

## **EFEITOS DA FORMA DE CURA DE CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO EM SUA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO**

**Tatiana Cureau Cervo**

**José Tadeu Balbo**

Laboratório de Mecânica de Pavimentos  
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

### **RESUMO**

Ensaio de tração na flexão foram realizados em corpos-de-prova prismáticos de concreto de cimento Portland de alto desempenho (CAD), empregando-se diferentes processos de cura para o CAD com três relações água/cimento distintas, permitindo a comparação com o método de cura indicado por norma para realização de ensaios de tração na flexão, e, entre os processos de cura química e cura úmida. Considerando-se um mesmo processo de moldagem para todos os concretos, as resistências à tração na flexão mostraram-se inferiores para ensaios realizados com o concreto no estado seco comparados àqueles no estado saturado. O processo de cura úmida mostrou-se mais eficiente do que o processo de cura química. Os resultados chamam a atenção para a necessidade de revisão da norma brasileira com relação ao processo de cura de corpos-de-prova prismáticos de concretos de alto desempenho.

### **ABSTRACT**

Strength of high performance concrete with three proportioning water/cement ratio and submitted to several curing conditions differing from standard patterns were evaluated through bending tests on beams in order to permit comparison among curing procedures. The moist curing process disclosed more effective than curing by chemical products leading to membrane formation over concrete surface; moreover, results pointed out the huge influence of saturation of the specimens on increasing resistance. Facing the received results, it is unavoidable to strongly recommend the revision of the Brazilian standard for molding and curing of concrete specimens for checking the fulfilling for the designed strength of concrete slabs for paving.

### **1. INTRODUÇÃO**

O método de cura indicado pela norma brasileira (NBR 5738) para corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos de concreto de cimento Portland estabelece que os corpos-de-prova devem ficar imersos em água ou permanecer em câmara úmida, ou ficar enterrados em areia completamente saturada de água, até início do ensaio, ou seja, até a data de ensaio à compressão ou à flexão. O procedimento normalmente empregado em obras de pavimentação rodoviária é a manutenção do material em tanque de imersão até o momento de sua ruptura (7 dias ou 28 dias). Na realização de um trabalho de pesquisa sobre a resistência à fadiga de concretos de cimento Portland para pavimentação, tornou-se necessário, devido a alguns condicionantes, a realização de ensaios de resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos submetidos a diferentes métodos de cura para o concreto de alto desempenho (CAD).

Neste momento surgia o primeiro questionamento a respeito da validade do método de cura recomendado por norma para corpos-de-prova prismáticos, que constantemente tem sido utilizado, tanto pelo meio acadêmico quanto pelo meio profissional, para dosagem do concreto e posterior determinação da resistência à tração na flexão. Preocupação dessa natureza, no que diz respeito a testes em compressão para concretos estruturais, são extraídas, por exemplo, de Tan & Gjorv (1996) e Agostini & Nunes (1996), já que em concretos de alto desempenho, onde a relação água/cimento (a/c) normalmente é inferior a 0,40 e geralmente se utiliza cimento de alta resistência inicial e adição de algum material fino como a sílica ativa, consideravam os autores que os efeitos da cura merecem ser cuidadosamente analisados.

Trabalhos têm discutido a respeito deste assunto, sendo que alguns pesquisadores defendem a cura úmida do CAD por imersão em água, outros a cura em câmara úmida, em que o concreto

permanece em vapor de água mas não fica imerso na mesma, e outros, defendem a cura por meio de selagem dos concretos com a utilização de alguma membrana plástica impermeabilizante. Alguns autores (Tan & Gjør, 1996; Agostini & Nunes, 1996) têm observado também que, para o CAD, um tempo menor de cura parece apresentar resultados mais vantajosos quando se analisa a resistência à compressão do concreto. Sob este aspecto é importante observar que os efeitos da cura em CADs submetidos a testes de compressão já foram aferidos em inúmeros estudos realizados, podendo-se ter maior confiabilidade e precisão no conjunto de conclusões já emanadas por outros autores.

Embora a engenharia busque aprimorar cada vez mais o conhecimento de um material, como é o caso do concreto de cimento Portland, algumas questões (de relevante importância) são tomadas como concluídas e, o pior, de maneira errônea, como é o caso do processo de cura para corpos-de-prova prismáticos de concreto de cimento Portland para ensaios de resistência à tração na flexão. O que ocorre nos ensaios em tração na flexão de CAD é que são bastante distintos daqueles esperados pela norma brasileira, que considera o concreto no estado saturado como sendo a situação mais crítica com relação à sua resistência à tração na flexão (Cervo, 2004). É importante recordar que a resistência à tração na flexão é a principal característica relacionada ao material, responsável por um adequado desempenho dos pavimentos de concreto de cimento Portland. Por este motivo é extremamente importante se conhecer, de forma mais precisa possível, o comportamento do concreto em flexão quando do momento da medida de sua resistência, seja em atividades de dosagem ou de controle tecnológico em obra.

Na tentativa de validação do método de cura recomendado pela norma brasileira e amplamente empregado em obras, para corpos-de-prova prismáticos, os autores apresentam neste artigo os resultados de resistência à tração na flexão de concretos de alto desempenho curados com diferentes métodos de cura, entre eles cura úmida, cura química e cura com filme PVC. Uma comparação com o comportamento obtido para o concreto convencional também foi realizada. A partir dos resultados é possível estabelecer coerências (e incoerências) entre o comportamento à tração na flexão real do concreto e aquele obtido quando seguidas as recomendações da norma brasileira NBR 5738.

## **2. CARACTERIZAÇÃO E MOLDAGEM DOS CONCRETOS**

Os corpos-de-prova prismáticos foram moldados nas dimensões de 100 x 100 x 400 mm, que apresentam resistência à tração na flexão idêntica àqueles moldados nas dimensões recomendadas por norma NBR MB 3483 (Cervo, 2003; Balbo *et al.*, 2003; Cervo, 2004). Os corpos-de-prova de dimensões de 100 x 100 x 400 mm foram moldados em camada única, sendo levados à mesa vibratória por um período de 30 segundos, após o que foram arrasados. A retirada do corpo-de-prova da forma metálica ocorreu após um período de 24 a 36 horas. Para os ensaios de resistência à tração na flexão as amostras tiveram a distância entre o apoio extremo do corpo-de-prova e sua seção transversal externa tomada proporcionalmente ao corpo-de-prova padrão (150 x 150 x 500 mm), resultando em 20 mm, o que definiu distância entre os apoios de 360 mm (com distâncias de 120 mm entre os terços médios do vão). Para a aplicação de carga a velocidade de aplicação foi reduzida tendo-se em conta a relação entre volumes dos dois tipos de corpo-de-prova, resultando em uma velocidade de 0,046 kN/s.

### **2.1 CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO**

Os materiais empregados no concreto de alto desempenho foram provenientes do Estado de São Paulo (SP), tendo características de concreto para pavimentação, sendo os mesmos materiais anteriormente utilizados na construção de *whitetopping* ultradelgado na rodovia Presidente Castelo Branco, em 1997 (Balbo, 2003). O cimento Portland utilizado nos concretos foi um cimento do tipo

CP V - ARI - RS da Holcim que apresentava pequeno teor de escória de alto forno como adição. Como agregado miúdo foi utilizada uma areia quartzosa rósea procedente das imediações de Bofete (na Depressão Periférica de SP), com módulo de finura de 1,14 e diâmetro máximo de 1,2 mm. O agregado graúdo utilizado foi uma brita 1, de origem calcária e procedente da pedreira da Indústrias Votorantim S.A. em Araçariçuama, que apresentava módulo de finura de 6,71 e dimensão máxima característica de 19 mm.

Conforme empregado na rodovia Castelo Branco, o concreto de alto desempenho estudado neste trabalho teve a adição de 10% de sílica ativa (teor de substituição em função da massa de cimento), e aditivo plastificante e superplastificante. A sílica ativa empregada foi a Silmix fabricada pela Camargo Correa Cimentos S.A. Como superplastificante utilizou-se um aditivo RX 3000 e, como plastificante utilizou-se um aditivo RX 322N, ambos da Reax. A utilização de um incorporador de ar também foi adotada. Para o estudo em questão foram moldados três traços de concreto de alto desempenho, curados em imersão em água e ensaiados em três idades diferentes. Posteriormente o traço com relação  $a/c = 0,365$  foi submetido a outros processos de cura distintos. A Tabela 1 apresenta as características das misturas empregadas no estudo e cada uma das relações  $a/c$  analisadas.

**Tabela 1** Características dos concretos de alto desempenho empregados

<b>Materiais e características</b>	<b>Quantidades e resultados obtidos</b>		
Relação água/cimento	0,365	0,385	0,41
Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	440	420	393
Sílica (kg/m <sup>3</sup> )	44	42	39
Areia (kg/m <sup>3</sup> )	493	514	544
Brita 1 (kg/m <sup>3</sup> )	1194	1194	1194
Plastificante (L/m <sup>3</sup> )	1,65	-	-
Superplastificante (L/m <sup>3</sup> )	3,846	3,5	3,0
Incorporador de ar (mL/m <sup>3</sup> )	119	119	119
Ar incorporado (%)	4,5	5,0	5,0
Abatimento (mm)	80	70	80

## 2.2 CONCRETO CONVENCIONAL

Para a moldagem do concreto convencional foi utilizado um cimento do tipo CP II E-40 (Santa Helena), que apresentava adição de escória de alto forno em sua composição. Como agregado miúdo foi utilizada uma areia com módulo de finura de 1,72 e dimensão máxima característica de 2,4 mm. Foram utilizadas as britas 1 e 2, com dimensões máximas características de, respectivamente, 19 mm e 25 mm. A brita 1 usada nas moldagens foi um granito com módulo de finura de 6,66 mm (procedente de São Paulo); como brita 2 foi utilizado um agregado calcário procedente da pedreira em Cajamar (SP) com módulo de finura de 7,68. As características do concreto convencional empregado no experimento estão apresentadas na Tabela 2, que procuraram reproduzir o concreto empregado por Balbo et al.. (2000) na pista experimental de pavimentos de concreto na USP.

**Tabela 2** Características do concreto convencional empregado

<b>Materiais e características</b>	<b>Quantidades e resultados obtidos</b>
Relação água/cimento	0,553
Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	328
Areia (kg/m <sup>3</sup> )	691
Brita 1 (kg/m <sup>3</sup> )	483
Brita 2 (kg/m <sup>3</sup> )	724
Plastificante (L/m <sup>3</sup> )	1,148
Ar incorporado (%)	2,6
Abatimento (mm)	65

### 3. PROCESSOS DE CURA ADOTADOS PARA O CAD

O estudo laboratorial buscou simular condições distintas de métodos de cura a fim de compará-los entre si e com aquele recomendado pela NBR 5738. Os três traços de concreto apresentados para o CAD, foram primeiramente levados a três idades de cura diferentes a fim de determinar suas resistências à tração na flexão e observar se o comportamento dos três traços seria semelhante. Posteriormente, o traço com relação água/cimento 0,365 foi curado por diferentes processos com o intuito de analisar os resultados da resistência à tração na flexão com diferentes métodos e idades de cura. Os ensaios de tração na flexão para os concretos de alto desempenho foram realizados aos 7, 28, 56 e 91 dias. Os processos de cura aplicados às amostras confeccionadas em concreto de alto desempenho estão apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3** Tipos de cura utilizados e seus respectivos códigos

<b>Código</b>	<b>Tipo de cura</b>
A	7 dias em tanque de imersão com água na temperatura constante de 20°C
B	7 dias em tanque de imersão com água na temperatura constante de 20°C mais 21 dias fora d'água em temperatura ambiente no laboratório, totalizando 28 dias de cura
C	28 dias em tanque de imersão com água na temperatura constante de 20°C
D	7 dias em câmara úmida, envoltos por filme PVC
E	7 dias em câmara úmida, envoltos por filme PVC mais 21 dias fora d'água em temperatura ambiente no laboratório, envoltos em filme PVC, totalizando 28 dias
F	7 dias em câmara úmida, envoltos por filme PVC mais 49 dias fora d'água em temperatura ambiente no laboratório, envoltos em filme PVC, totalizando 56 dias
G	7 dias em câmara úmida, envoltos por filme PVC mais 84 dias fora d'água em temperatura ambiente no laboratório, envoltos em filme PVC, totalizando 91 dias
H	28 dias em câmara úmida com filme PVC
I	28 dias em câmara úmida, envoltos por filme PVC mais 28 dias fora d'água em temperatura ambiente no laboratório, envoltos em filme PVC, totalizando 56 dias
J	7 dias em câmara úmida SEM filme PVC
K	28 dias em câmara úmida SEM filme PVC
L	28 dias em câmara úmida SEM filme PVC mais 28 dias fora d'água em temperatura ambiente no laboratório SEM filme PVC, totalizando 56 dias
M	7 dias em cura química
N	28 dias em cura química
O	91 dias em cura química

Os corpos-de-prova selados com filme PVC (policloreto de vinila) tiveram toda a sua área externa

envolta por este filme, conforme se pode observar na Figura 1, e foram selados logo após sua retirada do molde metálico, permanecendo com o PVC até idade de ensaio. Optou-se em colocar as amostras envoltas pelo PVC em câmara úmida com o intuito de não haver perda de umidade do corpo-de-prova para o ambiente externo (com U.A. = 100%) ou vice-versa. Nas amostras curadas com cura química os corpos-de-prova permaneceram nos moldes até data de ensaio e o produto de cura química foi aplicado logo após moldagem e arrasamento dos corpos-de-prova. Na Figura 2 é possível observar a aplicação da cura química que é realizada por aspersão do produto de cura sobre a superfície externa do concreto, sendo largamente utilizada em pista como método de cura para pavimentos de concreto de cimento Portland. O produto de cura utilizado neste trabalho foi o CURACEM BR, composto a base de parafina que atua como barreira contra evaporação brusca, sendo utilizado em uma dosagem de  $0,4 \text{ kg/m}^2$ .



**Figura 1** Selagem dos corpos-de-prova com filme PVC



**Figura 2** Aplicação da cura química

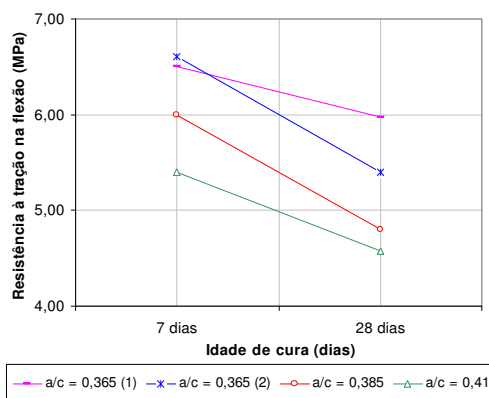
#### 4. RESULTADOS OBTIDOS

Na Figura 3 e na Tabela 4 são apresentados os valores obtidos para resistências à tração na flexão das amostras de concreto de alto desempenho e as cargas necessárias para a ruptura das mesmas, para diferentes relações água/cimento para alguns dos tipos de cura adotados. Dois traços com relação  $a/c = 0,365$  foram realizados pois, na primeira tentativa de moldagem observaram-se valores de resistência inusitados em função da idade de cura e queria-se comprovar tais valores. Foi em função desses primeiros resultados que se deu início ao estudo sobre a influência da cura na resistência à tração na flexão de CAD.

Os valores em **negrito e sublinhados** na Tabela 4 são as resistências à tração na flexão médias obtidas para cada traço e tipo de cura. A análise dos resultados mostra que quando os corpos-de-prova foram retirados da cura imersa em água aos 7 dias e ensaiados aos 28 dias (cura B), a resistência à tração na flexão foi reduzida de 8 a 20% comparadas às resistências aos 7 dias em imersão (cura A), para todas as relações água/cimento analisadas.

Na Figura 3 é possível observar claramente que as duas moldagens com mesma relação  $a/c$  e para um mesmo tipo de cura apresentam resistências à tração na flexão praticamente iguais, o que não deixa dúvidas com relação à legitimidade dos resultados. Quando se comparam as resistências obtidas para as curas A e B, observa-se que para todas as relações  $a/c$  estudadas houve redução na resistência da cura B em relação à cura A. Em contrapartida, os resultados mostram que, ao compararmos as curas A, B e C do traço com relação  $a/c$  0,365, ocorreu um decréscimo de 8,2% da cura B em relação à cura A e um acréscimo de 17,9% da cura C em relação à cura B, o que indica que a resistência do corpo-de-prova no estado seco é reduzida, o que poderia ser atribuído à remoção da umidade dos poros do concreto, ou ainda, que a resistência do concreto no estado saturado é superestimada.

Os resultados acima descritos indicam que existe influência positiva ou negativa do estado do corpo-de-prova (seco ou saturado) no momento do ensaio. Ainda, nos levam a refletir sobre a possibilidade de concretos de alto desempenho quando submetidos à tração na flexão apresentarem resultados a favor da segurança quando secos e não quando saturados (este último caso é o especificado por norma). Nos ensaios estáticos realizados a saturação do corpo-de-prova garantiu maior resistência ao CAD.



**Figura 3** Resistência à tração na flexão para amostras com os tipos de cura A e B para diferentes relações água/cimento.

**Tabela 4** Resistências obtidas para o CAD para diferentes tipos de cura e diferentes relações a/c

Relação a/c	Tipo de cura	CP 100 x 100 x 400 mm				
		$f_{ct,f}$ (MPa)	Carga (N)	Média (MPa)	s (MPa)	cv (%)
0,365	A	6,70	19760	<b><u>6,50</u></b>	0,22	3,32
		6,20	17830			
		6,60	19750			
	B	5,70	16280	<b><u>5,97</u></b>	0,38	6,32
		6,50	18210			
		5,70	17120			
0,365	A	6,80	19220	<b><u>6,63</u></b>	0,31	4,66
		6,90	19950			
		6,20	17550			
	B	5,80	17080	<b><u>5,40</u></b>	0,29	5,45
		5,10	14630			
		5,30	15360			
	C	7,20	20960	<b><u>7,27</u></b>	0,09	1,30
		7,40	21260			
		7,20	20720			
0,383	A	5,40	15330	<b><u>6,00</u></b>	0,54	8,92
		5,90	17480			
		6,70	19260			
	B	5,50	15390	<b><u>4,80</u></b>	0,54	11,15
		4,20	12160			
		4,70	13510			
0,409	A	5,30	15390	<b><u>5,40</u></b>	0,08	1,51
		5,50	15740			
		5,40	15400			
	B	3,90	10990	<b><u>4,57</u></b>	0,48	10,48
		4,80	13830			
		5,00	14230			

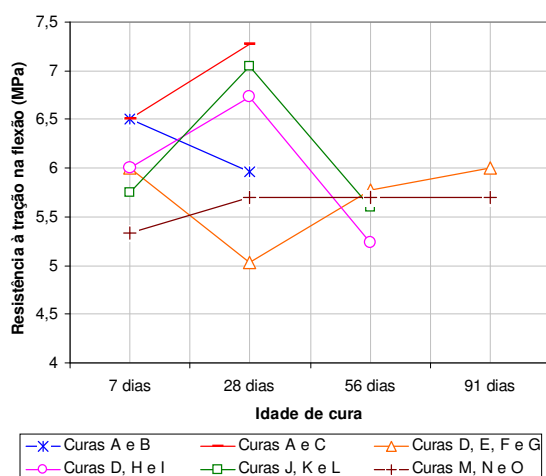
Na Figura 4 e na Tabela 5 são apresentados resultados de resistência à tração na flexão para o CAD e as respectivas cargas de ruptura necessária para o traço com relação a/c 0,365, utilizando diversos métodos de cura. Os valores destacados na Tabela 5 são as resistências à tração na flexão médias obtidas para cada método de cura adotado. Os resultados indicam que ocorre uma redução na

resistência à tração na flexão dos concretos secos quando comparados àqueles saturados no instante do ensaio, para todos os tipos de cura, e que este decréscimo varia de 8% a 22%. Este comportamento é verificado para amostras de mesmas idades (28 dias) secas e saturadas e para amostras saturadas aos 7 dias e secas aos 28 dias.

Quando se analisam as resistências obtidas em idades mais avançadas, os resultados apresentam valores bastante interessantes, quando mostram que para o concreto ensaiado no estado seco aos 56 e 91 dias, as resistências diminuíram em relação àquelas obtidas para o concreto saturado aos 28 dias. E mais, aos 56 e aos 91 dias, as resistências das amostras secas são praticamente iguais àquelas resultantes aos 7 dias saturadas. Isto ressalta notavelmente a influência da saturação do concreto no resultado do ensaio à tração na flexão, majorando-o.

Com relação aos diversos tipos de cura adotados, é possível observar que para todos os tipos de cura úmida analisados aos 7 dias (casos A, D e J) os resultados apresentam-se muito próximos entre A e D e entre D e J, podendo-se dizer que praticamente não existe diferença em se adotar quaisquer um dos três métodos de cura, e que a utilização do filme PVC não seria necessária para esta idade. Todavia, ao se analisar a cura química aos 7 dias (caso M), os resultados mostram valores inferiores aos de cura úmida, o que poderia estar ocorrendo pelo fato das amostras com cura química estarem secas no momento do ensaio; além do mais, é bem possível a perda de umidade do CCP curado seco para o ambiente em comparação aos demais casos.

As resistências dos corpos-de-prova aos 28 dias contínuos em imersão em água ou em câmara úmida, com e sem filme PVC (casos C, H e K) também apresentaram resultados bastante semelhantes, o que indicaria não existir diferença em se adotar um ou outro método de cura, da mesma forma em que se poderia ou não adotar o PVC. A cura química aos 28 dias, revelou resultados muito inferiores àqueles apresentados para curas úmidas de 28 dias. Aos 56 dias, os resultados apresentaram-se bastante próximos para os casos F e L, sendo que para o caso I a resistência decresceu. Os resultados obtidos aos 56 dias e aos 91 dias apresentam-se praticamente iguais, mostrando que o ganho de resistência foi muito pequeno.



**Figura 4** Resistência à tração na flexão para diferentes métodos de cura e  $a/c=0,365$ .



**Tabela 5** Resistências obtidas para o CAD para diferentes tipos de cura e mesma relação a/c

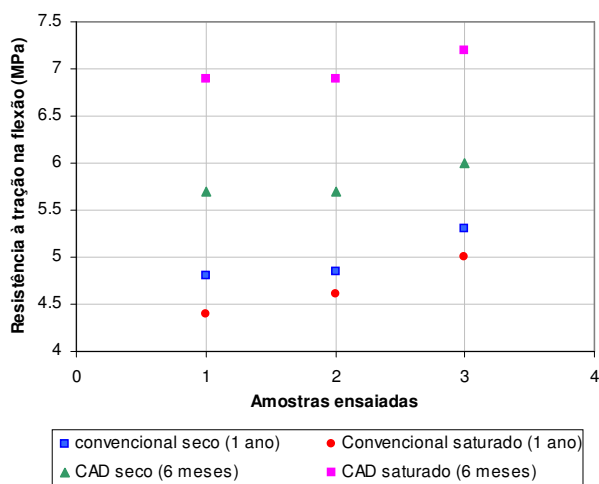
Relação a/c	Tipo de cura	CP 100 x 100 x 400 mm				
		$f_{ct,f}$ (MPa)	Carga (N)	Média (MPa)	s (MPa)	cv (%)
0,365	A	6,70	19760	<b><u>6,50</u></b>	0,22	3,32
		6,20	17830			
		6,60	19750			
	B	5,70	16280	<b><u>5,97</u></b>	0,38	6,32
		6,50	18210			
		5,70	17120			
	C	7,20	20960	<b><u>7,27</u></b>	0,09	1,30
		7,40	21260			
		7,20	20720			
0,365	D	6,00	17580	<b><u>6,00</u></b>	0,24	4,08
		6,30	18250			
		5,70	16350			
	E	5,20	14770	<b><u>5,03</u></b>	0,17	3,38
		5,10	14710			
		4,80	13430			
	F	6,10	17130	<b><u>5,77</u></b>	0,25	4,33
		5,70	16420			
		5,50	15420			
0,365	G	6,00	16970	<b><u>6,00</u></b>	0,24	4,08
		6,00	17170			
		5,70	15770			
	H	6,60	19150	<b><u>6,73</u></b>	0,09	1,40
		6,80	19310			
		6,80	19490			
	I	5,30	14970	<b><u>5,23</u></b>	0,09	1,80
		5,10	14450			
		5,30	14940			
0,365	J	5,30	15260	<b><u>5,75</u></b>	0,45	7,83
		6,20	17730			
		7,00	19960			
	K	7,10	20450	<b><u>7,05</u></b>	0,05	0,71
		5,60	15820			
		5,60	15920			
	M	5,10	14210	<b><u>5,33</u></b>	0,17	3,19
		5,40	15050			
		5,50	15280			
0,365	N	5,60	16130	<b><u>5,70</u></b>	0,08	1,43
		5,80	16440			
		5,70	16770			
	O	5,20	14920	<b><u>5,70</u></b>	0,45	7,98
		6,30	18850			
		5,60	16100			

Na Tabela 6 estão apresentados os resultados de resistência à tração na flexão obtidos para o CAD e para o concreto convencional, onde o método de cura utilizado para cada tipo de concreto foi: (a) para o CAD, cura em câmara úmida por sete dias com o corpo-de-prova envolto por filme PVC, sendo que após a cura úmida de 7 dias os corpos-de-prova ficaram envoltos pelo PVC em cura ambiente por 6 meses; nesta idade foram realizados ensaios com o concreto no estado seco e no estado saturado; para os ensaios saturados, o concreto ficou imerso em tanque com água por sete dias, anteriormente à data de ensaio; (b) para o concreto convencional, cura em tanque com imersão em água por 28 dias; após os 28 dias os corpos-de-prova permaneceram em cura ambiente por um ano; nesta idade foram realizados ensaios com o concreto no estado seco e no estado saturado; para os ensaios saturados o concreto ficou imerso em tanque com água por sete dias, anteriormente à data de ensaio. Estes ensaios foram realizados para verificar se o concreto convencional teria o mesmo comportamento que o concreto de alto desempenho quanto à resistência à tração na flexão quando seco e saturado, observando-se que este fato não ocorreu para o concreto convencional (resistência média diminuiu ligeiramente após a saturação).

**Tabela 6** Resistências obtidas para o concreto convencional e o CAD

Tipo de concreto	Concreto convencional SECO	Concreto convencional SATURADO	CAD SECO	CAD SATURADO
Resistência à tração na flexão (MPa)	4,85	5,00	6,00	6,90
	4,80	4,40	5,70	6,90
	5,30	4,60	5,70	7,20
Resistência à tração na flexão média (MPa)	5,00	4,70	5,80	7,00

A Figura 5 ilustra os resultados apresentados na Tabela 6 para o concreto convencional e para o CAD no estado seco e saturado, podendo-se inferir da mesma os seguintes comentários: (1) o comportamento do concreto convencional, à tração na flexão, é distinto daquele apresentado pelo CAD; (2) pode-se dizer que o concreto convencional apresenta a mesma resistência à tração na flexão tanto quando no estado seco quanto no estado saturado; (c) o CAD, quando no estado saturado, apresenta uma resistência bastante superior àquela no estado seco.



**Figura 5** Resistência à tração na flexão para o concreto convencional e para o CAD

Visto que o comportamento anômalo da resistência volta a ocorrer após longo período de cura seca seguido de saturação, deve ser descartada a possibilidade de retração autóloga estar afetando os resultados nas primeiras idades de cura. Na realidade, a estrutura de baixa porosidade dos CAD, não só em termos quantitativos mas também quanto ao diâmetro dos poros, contribui para a ocorrência de uma relativa dificuldade de eliminação rápida da água na estrutura interna do concreto durante um ensaio (que é portanto não drenado).

Assim, estando plenamente saturado o CAD (difícil condição de ocorrência em pista), há ocorrência nos micro-poros de tensão de sucção negativa, que agiria se opondo ao esforço de tração que surge nos limites das calotas dos poros saturados, o que resultaria na necessidade de maior tensão, portanto maior esforço, para ruptura do concreto; tal fenômeno não se verificou para corpos-de-prova moldados com um concreto convencional de pavimentação quando o consumo de cimento é menor, a estrutura granular sutilmente mais aberta e sem adição de sílica ativa na mistura.

Estudos futuros sobre a ação da água sob esforços dentro das microestrutura cristalina dos CAD poderão trazer maiores luzes ao esclarecimento do mecanismo observado durante os ensaios. Como se sabe, em ensaios de compressão, mesmo em CAD, a saturação possui um efeito de redução na resistência do corpo-de-prova. Em estruturas de pavimento de concreto simples, definitivamente respondendo mecanicamente à tração na flexão, não há portanto sustentação técnica para manter o corpo-de-prova saturado, como prevê a norma brasileira, que no entanto foi consolidada anteriormente ao advento e emprego do CAD em pavimentação; tal fato abre a necessidade de revisão da norma em questão para aplicação de concretos em pavimentação no que tange à imersão dos corpos-de-prova.

Outro fato que merece destaque, e por conseguinte comentários conclusivos, é que o CAD curado com imersão ou ainda envolto em PVC, portanto, em condições muito diferentes daquelas normais em pista (cura química), apresentaram resultados muito discrepantes entre si. Os melhores resultados em termos de resistência ocorreram para concretos imersos, tanto aos 7 quanto aos 28 dias (curas A e C), se comparados ao emprego de embalagem em PVC e cura em câmara úmida (curas D e H), pois, nestes casos, a resistência diminuiu sistematicamente de 0,5 MPa. Quanto à cura química, observou-se queda ainda mais sensível na resistência (de 6,5 para 5,3 MPa aos 7 dias; de 7,3 para 5,7 MPa aos 28 dias); esta queda ocorre tanto aos 7 dias, sendo para idades posteriores mais insatisfatórios ainda os resultados, devido ao próprio tipo de cura quando há certamente troca de umidade com o ambiente. Fica evidente que deverão ser estudados procedimentos de cura adequados durante o controle tecnológico em obras de pavimentação com emprego do CAD pois, aqueles atualmente prescritos em norma levariam a crer em valores de resistência estatísticos que não possuem equivalência com os reais resultados atingidos pelo concreto na pista durante seu complexo e comprometido processo de hidratação, dadas as reais circunstâncias ambientais e de cura, que não são representadas adequadamente no processo de controle tecnológico empregado.

## 5. CONCLUSÕES

Diante da pesquisa em laboratório, que permitiu confrontar resultados para diferentes métodos de cura em ensaios de resistência à tração na flexão para corpos-de-prova prismáticos, pode-se concluir que:

- Para concretos de alto desempenho ensaiados à tração na flexão existe influência do processo de cura na resistência do concreto;

- As amostras de CAD saturadas apresentaram valores de resistência à tração na flexão superiores às aquelas em estado seco;
- Concretos ensaiados aos 7 dias saturados, apresentaram resistências superiores às daqueles ensaiados aos 28 dias secos;
- Em idades mais avançadas (56 e 91 dias), as amostras de CAD secas apresentaram praticamente as mesmas resistências que aos 7 dias saturados;
- Os concretos curados com cura química apresentaram resistências inferiores às dos concretos curados com cura úmida, possivelmente devido a perda de umidade para o meio ambiente durante o processo de hidratação e cristalização da solução supersaturada;
- O concreto convencional parece não apresentar o mesmo comportamento à tração na flexão que o CAD; este fato pode ser atribuído à estrutura mais densa e menos porosa apresentada pelo CAD, necessitando-se de maiores estudos sob este aspecto;
- A norma brasileira para ensaios de tração na flexão deveria ser revista para o caso de resistência de concretos de alto desempenho, pois mantidas as condições e procedimentos atuais resultaria na superestimação da resistência do CAD, o que seria desfavorável quanto à durabilidade de pavimentos que se utilizem desse tipo de concreto.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores expressam sua gratidão às seguintes instituições que deram suporte estratégico às pesquisas realizadas: Associação Brasileira de Cimento Portland (moldagem e ensaio estático dos concretos); S.A. Indústrias Votorantim (fornecimento dos agregados e cimento CP II E); Holcim S.A. (fornecimento de cimento ARI e de areia da Depressão Periférica do Estado de São Paulo); Reax (fornecimento de aditivos); Camargo Corrêa S.A. (fornecimento de sílica ativa). O autor principal agradece à bolsa de doutorado concedida pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agostini, L. R. S.; Nunes, N.L. (1996). *Método de cura para concreto de alta resistência*. Revista Ibracon, ago/set, pp. 23-30, São Paulo.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1994) Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto – procedimento. NBR 5738/94, Rio de Janeiro.
- Balbo, J. T.; Severi, A. A.; Rodolfo, M. P.; Pereira, D. S. (2000) *Pesquisa dos efeitos do clima sobre pavimentos de concreto: instrumentação da pista experimental na USP*. In: Panorama Nacional da Pesquisa em Transportes 2000, ANPET, pp.533-538, Gramado.
- Balbo, J.T. (2003) *Análise mecanicista do desempenho de concreto de elevada resistência em wtud sob severas condições de tráfego*. In: Panorama Nacional da Pesquisa em Transportes 2003, Volume 1, pp.335-346, Rio de Janeiro.
- Balbo, J.T.; Cervo, T.C.; Silva, C.O.; Curti, R. (2003). *Sobre as dimensões de amostras para ensaios de tração na flexão para controle tecnológico de pavimentos de concreto de cimento Portland*. In: Anais da 12ª. Reunião Anual de Pavimentação (CDrom), Aracajú.
- Cervo, T.C. (2003). *Estudo do comportamento à fadiga de concretos de cimento Portland para pavimentação*. Relatório FAPESP nº 1, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo. Orientador.: José Tadeu Balbo. Bolsa de Doutorado. Processo 01/13508-5, São Paulo.
- Cervo, T.C. (2004). *Estudo do comportamento à fadiga de concretos de cimento Portland para pavimentação*. Texto submetido para exame de Qualificação de Doutorado na Escola Politécnica da USP; Orientador: José Tadeu Balbo, São Paulo.
- Tan, K; Gjorv, O. E. (1996). *Performance of concrete under different curing conditions*. Cement and Concrete Research, vol. 26, n. 3, pp. 355-361.

#### Laboratório de Mecânica de Pavimentos

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - PTR

Av. Prof. Almeida Prado, travessa 2, nº 83 - Cidade Universitária - São Paulo - CEP 05508-900

Fone: (11) 3091-5306 ; Fax: (11) 3091-5716 ; <http://www.ptr.usp.br/lmp>

e-mail: [tatiana.cervo@poli.usp.br](mailto:tatiana.cervo@poli.usp.br) [jotbalbo@usp.br](mailto:jotbalbo@usp.br)