

Influência das Condições de Cura em Algumas Propriedades dos Concretos Convencionais e de Alto Desempenho

Arnaldo Forti Battagin
Rubens Curti
Claudio Oliveira Silva
Flavio A. Cunha Munhoz

Associação Brasileira de Cimento Portland
Av. Torres de Oliveira, 76 - Jaguaré
CEP 05347-902 - SÃO PAULO - SP
e-mail: laboratorio@abcp.org.br

RESUMO

A necessidade do concreto de alto desempenho ser curado constitui assunto polêmico no meio técnico e mesmo o tipo e duração da cura para os partidários de sua adoção são igualmente polêmicos. Já nos concretos convencionais, com maior relação a/c, há unanimidade em aceitar que a cura adequada é condição essencial para obtenção de um concreto durável conforme as especificações do projeto estrutural.

A cura é realizada por duas razões básicas: hidratar o quanto possível o cimento e reduzir ao máximo a retração do concreto, fatores intrínsecos à durabilidade.

As características superficiais do concreto são as mais afetadas por uma cura inadequada como a permeabilidade, a carbonatação, a ocorrência de fissuração, etc.

Neste trabalho são mostrados os resultados da influência de ciclos de cura úmida e seca na resistência à compressão aos 28 dias, absorção de água por capilaridade, penetração de cloretos e profundidade de carbonatação acelerada de concretos com relação a/c 0,30, 0,45 e 0,65 como contribuição ao entendimento dos fenômenos atuantes.

1 Introdução

A cura do concreto constitui uma medida adotada para evitar a evaporação da água utilizada no amassamento do concreto e assim garantir que os componentes do cimento se hidratem.

Nos concretos convencionais, com emprego de valores de relação a/c maiores que os dos concretos de alto desempenho há unanimidade em aceitar que a cura adequada é condição essencial para a obtenção de um concreto durável.

O IBRACON, na sua missão de divulgar a boa prática do concreto recomenda um tempo mínimo de cura de acordo com o tipo de cimento e relação a/c utilizada no concreto, a seguir reproduzida.

Tipo de Cimento	Fator Água/Cimento			
	0,35	0,55	0,65	0,70
CP I e II-32	2 dias	3 dias	7 dias	10 dias
CP IV- 32	2 dias	3 dias	7 dias	10 dias
CP III- -32	2 dias	5 dias	7 dias	10 dias
CP I e II-40	2 dias	3 dias	5 dias	5 dias
CP V-ARI	2 dias	3 dias	5 dias	5 dias

Os vários tipos de cura já foram motivo de investigação de muitos pesquisadores, não sendo objetivo deste trabalho.

O objetivo deste trabalho é através de experiências de laboratório verificar a necessidade ou não de cura no concreto de alto desempenho. Não se atém também na influência da cura nas idades iniciais do concreto, mas especificamente na idade de 28 dias.

Barbosa e colaboradores (1.999) citam que a cura por imersão em água do CAD provoca melhores resultados que o envolvimento em cobertores plásticos pelo fato de que a selagem da peça não permite a entrada de água para repor a água perdida na autodessecação causada pela baixa relação a/c e microestrutura compacta. Por outro lado, Agostine et al (1.996) pesquisando diferentes variações de cura em câmara úmida, complementadas por cura submersa ou envoltas em lona ou em ambiente do laboratório até 91 dias concluíram que para concretos de alto desempenho sem microsilica os melhores resultados são obtidos por cura por imersão em água, sendo estes resultados tanto melhores quanto mais cedo a imersão for feita.

Concretos com quantidades de 10% de sílica ativa curados com selagem em lona plástica demonstraram eficiência equivalente à cura com imersão em água, concluindo que em condições práticas de obra o envolvimento das peças de concreto moldados in loco, especialmente pilares, com lona plástica, conduz a resultados melhores que a pulverização intermitente com água.

As características superficiais do concreto são as mais afetadas por uma cura inadequada como a permeabilidade, a carbonatação, a presença de fissuração, etc.

A parte experimental deste trabalho visa mostrar a influência de ciclo de cura ao ar em ambientes secos e úmidos na resistência à compressão aos 28 dias, absorção de água por capilaridade, penetração de cloretos e profundidade de carbonatação acelerada de concretos com relação a/c 0,30, 0,45 e 0,65.

2 Parte Experimental

2.1 Caracterização Tecnológica dos Materiais

Os materiais empregados para a execução dos concretos foram um cimento portland composto CP II-F-32 representativo da produção industrial brasileira, aditivos plastificante e superplastificante, sílica ativa e agregados graúdos e miúdos, cujas características são apresentadas a seguir:

2.1.1 Agregados Graúdos

O agregado graúdo (brita 1) empregado na elaboração das dosagens de concreto é constituído de rocha granítica, proveniente da Pedreira Cantareira, típico de material empregado em concreto na Região Metropolitana de São Paulo. O agregado foi submetido aos ensaios de caracterização física previstos pela norma NBR 7211/83. Os resultados obtidos constam da *Tabela 1*, sendo a distribuição granulométrica ilustrada na *Figura 1*.

Tabela 1 – Caracterização física do agregado graúdo

Composição granulométrica – porcentagem retida, em massa			
Peneira ABNT Abertura nominal (mm)	Individual	Acumulada	Limites NBR 7211/93 (gradação 1)
32,0	0	0	0
25,0	0	0	0
19,0	5	5	0 a 10
12,5	42	47	-
9,5	29	76	80 a 100
6,3	16	92	92 a 100
4,8	4	96	95 a 100
2,4	4	100	-
1,2	0	100	-
0,6	0	100	-
0,3	0	100	-
0,15	0	100	-
<0,15	0	100	-
Total	100,0	677	-
Dimensão máxima característica (mm)	19		-
Módulo de finura	6,77		-
Teor de material pulverulento (%)	0,50		<1
Massa específica (g/cm ³)	2,63		-
Absorção (%)	0,70		-
Massa unitária (kg/dm ³)	1,48		-

A amostra de agregado graúdo atende a todas as prescrições da norma NBR 7211/83, sendo classificada como graduação 1 (brita 1), podendo ser utilizada nos ensaios laboratoriais.

2.1.2 Agregado Miúdo

O agregado miúdo empregado na elaboração das dosagens de concreto é constituído por areia natural quartzosa, proveniente do Vale do Rio Paraíba e típico da areia empregada em concretos na Região Metropolitana de São Paulo. O agregado foi submetido aos ensaios de caracterização física previstos pela norma NBR 7211/83. Os resultados obtidos constam da *Tabela 2*, sendo a distribuição granulométrica ilustrada na *Figura 1*.

Tabela 2 – Caracterização física do agregado miúdo

Composição granulométrica – porcentagem retida, em massa			
Peneira ABNT Abertura nominal (mm)	Individual	Acumulada	Limites NBR 7211/83 (zona 2)
6,3	0	0	0 a 7
4,8	1	1	0 a 10
2,4	4	5	0 a 15
1,2	12	17	0 a 25
0,6	25	42	21 a 40
0,3	30	72	60 a 88
0,15	22	94	90 a 100
<0,15	6	100	–
Total	100	231	–
Dimensão máxima característica (mm)	2,40		–
Módulo de finura	2,31		–
Teor de material pulverulento (%)	1,4		(a)
Teor de argila em torrões (%)	0,4		(b)
Massa específica (g/cm ³)	2,63		–
Massa unitária (kg/dm ³)	1,44		–
Impureza orgânica	mais clara que a solução padrão		(c)

- a) A amostra apresentou 1,4% de teor de materiais pulverulentos, determinado de acordo com a NBR 7219/83, este valor é inferior ao limite especificado na NBR 7211/83, que estabelece limite máximo de 3% para concretos submetidos ao desgaste superficial e inferior ao limite de 5% para os demais concretos;
- b) A amostra apresentou 0,4% de teor de argila e partículas friáveis, determinado de acordo com a NBR 7218/83, valor inferior ao limite máximo de 1,5% estabelecido pela NBR 7211/83
- c) A amostra analisada apresentou coloração mais clara que a solução padrão no ensaio previsto na NBR 7220/87, indicando que o agregado está dentro da especificação da norma NBR 7211/83.

A amostra de agregado miúdo atende a todas as prescrições da norma NBR 7211/83, sendo classificada como areia fina (zona 2), podendo ser utilizada nos ensaios laboratoriais.

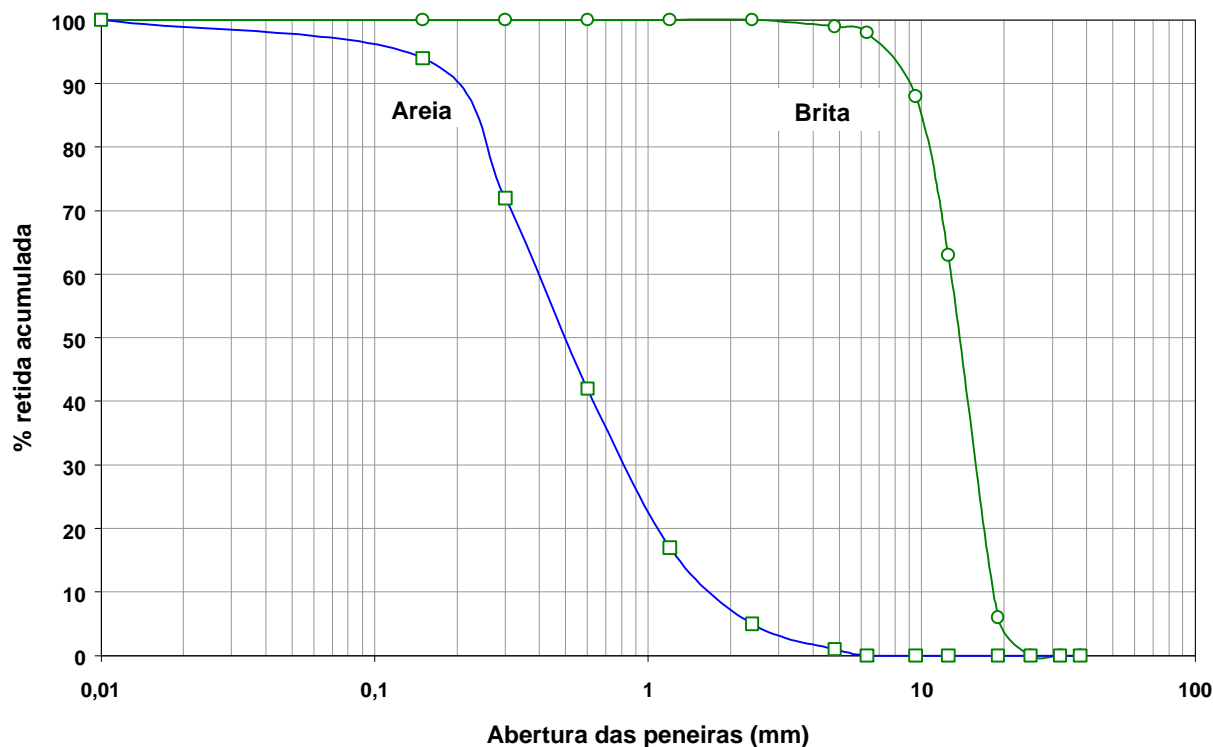


Figura 1 – Curva granulométrica dos agregados empregados no estudo

2.1.3 Cimento

Os resultados das caracterizações físico-mecânicas e química são apresentados nas Tabelas 3 e 4, respectivamente.

Tabela 3 – Caracterização físico-mecânica

Ensaio		Resultados	Limites da NBR 11578/91				
Finura – resíduo na peneira de 75µm (%)		2,7	≤ 12,0				
Massa específica (g/cm³)		3,10	–				
Área específica (cm²/g)		3950	≥ 260 m²/kg				
Água da pasta de consistência normal (%)		28,9	–				
Início de pega (h:min)		3:30	≥ 1h				
Fim de pega (h:min)		5:00	≤ 10h				
Expansibilidade de Le Chatelier – a frio (mm)		0	≤ 5				
Expansibilidade de Le Chatelier – a quente (mm)		0,5	≤ 5				
Resistência à compressão (MPa)							
Idade (dias)	Corpo-de-prova n°				Média	Desvio relativo máximo (%)	Limites da NBR 11578/91
	1	2	3	4			
3	31,2	31,0	30,2	29,9	30,6	2,3	≥ 10,0
7	36,5	37,1	37,1	36,3	36,8	1,4	≥ 20,0
28	44,7	46,8	46,2	44,7	45,6	2,6	≥ 32,0

Tabela 4 – Análise química

Composição Química		Resultados (% em massa)	Limites da NBR 11578/91
Perda ao Fogo	(PF)	4,43	≤ 6,5%
Dióxido de silício	(SiO ₂)	18,75	*****
Óxido de alumínio	(Al ₂ O ₃)	4,21	*****
Óxido de ferro	(Fe ₂ O ₃)	2,74	*****
Óxido de cálcio	(CaO)	60,64	*****
Óxido de magnésio	(MgO)	4,60	≤ 6,5%
Trióxido de enxofre	(SO ₃)	2,94	≤ 4,5%
Óxido de sódio	(Na ₂ O)	0,06	*****
Óxido de potássio	(K ₂ O)	1,00	*****
Resíduo Insolúvel	(RI)	0,59	≤ 16,0%
Anidrido carbônico	(CO ₂)	3,52	≤ 5,0%
Óxido de cal livre	(CaO)	0,71	*****
Equivalente alcalino em Na ₂ O		0,72	*****

2.2 Preparação dos Concretos

Os parâmetros adotados para a preparação dos concretos foram os seguintes:

- fixação de valores de a/c de 0,30, 0,45 e 0,65 respectivamente para concretos de classe 20, 40 e 80 MPa.
- fixação de abatimento de tronco de cone de 80±10mm para todos os concretos
- fixação de teor de argamassa de 48% para todos os concretos
- utilização no concreto classe 80 MPa de 10% de sílica ativa da SILMIX e aditivos plastificantes (322 N – 0,3%) e super plastificantes (Glenium – 1,1%) da marca MBT, valores referidos à massa do cimento.

Os concretos foram preparados em betoneira estacionária com eixo vertical e mistura forçada, com capacidade de 50 litros. A preparação dos concretos obedeceu a uma seqüência de colocação dos materiais. Primeiramente a betoneira (cuba, pás etc.) foi umedecida, sendo adicionado todo agregado graúdo e parte da água de amassamento ($\pm 1/3$ de água), com o acionamento da betoneira por 15s. Em seguida foi adicionado o cimento e uma outra parte da água de amassamento ($\pm 1/3$ de água), e a betoneira acionada por mais 45 segundos. Por último foram adicionados o agregado miúdo e o restante da água, sendo a betoneira acionada por mais 3 minutos. Os aditivos foram adicionados na água de amassamento e a sílica ativa, quando utilizada, foi adicionada junto com o cimento.

2.3 Ciclos de Cura

Para investigar a influência de cura nas diversas propriedades, os concretos foram submetidos aos seguintes ciclos de cura:

- 1 dia ao ar da câmara úmida e 28 dias em câmara seca
- 2 dias ao ar da câmara úmida e 26 dias em câmara seca
- 3 dias ao ar da câmara úmida e 25 dias em câmara seca
- 7 dias ao ar da câmara úmida e 21 dias em câmara seca

- 10 dias ao ar da câmara úmida e 18 dias em câmara seca
- 14 dias ao ar da câmara úmida e 14 dias em câmara seca
- 21 dias ao ar da câmara úmida e 7 dias em câmara seca
- 28 dias ao ar da câmara úmida

As condições da câmara úmida foram: umidade relativa do ar superior a 95% e temperatura de $23^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$. As condições da câmara seca foram: umidade relativa do ar de $50\pm 4\%$ e temperatura de $23^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$.

3 Resultados e Discussões

3.1 Resistência à Compressão do Concreto aos 28 dias

A Figura 2 mostra a evolução da resistência à compressão dos concretos submetidos aos diferentes ciclos de cura.

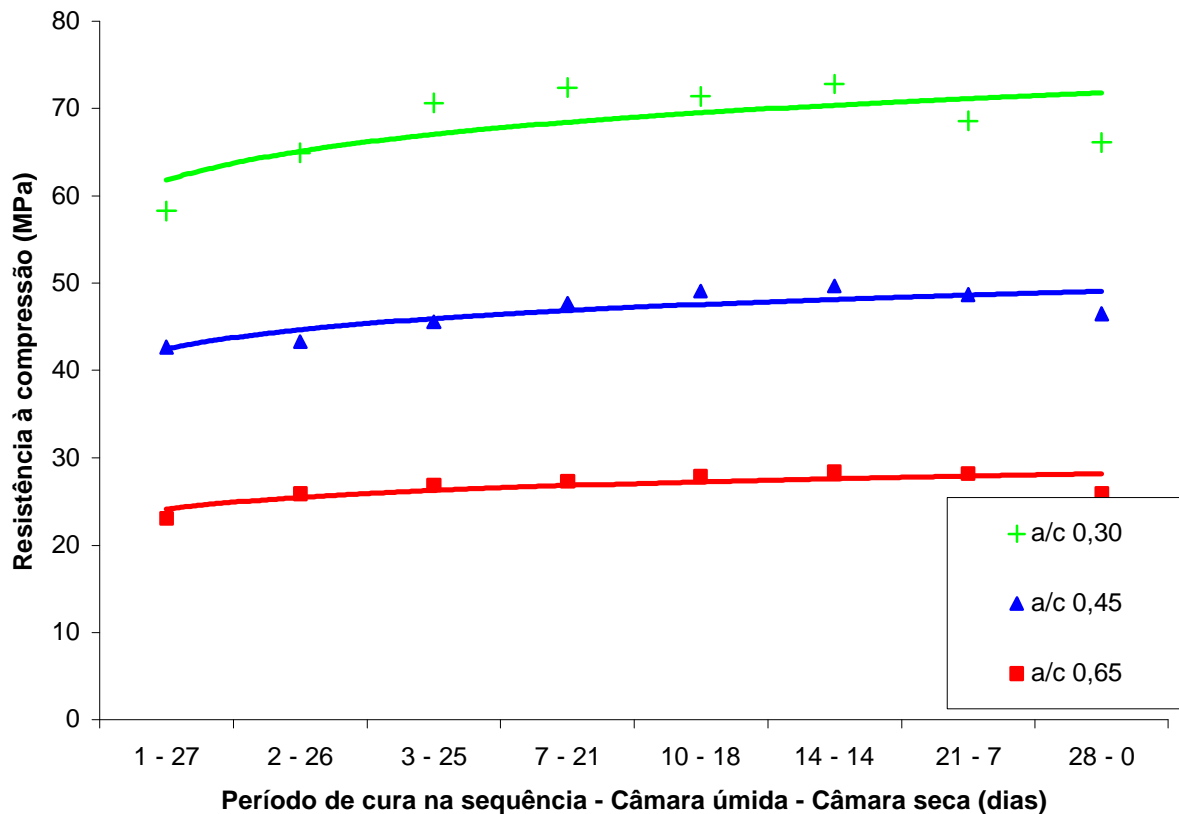


Figura 2 – Influência dos ciclos de cura na resistência à compressão dos concretos

Dos resultados obtidos depreende-se que de maneira geral quanto maior o tempo de permanência em cura úmida maior é a resistência a compressão de todos os concretos, independentemente de seu nível de resistência.

Verifica-se igualmente um ganho de resistência de 25%, 16% e 23%, respectivamente para os concretos com relação a/c de 0,30, 0,45 e 0,65 quando se comparou a resistência após cura de 1 dia em câmara úmida com a resistência após 14 dias de cura em câmara úmida. Curiosamente e inesperadamente a resistência aos 28 dias após tempo integral de cura úmida foi menor que aos 14 dias de cura úmida, não se encontrando explicação para o fenômeno.

Em suma, em termos de desenvolvimento de resistência a cura úmida para o concreto com a/c 0,30 mostrou-se tão necessária quanto para os concretos com a/c 0,45 e 0,65.

3.2 Absorção de Água por Capilaridade

Devido à relação da permeabilidade com a durabilidade foram desenvolvidos ensaios de absorção de água por capilaridade segundo NBR 9779, para concretos submetidos aos diferentes ciclos de cura.

A Figura 3 apresenta os resultados obtidos.

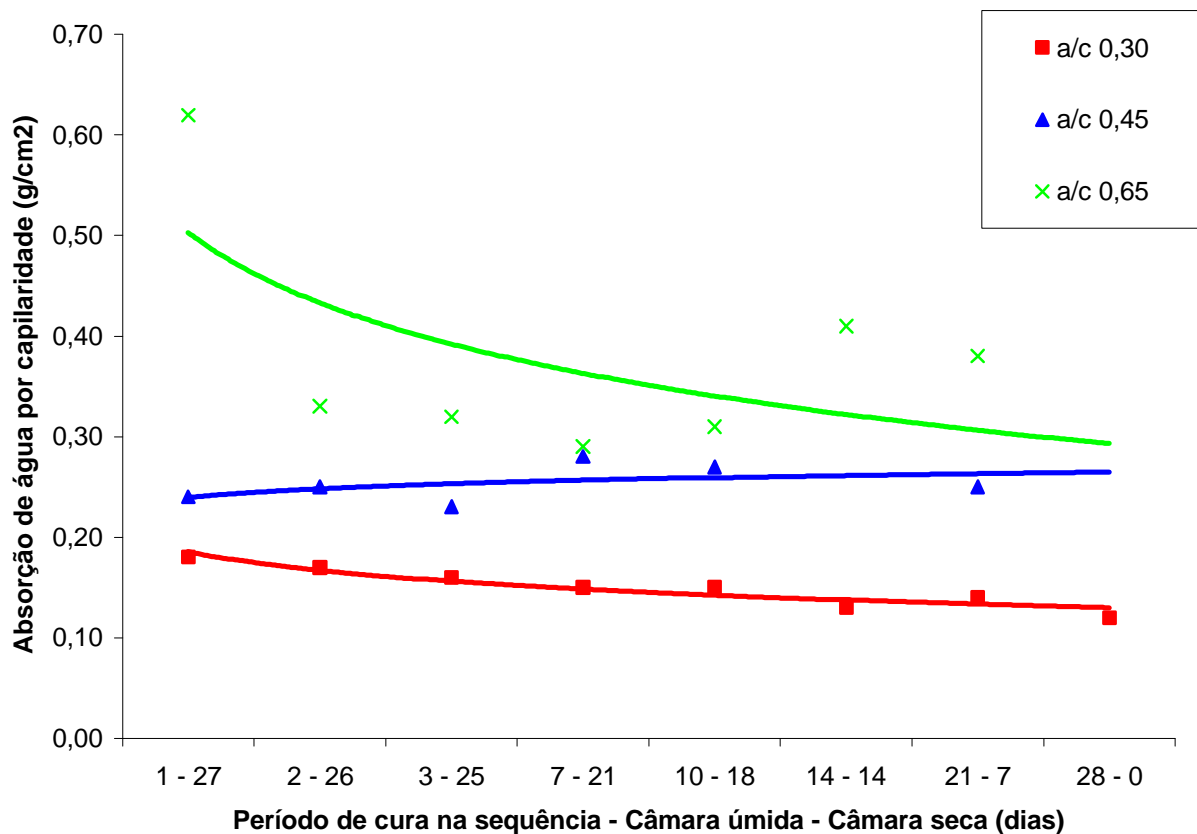


Figura 3 – Influência dos ciclos de cura na absorção de água por capilaridade dos concretos

Os resultados indicam que a absorção por capilaridade independe do ciclo de cura para concretos com a/c 0,45 e 0,30. Já para os concretos com a/c 0,65, a absorção aumenta com o aumento da cura inadequada, isto é, quanto menos tempo o concreto permanecer em cura úmida. Essas foram as tendências gerais observadas porém os resultados apresentaram-se dispersos, fato que dificultou uma análise mais aprofundada.

Os resultados indicam ainda que a absorção é maior quanto maior a relação a/c dos diferentes concretos.

3.3 Resistência à Penetração de Cloretos

A penetração de cloretos no concreto desperta grande atenção porque esses íons podem levar ao desencadeamento do processo de corrosão das armaduras. Para investigar o comportamento dos diferentes concretos submetidos aos distintos ciclos de cura adotou-se o método preconizado pela ASTM C - 1202 - "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration".

Este ensaio consiste em submeter uma amostra de concreto 5cm de altura e 10cm de diâmetro (extraída no terço médio de um corpo-de-prova cilíndrico de 10cm de diâmetro e 20cm de altura) à passagem de corrente elétrica, por um período de 6 horas, sob uma diferença de potencial de 60V. O corpo-de-prova tem uma das extremidades imersas em solução de hidróxido de sódio e a outra em solução de cloreto de sódio. A carga total passante (C), é relacionada com a resistência do concreto à penetração de íons cloretos. Os resultados obtidos são semi-quantitativos, tendo em vista a amplitude das faixas classificatórias definidas na ASTM C 1202 e apresentada na *Tabela 5*.

Tabela 5 – Critério de classificação para difusibilidade de cloretos (ASTM 1202)

Carga Passante (Coulombs)	Penetração dos Íons Cloreto
> 4000	elevada
2000 - 4000	moderada
1000 - 2000	baixa
100 - 1000	muito baixa
< 100	desprezível

A *Figura 4* apresenta os resultados obtidos

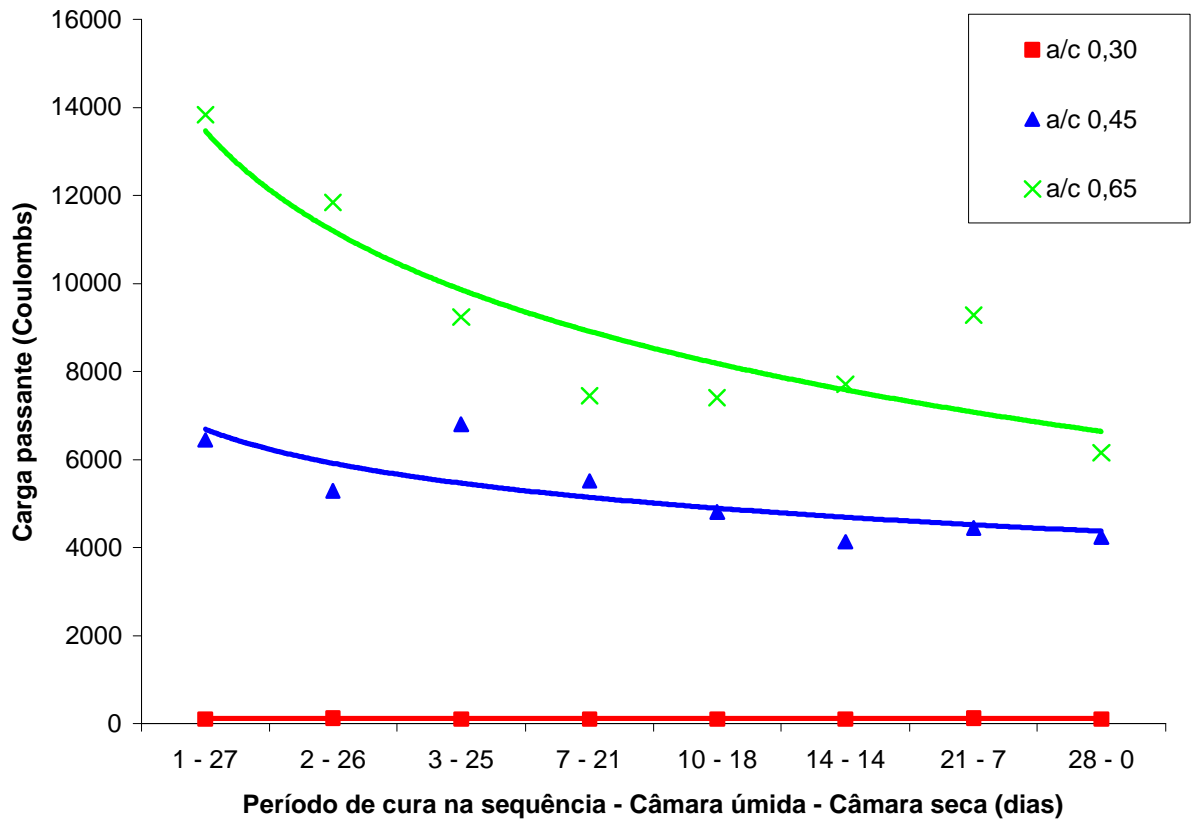


Figura 4 – Influência dos ciclos de cura na penetração de íons cloreto

Os resultados indicam que quanto maior é o período de cura úmida maior é a resistência a penetração de íons cloreto no concreto, isto é, menor é a carga passante. Nos concretos com a/c = 0,30 parece que os ciclos de cura não influíram significativamente na permeabilidade aos íons cloretos, sendo muito baixa.

Pelos critérios da ASTM 1202 entretanto tanto os concretos com a/c 0,45 quanto 0,65 apresentaram permeabilidade elevada aos cloretos independentemente do ciclo de cura.

Em suma, os ciclos de cura influenciaram na permeabilidade aos íons cloreto porém a relação a/c é mais preponderante nesse aspecto.

3.4 Carbonatação Acelerada

As armaduras do concreto armado ou protendido estão protegidas da corrosão eletroquímica pela alcalinidade da água que preenche os poros. Esse ambiente alcalino pode, porém, ser neutralizado pela ação do CO₂ atmosférico, quando as peças de concreto sofrem o fenômeno denominado carbonatação. Efetivamente, o pH da solução dos poros varia entre 12,5 e 13,5, sendo função da saturação do Ca(OH)₂, dos álcalis dissolvidos e também dos cristais precipitados de portlandita, que constituem a chamada reserva alcalina.

A portlandita em maior proporção e, secundariamente, os silicatos cálcicos hidratados (C-S-H) ao reagirem com o CO₂ atmosférico formam o carbonato de cálcio. O CO₂ reage inicialmente na superfície da camada de concreto e diminui o pH da solução dos poros para cerca de 8,5.

Progressivamente, o fenômeno pode alcançar as armaduras, que perdem a proteção (despassivação), ficando sujeitas à corrosão.

O uso de concreto impermeável, com baixa relação a/c e com cobrimento adequado das armaduras constituem medidas que reduzem o risco de corrosão.

Com objetivo de verificar o comportamento dos concretos submetidos aos distintos ciclos de cura, foram executados ensaios acelerados de carbonatação. A metodologia empregada seguiu as recomendações da RILEM CPC 18 - Medidas de profundidade de carbonatação (1988), adaptada para corpos-de-prova de 10 x 20 cm.

Os corpos-de-prova foram curados de acordo com os ciclos citados anteriormente até a idade de 28 dias. Após a cura, os corpos-de-prova foram colocados na câmara de carbonatação (umidade relativa de 65%, teor de CO₂ de 5% e temperatura de 23°C ± 2°C), durante 4 semanas.

As profundidades de carbonatação foram medidas em seções obtidas mediante ruptura de "fatias" de corpos-de-prova, após prévia pulverização de solução alcohólica de fenolftaleína a 1%. Nessas condições, as regiões carbonatadas conservam a coloração anterior ao tratamento, ao passo que as regiões não carbonatadas adquirem a coloração carmim.

As Figuras 5 e 6 mostram os resultados obtidos.

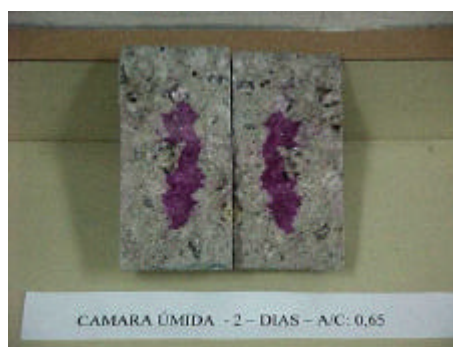


Figura 5 – Exemplos de corpos-de-prova dos concretos com diferentes valores de a/c submetidos aos diversos ciclos de cura, tratados com solução de fenolftaleína para evidenciar a espessura de carbonatação acelerada

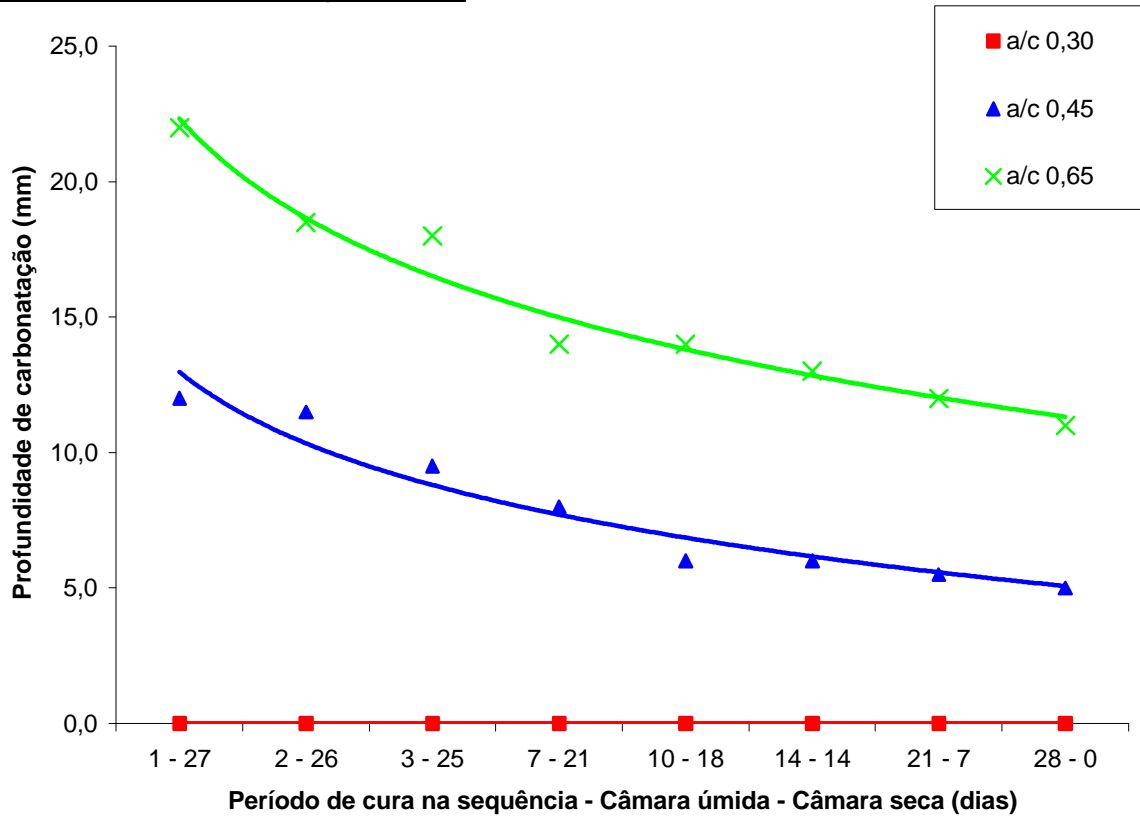


Figura 6 – Influência dos ciclos de cura na profundidade de carbonatação após 28 dias do término dos ciclos em câmara de carbonatação acelerada

Os resultados indicam, como era de esperar, que a profundidade de carbonatação aumenta com o aumento da relação a/c. Dentro de um mesmo ciclo de cura, a profundidade de carbonatação é tanto maior quanto mais tempo o concreto foi submetido à cura úmida. Para concreto com relação a/c igual a 0,30, os ciclos de cura parecem não ter influenciado a profundidade de carbonatação, sendo o fenômeno ausente nos níveis de aceleração da carbonatação adotados.

Finalmente, os concretos com a/c 0,45 com 1 e 2 dias apenas de cura úmida apresentaram espessuras de carbonatação similares a dos com relação a/c = 0,65 curados entre 21 e 28 dias em câmara úmida.

4 Conclusões

Dos resultados obtidos depreende-se que:

- Em termos de desenvolvimento de resistência à compressão aos 28 dias, a cura úmida (ao ar saturado) dos concretos com a/c 0,30 mostrou-se tão necessária quanto para os concretos com a/c 0,45 e 0,65.
- A absorção de água por capilaridade não varia entre os diversos ciclos de cura para os concretos com alto valor de a/c (0,65), sendo tanto menor quanto mais tempo o concreto permaneceu em câmara úmida.

- A permeabilidade aos cloretos é classificada como elevada pelos critérios da ASTM C 1202 para os concretos com a/c 0,45 e 0,65, sendo praticamente desprezível para os concretos com a/c 0,30. Os ciclos de cura parece influenciar apenas os concretos com a/c 0,45 e 0,65.
- Igualmente, os ciclos de cura não causaram influência na espessura de carbonatação dos concretos com a/c 0,30. No entanto, para os concretos com a/c 0,45 e 0,65 a espessura de carbonatação é tanto maior quanto mais precocemente o concreto permaneceu em câmara úmida.
- Em suma, a resistência à compressão aos 28 dias do concreto com a/c 0,30 foi a única propriedade das estudadas que foi influenciada negativamente quanto mais precocemente o concreto permaneceu em condições inadequadas de cura.

5 Referências

BARBOSA, M.P., et al.. A influência do processo de cura nas propriedades mecânicas dos concretos de elevado desempenho (CED), **41º Congresso Brasileiro do Concreto**. São Paulo, IBRACON, 1999.

AGOSTINI, R.S. e NUNES, N.L.. Método de cura para concreto de alta resistência. **Revista IBRACON** n 14, Agosto-Setembro, 1996, São Paulo.

CPC - 18 - Measurement of hardened concrete carbonation depth – RILEM RECOMMENDATIONS - **Materials and Structures**, vol. 21, n.26, 1988.