened cement paste, **Proceedings** of the Seventh International Congress on the Chemistry of Cements, Vol III, Paris, 1980.
- NYAME, B.K., ILLSTON, J.M., Relationships between permeability and pore structure of hardened cement paste, **Magazine of Concrete Research**, Vol. 33, N. 116, 1981.
- ODLER, I., RÖßLER, M., Investigations on the relationship between porosity, structure and strength of hydrated Portland cement pastes. II. Effect of pore structure and of degree of hydration, **Cement and Concrete Research**, Vol. 15, p. 401-410, 1985.

- OLIVEIRA, C.T.A., **Água do poro de pastas de cimentos de escória**, Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Engenharia, São Paulo, 2000.
- OLLIVIER, J.P., MASSAT, M., The effect of the transition zone on transfer properties of concrete, **Interfacial Transition Zone in Concrete**, RILEM REPORT 11, Part 3, 7, 1996.
- OLLIVIER, J. P., **Durability of Concrete**, São Paulo, EPUSP, 1998. 129p., Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/192.
- PAPADAKIS, V.G., FARDIS, M.N., VAYENAS, C.G., Effect of composition, environmental factors and cement-lime mortar coating on concrete carbonation, **Materials and structures**, 25, pp. 293-304, 1992.
- PARROT, L. J., Carbonation, moisture and empty pores, **Advances in Cement Research**, 4, No. 15, pp. 111-118, 1991/92.
- PATEL, H. H., BLAND, C. H., POOLE, A. B., The microstructure of concrete cured at elevated temperatures, **Cement and Concrete Research**, Vol. 25, p. 485-490, 1995.
- PAULON, V. A., **Estudos da microestrutura da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado**, Tese apresentada à Escola Politécnica da USP para obtenção do Título de Doutor em Engenharia, São Paulo, 1991.
- PERRY, C., GILLOTT, J.E., The influence of mortar-aggregate bond strength on the behaviour of concrete in uniaxial compression, **Cement and Concrete Research**, Vol. 7, pp. 553-564, 1977.
- PICKETT, G., Effect of aggregate on shrinkage of concrete and a hypothesis concerning shrinkage, *Journal of the American Concrete Institute*, Title No. 52-36, January 1956.
- POPOVICS, S., Analysis of the concrete strength versus water-cement ratio relationship, **ACI Materials Journal**, Vol. 87, N. 5, pp. 517-529, September-October, 1990.
- POWERS, T.C., BROWNYARD, T.L., Studies of the physical properties of hardened plant cement past, Part 9, **Proceedings**, American Concrete Institute, Vol. 43 In: *Journal of the American Concrete Institute*, Detroit, Michigan, ACI, April 1947.

- POWERS, T.C, BROWNYARD, T.L., Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste. Portland Cement Association, Research Department, Bulletin 22, Chicago, March, 1948.
- POWERS, T.C., COPELAND, L.E., HAYES, J.C., MANN, H.M., Permeability of Portland cement paste, *Journal of the American Concrete Institute*, pp. 285-298, November 1954.
- POWERS, T.C., COPELAND, L.E., MANN, H.M., Capillary continuity or discontinuity in cement pastes, *Journal Portland Cement Association Research and Development Laboratories*, 1, n.2, pp. 38-48, May 1959.
- REGATTIERI, C. E. X., HELENE, P. R. L., SILVA, M. G., SILVA, P. F. A., **Contribuição ao estudo da penetração da água nos concretos**, 37^o_REIBRAC – IBRACON, Goiânia, 1995.
- REGATTIERI, C. E. X., **Contribuição ao estudo da influência da dosagem do concreto na absorção capilar e penetração de íons cloreto**, Dissertação apresentada à Escola Politécnica da USP para obtenção do Título de Mestre em Engenharia, São Paulo, 1998.
- REINHARDT, H. W., Transport of Chemicals Through Concrete, **Materials Science of Concrete III**, Edited by Jan Skalny, The American Ceramic Society, Westerville, OH, pp. 209-241, 1992.
- ROY, D. M., GOUDA, G. R., Porosity – strength relation in cementitious materials with very high strengths, *Journal American Ceramic Society*, 53, No. 10, pp. 549-550, 1973.
- ROY, D. M., Mechanisms of cement paste degradation due to chemical and physical factors, **8th Congresso Internacional de Química do Cimento**, VI., pp. 362-376, Rio de Janeiro, 1986.
- SAMAHA, H.R., HOVER, K.C., Influence of microcracking on the mass transport properties of concrete, *ACI Materials Journal*, Title n. 89-M46, pp. 416-424, 1992.
- SATO, N.M.N., **Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concretos**, Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Engenharia, São Paulo, 1998.
- SCHLANGEN, E., van MIER, J.G.M., Numerical study of the influence of interfacial properties on the mechanical behaviour of cement-based composites, **Interfaces in**

- Cementitious Composites**, Edited by J.C.Maso. Proceedings of the RILEM International Conference, 18, pp. 237-246, E & FN Spon, London, 1992.
- SCHOLER, C.F., **The role of mortar-aggregate bond in the strength of concrete**, A Symposium on Concrete Strength, Highway Research Board, Número 210, 1967.
- SCHORN, H., Numerical simulation of altering mechanical properties of concrete due to material behaviour of the interfaces, **Interfaces in Cementitious Composites**, Edited by J.C.Maso. Proceedings of the RILEM International Conference, 18, pp. 159-168, E & FN Spon, London, 1992.
- SCRIVENER, K.L., PRATT, P.L., Characterisation of interfacial microstructure, **Interfacial Transition Zone in Concrete**, RILEM REPORT 11, Part 1, 1, 1996.
- SCRIVENER, K. L., NEMATI, K. M., The percolation of pore space in the cement paste/aggregate interfacial zone of concrete, **Cement and Concrete Research**, Vol. 26, N.1, 1996.
- SERSALE, R., CIOFFI, R., Relationship between gypsum content, porosity and strength in cement. I. Effect of SO₃ on the physical microstructure of Portland cement mortars, **Cement and Concrete Research**, Vol. 21, pp. 120-126, 1991.
- SINGH, B.G., Specific surface of aggregates related to compressive and flexural strength of concrete, **Journal of the American Concrete Institute**, Vol. 29, No. 10, pp. 897-907, April 1958.
- SKALNY, J., MINDESS, S., Physico-chemical phenomena at the cement paste-aggregate interface, **10th International Symposium on Reactivity of Solids**, Dijon, 1984.
- SNYDER, K.A., WINSLOW, D.N., BENTZ, D.P., GARBOCZI, E.J., Interfacial zone percolation in cement-aggregate composites, **Interfaces in Cementitious Composites**, RILEM International Conference, **Proceedings 18**, Part 2.2, Maso, J.C. Ed., E & FN SPON, Toulouse, 1992.
- STRUBLE, L., Microstructure and fracture at the cement paste-aggregate interface. In **Proceedings Materials Research Society Symposium**, Edited by S. Mindess and S. Shah, Vol. 114, pp. 11-20, 1988.
- STRUBLE, L., SKALNY, J., MINDESS, S., A review of the cement-aggregate bond, **Cement and Concrete Research**, Vol. 10, p. 277-286, 1980.

- TOGNON, G. P., CANGIANO, S., Interface phenomena and durability of concrete, **Proceedings of the Seventh International Congress on the Chemistry of Cements**, Vol III, Paris, 1980.
- UCHIKAWA, H., HANEHARA, S., HIRAO, H., Influence of microstructure on the physical properties of concrete prepared by substituting mineral powder for part of fine aggregate, **Cement and Concrete Research**, Vol. 26, N.1, 1996.
- VIEIRA, S. R. S. S., **Concretos comum e de alto desempenho: análise do comportamento através da microscopia eletrônica de varredura**, 40^o Congresso Brasileiro do Concreto, Rio de Janeiro, 1998.
- VILE, G.W.D., Behaviour of concrete under simple and combined stress. Ph.D. Thesis, University London, London, 1965, Apud STROEVEN, P., Some mechanical effects of interface debonding in plain concrete, **Interfaces in Cementitious Composites**, RILEM, Proceedings 18, pp.187-196, London, 1992.
- VILE, G.W.D., The strength of concrete under short-term static biaxial stress, The structure of concrete and its behaviour under load, Eds. Books, A.E. and Newman, K., Cement and Concrete Association, London, pp. 275-288, 1968.
- WAKELEY, L. D., ROY, D. M., A method for testing the permeability between grout and rock, **Cement and Concrete Research**, Vol. 12, p. 533-534, 1982.
- WATSON, K.L., A simple relationship between the compressive strength and porosity of hydrated Portland cement, **Cement and Concrete Research**, Vol. 11, pp. 473-476, 1981.
- WINSLOW, D., LIU, D., The pore structure of paste in concrete, **Cement and Concrete Research**, Vol. 20, p. 227-235, 1990.
- WINSLOW, D.N., COHEN, M.D., Percolation and pore structure in mortars and concrete, **Cement and Concrete Research**, Vol. 24, pp. 25-37, 1994.
- YOUNG, J. F., **A Review of the Pore Structure of Cement Paste and Concrete and its Influence on Permeability**, ACI – SP 108-1, Detroit, Michigan, 1988.
- ZHANG, M., GJØRV, O.E., Backscattered electron imaging studies on the interfacial zone between high strength lightweight aggregate and cement paste, **Advances in Cement Research**, 2, n. 8, pp. 141-146, 1989.
- ZHANG, M., GJØRV, O.E., Microstructure of the interfacial zone between lightweight aggregate and cement paste, **Cement and Concrete Research**, Vol. 20, pp. 610-618, 1990.

ZIMBELMANN, R., A contribution to the problem of cement-aggregate bond, **Cement and Concrete Research**, Vol. 15, 1985.

ANEXO A – Caracterização dos materiais empregados

Os resultados dos ensaios de caracterização efetuados nos materiais empregados no programa experimental estão apresentados nas Tabelas 38, 40 e 42. Nas Tabelas 39 e 41 estão apresentados os limites estabelecidos pela NBR 7211/83.

Tabela 38 Caracterização física do agregado graúdo

Composição granulométrica porcentagem retida, em massa			Normas utilizadas
Peneira ABNT Abertura nominal (mm)	Individual	Acumulada	
25,0	0	0	NBR 7217/87
19,0	1	1	
12,5	69	70	
9,5	25	95	
6,3	4	99	
4,8	0	99	
2,4	0	99	
1,2	0	99	
0,6	0	99	
0,3	0	99	
0,15	0	99	
< 0,15	1	100	
Total	100	690	
Dimensão máxima característica (mm)	19,0		
Módulo de finura	6,90		
Teor de material pulverulento (%)	1,9		NBR7219/87
Massa específica (g/cm ³)	2,64		NBR 9937/87
Absorção (%)	0,7		NBR 9937/87
Massa unitária (kg/dm ³)	1,45		NBR 7251/82

Tabela 39 Limites granulométricos de agregado graúdo: % em massa retida – NBR 7211/83

Peneira ABNT (mm)	Gradação 1 (brita 1)	
	limites da norma	resultados da amostra
19,0	0 a 10	1
12,5	-	-
9,5	80 a 100	95
6,3	92 a 100	99
4,8	95 a 100	99
2,4	-	-

Nos resultados apresentados pela análise granulométrica, o agregado é classificado com graduação 1 (brita 1), conforme demonstrado na Tabela 39. Da Tabela 38, a amostra apresentou 1,9% de teor de materiais pulverulentos, determinado de acordo com a NBR 7219/87⁴³⁶. Este valor é superior ao limite especificado na NBR 7211/83⁴³⁷, que estabelece limite máximo de 1%. Com base nos resultados, para a utilização do agregado graúdo em ensaios laboratoriais, a amostra deve ser peneirada antes da utilização, eliminando-se o material pulverulento.

⁴³⁶ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 7219/87 – Agregados – Determinação do teor de materiais pulverulentos.

⁴³⁷ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 7211/83 – Agregado para concreto – Especificação.

Tabela 40 Caracterização física do agregado miúdo

Composição granulométrica porcentagem retida, em massa			Normas utilizadas
Peneira ABNT Abertura nominal (mm)	Individual	Acumulada	
6,3	0	0	NBR 7217/87
4,8	1	1	
2,4	5	6	
1,2	11	17	
0,6	26	43	
0,3	36	79	
0,15	15	94	
< 0,15	6	100	
Total	100	240	
Dimensão máxima característica (mm)	4,8		
Módulo de finura	2,40		
Teor de material pulverulento (%)	1,6		NBR 7219/87
Teor de argila em torrões (%)	0,1		NBR 7218/87
Massa específica (g/cm ³)	2,63		NBR 9776/87
Massa unitária (kg/dm ³)	1,46		NBR 7251/82
Impureza orgânica	mais clara que a solução padrão		NBR 7220/87

Tabela 41 Limites granulométricos de agregado miúdo: % em massa retida acumulada
– NBR 7211/83

Peneira ABNT (mm)	Zona 3 (média)	
	limites da norma	resultados da amostra
6,3	0 a 7	0
4,8	0 a 11	1
2,4	0 a 25	6
1,2	10 a 45	17
0,6	41 a 65	43
0,3	70 a 92	79
0,15	90 a 100	94

Nos resultados apresentados pela análise granulométrica, o agregado miúdo se encontra na zona 3 (areia média), conforme demonstrado na Tabela 41. Da Tabela 40, conclui-se que a amostra atende às especificações da norma NBR 7211/83.

Na Tabela 42 estão apresentados alguns resultados obtidos no ensaio físico do cimento utilizado.

Tabela 42 Ensaio físicos do cimento

Ensaio físicos do material em pó	
Finura na peneira ABNT 75 micrometros (200) (%)	0,1
Finura pela permeabilidade ao ar (cm ² /g)	4460
Massa específica (g/cm ³)	3,10

O cimento utilizado para o estudo experimental atende à norma NBR 5733/91.