

uma cadeia de éter carboxílico modificado, isento de cloretos, que atende as prescrições das normas ASTM C 494 (tipos A e F) e ASTM C 1017. Este aditivo possui pH entre 5 a 7, teor de sólidos de 28,5 a 31,5 % e densidade de 1,067 a 1,107 g/cm³.

Tabela 4.3: Características físicas dos agregados

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA	PERCENTAGEM RETIDA ACUMULADA		
	Abertura das peneiras (mm)	AREIA	BRITA
	19,0		0
	12,5		36
	9,50		68
	6,3		87
	4,8	0	99
	2,4	2	100
	1,2	8	
	0,6	30	
	0,3	76	
	0,15	90	
Módulo de Finura		2,06	6,67
Dimensão máxima característica (mm)		2,4	19,0
Índice de Forma		-	2,99
Absorção de água (%)		0,50	2,81
Massa Específica (g/cm ³)		2,61	2,50
Massa Unitária Solta (g/cm ³)		1,67	1,31

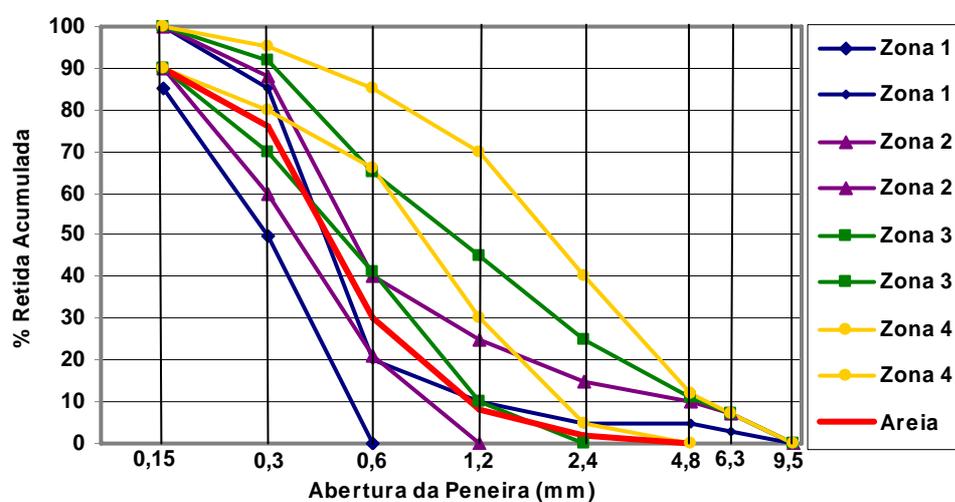


Figura 4.1: Curva granulométrica do agregado miúdo

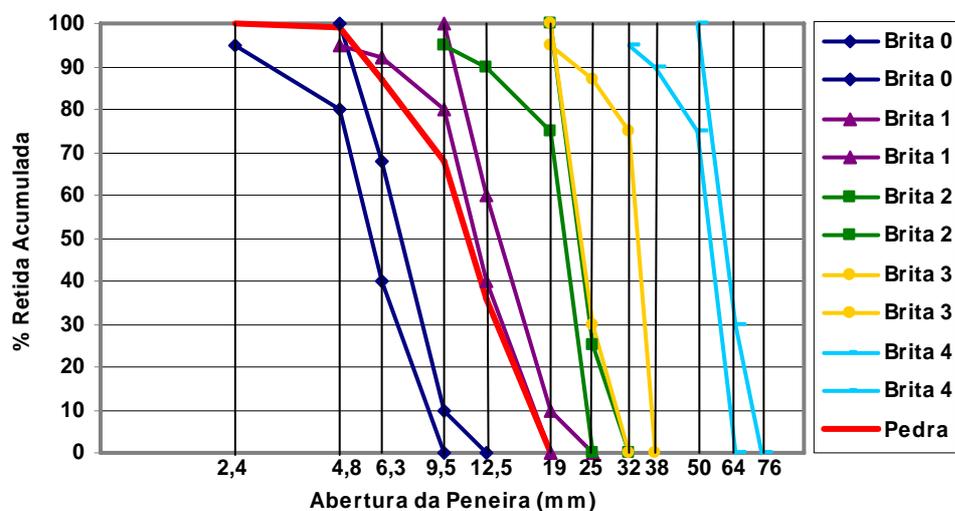


Figura 4.2: Curva granulométrica do agregado graúdo

4.3 PROPORCIONAMENTO DAS ADIÇÕES MINERAIS

Para investigar as influências das adições minerais na resistência e na penetração de cloretos, as adições minerais foram incorporadas aos concretos em substituição parcial da massa de cimento, de acordo com os teores indicados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Proporcionamento das adições minerais em cada mistura aglomerante

Nomenclatura das Misturas	Proporção dos materiais (% do total de aglomerante)			
	Cimento	Cinza de Casca de Arroz	Cinza Volante	Escória de Alto Forno
REF	100	-	-	-
10CCA	90	10	-	-
20CCA	80	20	-	-
30CCA	70	30	-	-
35CV	65	-	35	-
50EAF	50	-	-	50

As misturas contendo 50% escória de alto forno e 35% de cinza volante representam os cimentos comerciais CP III e CP IV, respectivamente, e são utilizadas para avaliação do desempenho das misturas com cinza de casca de arroz (foco do presente trabalho). As misturas com cimento puro servem de referência para todas as demais, ao mesmo tempo em que representam os concretos executados com cimento de alta resistência inicial.

4.4 DOSAGEM DOS CONCRETOS

O proporcionamento dos materiais para os concretos foi realizado segundo a metodologia proposta por HELENE & TERZIAN (1992), onde o teor ótimo de argamassa encontrado foi de 51%, em volume de materiais secos.

Devido a menor massa específica das adições minerais, em relação ao cimento, e o consequente aumento no volume de pasta quando o cimento é substituído por estes materiais, para que o teor de argamassa fosse mantido constante em todos os traços, tornou-se necessária a correção do volume de areia em cada mistura.

Para o traçado das curvas que indicam o comportamento dos concretos com diferentes aglomerantes, com relação às propriedades investigadas, em distintos níveis de resistência, os concretos foram dosados com três relações água/aglomerante, resultando nos traços unitários indicados na Tabela 4.5, no caso do concreto de referência.

Tabela 4.5: Traços unitários utilizados na dosagem dos concretos de referência

RELAÇÃO água/aglomerante	TRAÇO UNITÁRIO (aglom:areia:brita)
0,35	1 : 1,30 : 2,21
0,50	1 : 2,06 : 2,94
0,65	1 : 2,83 : 3,68

A consistência dos concretos, medida através do abatimento do tronco de cone (NBR 7223), foi fixada em 70 ± 10 mm. O teor de aditivo superplastificante necessário para obtenção da consistência desejada variou de 0% a 1,95%.

A Tabela 4.6 apresenta as quantidades de materiais por m³ de concreto correspondentes a cada mistura.

4.5 MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS-DE-PROVA

Para aumentar a confiabilidade dos resultados quando realizados os inter-relacionamentos das variáveis dependentes investigadas, todos os corpos-de-prova necessários aos ensaios propostos foram moldados em uma única etapa. Assim, para cada relação a/ag e período de cura de uma determinada mistura, foram moldados 12 corpos-de-prova cilíndricos (10x20cm), perfazendo um total de 648 cp's para todas as misturas. Destes 12 cp's, 8 foram destinados aos ensaios de resistência à compressão axial (4 por idade), 1 cp para o TRPC e 3 cp's para o EPCANP.

Com a finalidade de igualar a temperatura do concreto fresco para os diferentes traços em 18 °C, a partir da temperatura inicial dos agregados e dos aglomerantes, a temperatura da água foi corrigida através da Equação 4.1, proposta por MEHTA & MONTEIRO (1994), que correlaciona a temperatura do concreto com a massa e a temperatura inicial dos materiais constituintes.

Tabela 4.6: Consumo de materiais por m³ de concreto correspondente a cada mistura aglomerante

MISTURA	Relação a/ag	MATERIAIS, em Kg/m ³								
		AGLOM	CIM	CCA	CV	EAF	AREIA	BRITA	ÁGUA ¹	ADITIVO
REF	0,35	487	487	-	-	-	633	1076	170	0,97
	0,50	359	359	-	-	-	739	1055	180	-
	0,65	284	284	-	-	-	802	1043	185	-
10CCA	0,35	487	439	49	-	-	610	1076	170	2,44
	0,50	359	359	36	-	-	725	1055	180	0,72
	0,65	284	284	28	-	-	789	1043	185	-
20CCA	0,35	487	391	98	-	-	591	1076	170	4,64
	0,50	359	287	72	-	-	711	1055	180	1,80
	0,65	284	227	57	-	-	778	1043	185	0,85
30CCA	0,35	487	342	147	-	-	574	1076	170	9,53
	0,50	359	252	108	-	-	697	1055	180	3,77
	0,65	284	199	85	-	-	767	1043	185	1,99
35CV	0,35	487	315	-	170	-	583	1076	170	1,21
	0,50	359	232	-	125	-	703	1055	180	0,36
	0,65	284	184	-	99	-	772	1043	185	-
50EAF	0,35	487	244	-	-	244	615	1076	170	0,83
	0,50	359	179	-	-	179	728	1055	180	-
	0,65	284	142	-	-	142	792	1043	185	-

NOTAS:

1: Quantidade total de água na mistura, incluindo o aditivo. Para obtenção da quantidade de água de amassamento deve-se descontar a parte líquida do aditivo superplastificante, cujo teor de sólidos varia de 28,5 a 31,5%.

A consistência dos concretos, medida através do abatimento do tronco de cone, foi de 70 ± 10 mm.

$$T = \frac{0,22.(T_m.M_m + T_c.M_c) + T_a.Ma}{0,22.(M_m + M_c)} \quad (4.1)$$

onde,

T: temperatura da massa de concreto (°F)

T_m: temperatura dos agregados (°F)

T_c: temperatura do cimento (°F)

T_a: temperatura da água (°F)

M_m: massa de agregados (kg)

M_c: massa de cimento (kg)

M_a: massa de água (kg)

A moldagem dos corpos-de-prova foi executada de acordo com os preceitos da NBR 5378, sendo o adensamento realizado em mesa vibratória, onde o volume do cp foi preenchido em três camadas iguais e sucessivas.

Após a moldagem, os cp's foram armazenados em sala com temperatura controlada ($23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$) por um período de 24h. Decorrido este período os cp's de cada série investigada foram desmoldados e colocados em câmara úmida climatizada, à temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de 95%, e ali permaneceram até completarem os períodos de cura correspondentes a cada série (3, 7 e 28 dias), sendo logo após armazenados em sala coberta, sob condições de umidade e temperatura ambientais, até completaram a idade de ensaio. O período de cura de 28 dias foi escolhido para que fossem obtidas curvas de comportamento com maior precisão, visto que as variações nos parâmetros estudados entre períodos de cura de 7 e 14 ou 21 dias, por exemplo, são relativamente pequenas.

4.6 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados em corpos-de-prova cilíndricos (10x20 cm), nas idades de 28 (4 cp's) e 91 dias (4 cp's), e seguiram as recomendações da NBR 5738 e NBR 5739.

4.7 TESTE RÁPIDO DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS – TRPC (ASTM C1202)

Para cada série moldada foi separado um corpo-de-prova cilíndrico medindo 10x20 cm, que foi cortado em serra diamantada para a obtenção das duas amostras necessárias ao ensaio, medindo 95x51 mm.

Os ensaios para determinação da penetração de cloretos foram conduzidos segundo as prescrições da ASTM C1202, cuja metodologia fornece uma avaliação da resistência à penetração de cloretos através da relação com a condutância elétrica dos cp's de concreto.

Os procedimentos deste método de ensaio consistem, no monitoramento da quantidade de corrente passante através de um corpo-de-prova, durante o período de 6 horas, sob uma diferença de potencial de 60V DC. Uma das extremidades do cp está em contato com uma solução de hidróxido de sódio (0,3N em água destilada) e a outra está em contato com uma solução de cloreto de sódio (3% em massa, em água destilada). As leituras da corrente passante são realizadas a cada 30 min. A carga total passante (Q), em Coulombs, é, então, relacionada com a resistência à penetração de íons cloreto da amostra ensaiada por meio da Equação 4.2.

$$Q = 900.(I_0 + 2.I_{30} + 2.I_{60} + \dots + 2.I_{330} + I_{360}) \quad (4.2)$$

onde,

Q: carga total passante, em Coulombs;

I_0 : corrente inicial (tempo zero minutos), em Ámperes;

I_t : corrente após t min do início do ensaio, em Ámperes.

Os ensaios foram realizados em sala climatizada, com temperatura variando de 20 a 25 °C. Durante todo o período em que a diferença de potencial de 60 V DC foi aplicada, realizou-se o monitoramento da temperatura das soluções, devendo o ensaio ser interrompido caso esta temperatura ultrapassasse 90 °C, o que não ocorreu em nenhuma das amostras ensaiadas.

A carga total passante correspondente a cada série foi calculada através da média das cargas passantes de 2 cp's. A variação dos resultados entre os 2 cp's ficou dentro do limite especificado na ASTM C1202, para todas as amostras ensaiadas.

4.8 ENSAIO DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS POR ASPERSÃO DE NITRATO DE PRATA – EPCANP (AASHTO T259)

O Ensaio de Penetração de Cloretos por Aspersão de Nitrato de Prata (AgNO_3) tem o objetivo de, através de medidas das profundidades de penetração de cloretos em um corpo-de-prova de concreto em diferentes idades, calcular seu coeficiente k de difusão de íons cloreto.

Do total de corpos-de-prova cilíndricos (10x20cm) moldados para cada série, 3 cp's foram destinados ao ensaio de penetração de cloretos por aspersão de nitrato de prata. Este ensaio consiste basicamente dos seguintes procedimentos (ver Figuras 4.3 e 4.4):

- transcorrido o período de cura em câmara úmida de cada série, o cp cilíndrico 10x20cm correspondente foi cortado com serra diamantada em duas partes iguais medindo 10x10cm;
- as superfícies superior e inferior do cp foram pintadas com 3 demãos de verniz poliuretânico, para que apenas as laterais do cp tivessem contato com a solução de cloreto de sódio;
- os cp's foram, então, imersos em um tanque contendo solução salina com concentração de cloreto de sódio, semelhante à encontrada na água do mar (19.380ppm), até completarem as idades dos respectivos ensaios (7, 14, 28, 56 e 91 dias de imersão);
- na data de cada ensaio os cp's foram retirados do tanque e rompidos diametralmente, dando origem a duas amostras. Sobre a superfície de ruptura foi realizado o borrifamento de uma solução de AgNO_3 . Com isto, as regiões do corpo-de-prova que contém uma concentração superior a 0,15% de cloretos livres, em relação à massa do cimento, adquirem coloração esbranquiçada. Nos locais não atingidos pelos íons cloreto a coloração é marrom-avermelhada (semelhante à ferrugem);
- com paquímetro de precisão são realizadas as medidas da profundidade de penetração dos íons cloreto, sendo a profundidade média de penetração da amostra calculada pela média de 10 leituras, conforme esquematizado na Figura 4.3b.

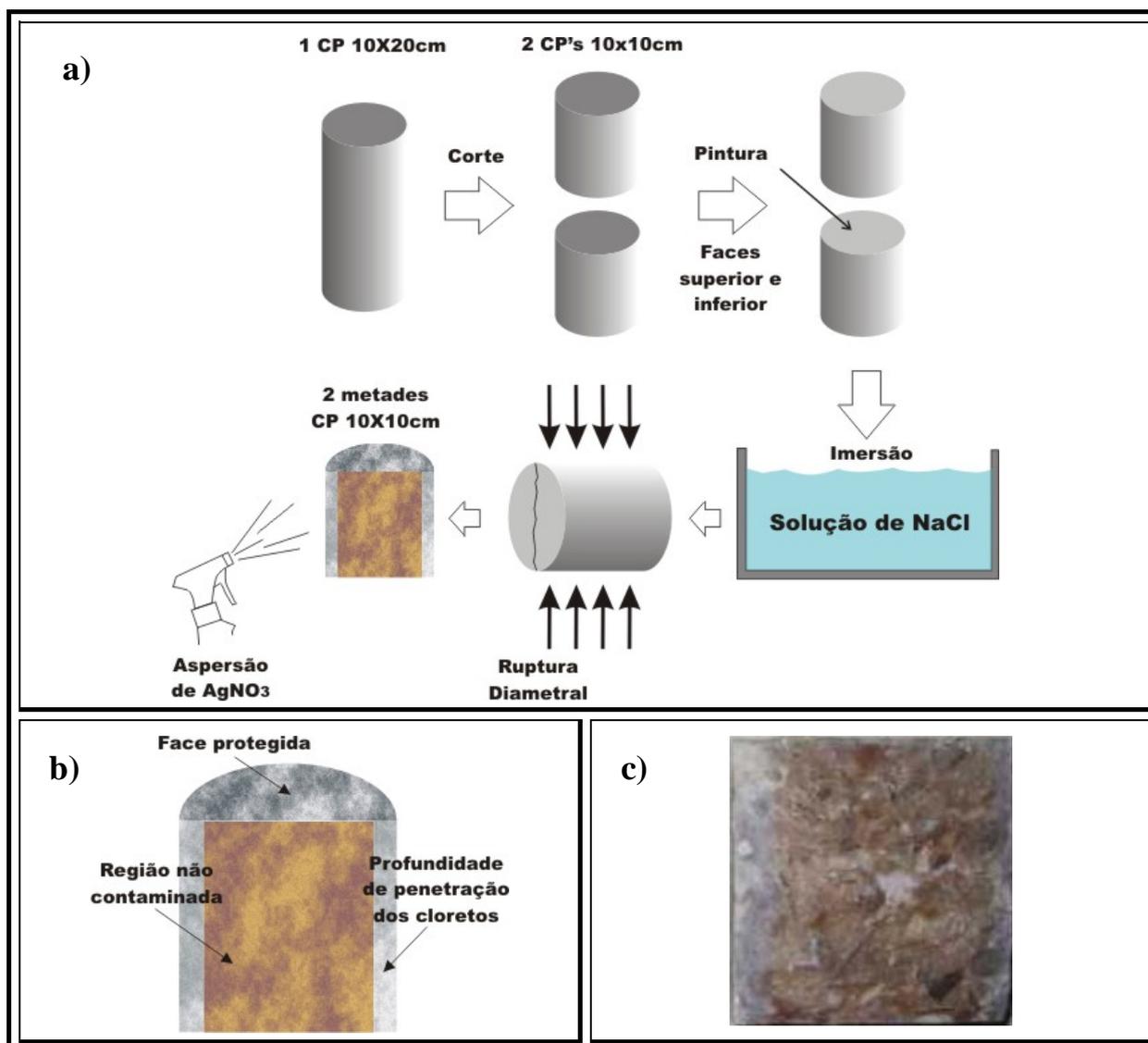


Figura 4.3: Metodologia do EPCANP. a) Procedimentos do ensaio. b) Representação da face rompida do cp, demonstrando a região onde é medida a profundidade de penetração dos íons cloreto. c) Fotografia de um cp onde foi borrifada a solução de AgNO_3 . A região mais clara (laterais) representa a parte do cp contaminada pelos íons cloreto.

Segundo BAKKER (1988), o coeficiente de difusão, que representa o índice de penetração de cloretos no EPCANP, podem ser determinados através da equação 4.3:

$$x = a + k(t)^{1/2} \quad (4.3)$$

onde,

x: profundidade média de penetração no cp, em mm;

a: ponto de intersecção da reta com o eixo y. Por ser, normalmente, um valor muito pequeno, este foi desconsiderado;

t: tempo em que o cp esteve imerso até a data do ensaio, em semanas

Deste modo, os valores de profundidade média de cada série são então plotados em um gráfico em função do tempo de imersão, sendo que a inclinação da reta (coeficiente angular) representa o coeficiente de difusão de cloretos do concreto, como exemplificado na Figura 4.4. Como descrito anteriormente, cada ponto plotado corresponde à média de 20 leituras de profundidade de penetração (10 leituras por cp em 2 cp's).

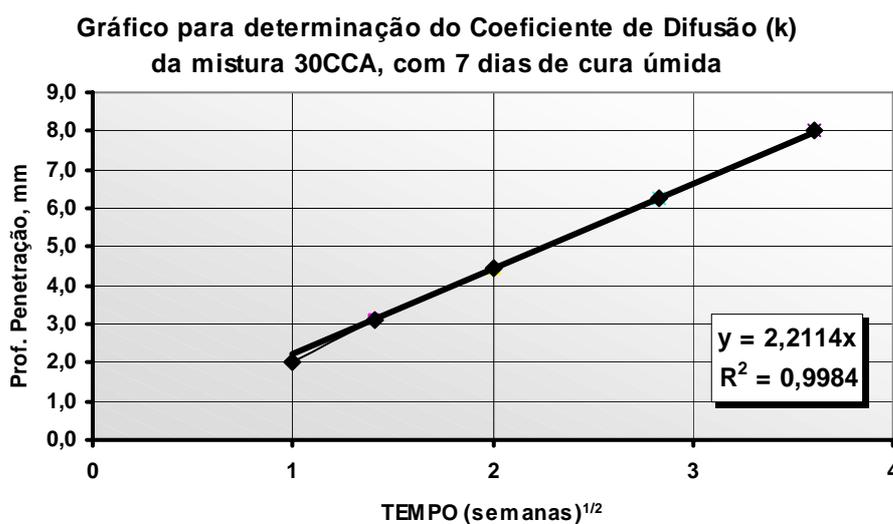


Figura 4.4: Gráfico auxiliar para determinação do coeficiente k de difusão de cloretos através da medida da profundidade de penetração ao longo do tempo. O k é determinado pelo coeficiente angular da reta. No caso k é igual a $2,2114 \text{ mm}/(\text{semana})^{1/2}$.

CAPÍTULO 5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 INTRODUÇÃO

No presente capítulo é feita a análise dos resultados das seis misturas testadas, conforme detalhado no Capítulo 4. Em cinco delas houve substituição de parte da massa de cimento por adições minerais: 10%, 20% e 30% de cinza de casca de arroz (CCA), 35% de cinza volante (CV) e 50% de escória de alto forno (EAF). A sexta mistura, chamada concreto de referência (REF), foi executada com cimento puro, servindo assim de base de comparação para a verificação do desempenho das demais frente às propriedades investigadas. Para isto, foram utilizadas três relações água/aglomerante (0,35, 0,50 e 0,65) e três períodos de cura úmida (3, 7 e 28 dias), totalizando 54 séries.

Em um primeiro momento são avaliados os resultados de resistência à compressão axial e penetração de cloretos pelos métodos da ASTM C 1202 e por aspersão de nitrato de prata – EPCANP. Através de uma abordagem comparativa entre as diversas misturas, com e sem adições minerais, são discutidas as alterações nestas propriedades frente à variação do tipo de adição, do percentual de substituição, da relação a/ag, do tempo de hidratação, em especial do período de cura, objetivo central desta pesquisa.

Em uma segunda etapa, por meio da integração dos resultados, procurou-se conhecer as relações existentes entre as diferentes propriedades estudadas. A partir daí foram realizadas análises das variações do consumo de aglomerante, carga passante e coeficiente de difusão de cloretos em dois níveis de resistência, bem como das variações da resistência à compressão, carga passante e consumo de aglomerante para misturas com igual coeficiente de difusão.

5.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Os resultados de resistência à compressão aqui apresentados são resultantes da média aritmética de 4 corpos-de-prova cilíndricos (10x20cm) moldados para cada mistura e condição de cura investigadas.

A interpretação dos resultados é auxiliada por gráficos e quadros, permitindo uma análise integrada de quais os fatores, de que forma e em que grau influenciam a resistência mecânica do concreto, tais como a relação água/aglomerante, a idade do concreto, o tipo e percentual de substituição das adições e do período de cura.

No Quadro 5.1 são encontrados os valores médios de resistência à compressão para todas as misturas, relações a/ag, período de cura e idade do concreto investigados. Também constam neste quadro os coeficientes A e B da curva de Abrams e o coeficiente de determinação (r^2) obtidos a partir da correlação entre resistência à compressão e a relação água/aglomerante de cada série.

5.2.1 Efeito isolado da relação água/aglomerante

Como era esperado, e já bem sedimentado no meio científico, a resistência a compressão de todas as misturas testadas (com e sem adição mineral) diminuiu com a elevação da relação água/aglomerante, independente da idade e período de cura analisados.

Quadro 5.1 – Resultados de resistência à compressão axial (MPa), coeficientes de Abrams e de determinação das misturas investigadas aos 28 e 91 dias de idade, de acordo com a relação a/ag e período de cura (dias) em câmara úmida

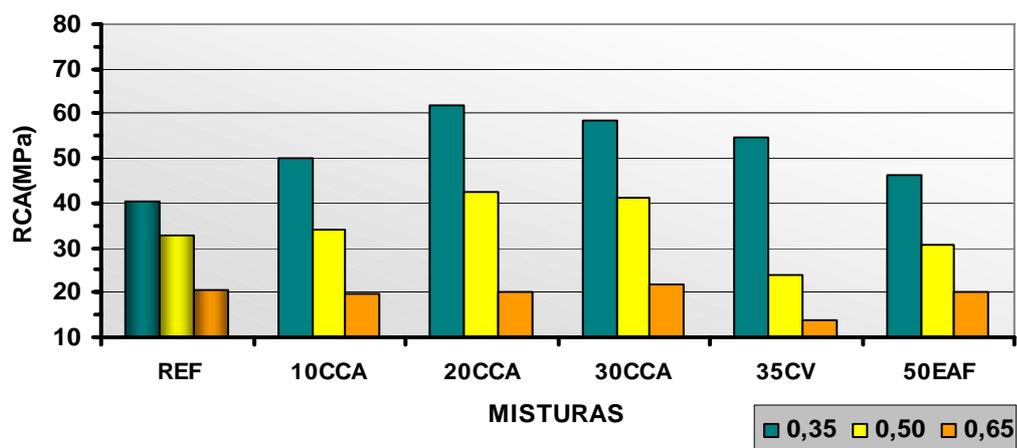
MISTURA	Período de Cura (dias)	28 DIAS						91 DIAS					
		a/ag			Coeficientes ^A			a/ag			Coeficientes ^A		
		0,35	0,50	0,65	A	B	r ²	0,35	0,50	0,65	A	B	r ²
REF	3	40,2	32,8	20,4	92,80	9,59	0,9895	59,2	40,3	30,3	227,20	9,23	0,9845
	7	45,8	40,7	24,1	103,65	8,50	0,9562	64,3	51,9	33,9	140,56	8,45	0,9943
	28	53,7	47,3	27,6	125,03	9,19	0,9593	72,6	56,8	35,0	176,97	11,38	0,9957
10CCA	3	49,9	34,2	19,6	152,95	22,53	0,9997	60,5	44,0	31,7	128,80	8,62	0,9964
	7	60,1	43,2	26,0	164,54	16,33	0,9999	71,5	54,2	32,9	183,52	13,30	0,9982
	28	68,1	46,9	31,7	166,70	12,79	0,9955	76,4	62,1	38,6	177,00	9,71	0,9903
20CCA	3	62,0	42,3	20,1	245,08	42,72	0,9994	71,8	49,3	29,9	203,69	18,54	0,9991
	7	68,2	47,7	24,5	237,06	30,34	0,9993	81,4	55,4	35,6	215,68	15,75	0,9968
	28	72,0	52,3	33,2	168,69	13,20	0,9999	85,6	62,9	41,7	201,52	11,00	0,9998
30CCA	3	58,7	41,2	21,9	194,23	26,75	0,9996	63,0	48,4	29,0	162,34	13,28	0,9967
	7	61,3	44,9	23,2	201,84	25,50	0,9968	66,7	55,1	31,7	202,79	16,80	0,9995
	28	67,4	50,1	29,9	180,46	15,01	0,9904	78,9	65,1	37,3	200,94	12,14	0,9816
35CV	3	54,9	23,8	13,8	261,91	99,76	0,9600	57,0	31,6	20,8	179,57	28,80	0,9739
	7	55,1	28,5	14,2	269,69	91,81	0,9852	60,0	43,7	22,8	196,13	25,16	0,9974
	28	58,2	36,6	16,7	263,46	64,17	0,9997	66,8	44,6	24,1	227,32	29,91	0,9997
50EAF	3	46,3	30,8	20,2	122,14	15,88	0,9941	54,7	40,6	25,7	135,59	12,40	0,9998
	7	49,3	32,8	21,8	127,75	15,18	0,9933	58,0	44,2	27,0	146,81	12,79	0,9980
	28	52,8	35,2	23,2	138,08	15,50	0,9941	61,8	46,1	29,0	153,74	12,45	0,9996

A: Coeficientes A e B das curvas de Abrams que relacionam a resistência à compressão f_c e relação água/aglomerante x , dada pela expressão $f_c = A/B^x$, em MPa, para cada mistura testada.

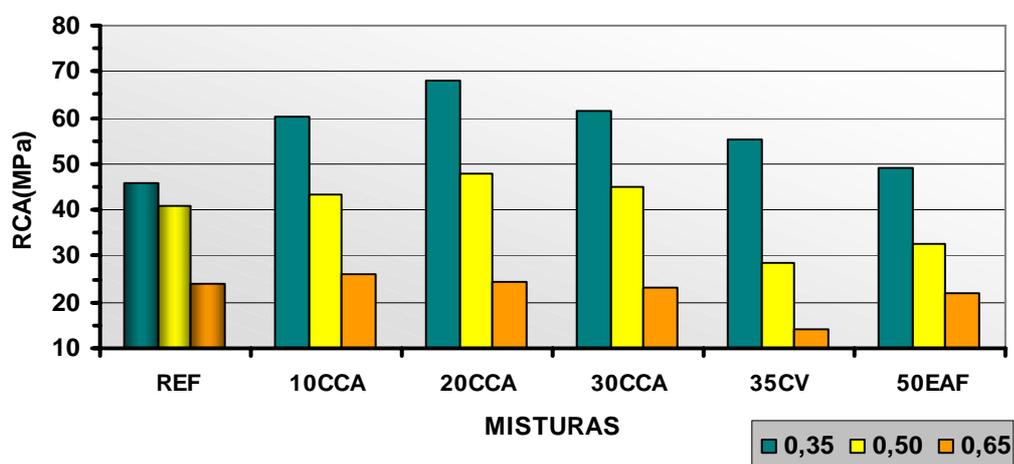
Aos 28 dias de idade, a perda de resistência, pelo aumento da relação a/ag de 0,35 para 0,50, variou de 11 a 57%, para as misturas REF (com cura de 7 dias) e 35CV (cura de 3 dias), respectivamente, considerando os três períodos de cura. Já para as misturas com cinza de casca de arroz, nos três níveis de substituição, e escória de alto forno, a redução da resistência foi de 30 %, em média, conforme Figura 5.1.

Da mesma forma, quando a relação a/ag passa de 0,35 para 0,65, os decréscimos na resistência à compressão variam de 51% (REF, cura de 28 dias) a 75% (35CV, curada por 3 dias). Para as demais misturas esta redução foi da ordem de 60%.

a) 3 dias de Cura Úmida



b) 7 dias de Cura Úmida



c) 28 dias de Cura Úmida

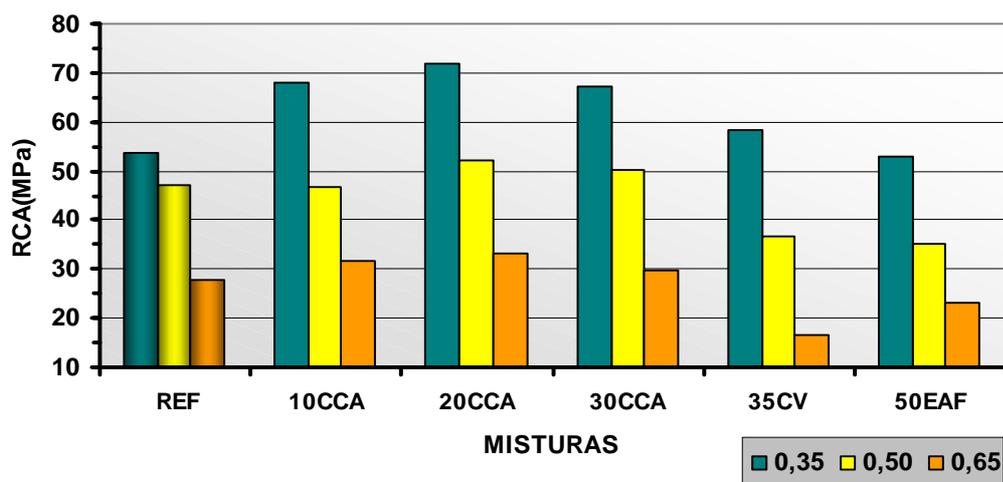
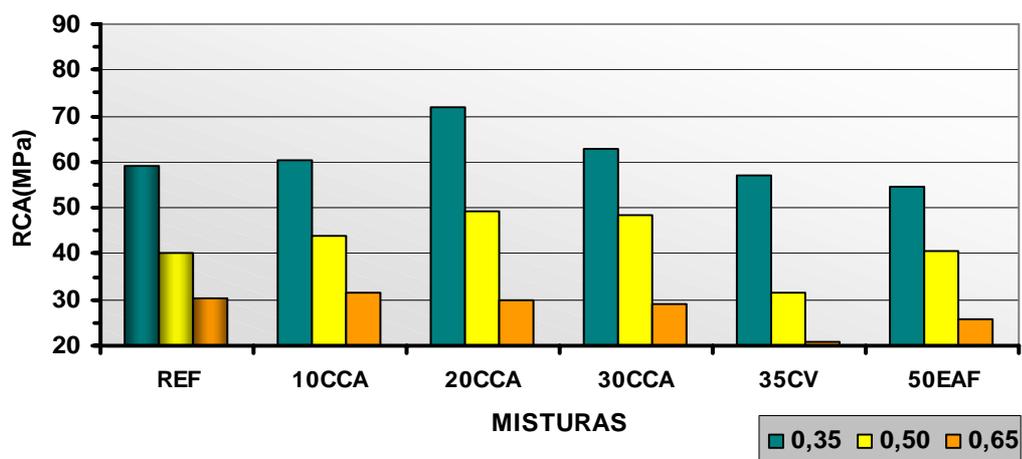
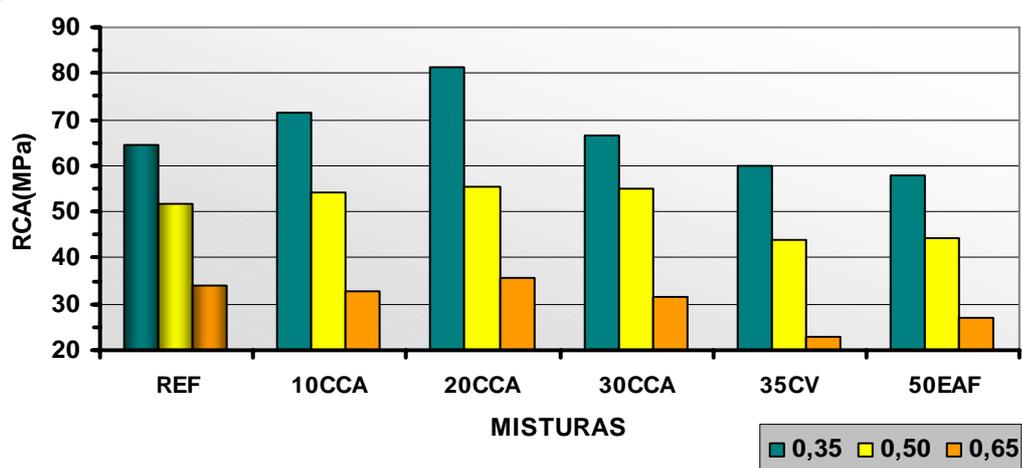


Figura 5.1 – Resistência à compressão axial, aos 28 dias, para as misturas investigadas, com períodos de cura úmida de 3, 7 e 28 dias.

a) 3 dias de Cura Úmida



b) 7 dias de Cura Úmida



c) 28 dias Cura Úmida

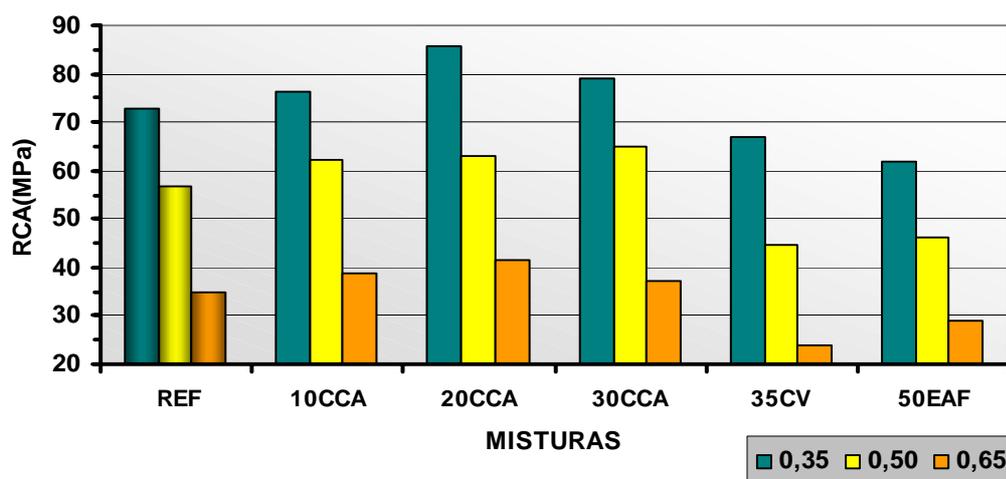


Figura 5.2 – Resistência à compressão axial, aos 91 dias, para as misturas investigadas, com períodos de cura úmida de 3, 7 e 28 dias.

Comportamento semelhante é observado aos 91 dias de idade (Figura 5.2), porém com menor magnitude. Novamente as misturas contendo cinza volante foram as que apresentaram maior decréscimo de resistência ao se elevar a relação a/ag de 0,35 para 0,65, chegando a 64%, enquanto os concretos sem adição – REF (com cura de 7 e 28 dias) – foram os que sofreram menor influência. Assim como aos 28 dias de idade, as demais misturas mantiveram-se num patamar intermediário, tendo sua resistência reduzida de 53%, em média.

Assim, independente do período de cura adotado, observa-se que a elevação da relação a/ag tem maior impacto sobre os concretos em que parte da massa de cimento foi substituída por adições minerais, uma vez que estes sofreram maior queda de resistência. Entre estes, os executados com adição de cinza volante se mostraram mais sensíveis ao aumento da quantidade de água na mistura.

5.2.2 Efeito isolado da idade do concreto (idade do ensaio)

No que diz respeito à idade do concreto, todas as misturas apresentaram crescimento nos valores de resistência a compressão, quando são comparados os valores obtidos aos 28 e 91 dias de idade. No entanto, a taxa de crescimento depende, entre outros fatores, da reatividade de cada adição, do percentual de substituição, da relação a/ag e do período de cura impostas ao concreto, conforme também observado por HASSAN *et al* (2000), COSTENARO & LIBORIO (2003), YEAU & KIM (2004), GÜNEYISI *et al* (2005), entre outros.

Fazendo-se uma análise conjunta dos dados, é possível notar que o incremento de resistência é maior com o aumento da relação a/ag. Ou seja, os concretos com maior quantidade de água, além de apresentarem resistência final inferior, têm ganho de resistência no período inicial (até 28 dias) mais lento. Isto acontece para todos os períodos de cura estudados.

Para melhor visualização das afirmações anteriores, foi definida a Taxa de Resistência Final (TRF), calculada pela razão entre as resistências à compressão aos 28 e 91 dias de idade, vezes 100% (Equação 5.1). Esta taxa informa qual a percentagem da resistência final (aqui tomada como sendo aos 91 dias) é atingida aos 28 dias, dando idéia da cinética das reações de hidratação dos compostos cimentícios e das reações pozolânicas de cada mistura aglomerante.

Então,

$$\text{TRF}(\%) = [\text{fc}_{28}/\text{fc}_{91}].100 \quad (5.1)$$

onde,

TRF: Taxa de Resistência Final, em %;
 fc_{28} : resistência à compressão na idade de 28 dias, em MPa;
 fc_{91} : resistência à compressão na idade de 91 dias, em MPa.

No Quadro 5.2 são apresentados os valores de TRF individuais e dos conjuntos de misturas estudadas e na Figura 5.3 é possível a visualização conjunta do incremento de resistência com a evolução da idade de cada mistura, conforme a relação a/ag e período de cura úmida.

Observa-se nesse quadro que a TRF média de todos os concretos com relação a/ag igual a 0,35 é da ordem de 85% (MC), variando de 68%, para o concreto de referência, a 96% para 35CV, ambos com cura de 3 dias. Quando a relação a/ag é elevada para 0,50, a TRF média do conjunto de misturas gira em torno de 79%, sendo o menor valor (65%) encontrado para 35CV, quando curada por 7 dias, e o maior (86%) para a mistura com 20% de cinza de casca de arroz, com cura de 3 e 7 dias. Seguindo uma tendência decrescente, a TRF média para a relação a/ag 0,65 é de 73%, ficando a mistura 35CV, curada por 7 dias, no limite inferior (62%) e a mistura 10CCA no limite superior (82%), quando curada por 7 dias.

Assim, percebe-se que à medida que a relação a/ag é aumentada, o desenvolvimento da resistência no primeiro período acontece de forma mais lenta, independente do procedimento de cura que seja adotado. Apesar de todas as misturas de cada conjunto seguirem, de forma global, a mesma tendência, individualmente elas apresentam diferenças entre si (TRFs individuais), devido às características físicas e químicas intrínsecas de cada adição, que interferem nas reações de hidratação e, conseqüentemente, no ganho de resistência ao longo do tempo.

Quadro 5.2: Valores de TRF(%) individuais, média individual (Mi) e média de cada conjunto (MC) de misturas, para as três relações água/aglomerante utilizadas

TRF (%) individual e média de acordo com a relação água/aglomerante para as diversas misturas																		
a/ag	0,35						0,50						0,65					
MISTURAS	REF	10CCA	20CCA	30CCA	35CV	50EAF	REF	10CCA	20CCA	30CCA	35CV	50EAF	REF	10CCA	20CCA	30CCA	35CV	50EAF
3d	68	82	86	93	96	85	81	78	86	85	75	76	67	62	67	76	66	79
7d	71	84	84	92	92	85	78	80	86	81	65	74	71	79	69	73	62	81
28d	74	89	84	85	87	85	83	76	83	77	82	76	79	82	80	80	69	80
Mi ^A	71	85	85	90	92	85	81	78	85	81	74	75	72	74	72	76	66	80
MC ^B	85%						79%						73%					

A: A Média Individual Mi é a média dos valores de TRF dos 3 períodos de cura para cada mistura.

B: A Média do Conjunto MC é a média de todos os valores de TRF de todas as misturas para uma mesma relação água/aglomerante.

5.2.3 Efeito isolado da substituição do cimento pelas adições minerais

A reatividade das adições minerais, em igual idade, relação a/ag e período de cura, pode ser avaliada através da Taxa de Desempenho da Adição (TDA), que indica o aumento ou redução percentual de resistência à compressão de determinada mistura em relação ao concreto de referência, em que uma parte do cimento é substituído pela adição, quando submetidos às mesmas condições de cura e relação a/ag.

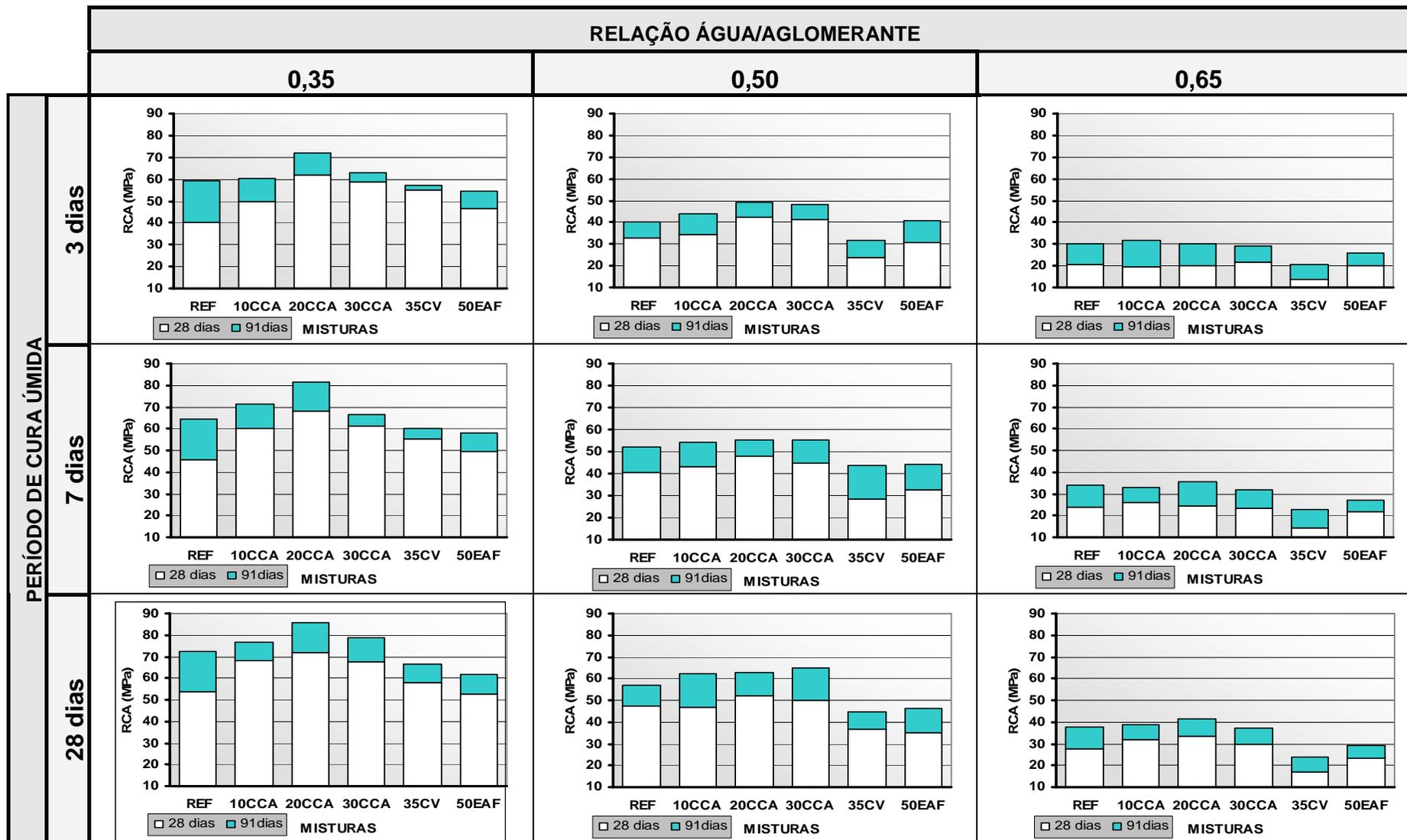


Figura 5.3 – Evolução da resistência à compressão axial com a idade do concreto, de acordo com a relação a/ag e período de cura úmida

A equação abaixo expressa a definição da Taxa de Desempenho da Adição:

$$\mathbf{TDA_{AD, i, x; tc}(\%) = [(f_{c_{AD, i, x, tc}}/f_{c_{REF, i, x, tc}})-1].100} \quad (5.2)$$

onde,

TDA_{AD} : Taxa de Desempenho da Adição AD , na idade i , com relação a/ag x e período de cura tc , em %;

$f_{c_{AD}}$: resistência à compressão do concreto com adição AD , na idade i , com relação a/ag x e período de cura tc , em MPa;

$f_{c_{REF}}$: resistência à compressão do concreto de referência (sem adição), na idade i , com relação a/ag x e período de cura tc , em MPa .

O Quadro 5.3 apresenta os valores de TDA_{AD} calculados para cada mistura, de acordo com a idade, relação a/ag e condição de cura, sendo estes valores representados graficamente nas Figuras 5.4 e 5.5.

Pode-se notar na Figura 5.4 que, para a relação a/ag 0,35, a substituição de parte do cimento por adições minerais resulta em acréscimos de resistência (TDA_{AD} positivo), aos 28 dias de idade, para todas as misturas, independente do tipo de adição, teor de substituição e período de cura adotados, exceto para a mistura 50EAF, com 28 dias de cura. A mistura com 20% de cinza de casca de arroz (20CCA) foi a que apresentou maior incremento de resistência (54%) em relação ao concreto de referência, seguida pelas misturas 30CCA (46%), 35CV (37%), 10CCA (24%) e 50EAF (15%), todas com período de cura de 3 dias.

Entretanto, para as relações a/ag 0,50 e 0,65, adições diferentes possuem comportamentos diferentes. As misturas com CV e EAF apresentam TDA_{AD} negativo (resistência inferior à concreto de referência) sob todas as condições de cura a que foram submetidas. Já nas misturas contendo adição de CCA a resistência à compressão é superior ao concreto de referência, exceto nas misturas 10CCA e 20CCA, com a/ag 0,65 e cura de 3 dias, e 30CCA, com cura de 7 dias também com a/ag igual a 0,65. A adição de CV e EAF em substituição ao cimento acarreta perdas de resistência para ambas relações a/ag. Na relação a/ag 0,50 a mistura 35CV apresenta resistências de 23% (cura de 28d) a 30% (cura de 7d) inferior à mistura de referência e a mistura 50EAF, 6% (3 dias de cura) a 26% (28 dias de cura).

Assim, as misturas contendo cinza volante e escória de alto forno apresentam maior perda de resistência em relação ao concreto de referência à medida que o período de cura úmida é prolongado. Neste sentido, as misturas contendo cinza de casca de arroz possuem valores de TDA_{AD} decrescentes quando o período de cura é aumentado de 3 para 7 e de 7 para 28 dias.

Quando são analisados os valores na idade de 91 dias (Figura 5.5) este comportamento é alterado. Os concretos com adição de CV e EAF apresentam TDA negativo, qualquer que seja a relação a/ag e condição de cura.

Quadro 5.3: Valores de TDA_{AD} (%), aos 28 e 91 dias de idade, em função do período de cura e da relação a/ag utilizados, para todas as misturas investigadas

Idade	Cura	a/ag	MISTURAS				
			10CCA	20CCA	30CCA	35CV	50EAF
28 dias	3	0,35	+24	+54	+46	+37	+15
		0,50	+4	+29	+26	-27	-6
		0,65	-4	-1	+7	-32	-1
	7	0,35	+31	+49	+34	+20	+8
		0,50	+6	+17	+10	-30	-19
		0,65	+8	+2	-4	-41	-10
	28	0,35	+27	+34	+26	+8	-2
		0,50	-1	+11	+6	-23	-26
		0,65	+15	+20	-8	-39	-16
91 dias	3	0,35	+2	+21	+6	-4	-8
		0,50	+9	+22	+20	-22	1
		0,65	+5	-1	-4	-31	-15
	7	0,35	+11	+27	+4	-7	-10
		0,50	+4	+7	+6	-16	-15
		0,65	-3	+5	-6	-33	-20
	28	0,35	+5	+18	+9	-8	-15
		0,50	+9	+11	+15	-21	-19
		0,65	+10	+19	+7	-31	-17

Confirmando as observações de FENG *et al* (2003), NEHDI *et al* (2003) e RODRIGUEZ DE SENSALÉ & REINA (2004), a cinza de casca de arroz apresenta-se como uma pozolana de alta reatividade, uma vez que, de uma maneira geral, aos 91 dias todas as misturas em que o cimento foi substituído por esta adição, nos diferentes teores, apresentaram resistência à compressão igual ou superior à REF, exceto nas misturas 30CCA, com a/ag 0,65, curados por 3 e 7 dias, e 10CCA, com cura de 7 dias. Porém, quando o período de cura é de 28 dias, todas as misturas contendo cinza de casca de arroz possuem TDA positivo nos três níveis de substituição e nas três relações a/ag.

Comparando as misturas compostas com 30% de CCA e 35% de CV constata-se que os concretos com cinza de casca de arroz apresentaram resistência superior àqueles com cinza volante, independente da relação a/ag, realçando as diferenças de reatividade destas pozolanas.

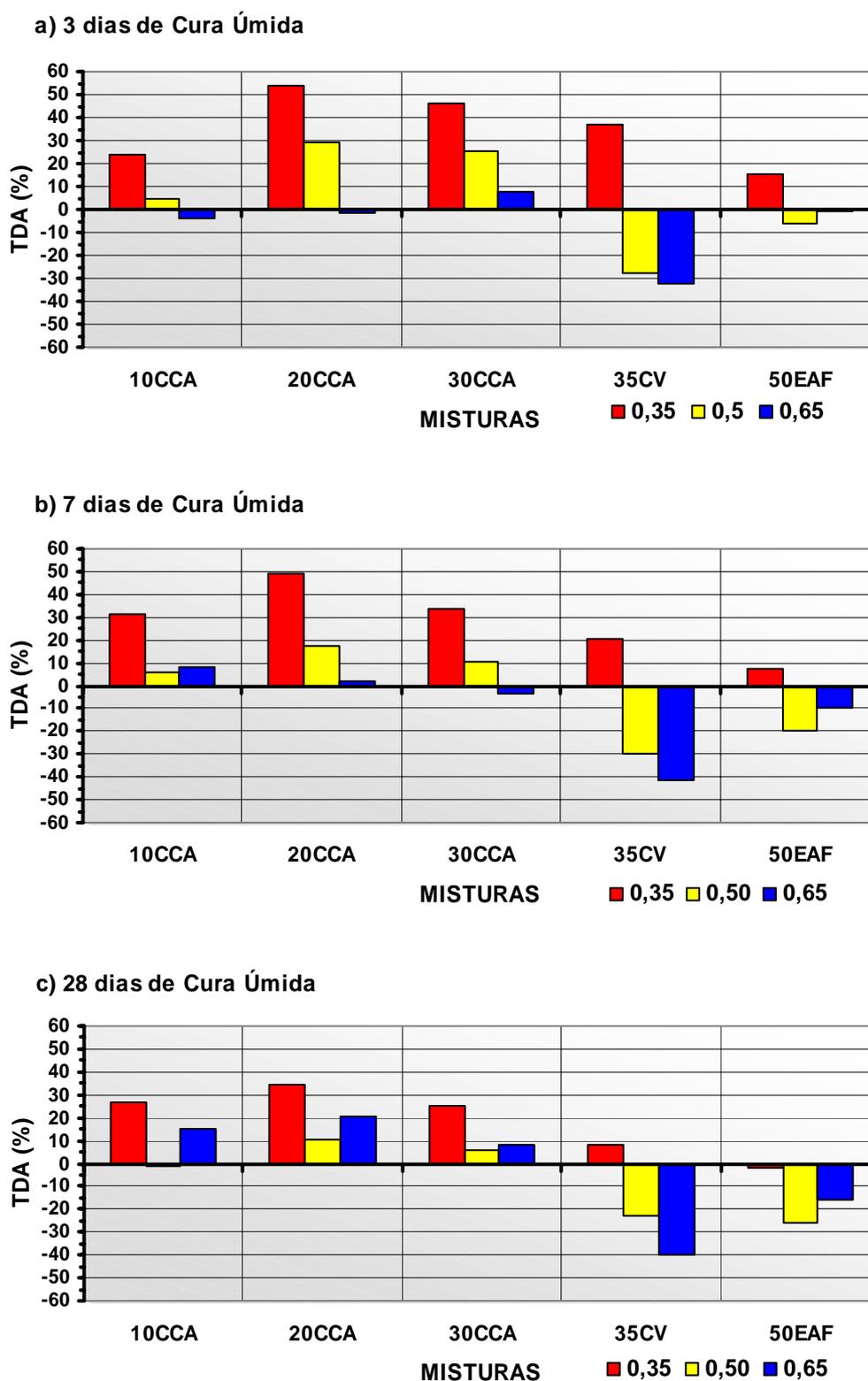


Figura 5.4 – Taxa de Desempenho da Adição TDA_{AD} (%), aos 28 dias, em função da relação a/ag e do período de cura adotados, para todas as misturas em que parte do cimento foi substituído por adição mineral.

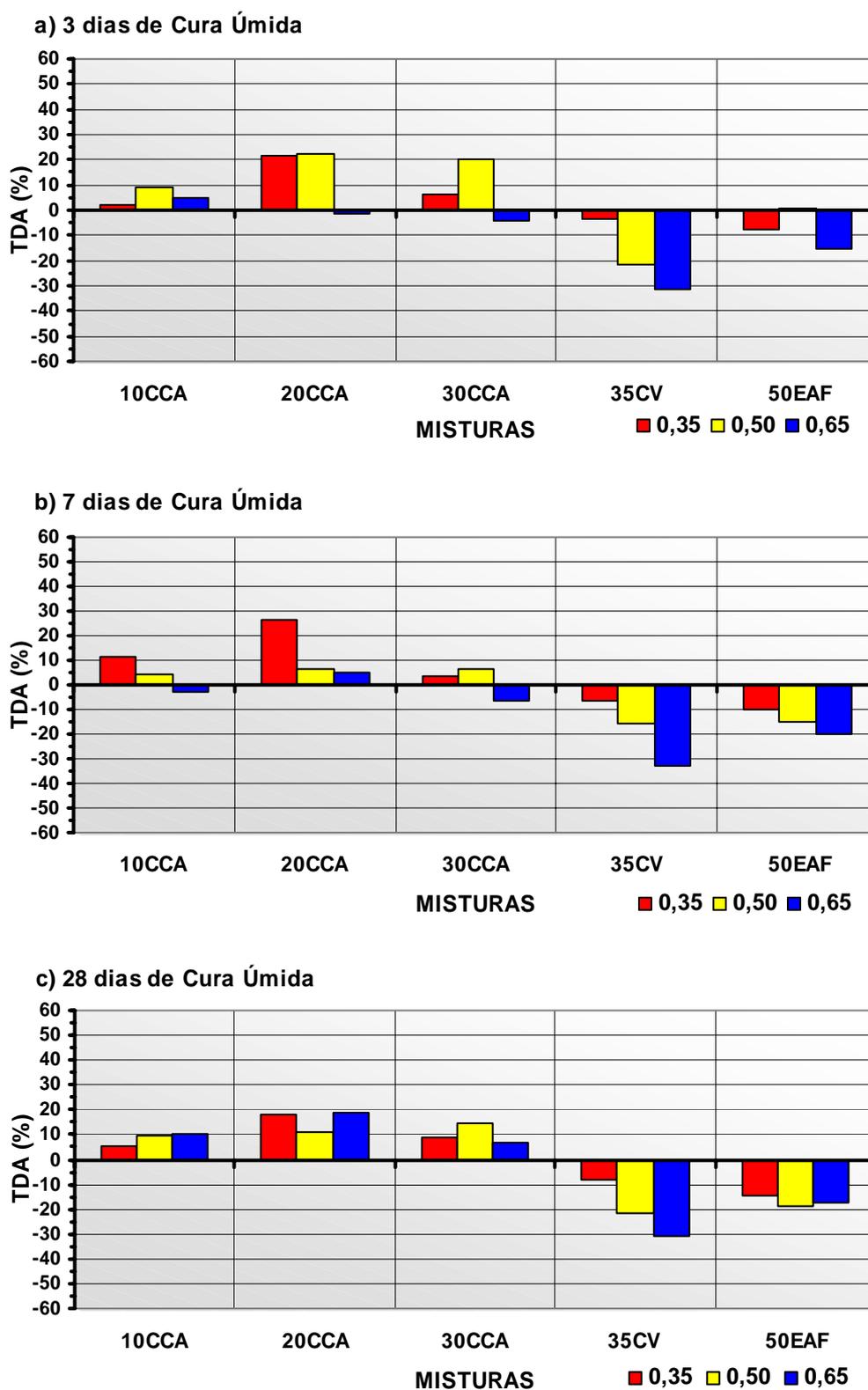


Figura 5.5 – Taxa de Desempenho da Adição TDA_{AD} (%), aos 91 dias, em função da relação a/ag e do período de cura adotados, para todas as misturas em que parte do cimento foi substituído por adição mineral

Aos 28 dias, a resistência do concreto com CCA foi de 7% a 79% maior do que aquela com CV e aos 91 dias, de 11% a 55%. Tal comportamento pode ser explicado devido à maior finura e quantidade de sílica amorfa apresentada pela CCA quando comparada com a CV. A sílica amorfa, que é consumida nas reações pozolânicas, produz o C-H secundário, um composto resistente que contribui para o ganho de resistência do concreto já nas primeiras idades, conforme observado por FENG *et al* (2003). Os grãos mais finos da CCA desenvolvem uma estrutura mais densa e homogênea na pasta de cimento (*efeito filler*), conforme relatam ISAIA *et al* (2003).

Apesar de aos 91 dias, as resistências das misturas com CCA também serem mais elevadas que aquelas contendo CV, esta diferença é menos expressiva, vindo de encontro com a afirmativa de que as reações pozolânicas da CV acontecem mais lentamente, tendo maior contribuição na resistência do concreto para as idades mais avançadas, conforme relatam HASSAN *et al* (2000).

Portanto, uma avaliação geral destes dados permite estabelecer que um aumento no período de cura (maior tempo em ambiente saturado) resultou, para as misturas investigadas, em maiores benefícios para aqueles concretos executados sem adições minerais, no que diz respeito à resistência mecânica. Isto pode ser visualizado mediante a comparação dos valores de TDA_{AD} de cada mistura quando se altera o período de cura úmida, em ambas as idades. As misturas com adições minerais apresentaram valores de TDA_{AD} para cura de 28 dias inferiores àqueles referentes à cura de 7 dias e estes, por sua vez, foram inferiores aos da cura de 3 dias, exceto para a mistura 30CCA com a/ag 0,65, aos 91 dias.

Verifica-se com isto, que os concretos sem adições minerais são mais sensíveis às condições de umidade do meio, no que diz respeito aos ganhos de resistência. Este comportamento está de acordo com as pesquisas de TAN & GJÖRV (1996), cujo objetivo foi investigar a aceitação de concretos com e sem sílica ativa para uso em ambientes agressivos. Para isto, utilizaram 4 séries com cimento puro com relações a/ag de 0,35, 0,40, 0,50 e 0,60, e uma série com 9%, em massa, de sílica ativa com a/ag 0,50. Os cp's foram submetidos a 4 regimes de cura que consistiram em 1 dia no molde, zero, 2, 6 e 28 dias imersos em água. A partir daí os cp' foram submetidos às condições ambientais até a data de ruptura, que foi aos 67 dias. Comparando os resultados dos concretos com e sem sílica ativa concluíram que, do ponto de vista de resistência à compressão, os concretos com sílica ativa são menos sensíveis à falta de umidade nas primeiras idades do que aqueles sem adição.

5.2.4 Efeito isolado do período de cura úmida

Na Figura 5.6 são mostradas as curvas de resistência à compressão *versus* relação água/aglomerante (curvas de Abrams), em função do período de cura, aos 28 e 91 dias de idade, para todas as misturas ensaiadas. Estas curvas foram obtidas através da correlação entre estas variáveis, sendo a equação geral e os coeficientes para cada mistura apresentados no Quadro 5.1.

O deslocamento destas curvas na direção das maiores resistências, comprova os benefícios logrados pelo concreto quando submetido por períodos de cura mais prolongados, fornecendo melhores condições para hidratação da pasta cimentícia. Como consequência, há liberação de maior quantidade de C-H para que as reações pozolânicas aconteçam, favorecendo os ganhos de resistência.

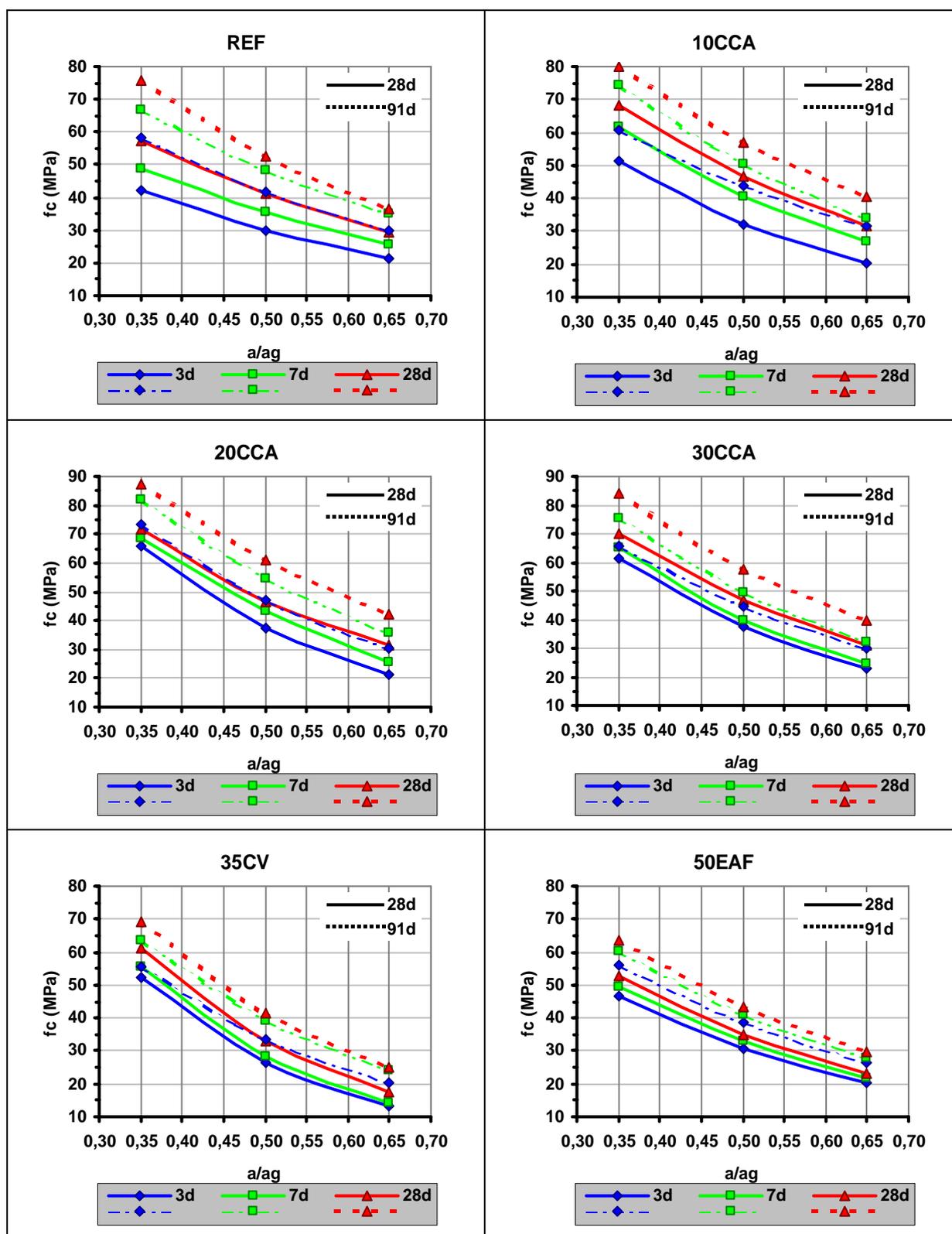


Figura 5.6 – Correlação entre resistência à compressão axial e relação água/aglomerante aos 28 (linhas cheias) e 91 (linhas tracejadas) dias de idade, em função dos períodos de cura úmida de 3, 7 e 28 dias.

Assim como nas análises anteriores, para melhor compreensão da influência das condições de cura sobre a resistência mecânica do concreto, foi introduzida uma nova variável chamada Taxa de Desempenho da Cura – TDC. Através desta variável é possível realizar a comparação (em termos relativos) entre a resistência à compressão de cada mistura e a dos concretos de referência, quando se altera o período de cura úmida, mantidas fixas a relação água/aglomerante e a idade das misturas.

Para cálculo da TDC os concretos sem adição (REF com $a/ag=0,35$, $0,50$ e $0,65$), curados durante o período de 3 dias, são tomados como base de comparação de cada conjunto de misturas e assumem o valor 100%. A partir daí a TDC_{AD} de cada mistura é obtida pela razão entre sua resistência à compressão e a do concreto de referência, multiplicando-se o resultado por 100, de acordo com a expressão abaixo:

$$TDC_{AD, i, x; tc}(\%) = [f_{cM, i, x, tc} / f_{cREF, i, x, tc=3d}].100 \quad (5.3)$$

onde,

TDC_{AD} : Taxa de Desempenho da Cura, para a mistura com adição AD , na idade i , com relação a/ag x e período de cura tc , em %;

f_{cM} : resistência à compressão da mistura com adição AD , na idade i , com relação a/ag x e período de cura tc , em MPa;

f_{cREF} : resistência à compressão do concreto de referência (sem adição), na idade i , com relação a/ag x e período de cura tc igual a 3 dias, em MPa.

Nas Figuras 5.7 e 5.8 são mostrados os valores de TDC_{AD} calculados para todas as misturas nas idades de 28 e 91 dias.

De uma forma geral, nota-se claramente nestas figuras os efeitos benéficos da cura no sentido de melhorar a resistência mecânica do concreto, podendo chegar a incrementos de resistência na ordem de 32% (mistura 10CCA; $a/ag=0,65$; aos 28 dias) ao passar de 3 para 7 dias de cura, e de 66% (mistura 20CCA; $a/ag=0,65$; aos 28 dias), quando o período de cura úmida passa de 3 para 28 dias.

No entanto, cada mistura se comporta de maneira distinta frente à variação das condições de cura, quando analisadas sob relação a/ag e idade iguais. Mais que isto, uma mesma mistura, ao sofrer variação no período de cura de 3 para 7 ou 28 dias, por exemplo, tem incrementos de resistência distintos para relações a/ag distintas. Tal comportamento sugere que a influência das condições de cura sobre as reações pozolânicas e de hidratação do cimento, que dão origem a sua resistência mecânica, dependem do tipo de aglomerante (cimento+adição) utilizado, da relação a/ag e da idade considerados.

Neste sentido, aos 28 dias de idade, nota-se que, das misturas em que o cimento foi substituído por diferentes teores de cinza de casca de arroz, a mistura com 10% de CCA foi aquela que teve maior benefício ao se elevar o período de cura de 3 para 7 dias, resultando em incrementos de resistência de 20% a 32%, para a/ag 0,35 e 0,65, respectivamente. Neste último caso, a mistura 10CCA (a/ag 0,65), curada por 3 dias, que tinha resistência inferior a todas as demais misturas, com exceção da 35CV, quando curada por um período de 7 dias apresentou resistência superior àquelas, ultrapassando a mistura 50EAF em 19%.

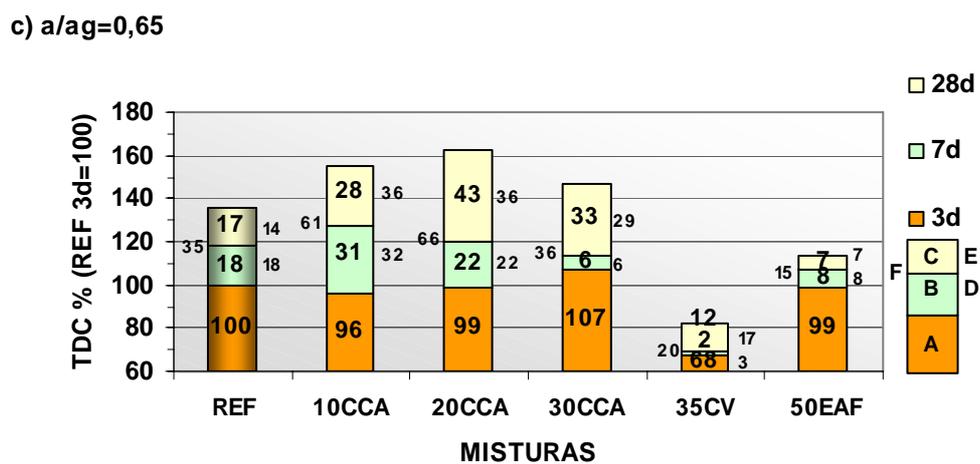
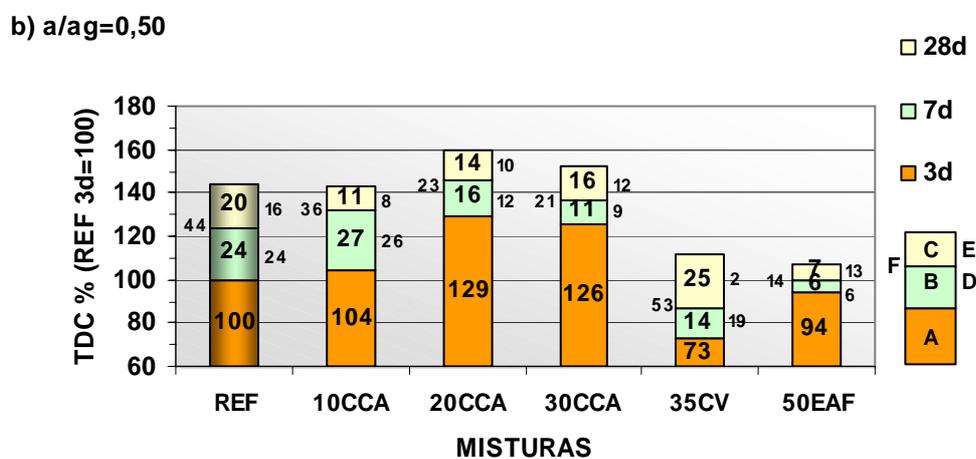
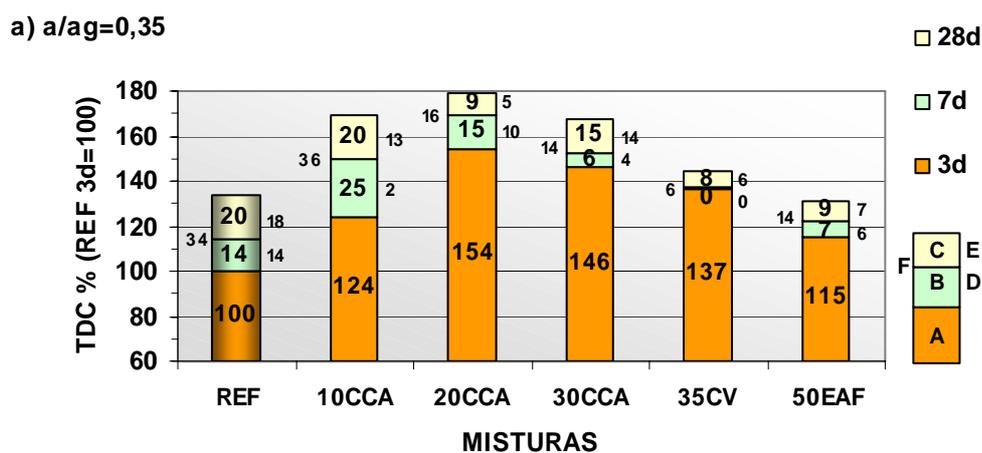


Figura 5.7 – Influência do período de cura úmida (3, 7 e 28 dias) na resistência à compressão axial aos 28 dias de idade, em função da relação água/aglomerante, para todas as misturas investigadas, medida através da Taxa de Desempenho de Cura – TDC_{AD} (%). A = TDC_{3d} ; B = $(TDC_{7d}-TDC_{3d})$; C = $(TDC_{28d}-TDC_{7d})$; D = (fc_{7d}/fc_{3d}) ; E = (fc_{28d}/fc_{7d}) ; F = (fc_{28d}/fc_{3d}) .

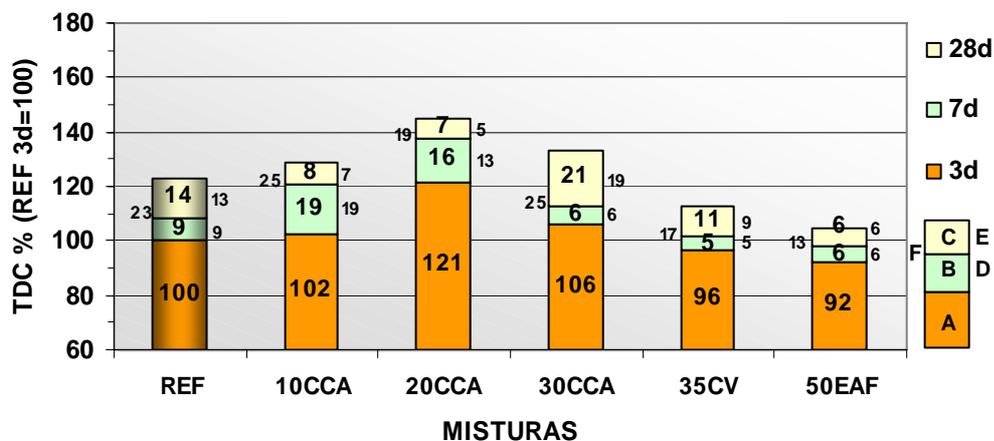
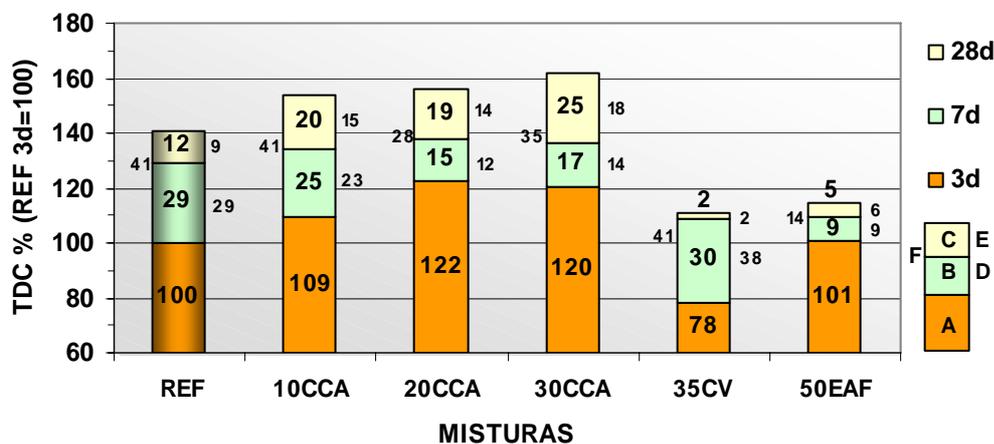
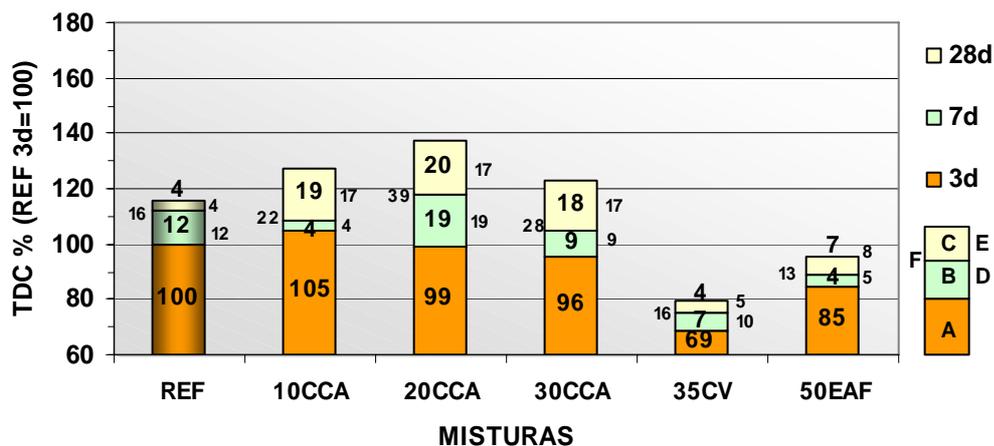
a) $a/ag=0,35$ b) $a/ag=0,50$ c) $a/ag=0,65$ 

Figura 5.8 – Influência do período de cura úmida (3, 7 e 28 dias) na resistência à compressão axial aos 91 dias de idade, em função da relação água/aglomerante, para todas as misturas investigadas, medida através da Taxa de Desempenho de Cura – TDC_{AD} (%). A = TDC_{3d} ; B = $(TDC_{7d}-TDC_{3d})$; C = $(TDC_{28d}-TDC_{7d})$; D = (fc_{7d}/fc_{3d}) ; E = (fc_{28d}/fc_{7d}) ; F = (fc_{28d}/fc_{3d}) .

Do mesmo modo, na relação a/ag 0,35, a mistura 10CCA, curada por 3 dias, teve resistência à compressão, aos 28 dias, igual a 49,9MPa contra 58,7MPa da mistura 30CCA. No entanto, estas misturas possuem resistências equivalentes quando curadas por 7 dias (60,1MPa para 10CCA e 61,3MPa para 30CCA). Comportamento semelhante é observado para a relação a/ag 0,50.

Mantendo-se os concretos curados por mais tempo, 28 dias, as resistências das misturas com 10% de CCA têm novamente os maiores incrementos para as relações a/ag 0,35 e 0,50. Porém, para a/ag 0,65 a mistura 20CCA foi a que teve maior benefício devido ao prolongamento do período de cura, apresentando aumentos de resistência na ordem de 66%. Nesta relação a/ag, o concreto 10CCA também apresenta grande melhoria de resistência, cerca de 61%, assim como aqueles executados com 30% CCA, que tiveram sua resistência aumentada em 36%, passando do período de cura de 3 para 28 dias.

Já nos concretos contendo substituição do cimento por cinza volante e escória de alto forno, os incrementos de resistência, aos 28 dias, devido à permanência dos cp's por mais tempo em ambiente saturado, são menos expressivos. Exceção é a mistura 35CV com a/ag 0,50, que teve sua resistência à compressão aumentada em 19% e 29%, quando o período de cura passou de 3 para 7 dias e de 7 para 28 dias, respectivamente. Considerando a variação total do período de cura de 3 para 28 dias, seu incremento de resistência foi de 53%.

No que se refere à resistência à compressão aos 91 dias de idade, entre as misturas com CCA, aquela com 10% de substituição é novamente a mais sensível à variação no período de cura úmida, para a/ag 0,35 e 0,50. Assim como na idade de 28 dias, quando a relação a/ag é de 0,65, a mistura 20CCA foi a que apresentou maior incremento de resistência. Esta, quando curada por apenas 3 dias, apresentou resistência ligeiramente inferior às misturas 10CCA e REF. No entanto, uma cura mais prolongada (7 ou 28 dias) favorece mais os ganhos de resistência da mistura 20CCA, sendo a resistência final superior a todas as demais misturas.

Assim como aos 28 dias de idade, as misturas 35CV e 50EAF são menos sensíveis ao aumento no período de cura úmida, do ponto de vista de resistência mecânica, com exceção da mistura 35CV com a/ag 0,50, que teve incremento de resistência de 41% ao passar de um período de cura de 3 para 28 dias.

A partir destas observações pode-se notar a melhoria na resistência mecânica, inicial e final, do concreto proporcionada pela substituição de parte da massa de cimento pela cinza de casca de arroz, atestando a grande reatividade desta pozolana. Esta característica é potencializada à medida que estes concretos são curados por um período mais prolongado. No entanto, a magnitude dos efeitos da cura sobre essas misturas depende do teor de substituição, da relação água/aglomerante e da idade considerados. Desta forma, alguns confrontos merecem destaque:

- aos 28 dias, a mistura 10CCA (a/ag=0,35) que, com período de cura de 3 dias, tinha resistência igual a 49,9MPa contra 54,9MPa da mistura 35CV (a/ag=0,35). Quando a cura é mantida por 7 dias sua resistência é elevada para 60,1MPa, valor este superior inclusive àquele obtido com cura de 28 dias para 35CV;
- também aos 28 dias de idade, as misturas contendo 10%, 20% e 30% de CCA e 50% de EAF, com a/ag de 0,65, possuem resistências semelhantes quando curadas durante 3 dias. No entanto, quando curadas por 7 dias, o concreto

10CCA possui resistência de 8 a 19% superior aos demais. Porém, o prolongamento do período de cura para 28 dias tem maior benefício para a mistura 20CCA, sendo sua resistência, agora, 5% maior que a da mistura 10CCA, podendo chegar esta diferença a 33%, se comparada à mistura com 50% de escória de alto forno;

- na idade de 91 dias, para alcançar resistências equivalentes à da mistura 20CCA (71,8MPa) curada por apenas 3 dias, por exemplo, a mistura 10CCA necessita de 7 dias de cura e o concreto sem adição de 28 dias de cura úmida, ambas com a/ag 0,35. Já para a/ag 0,50, as misturas 20CCA e 30CCA, curadas por 3 dias, possuem resistências semelhantes, sendo 10% superior a da mistura 10CCA. Porém, se o período de cura considerado for de 7 dias, tais resistências se igualam nas três misturas. E para um período de cura de 28 dias, a mistura 30CCA possui resistência ligeiramente superior (4%) às outras duas.

A bibliografia consultada não é decisiva quanto aos efeitos da cura úmida na resistência à compressão de concretos contendo adições minerais. RAMEZANIANPOUR & MALHOTRA (1995) concluíram que os concretos contendo cinza volante (25% e 58%) e escória de alto forno (25% e 50%) parecem ser mais sensíveis à falta de cura úmida do que o concreto sem adições, sendo os concretos com adições minerais tanto mais sensíveis quanto maior for o teor de substituição. Por outro lado, TAN & GJÖRV (1996), em experimentos com 10% de sílica ativa, concluíram que os concretos executados com esta pozolana são menos sensíveis a uma cura pobre que os concretos com cimento puro, do ponto de vista da resistência à compressão. Já os estudos de GÜNEYISI *et al* (2005) indicam que os ganhos de resistência são mais elevados nos concretos compostos com cinza volante e escória de alto forno do que naqueles com cimento puro, quando os concretos passam das condições de cura seca para cura úmida.

A partir da observação global dos resultados de resistência à compressão das misturas investigadas neste trabalho, verifica-se que as misturas de referência e com CCA são mais sensíveis à variação das condições de cura úmida. Por outro lado, a resistência mecânica dos concretos com adição de 50% de escória de alto forno e 35% de cinza volante apresentaram pequenas variações com o prolongamento do período de cura, exceto para a mistura 35CV com a/ag igual a 0,50.

Nota-se com isto que, o aumento no período de cura úmida elevou a resistência à compressão axial para todas as misturas analisadas, no entanto, as variações no período de cura afetam de forma individual cada mistura. Porém, o aumento na resistência devido ao prolongamento do período de cura é mais pronunciado nos concretos com relações a/ag mais elevadas, aos 28 dias de idade. Já para a idade de 91 dias, os maiores incrementos são conseguidos para relação a/ag intermediária igual a 0,50.

Tais comportamentos sugerem a existência de um período de cura ótimo para cada tipo de adição, levando em conta critérios técnicos e econômicos, que depende do percentual de substituição, da relação a/ag e da idade especificada para que o concreto atinja determinado nível de resistência.

5.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS – EPCANP

Os valores obtidos para os coeficientes de difusão (k) para cada mistura investigada, através do Ensaio de Penetração de Cloretos por Aspersão de Nitrato de Prata – EPCANP, de acordo com o método descrito no item 4.8, são apresentados no Quadro 5.4 e ilustrados na Figura 5.9.

Quadro 5.4 – Coeficientes de difusão de cloretos (EPCANP), de acordo com a relação a/ag e período de cura em câmara úmida

COEFICIENTE K DE DIFUSÃO DE CLORETOS, EM mm/(semana) ^{1/2}									
CURA	3 dias			7 dias			28 dias		
MISTURA	a/ag			a/ag			a/ag		
	0,35	0,50	0,65	0,35	0,50	0,65	0,35	0,50	0,65
REF	3,17	3,95	5,70	3,03	3,66	4,96	1,93	2,74	3,05
10CCA	2,98	4,21	5,13	2,53	3,48	4,81	1,12	2,19	2,61
20CCA	3,29	4,39	4,71	2,69	3,40	4,25	1,48	2,13	2,77
30CCA	3,09	3,77	4,98	2,21	3,37	4,39	1,90	2,50	3,07
35CV	3,61	5,31	6,19	3,07	4,19	5,87	1,99	2,98	3,62
50EAF	2,18	2,78	3,41	2,03	2,54	3,01	1,44	2,10	2,62

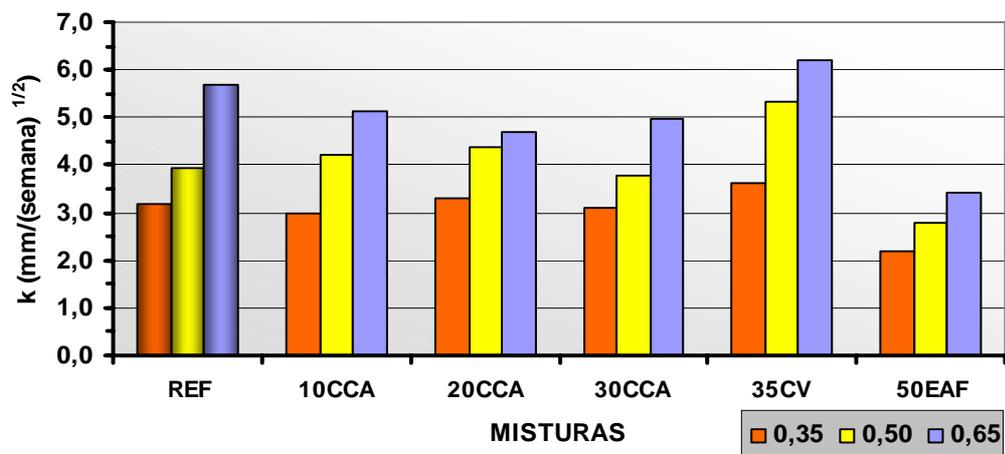
Pode-se verificar neste quadro a grande variabilidade dos valores de k (diferença de 5,5 vezes entre o maior e o menor valor) entre as diversas misturas. Independente da relação água/aglomerante e do período de cura adotado, os concretos contendo 35% de cinza volante apresentaram valores de k superiores a todos os demais. As misturas contendo escória de alto forno apresentaram os mais baixos valores de k , para todas as relações a/ag e períodos de cura, exceto na a/ag 0,35 e período de cura de 28 dias, onde a mistura com 10% de cinza de casca de arroz teve o menor valor de k entre todas as misturas. O baixo desempenho desta pozolana pode estar relacionado ao tamanho médio dos grãos, uma vez que a cinza volante utilizada não foi moída, conforme descrito no item 4.2.2.

Assim como na discussão dos resultados de resistência à compressão axial, uma interpretação mais detalhada dos resultados será realizada sob a ótica de cada fator que interfere no fenômeno de difusão, e que foi objeto de investigação na presente pesquisa, tais como a relação água/aglomerante, o tipo de adição e o período de cura em câmara úmida.

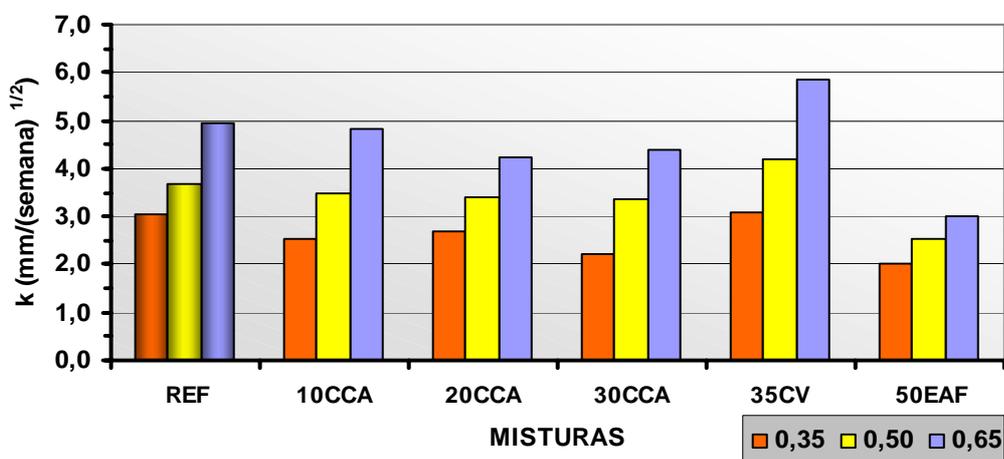
5.3.1 Efeito isolado da relação água/aglomerante

Uma análise dos dados do Quadro 5.4 e da Figura 5.9 permite observar que a relação a/ag tem influência marcante sobre o valor do coeficiente de difusão e, conseqüentemente, na resistência à penetração de íons cloretos no concreto. Para NGALA *et al* (1995), a quantidade de água na mistura é o principal parâmetro que influencia a penetração de cloretos no concreto, devido ao refinamento da porosidade capilar obtido nas baixas relações a/ag.

a) 3 dias de Cura Úmida



b) 7 dias de Cura Úmida



c) 28 dias de Cura Úmida

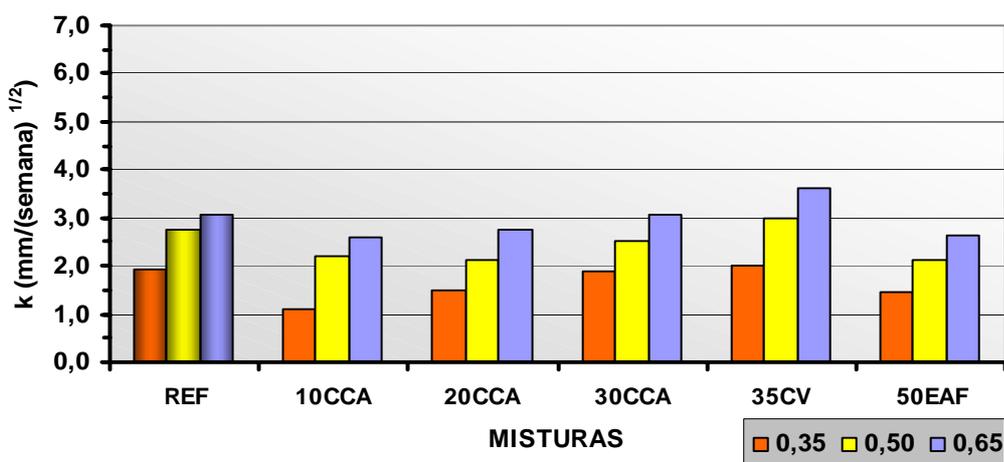


Figura 5.9 – Coeficientes de difusão de cloretos resultantes do Ensaio de Penetração de Cloretos por Aspersão de Nitrato de Prata – EPCANP, de acordo com a relação a/ag e o período de cura.

Para concretos com período de cura de 3 dias, a redução da relação a/ag de 0,65 para 0,50 diminuiu o coeficiente k em 31% para a mistura de REF e em 24% para 30CCA. Alterando-se a a/ag de 0,50 para 0,35 as maiores reduções de k são de 32% para 35CV, de 29% para 10CCA e de 25% para 20CCA. O concreto sem adição mineral apresentou maior decréscimo no valor de k quando considerada a diminuição da a/ag de 0,65 para 0,35, cerca de 44%.

Nas misturas que foram curadas por 7 dias, a redução no coeficiente k pode chegar a 38% para ambas as misturas 35CV e 10CCA, quando são comparados os dados das relações a/ag 0,65 e 0,50. Já a mistura 30CCA foi a que obteve os decréscimos mais expressivos de k com a redução da a/ag de 0,50 para 0,35 e de 0,65 para 0,35, cerca de 34% e 50%, respectivamente. Este último bem próximo àquele ocorrido para a mistura 35CV (48%).

Quando analisadas as misturas com período de cura de 28 dias, a mistura 20CCA foi aquela que apresentou a maior variação no valor de k quando a a/ag foi reduzida de 0,65 para 0,50, cerca de 23%. No entanto, a mistura 10CCA foi a que apresentou maiores decréscimos de k quando a a/ag foi reduzida de 0,50 para 0,35 e de 0,65 para 0,35, sendo os respectivos valores iguais a 49% e 57%.

Com isto, verifica-se que o coeficiente de difusão de cloretos nas misturas investigadas é tanto maior quanto maior for a quantidade de água na mistura, ou seja, a relação existente entre k e a/ag é diretamente proporcional. Entretanto, a amplitude de variação de k com a alteração da a/ag é dependente do tipo de aglomerante (cimento + adição) e do regime de cura ao qual o concreto é submetido. Assim, a limitação da quantidade de água na mistura é fator de grande importância a ser considerado na dosagem de concretos expostos ao ataque de cloretos, uma vez que relações água/aglomerante elevadas podem resultar em estruturas de baixa durabilidade. Isto pode ser atribuído a maior porosidade e à formação de redes interconectadas de poros capilares em concretos com elevadas relações a/ag, como aquelas observadas por SILVA & VIEIRA (2001) – item 2.3.1 da presente dissertação.

Por outro lado, a redução no valor de k de uma determinada mistura, devido à redução da relação a/ag, aumenta exponencialmente a vida útil de uma estrutura sujeita ao ataque destes íons. Ou seja, uma redução do k de 30%, por exemplo, aumenta em 2 vezes o tempo necessário para que os íons cloreto penetrem através da camada de cobrimento e atinjam a camada de passivação do aço. Se esta redução for de 50%, aproximadamente, este período é elevado para 8 vezes.

HOFFMANN & DAL MOLIN (2002) observaram reduções no coeficiente de difusão de cloretos na ordem de 70% com a diminuição da relação a/ag de 0,75 para 0,28, utilizando misturas com e sem sílica ativa.

5.3.2 Efeito isolado da substituição do cimento pelas adições minerais

Seguindo a mesma metodologia utilizada para análise das influências do tipo de adição sobre a resistência à compressão axial das misturas investigadas, neste tópico serão discutidos aspectos referentes aos efeitos da substituição parcial do cimento por adições de cinza de casca de arroz, cinza volante e escória de alto forno sobre o coeficiente de difusão de cloretos. Do mesmo modo que no item 5.2.3, esta abordagem será feita mediante a análise de uma nova variável chamada Taxa de Desempenho da Adição, quanto à redução do coeficiente de difusão de cloretos – TDA_{AD}^k . Esta variável traduz matematicamente as variações percentuais do coeficiente de difusão devido à incorporação de determinada adição mineral na mistura

aglomerante, mantendo-se fixos a relação água/aglomerante e o período de cura, conforme expressão abaixo:

$$\mathbf{TDA}_{AD, i, x; tc}^k(\%) = -[(k_{AD, i, x, tc}/k_{REF, i, x, tc})-1].100 \quad (5.4)$$

onde,

TDA_{AD}^k : Taxa de Desempenho da Adição AD, quanto à redução do coeficiente de difusão, na idade i , com relação a/ag x e período de cura tc , em %;

k_{AD} : coeficiente de difusão do concreto com adição AD, na idade i , com relação a/ag x e período de cura tc , em $\text{mm}/(\text{semana})^{1/2}$;

k_{REF} : coeficiente de difusão do concreto de referência (sem adição), na idade i , com relação a/ag x e período de cura tc , em $\text{mm}/(\text{semana})^{1/2}$.

O sinal negativo no início da expressão foi introduzido para que o valor numérico fosse compatível com seu significado técnico, isto é, para aquelas misturas cujo valor de k é inferior ao da mistura de referência, o valor de TDA_{AD}^k resulta positivo, representando uma mistura aglomerante com desempenho superior ao do concreto de referência.

No Quadro 5.5 estão apresentados os valores de TDA_{AD}^k para todas as misturas investigadas, sendo graficamente representados na Figura 5.10.

Quadro 5.5: Valores de $TDA_{AD}^k(\%)$, em função do período de cura e da relação a/ag utilizados, para todas as misturas investigadas

Cura	a/ag	MISTURAS				
		10CCA	20CCA	30CCA	35CV	50EAF
3	0,35	+6	-4	+3	-14	+31
	0,50	-7	-11	+5	-34	+30
	0,65	+10	+17	+13	-9	+40
7	0,35	+16	+11	+27	-1	+33
	0,50	+5	+7	+8	-14	+31
	0,65	+3	+14	+11	-18	+39
28	0,35	+42	+23	+1	-3	+25
	0,50	+20	+22	+9	-9	+23
	0,65	+14	+9	-1	-19	+14

O fenômeno da difusão de cloretos depende da estrutura porosa do concreto. O volume de poros capilares e sua interconexão determinam, entre outros fatores, a capacidade destes íons penetrarem através da camada de cobrimento e atingirem a armadura.

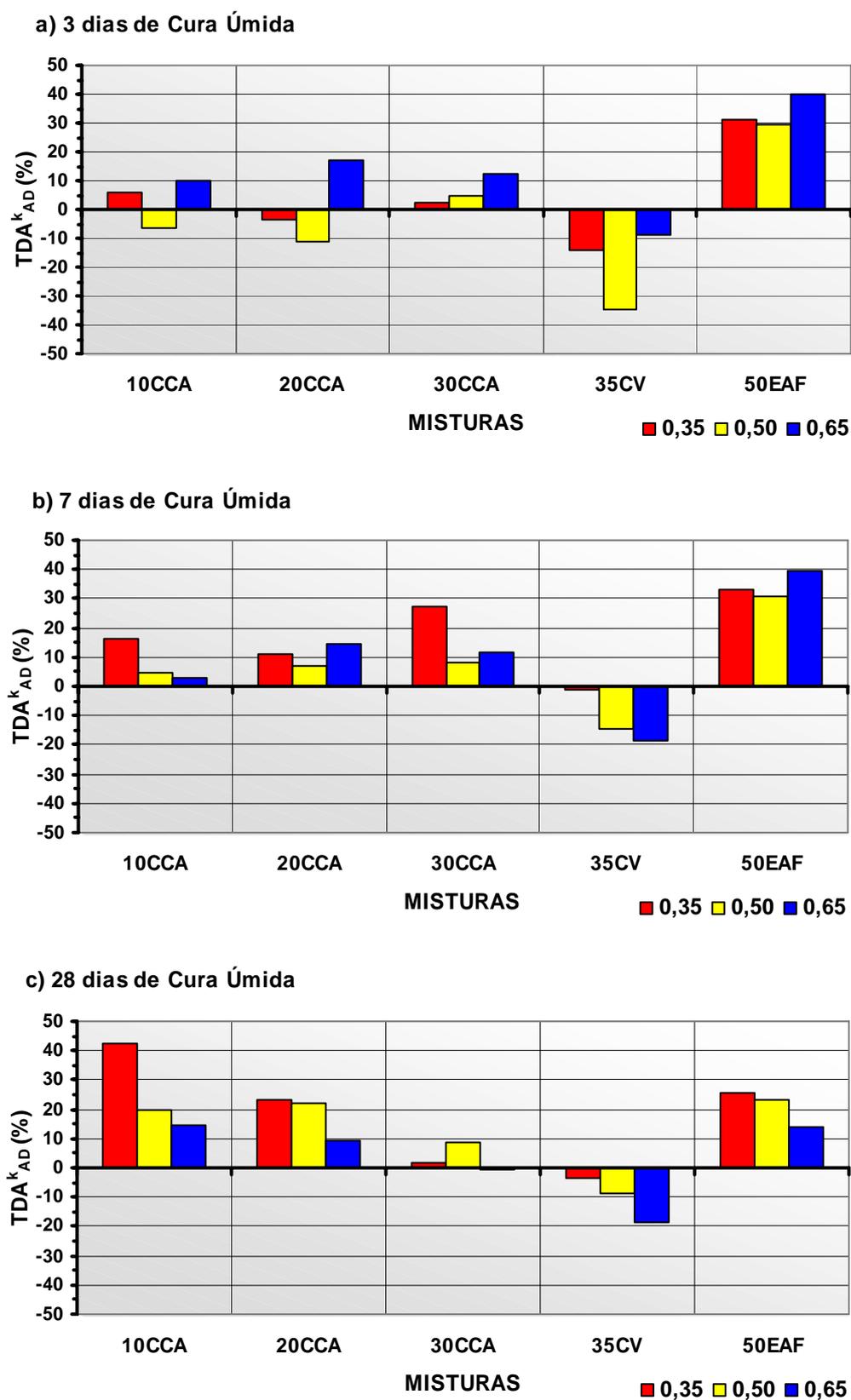


Figura 5.10 – Taxa de Desempenho da Adição, quanto à redução do coeficiente de difusão de íons cloreto $TDA^k_{AD}(\%)$ das diversas misturas investigadas, de acordo com a relação a/ag e o período de cura.

Sabe-se que a substituição do cimento por adições minerais resultam num refinamento da estrutura de poros do concreto, devido aos efeitos físico (efeito *filler*) e químico (reações pozolânicas) das adições (ISAIA *et al.*, 2001). Este refinamento dos poros, através do seccionamento dos capilares, reduz a permeabilidade do concreto e, conseqüentemente, a difusão de íons (MEHTA & AITCIN, 1990; TORII & KAWAMURA, 1992).

Segundo WEE *et al.* (2000), a difusão de cloretos através do concreto é dependente da sua microestrutura e as alterações que nela ocorrem, como a fixação dos íons cloreto pelas fases aluminatos e ferro-aluminatos do cimento.

Deste modo, a substituição do cimento por adições com baixos teores de alumina, como por exemplo a cinza de casca de arroz, reduz a capacidade de combinação dos íons cloretos com os aluminatos presentes na mistura, podendo resultar em misturas com maior coeficientes de difusão. Já em adições como a cinza volante e a escória de alto forno, que possuem teores mais elevados de alumina em sua composição, os efeitos de refinamento dos poros e de combinação dos cloretos com os aluminatos se somam, fazendo com que o fenômeno da difusão seja reduzido.

Assim, o comportamento frente à penetração de cloretos de um determinado concreto, entre outros fatores, é influenciado tanto pelas alterações na sua microestrutura quanto pela quantidade de aluminatos do aglomerante, resultantes da substituição do cimento pelas adições minerais, sendo sua capacidade final de resistir à penetração destes íons uma combinação destes dois fatores.

Desta forma, em todas as misturas em que o cimento foi parcialmente substituído por cinza de casca de arroz, o coeficiente k foi inferior ao concreto de referência, exceto nas misturas 10CCA, com a/ag 0,50, e 20CCA, com a/ag 0,35 e 0,50, todas com cura de 3 dias.

Pode-se observar, no entanto, que o desempenho das misturas com CCA, em relação ao concreto sem adição, depende da relação a/ag, do período de cura e do teor de substituição desta adição. Para um período de cura de 3 dias, a mistura 20CCA, com a/ag 0,65, apresentou k 17% inferior a REF (TDA_{AD}^k positiva), apresentando desempenho superior às misturas 10CCA e 30CCA. Porém, se a a/ag for 0,50 ou 0,35 a TDA_{AD}^k para a mistura 20CCA é negativa, informando que estas misturas são menos resistentes à difusão dos íons cloreto que o concreto com cimento puro com igual relação a/ag. Nestes casos, as misturas 20CCA apresentaram desempenho inferior às misturas 10CCA e 30CCA.

Já quando o período de cura foi de 7 dias, a mistura de melhor desempenho é aquela contendo 30% de CCA (a/ag = 0,35), com valor de k 27% inferior ao da mistura REF.

A mistura 10CCA (a/ag = 0,35) foi a que apresentou maior taxa de desempenho (42%) quando o período de cura dos concretos foi prolongado para 28 dias.

Nota-se com isto que o desempenho das misturas contendo cinza de casca de arroz é função do efeito combinado do percentual de substituição, da relação a/ag e do tempo no qual os concretos são mantidos em condições ideais de cura.

MISSAU (2005), estudando a porosidade de pastas com iguais teores de CCA e relações a/ag, verificou que a substituição do cimento por CCA promoveu um refinamento da estrutura de poros da pasta, que foi mais acentuado na medida em que se aumentou o teor de substituição.

Então, é esperado que o k de misturas contendo CCA seja menor naquelas misturas com maior quantidade de CCA, fato este não observado na íntegra no presente estudo. Para ilustrar, cita-se os casos das misturas curadas por 28 dias, nas a/ag 0,35 e 0,65, onde o k da mistura 30CCA foi mais elevado que o das misturas 20CCA e 10CCA. Deste modo, este

comportamento sugere o predomínio da interação química (combinação de cloretos), maior naquelas misturas com baixos teores de CCA, sobre o efeito de densificação da pasta, maior nas misturas com teores de CCA mais elevados. A combinação destes dois fatores na redução da penetração de cloretos está associada ainda às condições de cura e ao grau de formação da estrutura da pasta no momento do ensaio.

Em todas as misturas contendo cinza volante o valor de TDA_{AD}^k foi negativo, indicando que a substituição do cimento por esta adição (35% da massa do aglomerante) resultou em concretos com maior coeficiente de difusão. Efeito contrário foi observado quando 50% do cimento foram substituídos pela escória de alto forno. Os coeficientes de difusão destas misturas foram bem inferiores (TDA_{AD}^k positivos) aos dos concretos sem adição, em todos os períodos de cura e a/ag avaliados, com exceção daqueles com relações a/ag 0,35 e 0,65, curados por 28 dias.

No caso das misturas com adição de escória de alto forno, o problema da redução do teor de aluminatos quando o cimento é substituído por adições é menos pronunciado, uma vez que as escórias contêm certa quantidade de alumina em sua composição. Tal fato, associado ao refinamento da rede de poros proporcionado pelas reações pozolânicas da escória de alto forno, pode ser a causa do bom desempenho das misturas 50EAF em relação às demais.

O bom desempenho das misturas com escória de alto forno em relação ao concreto com cimento puro, também foi comprovado nos experimentos de WEE *et al* (2000), em todos os teores de substituição e finuras testados.

5.3.3 Efeito isolado do período de cura úmida

Os efeitos da variação do período de cura sobre o coeficiente k de difusão de íons cloreto das diversas misturas testadas pode ser avaliado através das curvas plotadas nos gráficos da Figura 5.11. Percebe-se claramente nesta figura o deslocamento destas curvas no sentido dos menores valores de k quando o período de cura é alterado de 3 para 7 dias e de 7 para 28 dias. Este comportamento indica que o prolongamento do período de cura do concreto resulta numa estrutura menos permeável, reduzindo, assim, a penetração dos íons cloreto. Porém, as reduções do coeficiente de difusão, quando é alterado o período de cura, são distintas para as diversas misturas, variando também com a relação a/ag.

Para quantificar o desempenho de cada mistura com o aumento do período de cura úmida, será feito uso da variável Taxa de Desempenho da Cura, quanto à redução do coeficiente de difusão – TDC_{AD}^k , de forma semelhante àquela descrita no item 5.2.4. Esta variável indica a redução percentual do coeficiente de difusão de íons cloreto do concreto, quando o período de cura é prolongado além dos 3 dias, tendo a seguinte expressão:

$$TDC_{AD, i, x; tc}^k (\%) = \{[-((k_{AD, i, x, tc}/k_{REF, i, x, tc=3d})-1)].100\}+100 \quad (5.5)$$

Simplificando:

$$TDC_{AD, i, x; tc}^k (\%) = [2-(k_{AD, i, x, tc}/k_{REF, i, x, tc=3d})].100 \quad (5.6)$$

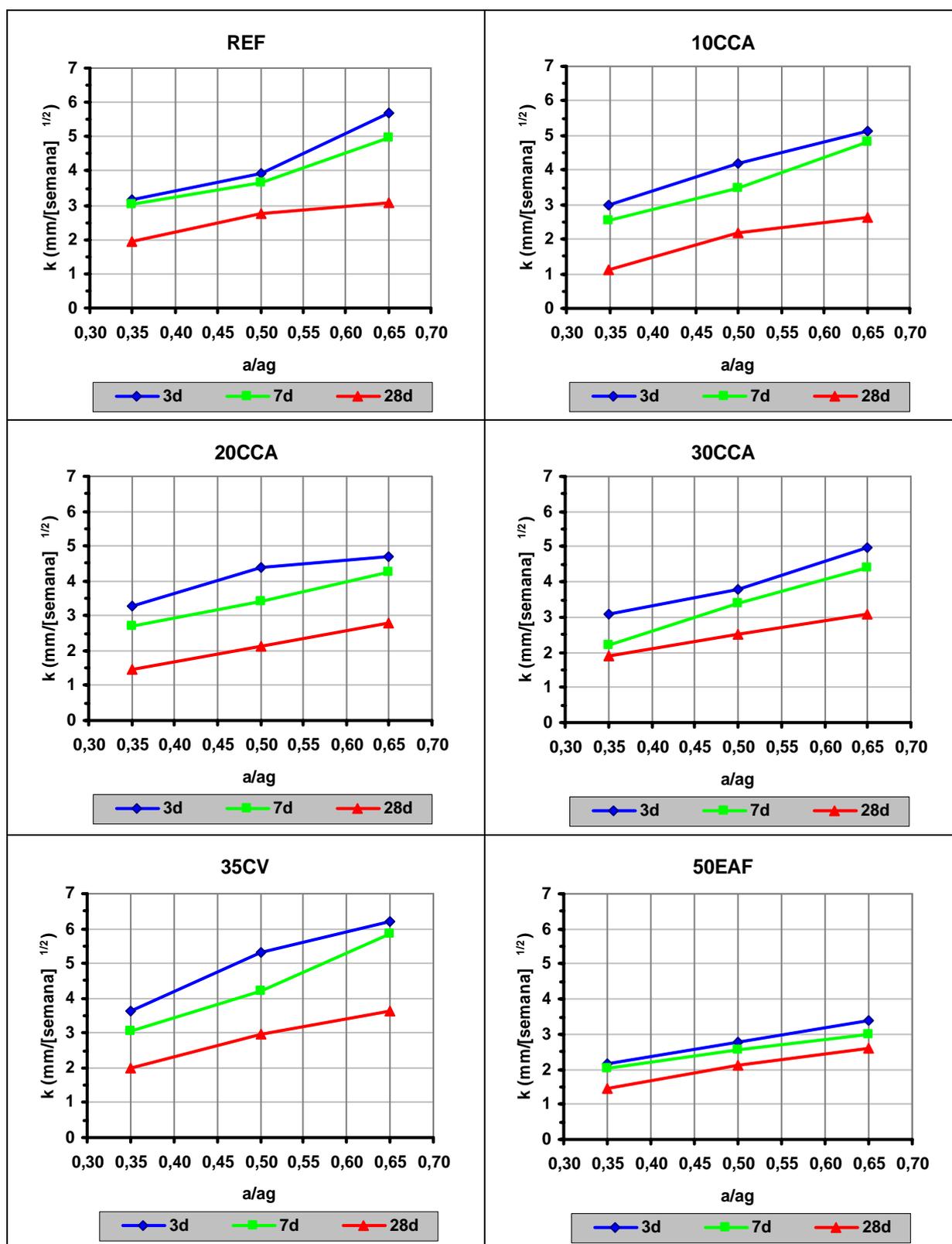


Figura 5.11 – Influência da variação do período de cura sobre o valor do coeficiente de difusão de íons cloreto das diversas misturas investigadas, em função da relação a/ag .

onde,

TDC_{AD}^k : Taxa de Desempenho da Cura, quanto à redução do coeficiente de difusão do concreto com adição AD , na idade i , com relação a/ag x e período de cura tc , em %;

k_{AD} : coeficiente de difusão do concreto com adição AD , na idade i , com relação a/ag x e período de cura tc , em $mm/(semana)^{1/2}$;

k_{REF} : coeficiente de difusão do concreto de referência (sem adição), na idade i , com relação a/ag x e período de cura tc igual a 3 dias, em $mm/(semana)^{1/2}$.

Assim, um valor de TDC_{AD}^k maior que 100 para determinada mistura com adição mineral, com determinado período de cura, indica que seu coeficiente de difusão de cloretos é inferior ao da mistura de referência curada por 3 dias.

A Figura 5.12 representa graficamente os efeitos do prolongamento do período de cura sobre o coeficiente de difusão nas misturas ensaiadas. Deve-se lembrar que, conforme equação 5.6, decréscimos de k , devido ao prolongamento do período de cura, geram variações positivas de TDC_{AD}^k .

Como pode ser visto, das misturas contendo CCA, com a/ag 0,35, a que teve maior variação na TDC_{AD}^k foi a mistura 30CCA, com decréscimo no valor de TDC_{AD}^k de 28%, quando o período de cura passou de 3 para 7 dias. Para a/ag 0,50, a mistura 20CCA obteve o melhor desempenho, apresentando queda de 23% no TDC_{AD}^k , para a mesma variação do período de cura. Já as misturas com 20CCA e 30CCA foram as que tiveram maior redução de TDC_{AD}^k (10 a 12%), para a/ag 0,65.

Os decréscimos mais significativos de TDC_{AD}^k para as demais misturas, quando o período de cura passou de 3 para 7 dias, foram de 21% para 35CV (a/ag 0,50), 13% para REF (a/ag 0,65) e 12% para 50EAF (0,65).

O prolongamento do período de cura além dos 7 dias favorece a formação de uma estrutura ainda mais compacta, com menor interconexão entre os poros do concreto, reduzindo sua permeabilidade. Isto pode ser verificado mediante a comparação das variações de TDC_{AD}^k quando o período de cura é alterado de 3 para 7 dias e de 7 para 28 dias. Os decréscimos relativos nos valores de k , em geral, são mais elevados quando o período de cura passa de 7 para 28 dias.

Nas misturas com CCA pode ser observado que os decréscimos de k , com o aumento no período de cura de 7 para 28 dias, é tanto maior quanto menor for o teor de substituição, independente da relação a/ag utilizada. Para a/ag 0,35, estes decréscimos são de 40%, 32% e 8% para as misturas 10CCA, 20CCA e 30CCA, na mesma ordem; para a/ag 0,50, são de 28%, 26% e 20%; e de 37%, 24% e 21% quando a a/ag é 0,65.

Entre as demais misturas, a de referência e aquela com 35% de cinza volante foram as que apresentaram maior redução no coeficiente de difusão com a elevação do período de cura de 3 para 28 dias. No concreto de referência o valor de k foi reduzido de 30% (a/ag 0,50) a 46% (a/ag 0,65) e na mistura 35CV a redução de k foi entre 45% e 67%, para as relações a/ag 0,65 e 0,50, respectivamente.

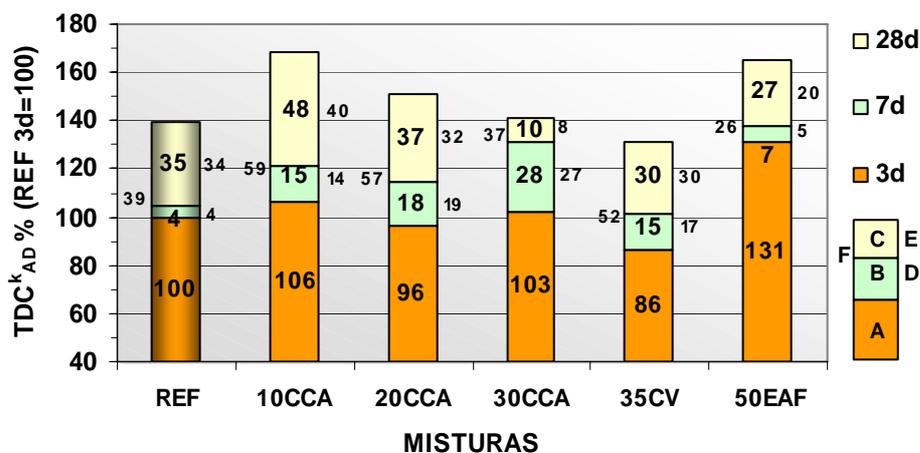
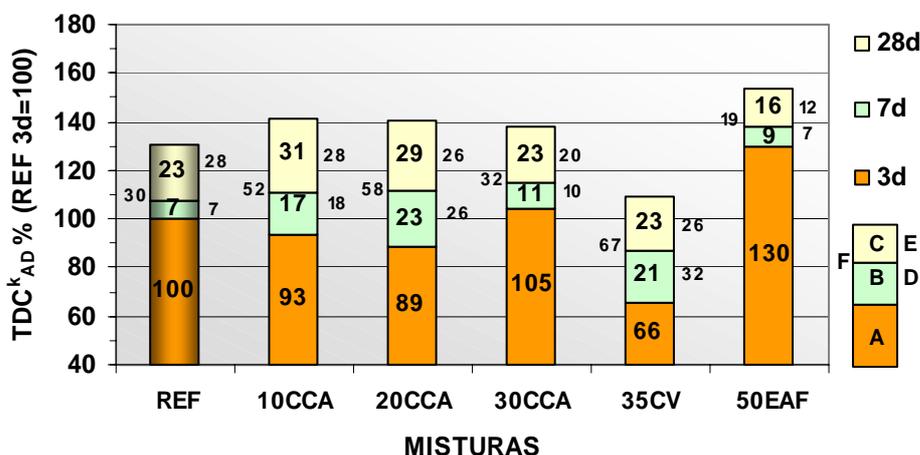
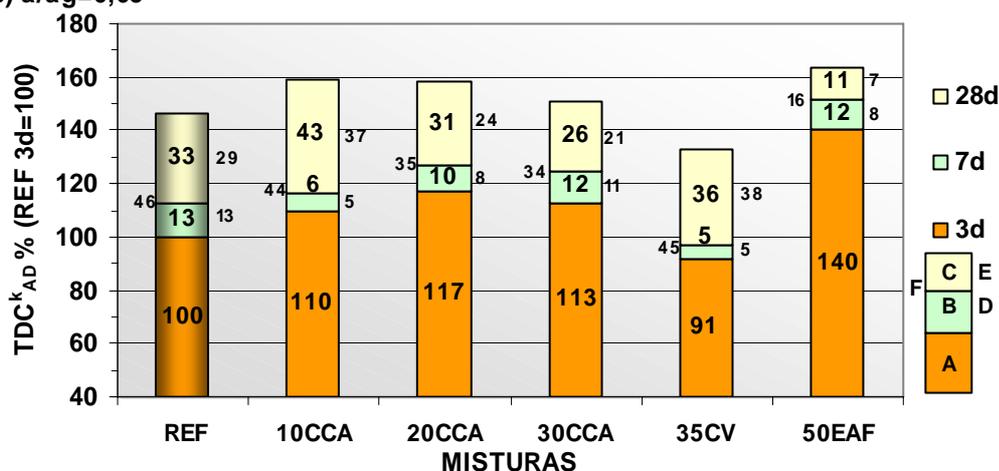
a) $a/ag=0,35$ b) $a/ag=0,50$ c) $a/ag=0,65$ 

Figura 5.12 – Taxa de Desempenho da Cura, quanto à redução do coeficiente de difusão de íons cloreto $TDC^k_{AD}(\%)$ das diversas misturas investigadas, de acordo com a relação a/ag e o período de cura. A = TDC^k_{3d} ; B = $(TDC^k_{7d} - TDC^k_{3d})$; C = $(TDC^k_{28d} - TDC^k_{7d})$; D = (k_{7d}/k_{3d}) ; E = (k_{28d}/k_{7d}) ; F = (k_{28d}/k_{3d}) .

Uma análise global dos dados demonstra que os decréscimos de k , para as misturas investigadas, variaram de 4% (REF; 0,35) a 32% (35CV; 0,50), quando o período de cura passou de 3 para 7 dias, e de 7% (50EAF; 0,65) a 40% (10CCA; 0,35), com o prolongamento da cura de 7 para 28 dias. Se considerados os períodos de cura de 3 e 28 dias, a redução de k variou de 16% a 67%, para as misturas 50EAF (0,65) e 10CCA (0,35), respectivamente.

Quanto ao coeficiente de difusão de cloretos, as misturas com CCA e CV se mostraram fortemente influenciadas pelas condições de umidade durante a cura, sugerindo que os efeitos negativos da redução no teor de aluminatos causados por algumas adições (redução da capacidade de fixação dos íons cloretos) podem ser compensados por um prolongamento do período de cura úmida, favorecendo a formação de uma microestrutura mais compacta, com menor porosidade e permeabilidade.

Portanto, verifica-se que o aumento no período de cura do concreto reduz o coeficiente de difusão de íons cloretos, sendo o grau de redução dependente do tipo de adição, do percentual de substituição e da relação água/aglomerante. Disto decorre que, o fornecimento de condições de cura adequadas a cada tipo de mistura aglomerante aumenta significativamente a resistência à penetração de agentes agressivos, resultando, desta forma, em concretos de melhor qualidade e maior durabilidade.

5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS – ASTM C1202

A determinação da resistência à penetração de cloretos foi realizada através do Teste Rápido de Determinação de Cloretos (TRPC) proposto pela ASTM C1202, em corpos-de-prova com idade de 91 dias, conforme descrito no item 4.9.

Os resultados obtidos para todas as misturas investigadas são apresentados no Quadro 5.6. Também constam neste quadro os coeficientes C e D das curvas de Abrams e o coeficiente de determinação (r^2), calculados a partir da correlação entre a carga total passante (Q) e a relação água/aglomerante de cada série.

No Quadro 5.7 é apresentada uma classificação dos concretos quanto à penetração de cloretos, proposta pela ASTM C1202. As classes são organizadas de acordo com a carga total passante obtida através do TRPC.

A observação global dos resultados obtidos permite visualizar a existência de uma grande variabilidade nos valores de carga total passante entre os concretos com diferentes composições, relação a/ag e período de cura em câmara úmida. Assim, uma análise mais detalhada destes resultados será realizada isoladamente para cada fator que exerce influência sobre esta propriedade e que foi objeto da presente pesquisa.

5.4.1 Efeito isolado da relação água/aglomerante

Como pode ser observado na Figura 5.13, independente da relação a/ag e do período de cura adotados, os concretos sem adições (REF) apresentaram carga total passante (Q) superior a todas as demais misturas, caracterizando-o como concreto de menor resistência a penetração de cloretos, dentre aqueles testados. As misturas de melhor desempenho foram aquelas em que o cimento foi substituído por 30% e 20% de CCA, nesta ordem.

Quadro 5.6 – Resultados de Carga Total Passante derivados do Teste Rápido de Penetração de Cloretos - TRPC (ASTM C1202) e coeficientes de Abrams e de determinação das misturas investigadas, aos 91 dias de idade, de acordo com a relação a/ag e período de cura em câmara úmida

MISTURA	Período de Cura (dias)	CARGA TOTAL PASSANTE(Coulombs)					
		a/ag			Coeficientes ^A		
		0,35	0,50	0,65	C	D	r ²
REF	3	1591	2632	3458	668,35	0,075	0,9978
	7	1147	1867	2926	387,15	0,044	0,9940
	28	1039	1480	1778	570,65	0,167	0,9939
10CCA	3	637	1313	2201	155,57	0,016	0,9969
	7	587	1084	1983	142,32	0,017	0,9864
	28	472	798	876	246,74	0,127	0,9428
20CCA	3	557	892	1477	177,60	0,039	0,9878
	7	461	625	1201	142,00	0,041	0,9520
	28	321	446	698	127,16	0,075	0,9814
30CCA	3	420	860	1306	117,22	0,023	0,9999
	7	376	562	1228	88,69	0,019	0,9510
	28	271	382	568	113,05	0,085	0,9894
35CV	3	1060	2017	2769	364,78	0,047	0,9976
	7	521	1215	2078	109,07	0,010	0,9980
	28	344	591	899	114,29	0,044	0,9980
50EAF	3	747	1071	1743	272,39	0,059	0,9802
	7	604	914	1267	258,32	0,085	0,9993
	28	546	743	1104	236,49	0,096	0,9858

A: Coeficientes C e D das curvas de Abrams que relacionam a Carga Total Passante Q e a relação água/aglomerante x, dada pela expressão $Q = C/D^x$, em Coulombs, para cada mistura testada.

Quadro 5.7 – Classificação dos concretos quanto à penetração de cloretos em função da carga total passante derivada do TRPC, proposta pela ASTM C1202

PENETRAÇÃO DE CLORETOS	CARGA TOTAL PASSANTE (Coulombs)
ALTA	> 4000
MODERADA	de 2000 a 4000
BAIXA	de 1000 a 2000
MUITO BAIXA	de 100 a 1000
DESPREZÍVEL	< 100

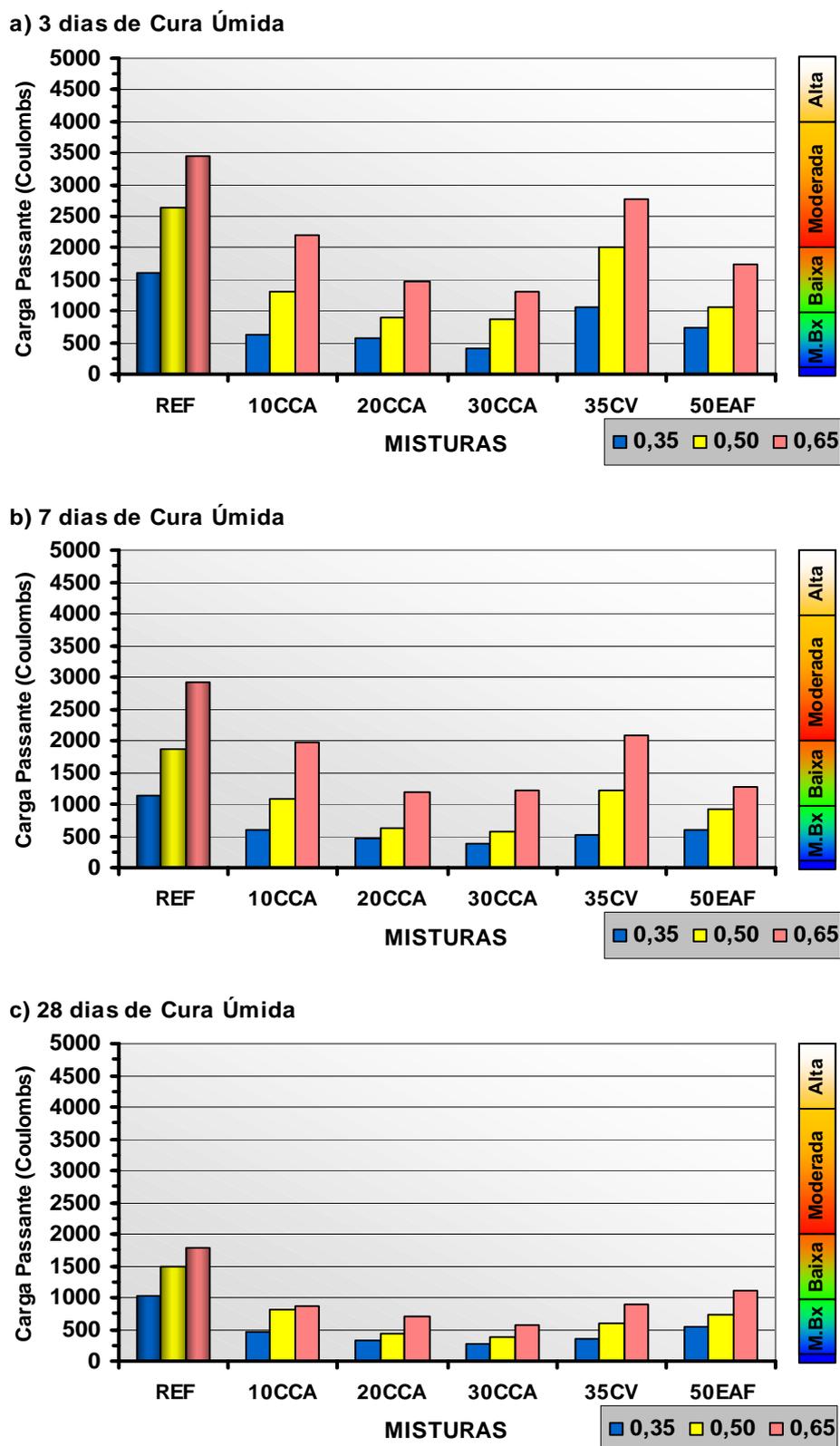


Figura 5.13 – Carga Total Passante medida através do Teste Rápido de Penetração de Cloretos – TRPC, para as misturas investigadas, na idade de 91 dias, de acordo com a relação a/ag e o período de cura,. Ao lado de cada gráfico está representada a classificação dos concretos de acordo com a penetração de cloretos proposta pela ASTM C1202.

Assim como ocorreu nos resultados dos coeficientes de difusão, item 5.3.1, a redução da relação a/ag aumentou a resistência à penetração de cloretos para todos os concretos investigados, independente do período de cura adotado, o que é demonstrado através dos decréscimos ocorridos na Q.

Para os concretos com cura de 3 dias, a mistura 10CCA foi a que obteve os maiores decréscimos na Q com a redução da relação a/ag, cerca de 40% quando a relação a/ag variou de 0,65 para 0,50 e 51% na variação de 0,50 para 0,35. Este decréscimo chega a 71%, se considerada a variação na relação a/ag de 0,65 para 0,35. Do mesmo modo, a redução na quantidade total de água no concreto trouxe grande melhoria para as misturas 20CCA e 30CCA, gerando reduções de 62% e 68%, respectivamente, quando a relação a/ag passou de 0,65 para 0,35.

Naqueles concretos em que o período de cura foi de 7 dias, o maior decréscimo na Q foi observado para a mistura 30CCA, 54%, com a variação na relação a/ag de 0,65 para 0,50. Porém, a redução na relação a/ag de 0,50 para 0,35 ocasionou um decréscimo mais acentuado na Q para a mistura 35CV, correspondendo a 57%. A redução de 75% na Q para a mistura 35CV, quando a relação a/ag passou de 0,65 para 0,35, demonstra que este fator tem grande influência na formação da estrutura dos poros do concreto (descontinuidade dos capilares) e, conseqüentemente, na sua permeabilidade, propriedade que interfere diretamente na qualidade do concreto e na durabilidade das estruturas.

A redução na Q com a redução da relação a/ag foi observada por outros pesquisadores como TORII & KAWAMURA (1992), ISAIA (1995), GASTALDINI *et al* (2002), DAL RI (2002), entre outros.

Com o prolongamento do período de cura para 28 dias, a mistura 35CV teve novamente a maior redução na Q quando a relação a/ag variou de 0,65 para 0,35, em torno de 62%. Porém, a variação da relação a/ag de 0,65 para 0,50 gerou maiores quedas na Q para a mistura 20CCA, aproximadamente 36%; e a variação da relação a/ag de 0,50 para 0,35 trouxe maiores benefícios para as misturas 35CV e 10CCA, com redução média de 41% na Q.

Desta forma, pode-se observar que a relação a/ag exerce grande influência na resistência à penetração de cloretos no concreto, sendo a carga total passante elevada na razão direta da quantidade de água da mistura.

5.4.2 Efeito isolado da substituição do cimento pelas adições minerais

A incorporação de adições minerais no concreto promove, simultaneamente, alterações físicas e químicas na estrutura da pasta cimentícia, e a magnitude destas alterações vai depender do tipo de adição, do teor de substituição, da relação a/ag, do regime de cura adotado e do grau de hidratação da pasta (idade considerada). Segundo MEHTA & MONTEIRO (1994), as alterações físicas se constituem por uma densificação da pasta, comandada por um refinamento dos poros e dos grãos de C-H. As mudanças na composição química da pasta estão correlacionadas com as quantidades de silicatos e aluminatos disponíveis para as reações, devido à menor quantidade de cimentos na mistura.

É de consenso que as alterações na microestrutura da pasta e na composição química da solução dos poros (concentração de íons Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , OH^- e SO_4^{2-}), resultantes das reações pozolânicas, são os principais parâmetros que influenciam a carga total passante, medida no TRPC (SHI *et al*, 1998; DAL RI *et al*, 2002). As alterações na microestrutura porque dificultam a passagem dos íons e estão relacionadas ao seccionamento de poros capilares e à maior descontinuidade e tortuosidade da rede de poros. As mudanças na

composição química da solução dos poros, porque alteram a condutividade elétrica do concreto.

Assim, no presente tópico será realizada uma abordagem mais detalhada quanto ao desempenho de cada adição mineral na redução da carga total passante, medida no TRPC. Esta análise é feita mediante a comparação entre os valores de Q de cada mistura e da mistura de referência (100% cimento). Para isto, definiu-se a Taxa de Desempenho da Adição, quanto à redução da carga passante no TRPC, de acordo com a equação 5.7 abaixo.

$$\mathbf{TDA}_{AD, i, x; tc}^C (\%) = -[(Q_{AD, i, x, tc}/Q_{REF, i, x, tc})-1].100 \quad (5.7)$$

onde,

TDA_{AD}^C : Taxa de Desempenho da Adição AD , quanto à redução da carga total passante, na idade i , com relação a/ag x e período de cura tc , em %;

Q_{AD} : Carga Total Passante através do concreto com adição AD , na idade i , com relação a/ag x e período de cura tc , em Coulombs;

Q_{REF} : Carga Total Passante através do concreto de referência (sem adição), na idade i , com relação a/ag x e período de cura tc , em Coulombs.

O sinal negativo no início da equação anterior faz com que o valor numérico da taxa de desempenho represente melhor seu significado técnico, ou seja, valores de Q_{AD} inferiores a Q_{REF} mostram o bom desempenho da mistura com a adição AD em relação à mistura REF , devendo, portanto, conduzir a um valor de TDA_{AD}^C positivo.

No Quadro 5.8 são apresentados os valores das taxas de desempenho para cada mistura com adição mineral, de acordo com o período de cura e a relação água/aglomerante.

Quadro 5.8: Taxas de Desempenho das Adições, quanto à redução da carga total passante, das misturas investigadas, aos 91 dias de idade, em função do período de cura e da relação a/ag utilizados

Idade	Cura	a/ag	MISTURAS				
			10CCA	20CCA	30CCA	35CV	50EAF
91 dias	3	0,35	+60	+65	+74	+33	+53
		0,50	+50	+66	+67	+23	+59
		0,65	+36	+57	+62	+20	+50
	7	0,35	+49	+60	+67	+55	+47
		0,50	+42	+67	+70	+35	+51
		0,65	+32	+59	+58	+29	+57
	28	0,35	+55	+69	+74	+67	+47
		0,50	+46	+70	+74	+60	+50
		0,65	+51	+61	+68	+49	+38

As melhorias na qualidade dos concretos contendo adições minerais, no que se refere à redução da carga passante, são claramente observadas no quadro anterior e na Figura 5.14, independente da relação água/aglomerante e do período de cura, pois em todas as misturas avaliadas das taxas de desempenho foram positivas.

Para um período de cura de 3 dias, as misturas 20CCA e 30CCA foram as que apresentaram melhor desempenho, com TDA_{AD}^C média, para as três relações a/ag, de 63% e 67%, respectivamente, sendo que na mistura 30CCA, com a/ag 0,35, a redução na carga passante chegou a 74%. Estas misturas também apresentaram desempenho superior às demais em períodos de cura mais prolongados, como 7 e 28 dias. As maiores taxas de desempenho foram relativas à mistura 30CCA, em média 65% para cura de 7 dias e 72% para cura de 28 dias.

Nas misturas em que o cimento foi substituído por CCA, o aumento no teor de substituição, em geral, reduziu a Q, em todas as relações a/ag e períodos de cura, exceto no aumento de 20% para 30% de CCA, com a/ag 0,65 e cura de 7 dias, onde praticamente não houve variação dos resultados. O aumento no percentual de substituição de 10% para 20% gerou os maiores incrementos na TDA_{AD}^C , nos três períodos de cura estudados, cerca de 21% (a/ag 0,65), 27% (a/ag 0,65) e 24% (a/ag 0,50) para períodos de cura de 3, 7 e 28 dias, nesta ordem. Apesar de também ter havido elevação na taxa de desempenho com o aumento do teor de CCA de 20% para 30%, as diferenças não foram tão expressivas quanto aquelas ocorridas quando se aumentou o teor de CCA de 10% para 20%.

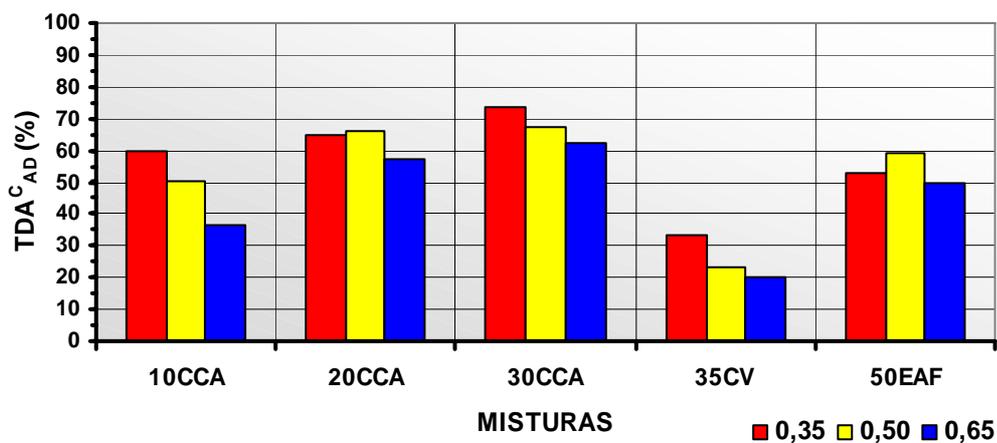
A grande reatividade da cinza de casca de arroz, quanto à redução da penetração de cloretos, pode ser comprovada mediante a observação das taxas de desempenho das misturas contendo esta adição. A simples substituição de 10% da massa de cimento por CCA produziu quedas na carga total passante de 60%, 50% e 36%, para a/ag 0,35, 0,50 e 0,65, respectivamente, quando o período de cura foi de 3 dias apenas. Como visto anteriormente, estes decréscimos na carga total passante podem chegar a 70% para a mistura 20CCA e a 74% para a mistura 30CCA, ambas com a/ag 0,50 e cura de 28 dias.

A mistura 35CV teve as menores taxas de desempenho para os períodos de cura de 3 e 7 dias, cerca de 20% e 29%, respectivamente. Quando o período de cura foi de 28 dias, a mistura 50EAF apresentou TDA_{AD}^C igual a 38%, sendo a taxa de desempenho mais baixa neste regime de cura.

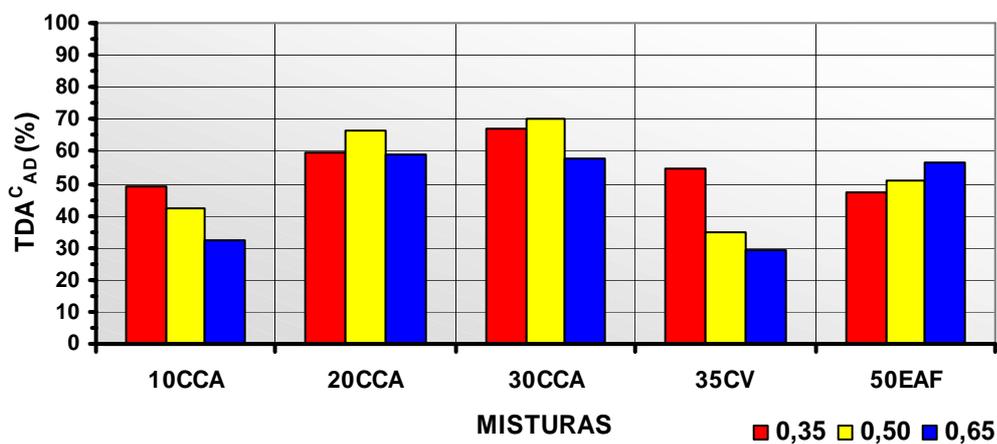
Deste modo, verificou-se que a inclusão das adições minerais, em substituição de parte do cimento, resultou em concretos com menor carga total passante e, portanto, com resistência à penetração de cloretos mais elevada, de acordo com os critérios da ASTM C1202. Estes resultados estão de acordo com as pesquisas de TORII & KAWAMURA (1992), RAMEZANIANPOUR & MALHOTRA (1995), WEE *et al* (2000) e FERREIRA *et al* (2003).

Todavia, o desempenho de cada mistura se mostrou dependente do tipo de adição mineral, do teor de substituição, da relação água/aglomerante e do regime de cura imposto.

a) 3 dias de Cura Úmida



b) 7 dias de Cura Úmida



c) 28 dias de Cura Úmida

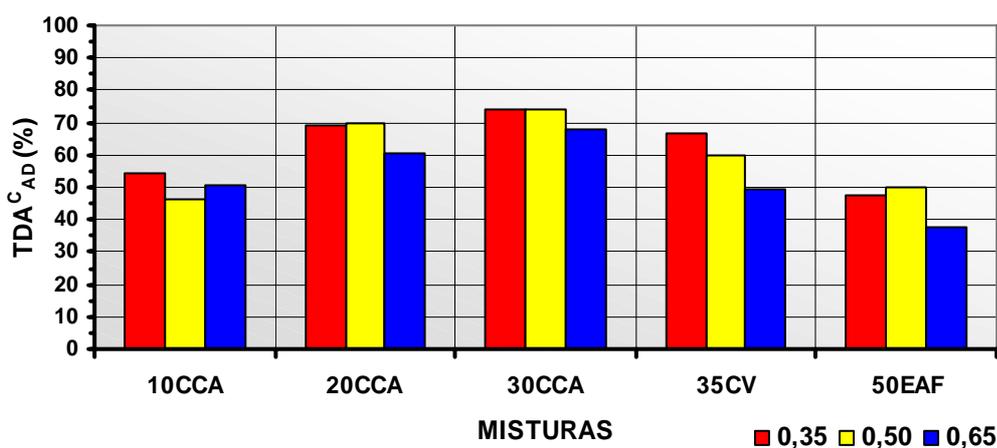


Figura 5.14 – Taxa de Desempenho da Adição, quanto à redução da carga total passante medida no TRPC - ASTM C1202, de acordo com a relação a/ag e o período de cura.

5.4.3 Efeito isolado do período de cura úmida

É sabido que a cura do concreto favorece as reações de hidratação do cimento e pozolânicas, assim como evita a saída prematura da água do interior dos poros (NEVILLE, 1997). Este processo dá origem a uma microestrutura mais densa, com menor volume de poros capilares e, por conseqüência, resulta num concreto de menor permeabilidade (AÏTCIN, 2000). No entanto, não há ainda um consenso no meio científico sobre o tempo mínimo necessário no qual deve-se proceder a cura em concretos contendo adições minerais (BATTAGIN *et al*, 2002). Este período dependerá, além do tipo e da temperatura de cura, de diversos outros fatores, tais como: tipo de adição utilizada, sua proporção, relação água/aglomerante, fatores climáticos e construtivos, assim como das propriedades de interesse (resistência a cloretos, sulfatos, carbonatação ou mecânica).

Na Figura 5.15 estão plotadas as curvas que correlacionam a carga total passante Q em função do período de cura adotado para todas as misturas investigadas. Percebe-se nesta figura, o deslocamento das curvas no sentido dos menores valores de Q , devido ao prolongamento do período de cura de 3 para 7 ou 28 dias. Pode-se notar também, que este deslocamento é tanto maior quanto mais elevada for a quantidade de água na mistura, representada pela relação a/ag . Comportamento semelhante foi observado por BATTAGIN *et al* (2002).

Assim, visando conhecer melhor a influência do período de cura úmida sobre a resistência à penetração de cloretos em concretos contendo adições minerais é desenvolvida neste tópico, a exemplo dos anteriores, uma abordagem baseada em uma medida de desempenho de cada mistura em relação ao concreto de referência ou de controle. A variável Taxa de Desempenho da Cura, quanto à redução da carga passante medida no TRPC, quantifica as variações percentuais na Q devido ao prolongamento do período de cura, para cada mistura, na idade de 91 dias. A equação 5.8 expressa a definição desta variável.

$$TDC_{AD, i, x; tc}^C (\%) = \{ -[(Q_{AD, i, x, tc} / Q_{REF, i, x, tc=3d}) - 1] \cdot 100 \} + 100 \quad (5.8)$$

onde,

TDC_{AD}^C : Taxa de Desempenho da Cura, quanto à redução da carga total passante do concreto com adição AD , na idade i , com relação a/ag x e período de cura tc , em %;

Q_{AD} : Carga Total Passante do concreto com adição AD , na idade i , com relação a/ag x e período de cura tc , em Coulombs;

Q_{REF} : Carga Total Passante do concreto de referência (sem adição), na idade i , com relação a/ag x e período de cura tc igual a 3 dias, em Coulombs.

A Figura 5.16 representa graficamente as taxas de desempenho da cura calculadas para cada mistura, de acordo com a relação a/ag .

Nota-se que nos concretos com a/ag 0,35, o aumento no período de cura de 3 para 7 dias foi mais benéfico para a mistura 35CV, reduzindo sua carga passante em 38%. Porém, para cura de 28 dias, nesta a/ag , as misturas 20CCA e 30CCA obtiveram os maiores incrementos, cerca de 14% em relação ao período de cura de 7 dias.

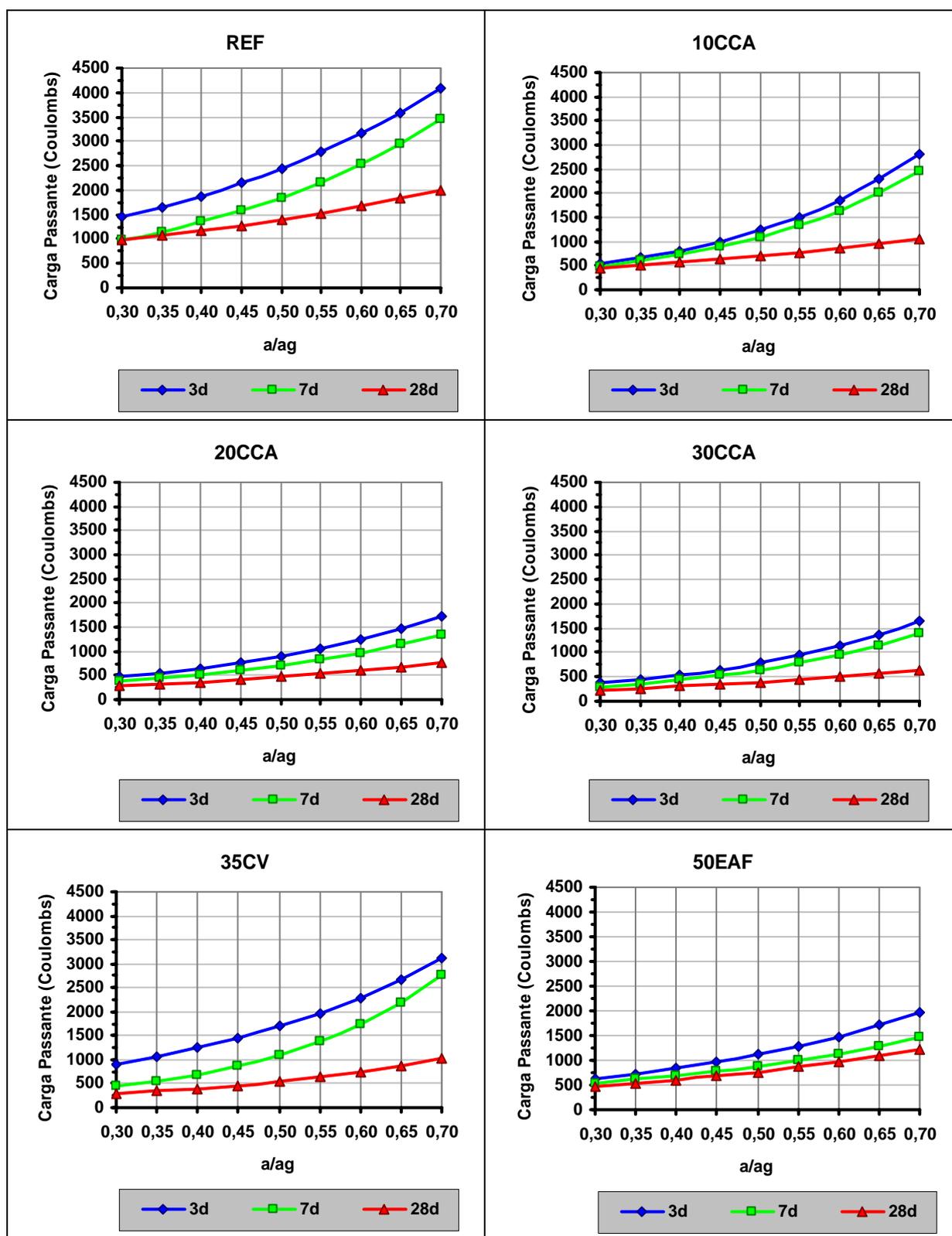


Figura 5.15 – Variação da Carga Total Passante de cada mistura investigada, aos 91 dias, em função da relação água/aglomerante e do tempo de cura úmida.

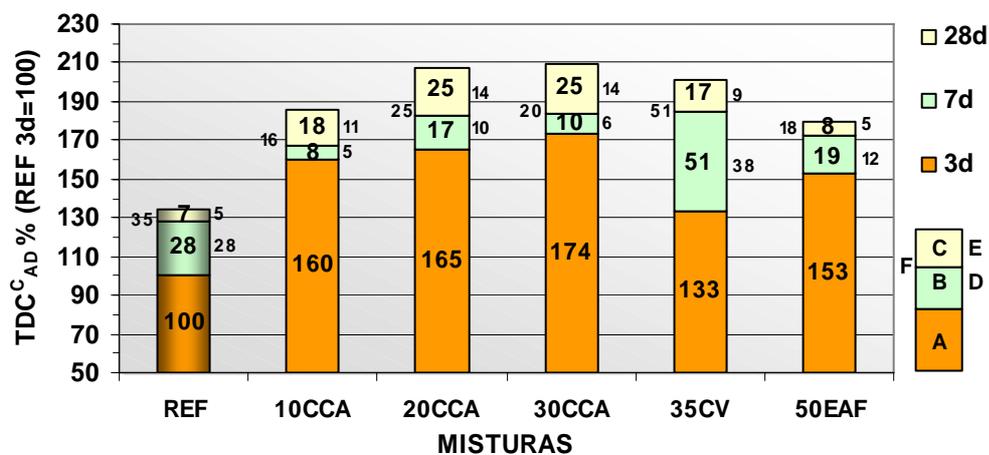
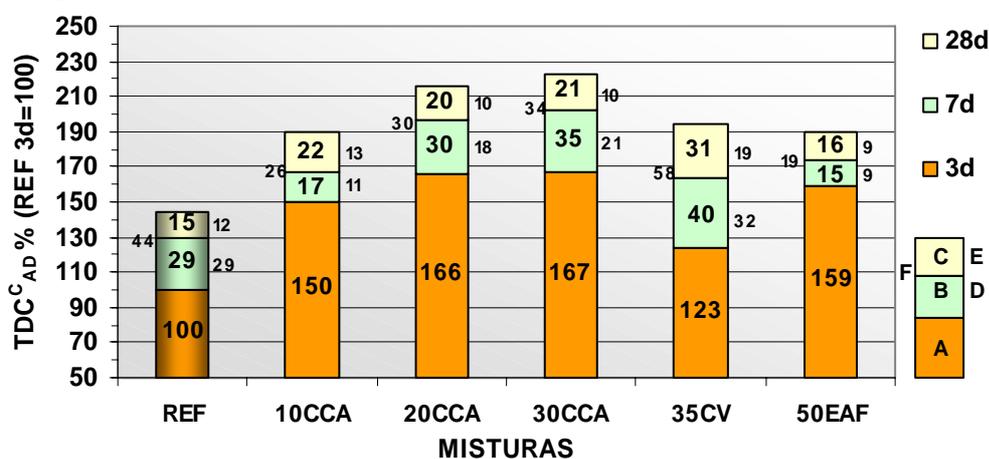
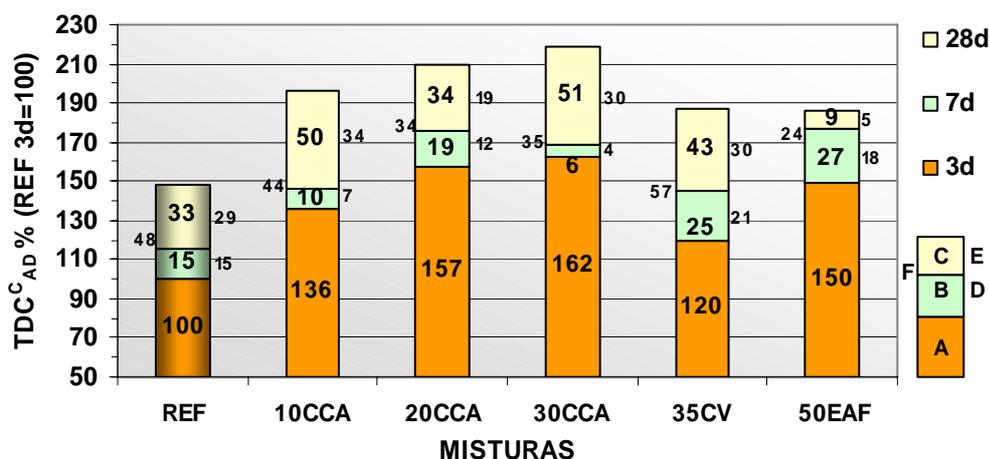
a) $a/ag=0,35$ b) $a/ag=0,50$ c) $a/ag=0,65$ 

Figura 5.16 – Taxa de Desempenho da Cura, quanto à redução da carga total passante das diversas misturas investigadas, de acordo com a relação a/ag e o período de cura. A = TDC^C_{3d} ; B = $(TDC^C_{7d} - TDC^C_{3d})$; C = $(TDC^C_{28d} - TDC^C_{7d})$; D = (Q_{7d}/Q_{3d}) ; E = (Q_{28d}/Q_{7d}) ; F = (Q_{28d}/Q_{3d}) .

Para a/ag igual a 0,50 a mistura 35CV tem novamente as maiores reduções na Q (32%), seguida das misturas REF (29%), 30CCA (21%) e 20CCA (18%), com a variação no período de cura de 3 para 7 dias. Na alteração do período de cura de 7 para 28 dias, a mistura 35CV apresentou queda na Q de 19% e as misturas contendo CCA nos três teores de substituição, apresentaram redução média de 11%.

Dentre as misturas com relação a/ag igual a 0,65, aquela contendo 35% de cinza volante foi a que apresentou maior decréscimo na Q quando o período de cura aumentou de 3 para 7 dias, aproximadamente 21%. No entanto, o prolongamento do período de cura úmida de 7 para 28 dias gerou reduções mais acentuadas na Q para a mistura 10CCA (34%), seguida das misturas 30CCA e 35CV (30% para ambas) e REF (29%).

Através da análise das Figuras 5.15 e 5.16 verifica-se que, para todas as misturas, o incremento na taxa de desempenho TDC_{AD}^C é mais elevado quanto maior for a a/ag . O cálculo das diferenças das TDC_{AD}^C entre os períodos de cura de 3 e 28 dias demonstra que esta amplitude é maior à medida que se eleva a a/ag . O concreto 35CV teve as maiores variações na TDC_{AD}^C para todas as relações a/ag , cerca de 68-70%, e a mistura 50EAF as menores, variando de 27% a 36%.

Para as misturas com CCA, os decréscimos na carga passante com o aumento no período de cura de 3 para 28 dias dependem do percentual de substituição e da relação a/ag , uma vez que as maiores reduções nas relações a/ag iguais a 0,35, 0,50 e 0,65 foram obtidas, respectivamente, para as misturas 20CCA (25%), 30CCA (34%) e 10CCA (44%).

Com isto, pode-se afirmar que a cura do concreto tem grande influência na capacidade deste resistir à penetração de agentes agressivos como os íons cloreto. O prolongamento do período de cura melhorou a qualidade dos concretos investigados, segundo o critério de classificação proposto pela ASTM C1202. Como pode ser visto no Quadro 5.9, a mistura REF (a/ag 0,50) que, ao ser curada por 3 dias apenas, ocupa a classe dos concretos com moderada penetração de cloretos, com o prolongamento da cura para 7 dias esta mistura adquire características de concretos com baixa penetração de cloretos. Outro bom exemplo é o caso da mistura 10CCA, com a/ag 0,65: quando a cura é exercida por 3 dias, a penetração de cloretos é moderada; se a curada for de 7 dias, a penetração de cloretos é baixa; e o prolongamento da cura por um período de 28 dias lhe dá características de concretos de penetração de cloretos muito baixa. Caso idêntico a este é o da mistura 35CV, com a/ag 0,50. Para os concretos com adições de 20% e 30% de CCA e a/ag 0,65, também foram observadas melhorias de qualidade com o prolongamento do período de cura de 7 para 28 dias, passando da classe de baixa para muito baixa penetração de cloretos.

5.5 INTEGRAÇÃO DOS RESULTADOS

Com o objetivo de conhecer melhor as interdependências entre as propriedades investigadas, no presente tópico são estabelecidas as seguintes correlações:

- resistência à compressão axial x carga total passante
- resistência à compressão axial x coeficiente de difusão de cloretos
- coeficiente de difusão de cloretos x carga total passante

Quadro 5.9: Classificação das misturas investigadas quanto à penetração de cloretos, de acordo com os critérios da ASTM C1202

MISTURAS	RELAÇÃO ÁGUA/AGLOMERANTE								
	0,35			0,50			0,65		
	Período de Cura (dias)			Período de Cura (dias)			Período de Cura (dias)		
	3	7	28	3	7	28	3	7	28
REF	B	B	B	M	B	B	M	M	B
10CCA	MB	MB	MB	B	B	MB	M	B	MB
20CCA	MB	MB	MB	MB	MB	MB	B	B	MB
30CCA	MB	MB	MB	MB	MB	MB	B	B	MB
35CV	B	MB	MB	M	B	MB	M	M	MB
50EAF	MB	MB	MB	B	MB	MB	B	B	B

CLASSIFICAÇÃO DOS CONCRETOS QUANTO À PENETRAÇÃO DE CLORETOS – ASTM C1202					
Penetração de cloretos:	A-ALTA	M-MODERADA	B-BAIXA	MB-MUITO BAIXA	D-DESPREZÍVEL
Carga Total Passante (Coulombs)	> 4000	de 2000 a 4000	de 1000 a 2000	de 100 a 1000	< 100

Para sedimentar as diferenças no desempenho entre os diferentes aglomerantes, primeiramente é realizada uma análise do coeficiente de difusão de cloretos, da carga total passante, do consumo de aglomerante e da relação a/ag correspondentes a dois níveis de resistência à compressão: 30 MPa, para representar os concretos convencionais, e 60 MPa, por se encontrar na faixa de resistência dos concretos de alto desempenho.

Em uma segunda análise é fixado um parâmetro de durabilidade, no caso o coeficiente de difusão de cloretos, sendo calculados para cada mistura os respectivos valores de resistência mecânica, carga total passante e relação a/ag correspondentes a este coeficiente.

5.5.1 Correlação entre a resistência à compressão axial e a carga total passante

Na Figura 5.17 forma plotados os pontos correspondentes aos pares de valores de carga total passante (Q) e resistência à compressão axial (f_c), em igualdade de relação água/aglomerante, para cada série testada, na idade de 91 dias.

Pode-se observar nesta figura que há grande dispersão dos valores, estabelecendo a inexistência de um comportamento bem definido para este grupo de valores, pois existem valores bastante diferentes de Q que correspondem a iguais valores de f_c . Isto é, misturas com resistência à compressão semelhantes apresentaram valores de carga total passante muito distintas durante o Teste Rápido de Penetração de Cloretos. Além disso, conforme relatado nos itens anteriores, para uma mistura de mesma composição e relação a/ag, os valores da Q podem ser diferentes, se estas misturas forem submetidas a distintos períodos de cura em câmara úmida.

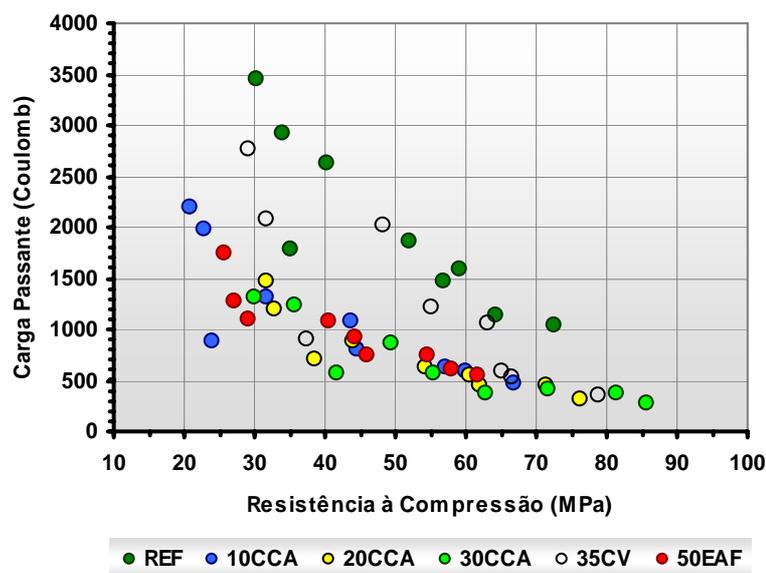


Figura 5.17 – Relação entre a resistência à compressão axial e a carga total passante, aos 91 dias de idade, em igualdade de relação a/ag, para todas as misturas e períodos de cura investigados.

Isto demonstra que o tipo de adição (sua composição química, finura, reatividade), o teor de substituição e o período de cura têm diferentes graus de influência sobre a resistência à compressão e a carga total passante de um concreto.

Deste modo, boas correlações podem ser determinadas eliminando-se as variáveis tipo de adição e período de cura, ou seja, é traçada uma curva de correlação para cada mistura e período de cura, conforme Figura 5.18.

Através da análise dos coeficientes de determinação (r^2) das curvas da Figura 5.18 pode-se verificar que existe uma correlação muito forte entre a resistência à compressão axial e a carga total passante, derivada do TRPC, para todas as misturas investigadas. Este fato também foi relatado por outros pesquisadores, dentre eles cita-se (ISAIA, 1995; WEE *et al*, 2000; GASTALDINI *et al*, 2002). O aumento na resistência à compressão do concreto é acompanhado por uma redução da carga total passante através dele, devido à redução da porosidade total observada com o decréscimo da relação a/ag.

Nota-se também nesta figura que o coeficiente angular a , que dá o grau de inclinação da reta, diminui à medida que o período de cura passa de 3 para 7 dias e de 7 para 28 dias. Isto indica que, em concretos curados por um período mais prolongado, a carga total passante é menos dependente da resistência à compressão e que uma cura adequada pode compensar os efeitos negativos das relações a/ag mais elevadas, no que diz respeito à durabilidade do concreto. Tal fato foi observado para todas as misturas investigadas.

O aumento no percentual de substituição do cimento por CCA também é acompanhado por uma redução no coeficiente a , sugerindo que nas misturas com maior teor de CCA, a redução na relação a/ag traz maiores benefícios para a resistência à compressão do concreto do que para a redução da carga total passante. Isto é válido para um mesmo tipo de mistura aglomerante.

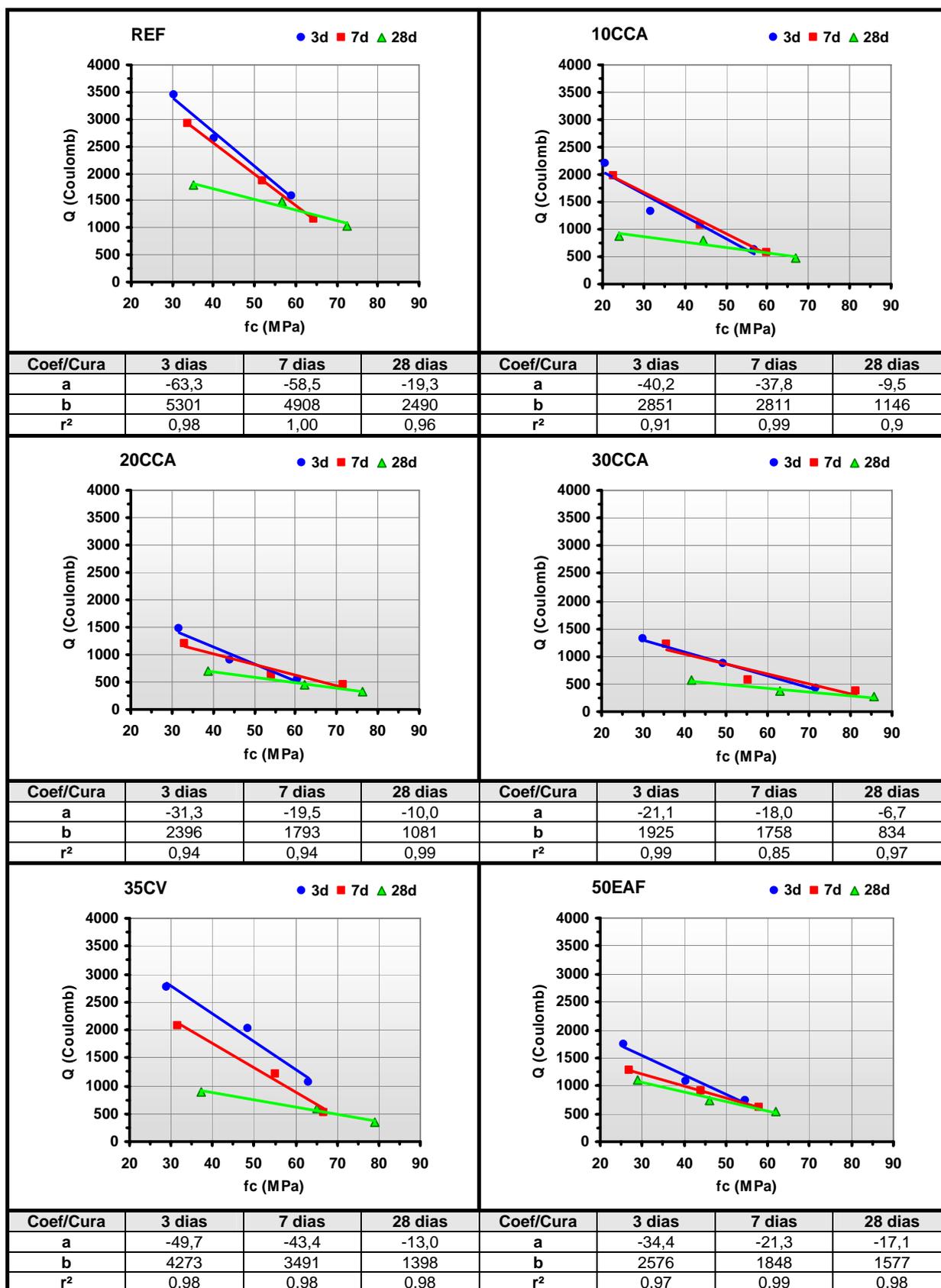


Figura 5.18 – Curvas de correlação entre a resistência à compressão axial e a carga total passante para as diversas misturas testadas, em função do período de cura. As curvas seguem a equação geral $Q = a \cdot f_c + b$, cujos coeficientes a e b são apresentados abaixo de cada gráfico. r^2 é o coeficiente de determinação.

Com efeito, tal comportamento está associado às alterações na microestrutura dos poros e na resistividade elétrica da solução destes poros, uma vez que a carga passante é um parâmetro de depende destas duas variáveis. Uma grande redução da porosidade e seccionamento dos capilares poderia já ter ocorrido quando o cimento foi substituído por 10 % de CCA, fazendo com que os benefícios adicionais, quanto à redução da carga passante, devido à elevação do teor desta pozolana de 10% para 20% ou 30% sejam menos expressivos do que aqueles da mistura 10CCA.

Por meio das equações de correlação de cada mistura, é possível estimar com boa precisão os valores de carga total passante a partir da resistência à compressão, para concretos com materiais, proporções e regimes de cura semelhantes àqueles aqui testados.

5.5.2 Correlação entre a resistência à compressão axial e o coeficiente de difusão de cloretos

Os pontos que correlacionam a resistência à compressão axial (f_c) e o coeficiente k de difusão, para todas as séries ensaiadas, mostram uma dispersão bastante acentuada dos valores, devido aos diferentes fatores que interferem em cada uma destas propriedades (Figura 5.19), conforme discutido no item anterior.

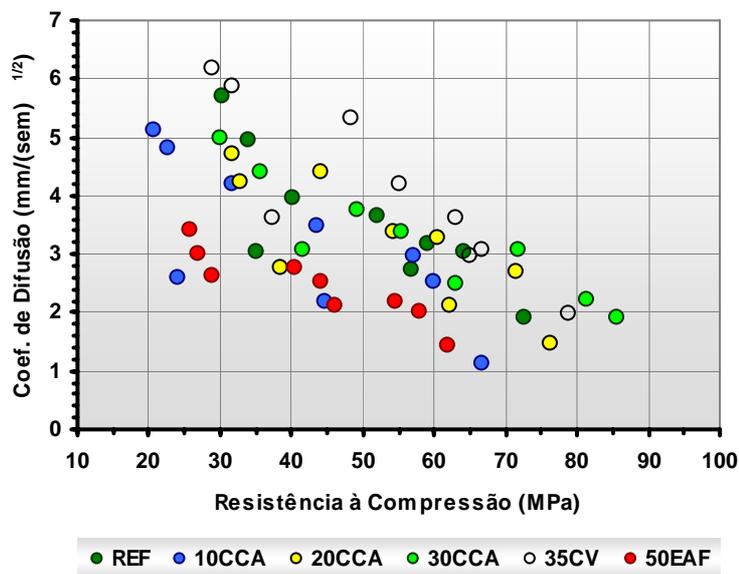


Figura 5.19 – Relação entre a resistência à compressão axial e o coeficiente de difusão de cloretos, aos 91 dias de idade, em igualdade de relação a/ag, para todas as misturas e períodos de cura investigados.

Assim, as curvas de correlação foram geradas para cada mistura aglomerante, individualmente, de acordo com o período de cura adotado (Figura 5.20). Os coeficientes de determinação elevados mostram a existência de uma forte correlação entre o coeficiente k e a f_c , para cada mistura, individualmente.

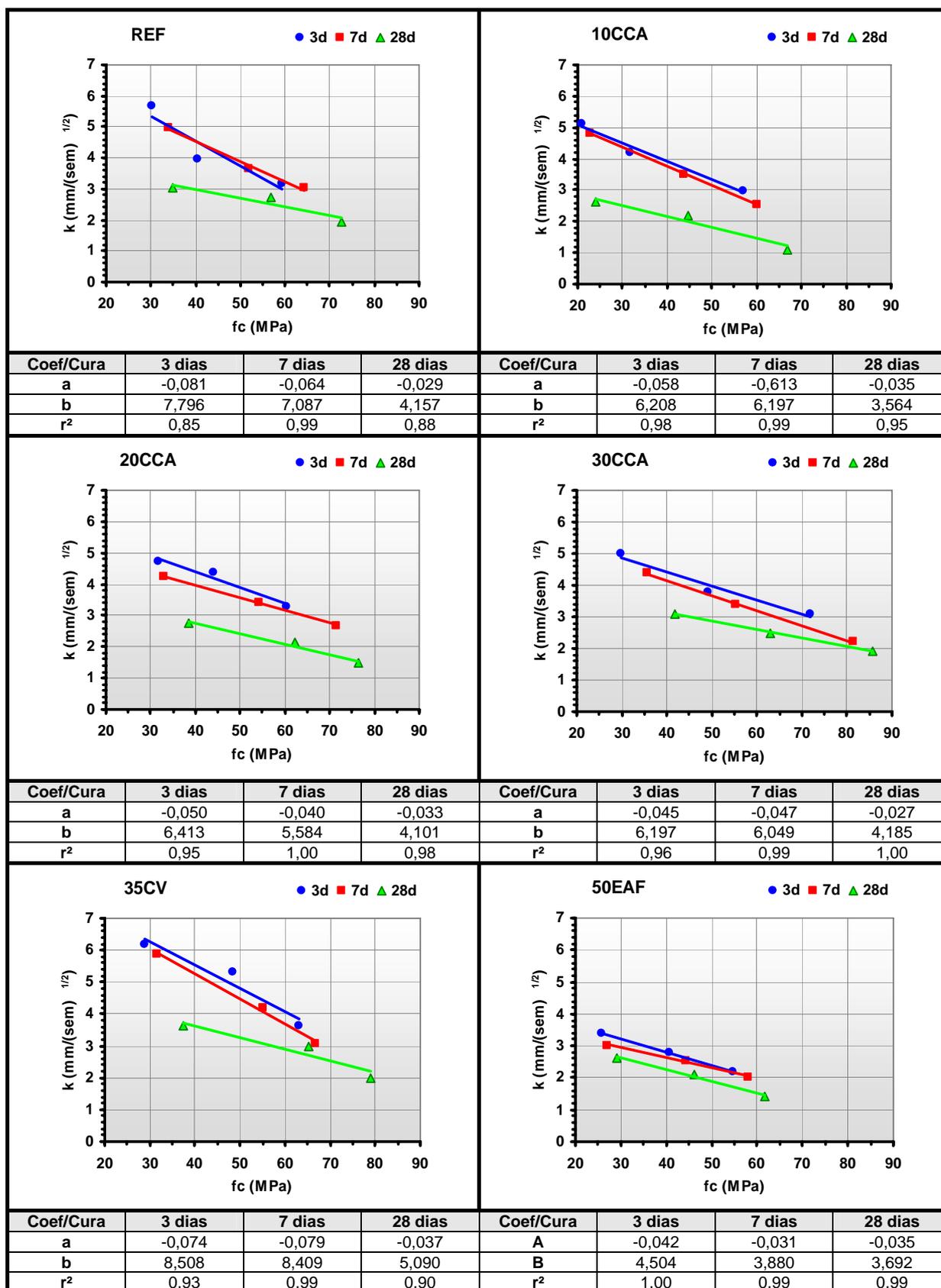


Figura 5.20 – Curvas de correlação entre a resistência à compressão axial e coeficiente de difusão de cloretos para as diversas misturas testadas, em função do período de cura. As curvas seguem a equação geral $k = a \cdot f_c + b$, cujos coeficientes a e b são apresentados abaixo de cada gráfico. r^2 é o coeficiente de determinação.

A comparação dos coeficientes angulares a , relativos aos períodos de cura de 7 e 28 dias, sugere que, para um mesmo aglomerante, o coeficiente de difusão de cloretos depende menos da resistência à compressão axial naqueles concretos com período de cura mais prolongado, assim como ocorreu na análise da carga passante. Exceção é o caso da mistura 50EAF, que possui valores de a iguais a $-0,0314$ para cura de 7 dias e $-0,0359$ para cura de 28 dias.

Em geral, o aumento na quantidade de CCA na mistura fez com que houvesse menores variações no k , devido ao aumento da f_c , para todos os períodos de cura adotados. Ou seja, à medida que aumentou o teor de CCA na mistura, o coeficiente de difusão de cloretos é menos influenciado pelo aumento no nível de resistência à compressão do concreto.

Neste caso, o aumento no teor de CCA na mistura reduz a quantidade de aluminatos do aglomerante, diminuindo a capacidade de fixação dos íons cloreto pelo concreto, se contrapondo às melhorias em sua microestrutura. Deste modo, a capacidade do concreto de resistir ao ataque dos íons cloreto, quando a quantidade de CCA é aumentada, seria resultante da combinação destes dois fatores, cujos efeitos são opostos.

Portanto, a partir dos resultados de resistência à compressão axial é possível determinar com boa precisão o coeficiente de difusão de cloretos dos concretos investigados, utilizando para isto as funções de correlação de cada mistura constantes na Figura 5.20, desde que mantidas condições de cura semelhantes àquelas adotadas na presente pesquisa.

5.5.3 Correlação entre a carga total passante e o coeficiente de difusão de cloretos

Segundo estudos de ANDRADE (1993), ISAIA (1996), SHI *et al* (1998) e WEE *et al* (2000), o Teste Rápido de Penetração de Cloretos (TRPC), proposto pela ASTM C1202, não determina diretamente a resistência à penetração de cloretos, principalmente em concretos contendo adições minerais. Os resultados do TRPC poderiam ser usados como uma medida de condutividade global destes concretos ao invés de uma medida de resistência à penetração dos cloretos. A carga total passante é dependente da microestrutura e da condutividade dos poros (especialmente dos íons OH^-), enquanto a difusão dos íons cloretos através do concreto é influenciada pelas alterações que ocorrem nesta microestrutura, que restringem a mobilidade dos íons cloretos, como a fixação destes íons por combinação com as fases aluminato e ferro-aluminato do cimento. Assim, a carga total passante e o coeficiente de difusão seriam controlados por diferentes fatores, o que explicaria a não correlação destas variáveis (WEE *et al*, 2000).

De fato, como pode ser visualizado na Figura 5.21, quando são plotados os valores correspondentes a todas as séries investigadas na presente pesquisa existe uma grande dispersão dos pontos que correlacionam a Q e o k . Nota-se nesta figura que a determinação da resistência à penetração de cloretos através das medidas de carga passante tem que ser utilizada com muita reserva, uma vez que existem misturas com valores semelhantes de carga passante que apresentam coeficientes de difusão cerca de 200% superiores.

Por outro lado, ISAIA (1995) relata que o TRPC apresenta como vantagens a fácil execução do ensaio, a rapidez na obtenção dos resultados e é aplicável a quase todos os tipos de concretos, em especial quando se deseja comparar os resultados de misturas alternativas com uma de referência.

No entanto, a classificação dos concretos quanto à penetração de cloretos proposta pela ASTM C1202, mostrou-se eficiente para uma rápida avaliação qualitativa de cada

mistura isoladamente, não sendo adequada para comparação de diferentes misturas aglomerantes ou que tenham sido curadas por períodos distintos. Apenas a título de exemplificação, existem misturas que pertencem à mesma categoria quanto à penetração de cloretos (muito baixa, por exemplo), cujos respectivos coeficientes de difusão diferem em até 3,7 vezes. Se calculados os tempos necessários para que os íons cloretos penetrem da superfície do concreto até as barras de aço de uma estrutura sob condições semelhantes às do EPCANP, estas diferenças podem chegar a 13 vezes.

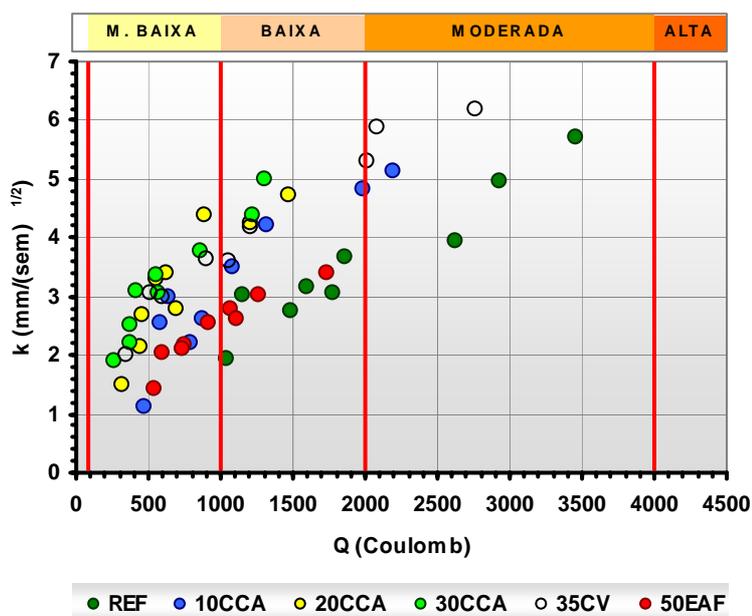


Figura 5.21– Relação entre a carga total passante e o coeficiente de difusão de cloretos, aos 91 dias de idade, em igualdade de relação a/a_g , para todas as misturas e períodos de cura investigados. Na parte superior do gráfico está representada a classificação dos concretos quanto à penetração de cloretos – ASTM C1202.

Conforme a Figura 5.22, pode-se conseguir boas correlações entre a carga total passante e o coeficiente de difusão de cloretos, se os dados forem agrupados de acordo com o tipo de mistura aglomerante e o período de cura no qual os concretos são submetidos. Deste modo, é possível estimar com boa precisão os coeficientes de difusão, para as misturas testadas, a partir dos resultados do TRPC. Verifica-se nesta figura que o coeficiente de difusão cresce com o aumento na carga total passante. Nota-se também que, com exceção da mistura de referência, o coeficiente angular a das curvas de correlação aumenta com o prolongamento do período de cura para todas as demais misturas. Este comportamento sugere que, nos concretos com cura mais prolongada, a variação na resistência à compressão exerce maior influência sobre o coeficiente de difusão do que na carga total passante.

A importância da cura na redução do coeficiente de difusão de cloretos e da carga total passante pode ser visualizada claramente nesta figura, já que o prolongamento no período de cura conduziu a valores menores de k e Q para todas as misturas testadas.

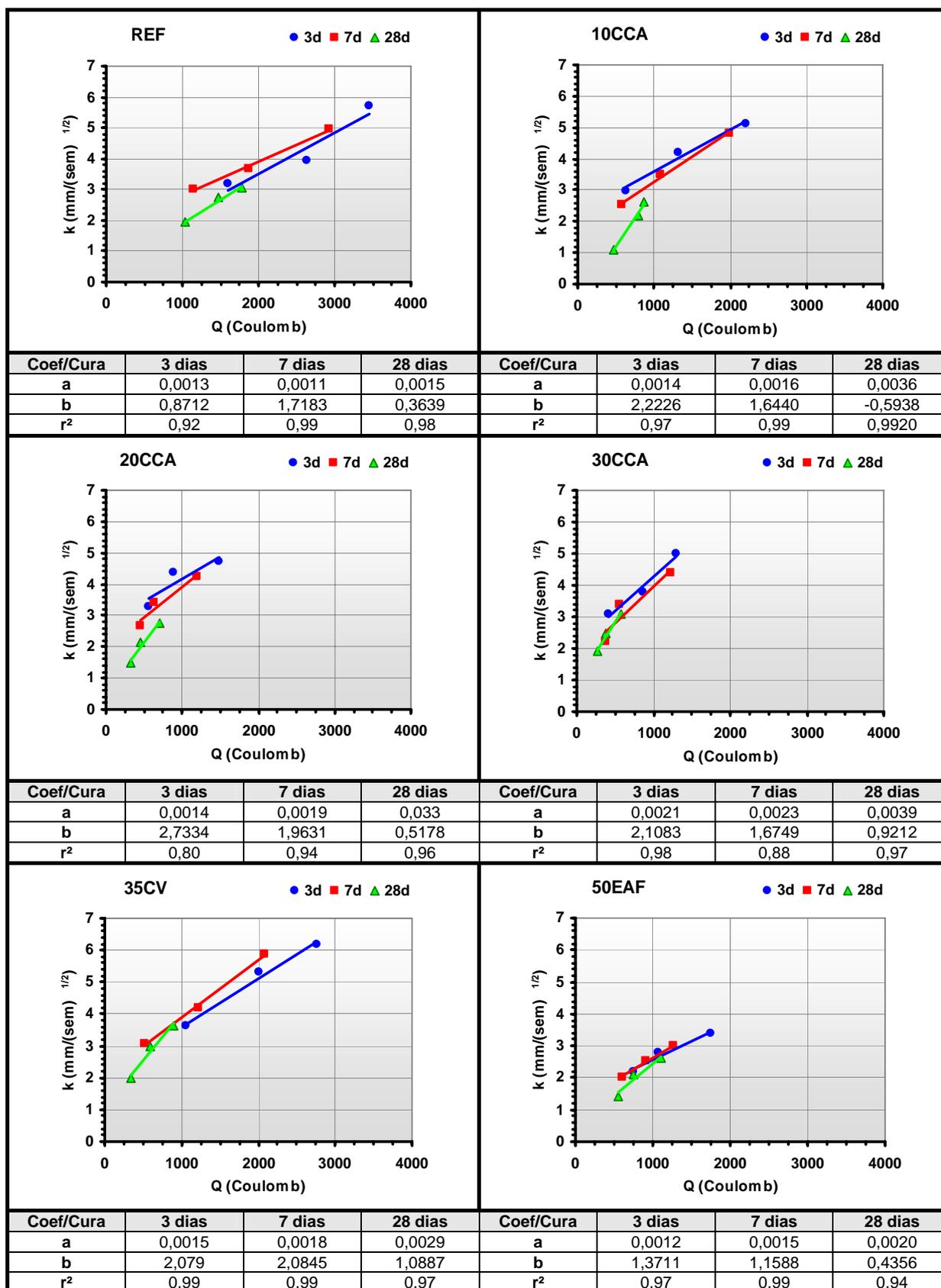


Figura 5.22 – Curvas de correlação entre a carga total passante e o coeficiente de difusão de cloretos para as diversas misturas testadas, em função do período de cura. As curvas seguem a equação geral $k = a.Q + b$, cujos coeficientes a e b são apresentados abaixo de cada gráfico. r^2 é o coeficiente de determinação.

5.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS EM IGUALDADE DE RESISTÊNCIA

A resistência mecânica é a propriedade do concreto utilizada pelos projetistas para especificação de um material que atenda as exigências de execução de uma determinada estrutura de concreto. Uma das razões para isto talvez seja encontrada no fato de esta propriedade ter um comportamento já bastante conhecido no meio técnico e sua medição é de relativa simplicidade.

Deste modo, neste tópico serão analisadas as variações do coeficiente de difusão de cloretos e da carga total passante para as diversas misturas investigadas, em dois níveis de resistência à compressão, 30MPa e 60MPa. Será feita uma abordagem do ponto de vista das variações no período de cura úmida destes concretos, linha central desta pesquisa.

O nível de resistência de 30 MPa foi escolhido para representar os concretos ditos convencionais, geralmente especificados aos 28 dias de idade. E o nível de 60MPa por se encontrar na faixa daqueles concretos considerados de alto desempenho. Neste caso a idade do concreto considerada é de 91 dias.

Assim, fixadas as resistências à compressão e a idade dos concretos, as relações a/ag foram calculadas a partir das equações de Abrams, cujos coeficientes para cada mistura e regime de cura encontram-se no Quadro 5.1. De posse destas relações a/ag , foram calculados os consumos de aglomerante por m^3 de concreto para cada mistura, em cada nível de resistência.

A carga total passante e o coeficiente de difusão são obtidos a partir das funções de regressão apresentadas nas Figuras 5.18 e 5.20, respectivamente. Para cálculo do k e da Q dos concretos do nível de resistência de 30MPa, procedeu-se da seguinte maneira: primeiramente foram obtidas as relações a/ag necessárias para atingir esta tensão na idade de 28 dias; num segundo momento; as relações a/ag foram utilizadas nas funções de regressão de k (Quadro 5.10) e Q (Quadro 5.7) obtidas para cada mistura, na idade de 91 dias.

Quadro 5.10 – Coeficientes a , b e r^2 das curvas de correlação entre o coeficiente de difusão k e a relação água aglomerante, para as misturas investigadas, em função do período de cura. (ver nota)

MISTURAS	PERÍODO DE CURA EM CÂMARA ÚMIDA								
	3 DIAS			7 DIAS			28 DIAS		
	a	b	r^2	a	b	r^2	a	b	r^2
REF	8,4263	0,0589	0,9531	6,4240	0,6724	0,9616	3,7423	0,7019	0,9372
10CCA	7,1900	0,5117	0,9929	7,5933	-0,1867	0,9908	4,9853	-0,5194	0,9387
20CCA	4,7350	1,7622	0,9087	5,2067	0,8420	0,9970	4,3000	-0,0236	1,0000
30CCA	6,3000	0,7967	0,9745	7,2620	-0,3072	0,9987	3,9117	0,5351	0,9998
35CV	8,5860	0,7451	0,9676	9,3310	-0,2886	0,9868	5,4343	0,1461	0,9848
50EAF	4,1100	0,7337	0,9997	3,2632	0,8954	0,9995	3,9347	0,0867	0,9945

NOTA: Os coeficientes a , b são os coeficientes angular e linear da equação geral $y = a.x + b$, onde y é substituído por k e x pela relação a/ag ; k é expresso em $mm/(semana)^{1/2}$.

As Figuras 5.23 e 5.24 apresentam as curvas de resistência à compressão, em função da relação água/aglomerante de cada mistura, para os diferentes períodos de cura considerados, para as idades de 28 e 91 dias, respectivamente.

No Quadro 5.11 constam os valores de água/aglomerante, coeficiente de difusão, carga total passante e o consumo de aglomerante, calculados para os níveis de resistência de 30MPa e 60MPa.

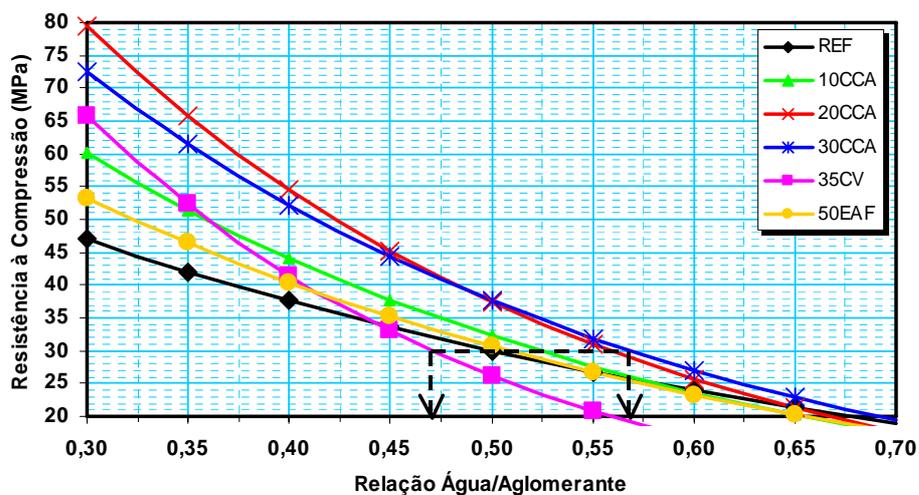
Quadro 5.11 – Relações água/aglomerante, consumo de aglomerante, coeficiente de difusão e carga total passante, calculados para os níveis de resistência à compressão de 30MPa e 60MPa.

MISTURAS	CURA (dias)	NÍVEL DE RESISTÊNCIA DOS CONCRETOS							
		30 MPa (idade de 28 dias)				60 MPa (idade de 91 dias)			
		a/ag	C	k ^A	Q ^A	a/ag	C	k	Q
REF	3	0,50	368	4,27	2437	0,34	492	2,92	1611
	7	0,58	319	4,40	2370	0,40	441	3,24	1351
	28	0,64	284	3,10	1797	0,44	406	2,35	1256
10CCA	3	0,52	353	4,25	1336	0,35	478	3,03	661
	7	0,61	302	4,45	1709	0,43	416	3,08	821
	28	0,67	269	2,82	982	0,48	384	1,87	664
20CCA	3	0,56	331	4,41	1096	0,42	427	3,75	695
	7	0,61	304	4,02	997	0,46	393	3,24	618
	28	0,67	271	2,86	721	0,51	365	2,17	476
30CCA	3	0,57	326	4,39	1014	0,38	453	3,19	494
	7	0,59	314	3,98	911	0,43	417	2,82	484
	28	0,66	275	3,12	577	0,48	379	2,41	370
35CV	3	0,47	386	4,78	1540	0,33	500	3,58	1003
	7	0,49	375	4,28	1047	0,37	464	3,16	602
	28	0,52	352	2,97	580	0,39	444	2,27	386
50EAF	3	0,51	362	2,83	1149	0,32	505	2,05	672
	7	0,53	347	2,62	956	0,35	481	2,04	613
	28	0,56	332	2,29	881	0,37	462	1,54	564

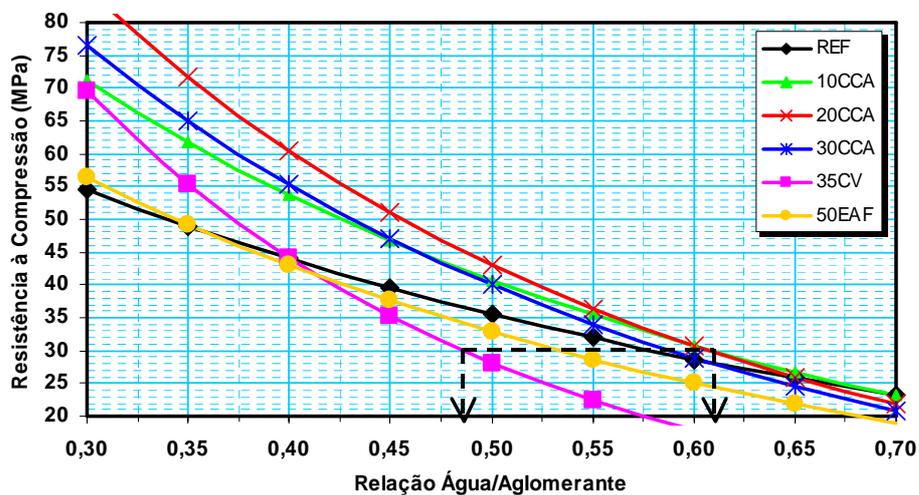
LEGENDA: a/ag: relação água/aglomerante; C: consumo de aglomerante, em kg/m³; k: coeficiente de difusão de cloretos, em mm/(semana)^{1/2}; Q: carga total passante, em Coulomb.

A: o coeficiente k e a Q para os concretos de 30MPa, assim como para os de 60MPa, foram calculadas na idade de 91 dias.

a) 3 DIAS DE CURA ÚMIDA



b) 7 DIAS DE CURA ÚMIDA



c) 28 DIAS DE CURA ÚMIDA

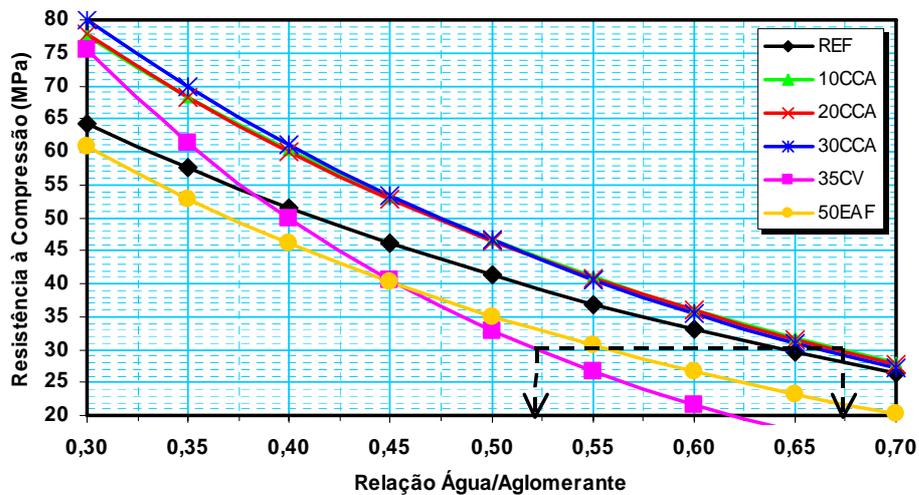
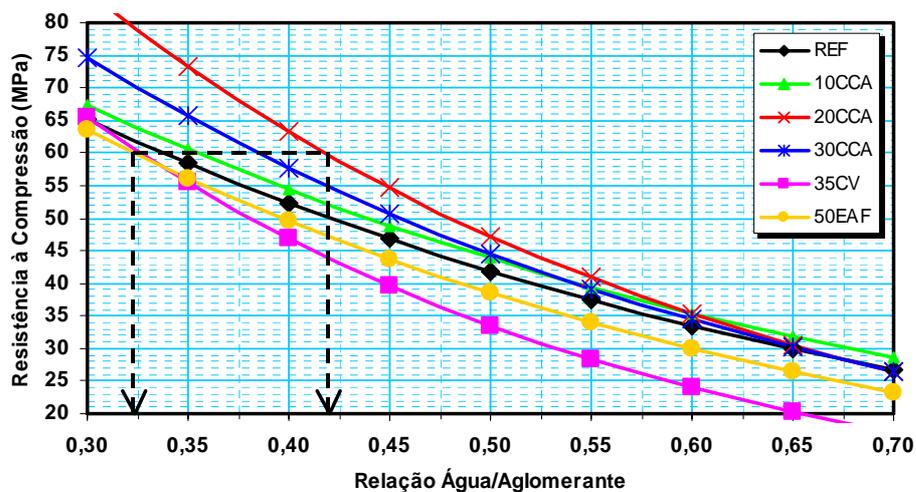
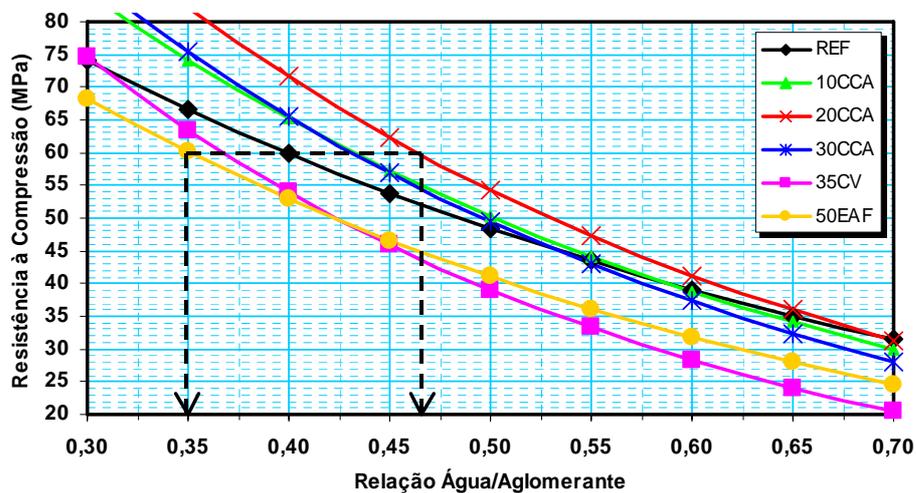


Figura 5.23 – Curvas de resistência à compressão *versus* relação água/aglomerante, em função do período de cura, para todas as misturas, na idade de 28 dias. As linhas tracejadas definem as relações a/ag limites para um nível de resistência de 30 MPa.

a) 3 DIAS DE CURA ÚMIDA



b) 7 DIAS DE CURA ÚMIDA



c) 28 DIAS DE CURA ÚMIDA

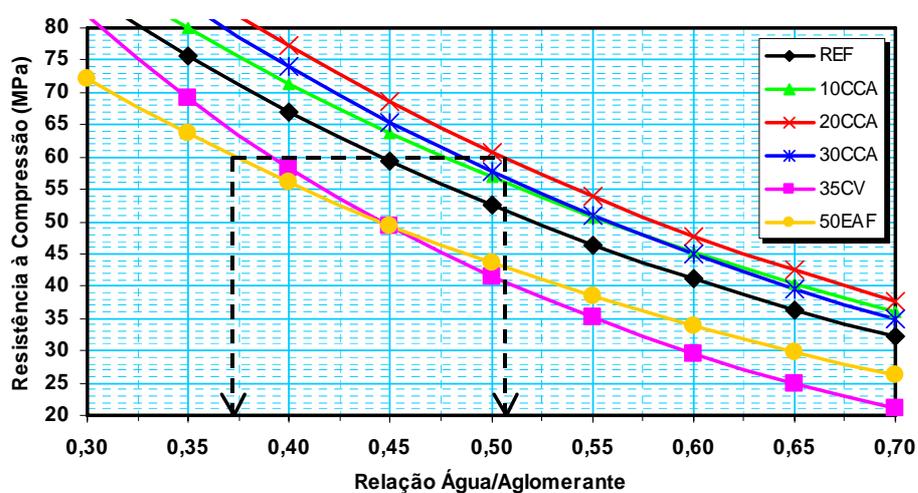


Figura 5.24 – Curvas de resistência à compressão *versus* relação água/aglomerante, em função do período de cura, para todas as misturas, na idade de 91 dias. As linhas tracejadas definem as relações a/ag limites para um nível de resistência de 60 MPa.

Como pode ser visto, para um mesmo nível de resistência à compressão, existem variações na relação água/aglomerante com o tipo de mistura e com o período de cura adotado. Para o nível de resistência de 30 MPa, a relação a/ag varia de 0,47 a 0,67, para as misturas 35CV, com cura de 3 dias, e 20CCA, com cura de 28 dias. Já para concretos com 60MPa, a mistura 50EAF, curada por 3 dias, apresentou a menor relação a/ag , 0,32, e a mistura 20CCA, curada por 28 dias, a maior, 0,51.

Deste modo, estes concretos, mesmo com igual resistência à compressão, podem apresentar durabilidades distintas, já que a relação a/ag é um dos fatores que maior influência em propriedades como a porosidade, permeabilidade e difusão de gases e íons.

5.6.1 Análise do consumo de aglomerante para concretos com 30MPa e 60MPa

De acordo com o Quadro 5.11 e a Figura 5.25, para o nível de resistência de 30 MPa, aos 28 dias de idade, a mistura com 35% de cinza volante é a que apresenta o maior consumo de aglomerante, devido à relação a/ag mais baixa para atingir esta tensão, consequência da baixa reatividade desta pozolana nas idades iniciais.

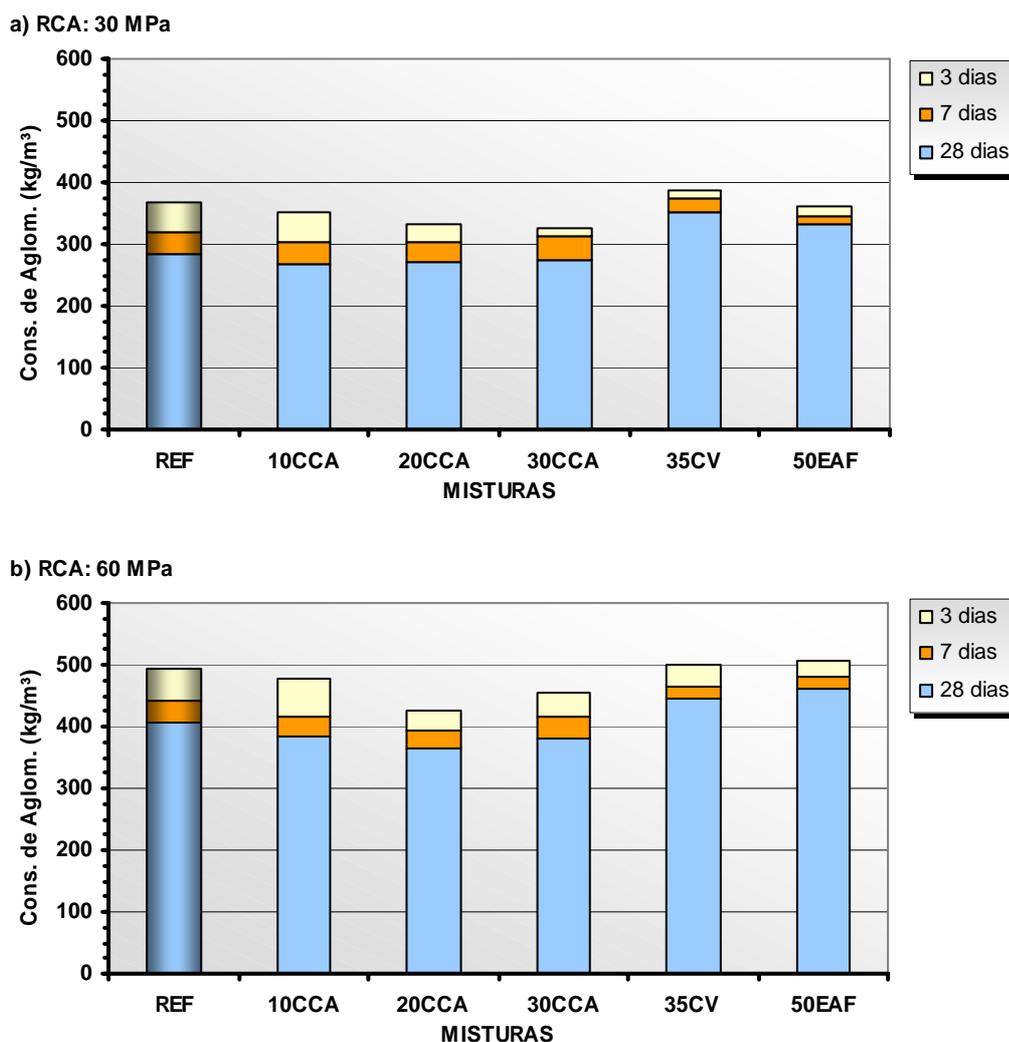


Figura 5.25 – Consumo de aglomerante por m³ de concreto para as diversas misturas, nos níveis de resistência de 30 MPa e 60 MPa e sua variação de acordo com o período de cura considerado.

Os concretos contendo cinza de casca de arroz foram os que obtiveram os menores consumos de aglomerante para atingir os 30 MPa, atestando a grande reatividade desta adição, o que contribui para os ganhos de resistência desde as primeiras idades. A mistura com 30% de CCA apresenta uma redução média na quantidade de aglomerante de 18% em relação àquela com 35% de CV.

Os benefícios do aumento no período de cura podem ser verificados através dos decréscimos no consumo de aglomerante ocorridos quando a cura é realizada além dos 3 dias. Das misturas com 30 MPa, a de referência e a com 10% de CCA têm as maiores reduções na quantidade de aglomerante com o prolongamento do período de cura de 3 para 7 dias e de 3 para 28 dias, cerca de 11% e 23%, respectivamente. Já as misturas 35CV e 50EAF apresentam pequena queda no consumo de aglomerante, para períodos de cura maiores que 3 dias, sendo em média 3% quando a cura passa de 3 para 7 dias e de 8% quando passa de 3 para 28 dias.

Para atingir o nível de resistência de 60 MPa, as misturas com CCA são as que apresentam menor quantidade total de aglomerante. Aquela contendo 20% desta adição consome 11% menos aglomerante que a mistura com cimento puro e tem um consumo 14% inferior à mistura 50EAF. Esta última, dentre as demais, é a mistura que necessita da maior quantidade de aglomerante para atingir a tensão de 60 MPa, aos 91 dias.

Assim como nos concretos convencionais (30 MPa), o prolongamento do período de cura resulta na redução da quantidade de aglomerante para atingir os 60 MPa de resistência à compressão. O concreto com 10% de CCA foi o que obteve os maiores benefícios, consumindo 13% menos aglomerante, quando curado por 7 dias, em relação àquela com cura de 3 dias apenas. Se a cura for prolongada para 28 dias, esta redução no consumo do aglomerante chega a 20%.

A exemplo do que ocorreu quando foram analisados os concretos de 30 MPa, no nível de 60 MPa as misturas com menor queda no consumo de aglomerante com a elevação do período de cura são as misturas 35CV e 50EAF.

5.6.2 Análise da carga total passante para concretos com 30MPa e 60MPa

Verifica-se através dos resultados do Quadro 5.11 e na Figura 5.26 que, para o nível de resistência de 30 MPa, as misturas de referência (sem adições) apresentam os maiores valores de carga total passante (de 1797 a 2437 Coulomb), nos três períodos de cura analisados. Quando curadas por 3 e 7 dias, pertencem à classe dos concretos com moderada penetração de cloretos, segundo a ASTM C1202. Entretanto, estes concretos passam a ser classificados como de baixa penetração de cloretos se a cura for prolongada para 28 dias.

Entre as misturas com substituição do cimento por CCA, aquela com teor de 30% apresenta os menores valores de Q, independente do período de cura considerado (de 577 a 1014 Coulomb).

Os efeitos do prolongamento do período de cura úmida na redução da Q são observados para todas as misturas, exceto para 10CCA, para a qual houve aumento de 28% com a elevação do período de cura de 3 para 7 dias. Tal comportamento pode ser explicado devido ao melhor desempenho, quanto à resistência à compressão, obtido pela mistura 10CCA, quando curada por 7 dias, em relação a esta mesma mistura com cura de 3 dias apenas (ver Figura 5.15). Isto é, a tensão de 30 MPa, aos 28 dias, é atingida pela mistura 10CCA, curada por 7 dias, utilizando-se uma relação a/ag relativamente elevada (0,61), se comparada àquela necessária para que a mistura 10CCA, com cura de 3 dias, atinja este

mesmo nível de resistência na mesma idade. No entanto, a alta relação a/ag da mistura 10CCA (cura de 7 dias), quando inserida nas respectivas equações de regressão, resulta num valor de carga total passante superior ao da mistura 10CCA, curada por 3 dias.

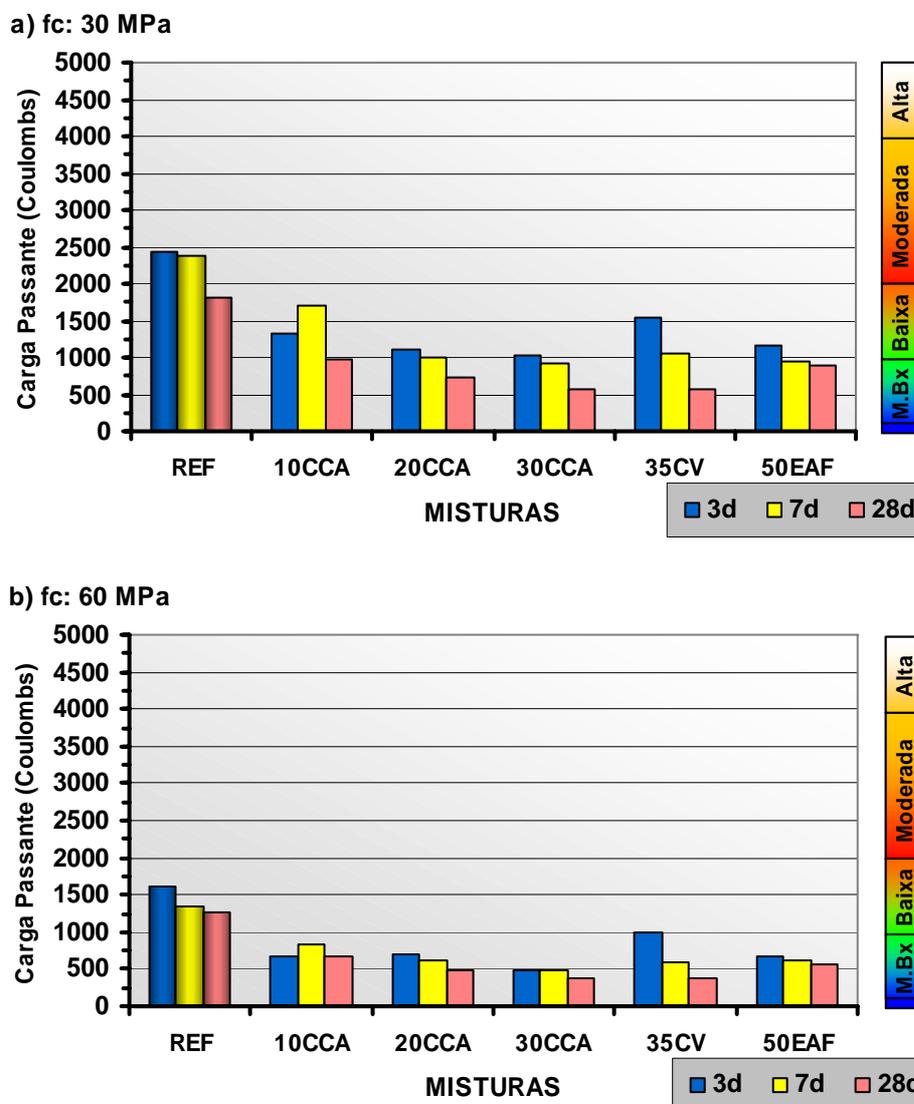


Figura 5.26 – Variação da Carga Total Passante em concretos com níveis de resistência de 30 MPa e 60 MPa, de acordo com o período de cura considerado. Ao lado de cada gráfico é representada a classificação dos concretos quanto à penetração de cloretos, segundo a ASTM C1202.

A mistura com 35% de CV mostrou-se fortemente influenciada pelas variações no período de cura, tendo decréscimos na Q de 32% e 62% com o aumento no período de cura de 3 para 7 e de 3 para 28 dias, respectivamente.

Os resultados constantes no Quadro 5.11 mostram que o regime de cura influencia diretamente o valor da carga total passante através dos concretos testados. Mesmo possuindo a mesma resistência à compressão, os concretos curados por um período maior de tempo apresentam valores de Q menores.

Seguindo um comportamento semelhante ao dos concretos com tensão de 30 MPa, naqueles com resistência de 60 MPa a mistura REF tem os valores mais elevados de Q, para

todos os períodos de cura avaliados. Mesmo assim, pelos critérios de classificação da ASTM C1202, estes concretos pertencem à classe dos concretos de baixa penetração de cloretos.

A elevação do período de cura, novamente tem maior influência na Q das misturas com 35% de CV, onde o aumento no período de cura de 3 para 28 dias conduz a quedas de mais de 60% na Q .

Assim como ocorre para os concretos com 10% de CCA e 30 MPa de resistência, o aumento no período de cura de 3 para 7 dias desta mistura resulta em maior quantidade de carga passante quando o nível de resistência é de 60 MPa, pela mesma razão apresentada naquele nível de resistência.

Mesmo se tratando de concretos de igual resistência à compressão (60 MPa), submeter determinada mistura a períodos de cura mais prolongados pode resultar em reduções na carga total passante de até 2,6 vezes, como é o caso das misturas com 35% de CV. Na comparação da carga total passante das diversas misturas, neste nível de resistência mais elevado, as diferenças entre os referidos valores podem chegar a 3,4 vezes, quando são comparados os valores de Q das misturas REF e 30CCA, ambas com cura de 28 dias, por exemplo.

Deste modo, pode-se observar que estas misturas resultam em concretos de mesma resistência à compressão que certamente apresentariam durabilidades distintas se expostos a condições ambientais agressivas semelhantes.

A carga total passante também é alterada com a elevação do nível de resistência de 30 MPa para 60 MPa para todas as misturas, sendo reduzida em média de 48% para a mistura 10CCA, 45% para 30CCA e de 38% para as misturas 20CCA, REF, 35CV e 50EAF.

5.6.3 Análise do coeficiente de difusão de cloretos para concretos com 30MPa e 60MPa

Uma análise dos dados do Quadro 5.11 e da Figura 5.27 permite visualizar que as misturas com 50% de escória de alto forno, com 30 MPa, apresentam coeficientes de difusão de cloretos inferiores a todas as demais misturas, qualquer que seja o período de cura considerado, sendo que k varia de 2,83 a 2,29 mm/(semana)^{1/2}, para períodos de cura de 3 e 28 dias, na mesma ordem. Neste nível de tensão, as demais misturas possuem valores semelhantes de k , em média 2,97 para 28 dias de cura, 4,22 para cura de 7 dias e de 4,48 para cura de 3 dias.

O prolongamento do período de cura promove melhorias de qualidade para todos os concretos avaliados, sendo os coeficientes k reduzidos, em média, 19% para a mistura 50EAF e 33% para as demais misturas, quando o período de cura passa de 3 para 28 dias.

Nos concretos com resistência à compressão de 60 MPa, os menores valores de k são obtidos para aqueles contendo 50% de EAF (1,54 a 2,05), assim como nos concretos de 30 MPa de resistência. As demais misturas mostram certo equilíbrio quanto ao valor de k , sendo que as maiores variações ocorrem quando é alterado o período de cura.

O bom desempenho das misturas com escória, em relação às demais, provavelmente está relacionado com a maior capacidade de fixação de íons cloreto destas misturas, já que esta adição possui certa quantidade de alumina em sua composição, que repõe a alumina da massa de cimento que foi substituída pela escória.

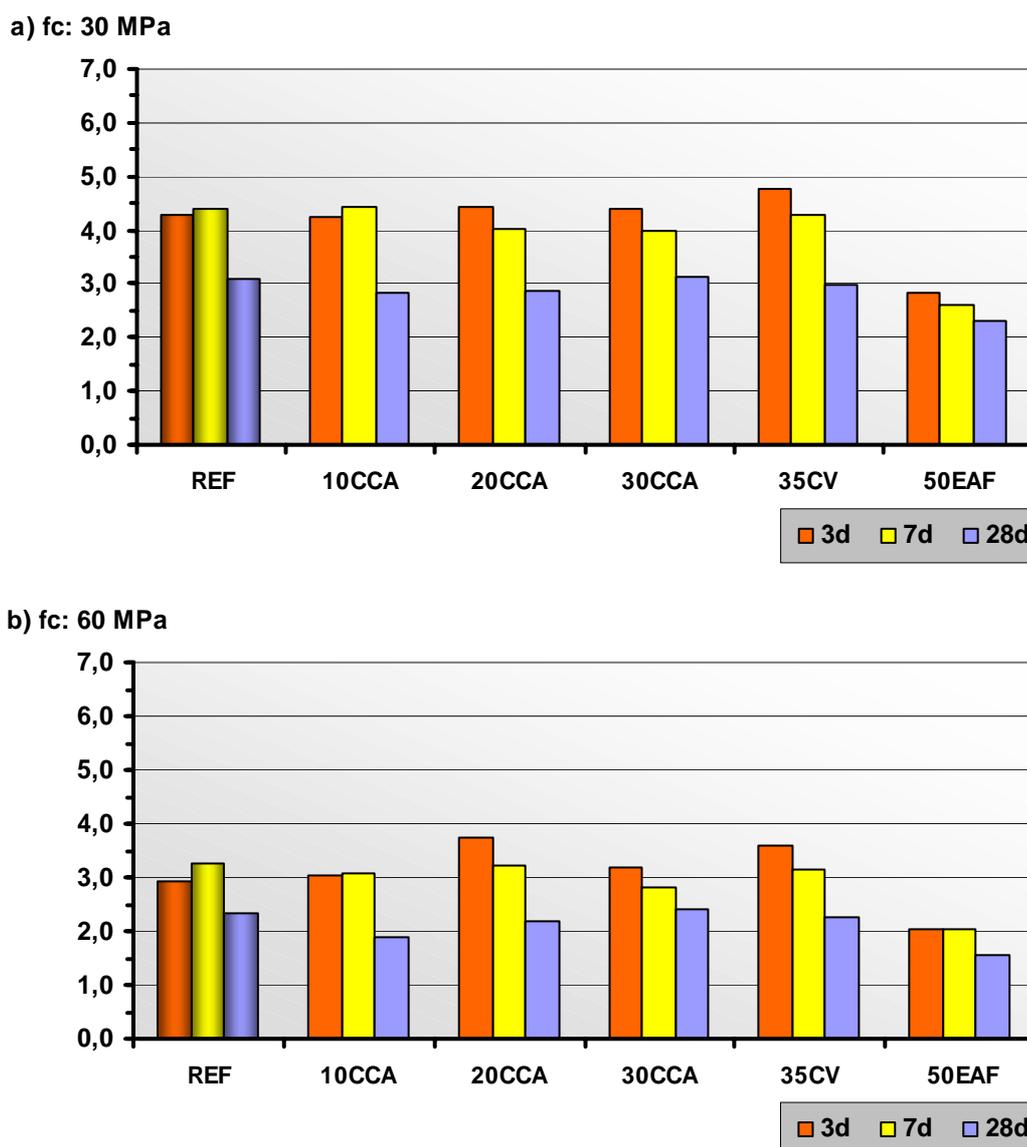


Figura 5.27 – Variação do Coeficiente de difusão de cloretos em concretos com níveis de resistência de 30 MPa e 60 MPa, em função do período de cura considerado.

As misturas 20CCA, 30CCA e 35CV têm as maiores reduções no k , com o aumento no período de cura de 3 para 7 dias, cujos percentuais de redução são de 14% para 20CCA e 12% para 30CCA e 35CV. Com o prolongamento do período de cura de 3 para 28 dias, os valores de k são reduzidos em 20% para a mistura 20CCA e em 42% para 35CV.

As misturas com 10% de CCA, curadas por 7 dias, apresentam k ligeiramente superior àquelas com 3 dias de cura, a exemplo do que ocorre com os valores de Q .

5.6.4 Comparação entre o coeficiente de difusão e a carga total passante dos concretos nos níveis de resistência de 30MPa e 60MPa

Com o intuito de avaliar os resultados obtidos para o coeficiente de difusão e a carga total passante, dos concretos de 30 MPa e 60 MPa, foram calculados, a partir da equação de Bakker (capítulo 4), os tempos necessários para que os íons cloreto penetrem através da camada de cobrimento até a superfície do aço. Este período de tempo foi denominado de tempo de penetração (t_p).

É importante ressaltar que, transcorrido o tempo de penetração t_p , calculado através equação de Bakker, a concentração de cloretos livres na profundidade considerada será maior que 0,15% sobre a massa de cimento, pois esta é a concentração mínima que permite a visualização da profundidade de penetração de cloretos através da aspersion de nitrato de prata no EPCANP - ensaio para determinação do coeficiente de difusão.

Portanto, tomar o tempo de penetração t_p como aquele a partir do qual o processo de despassivação da armadura tem início (período de iniciação) poderia resultar em equívoco, uma vez que não existe ainda um consenso sobre o conteúdo de cloretos necessário para despassivar o aço. Como referência algumas normas internacionais como ACI 318/83, BS 8110/95 e EN 206 aceitam como limite máximo um teor de cloretos de 0,05% a 0,1% sobre a massa do concreto ou 0,4% sobre a massa do cimento (ANDRADE, 1992 e KAYYALI & HAQUE, 1995, *apud* HOFFMANN, 2001). A norma brasileira NBR 6118/1978 determinava o teor máximo de cloretos em 500mg/l, considerando o volume da água de amassamento, o que corresponderia a aproximadamente 0,02% sobre a massa de cimento, para concretos convencionais. Pode-se acrescentar ainda que a validade destes limites para concretos contendo adições minerais ainda é alvo de estudos.

Assim, o presente tópico tem por objetivo dar uma idéia da dinâmica do fenômeno de difusão através dos concretos testados, em dois níveis de resistência, um de 30 MPa, representando os concretos convencionais, e outro de 60 MPa, por estar incluído na faixa de resistência dos concretos de alto desempenho. A estimativa do tempo de penetração dos cloretos da superfície do concreto até a armadura serve, então, como termo de comparação entre os concretos investigados.

O Quadro 5.12 apresenta os tempos de penetração t_p calculados para espessuras da camada de cobrimento de 25, 50 e 100mm, em função do período de cura do concreto. Para fins de comparação, foram inseridas neste quadro colunas contendo a classificação de cada mistura quanto à penetração de cloretos, de acordo com a ASTM C 1202.

Como pode ser visto, o desempenho de cada mistura é inversamente proporcional ao seu coeficiente de difusão, sendo que as misturas com adição de escória de alto forno apresentam os maiores tempos de penetração, para os dois níveis de resistência à compressão, a saber: em 30 MPa, o t_p varia de 1,5 ano (cura de 3 dias e cobrimento de 25mm) a 36,6 anos (cura de 28 dias e cobrimento de 100mm); para 60 MPa t_p varia de 2,9 a 80,6 anos, para as mesmas condições anteriores.

O prolongamento do período de cura de 3 para 28 dias aumenta o tempo de penetração de 1,5 a 3,0 vezes. Porém, a elevação do período de cura de 3 para 7 dias resulta em pequenas alterações de t_p . As misturas contendo adições de CCA e CV se mostraram mais sensíveis às variações do período de cura que as misturas com EAF e de referência, no que se refere ao tempo de penetração.

Quadro 5.12 – Tempo necessário para que os íons cloretos penetrem através do cobrimento até atingirem a camada de passivação do aço (tp , em anos), calculados a partir dos coeficientes de difusão obtidos no Ensaio de Penetração de Cloretos por Aspersão de Nitrato de Prata (EPCANP), para os níveis de resistência à compressão de 30MPa e 60MPa.

MISTURAS	CURA (dias)	NÍVEL DE RESISTÊNCIA DOS CONCRETOS							
		30 MPa (idade de 28 dias)				60 MPa (idade de 91 dias)			
		Espessura do Cobrimento (mm)			CLASSE ASTM ^A	Espessura do Cobrimento (mm)			CLASSE ASTM ^A
		25	50	100		25	50	100	
REF	3	0,7	2,6	10,5	M	1,4	5,6	22,4	B
	7	0,6	2,5	9,9	M	1,1	4,6	18,2	B
	28	1,2	5,0	20,0	B	2,2	8,7	34,8	B
10CCA	3	0,7	2,7	10,6	B	1,3	5,2	20,9	MB
	7	0,6	2,4	9,7	B	1,3	5,1	20,2	MB
	28	1,5	6,0	24,1	MB	3,4	13,7	54,6	MB
20CCA	3	0,6	2,5	9,8	B	0,9	3,4	13,6	MB
	7	0,7	3,0	11,9	B	1,1	4,6	18,3	MB
	28	1,5	5,9	23,5	MB	2,5	10,2	40,8	MB
30CCA	3	0,6	2,5	9,8	B	0,9	3,4	13,6	MB
	7	0,8	3,0	12,1	MB	1,5	6,0	24,2	MB
	28	1,2	4,9	19,7	MB	2,1	8,2	32,9	MB
35CV	3	0,5	2,1	8,4	B	0,9	3,7	15,0	B
	7	0,7	2,6	10,5	B	1,2	4,8	19,2	MB
	28	1,4	5,4	21,7	MB	2,3	9,3	37,4	MB
50EAF	3	1,5	6,0	24,0	B	2,9	11,4	45,7	MB
	7	1,7	7,0	27,8	MB	2,9	11,5	46,2	MB
	28	2,3	9,1	36,6	MB	5,0	20,2	80,6	MB

A: Classificação dos concretos quanto à penetração de cloretos proposta pela ASTM C1202; B: Penetração de Cloretos Baixa ($1000 < CPT < 2000$ Coulomb); M.B.: Penetração de Cloretos Muito Baixa ($100 < CPT < 1000$ Coulomb).

NOTA: A concentração mínima de cloretos livres na profundidade considerada, após o decurso de tp é de 0,15% sobre a massa do cimento.

A elevação do nível de resistência dos concretos de 30 MPa para 60 MPa, como esperado, resulta no aumento do tempo necessário para que os íons cloreto atinjam a profundidade especificada. Desta forma, dobrando-se a resistência à compressão, aumenta-se o tp de 1,4 a 2,2 vezes para as misturas em questão.

Entre os parâmetros analisados neste tópico, aquele que tem maior influência no prolongamento do tempo de penetração é a espessura da camada de cobrimento da armadura, pois uma variação de 4 vezes neste parâmetro se traduz numa variação média de 16 vezes no tp .

Nota-se no Quadro 5.12 que a classificação proposta pela ASTM C1202 deve ser encarada de forma qualitativa, já que os resultados do TRPC não são realistas quanto à medida da resistência à penetração de cloretos no concreto, conforme relatam WEE *et al* (2000), SHI *et al* (1998) e ANDRADE (1993). De fato, a mistura de REF, com 30 MPa e cura de 3 dias, é classificada como de moderada penetração de cloretos e possui coeficiente de difusão k igual a 4,27. No entanto, a mistura 35CV, também com 30 MPa e cura de 3 dias, que é classificada como de baixa penetração de cloretos, apresenta k igual a 4,78.

Nesta linha de raciocínio, a mistura REF, com 60 MPa e cura de 28 dias, possui um k cerca de 1,7 vez menor que o da mistura 20CCA, curada por 7 dias e com resistência de 30 MPa. Mesmo assim, a primeira é classificada como de baixa penetração de cloretos e a segunda pertence à classe dos concretos de penetração de cloretos muito baixa.

Pode-se verificar ainda, tempos de penetração bastante distintos para misturas pertencentes a uma mesma classificação. Tanto a mistura 20CCA (30 MPa e cura de 7 dias), quanto à mistura 50 EAF (60 MPa e cura de 28 dias), são classificadas como concretos de penetração de cloretos muito baixa. Entretanto, o tempo de penetração destas misturas pode variar em até 6,7 vezes, se considerado um cobrimento de 50mm, ou seja, o tp calculado para a mistura 20CCA é de 3 anos contra 20,2 anos da mistura 50 EAF.

5.7 ANÁLISE DOS RESULTADOS EM IGUALDADE DE COEFICIENTE DE DIFUSÃO DE CLORETOS

Projetar estruturas com base apenas na resistência à compressão axial do concreto, sem considerar outros requisitos de durabilidade, tem sido uma das causas de um grande número de patologias e diminuição da vida útil de estruturas nos últimos anos (ISAIA & GASTALDINI, 2003). Segundo estes autores, o enfoque atual é projetar estruturas em função da vida útil especificada pelo proprietário, cuja resistência à compressão é consequência das condições de durabilidade requeridas pela construção.

A qualidade do concreto, segundo HELENE (1997), é medida através de parâmetros relativos ao transporte de certos íons, gases e líquidos através dos seus poros, como os coeficientes de difusão, permeabilidade, absorção capilar e de migração.

No que diz respeito à difusão de íons cloreto, conforme demonstrado no item 5.6, concretos de mesma resistência à compressão axial apresentam coeficientes que podem variar em até 2,4 vezes, o que certamente resultaria em estruturas com vidas úteis bastante distintas.

No Capítulo 1 foi visto que a maioria dos modelos de degradação de estruturas segue a proposta de TUUTTI, que é dividida em período de iniciação e período de propagação da corrosão. Segundo ANDRADE (2000), o período de iniciação é definido como o espaço de tempo que os agentes agressivos levam até atingirem a armadura, sem que haja comprometimento da funcionalidade da estrutura. No período de propagação da corrosão, os fenômenos de degradação agem sobre a estrutura, comprometendo a sua estabilidade estrutural ou seu aspecto estético.

Para o estudo da fase de iniciação, em concretos submetidos ao ataque de íons cloreto, é fundamental o conhecimento de qual a concentração crítica destes íons para que o processo de despassivação da armadura seja estabelecido. No entanto, conforme discutido anteriormente, não existe ainda um consenso no meio técnico sobre qual seria este teor crítico, podendo variar de 0,1% a 1%, dependendo da experiência de cada país, e segundo BOWNE (*apud* HOFFMANN, 2001) a corrosão poderá iniciar com teores de íons cloreto entre 0,4% e

0,6%, em relação à massa de cimento, estando presentes todas as outras condições (eletrólito, oxigênio e diferença de potencial).

Durante a realização do ensaio de penetração de cloretos por aspersão de nitrato de prata (EPCANP), de onde são extraídos os coeficientes de difusão dos concretos, o teor de cloretos livres que promove a coloração branca nas regiões contaminadas é superior a 0,15% sobre a massa de cimento (WEE *et al*, 2000).

Assim, com o objetivo de comparar o desempenho das diversas misturas em relação à fase de iniciação, no presente tópico será realizada uma abordagem do ponto de vista da durabilidade da estrutura, onde, a partir de um parâmetro de qualidade pré-fixado (coeficiente de difusão de cloretos), procurar-se-á conhecer o comportamento de cada mistura quanto à variação da relação água/aglomerante, da resistência à compressão axial e do consumo de aglomerante.

Para isto, foram fixados os seguintes parâmetros:

- tempo de penetração⁵ (tp): 20 anos;
- cobertura da armadura: 75mm;
- máximo coeficiente de difusão de cloretos: 2,25 mm/(semana)^{1/2};
- condição de exposição da estrutura: semelhante àquela do EPCANP (submersa em solução de cloretos semelhante à água do mar)

Estipulado o valor máximo de k em 2,25 mm/(semana)^{1/2}, as relações a/ag para cada mistura são conhecidas através das equações de regressão constantes no Quadro 5.10. Uma vez encontradas as relações a/ag , as resistências à compressão e as cargas totais passantes correspondentes são obtidas a partir das equações de regressão dos Quadros 5.1 e 5.7, respectivamente.

No Quadro 5.13 são apresentados os valores calculados para a relação a/ag , resistência à compressão axial, carga total passante e consumo de aglomerante, para cada série, correspondentes a um coeficiente k igual a 2,25 mm/(semana)^{1/2}.

Num primeiro momento pode-se visualizar neste quadro a grande variabilidade das relações a/ag entre diferentes misturas e períodos de cura. Na presente abordagem, serão desconsideradas as relações a/ag inferiores a 0,30 por excederem os limites de extrapolação das curvas de regressão. Deve-se considerar também que aquelas misturas, cujos consumos de aglomerante são muito superiores a 500 kg/m³, podem resultar em concretos com problemas de retração e fissuração, o que comprometeria a durabilidade da estrutura. Verifica-se, com isto, que a relação a/ag varia de 0,32 para a mistura 10CCA, curada por 7 dias, até 0,56 para esta mesma mistura, porém com cura de 28 dias.

Os resultados de resistência à compressão também apresentam grande amplitude, sendo a diferença entre o menor e o maior valor por volta de 2 vezes (Figura 5.28). A mistura com resistência à compressão mais elevada é a 10CCA (cura de 7 dias), cerca de 80 MPa, sendo a mistura 50EAF (cura de 28 dias) a que apresentou o menor valor, 38,4 MPa. Nota-se que ambas tem o mesmo valor de k , o que demonstra que a mistura contendo escória de alto forno, na proporção de 50%, exibe um ótimo desempenho quanto à redução da penetração de cloretos no concreto. Este desempenho é atribuído ao efeito simultâneo das reações

⁵ Transcorrido o período de 20 anos, na profundidade de 75 mm haveria uma concentração mínima de cloretos igual a 0,15% s.p.c. Estima-se que em 50 anos a concentração nesta profundidade seria de 0,4% s.m.c.

pozolânicas e da maior quantidade de alumina e ferro na composição da escória. As reações pozolânicas resultam numa microestrutura mais compacta, devido ao refinamento dos poros do concreto e a maior quantidade de alumina na escória promove a fixação dos cloretos através combinação destes íons com as fases aluminato do cimento, formando cloroaluminatos e ferro-cloroaluminatos de cálcio. Esta combinação dificulta a mobilidade dos cloretos que ingressam na rede de poros, aumentando a resistência do concreto à penetração destes íons, conforme discutido no Capítulo 3.

Quadro 5.13 – Valores de relação água/aglomerante, resistência à compressão axial, consumo de aglomerante e carga total passante, aos 91 dias de idade, correspondentes a um coeficiente de difusão k igual a $2,25 \text{ mm}/(\text{sem})^{1/2}$

MISTURAS	CURA	a/ag	fc.	C	Q	CLASSE ^A
REF	3	*	*	*		
	7	*	*	*		
	28	0,41	64,7	429	1198	B
10CCA	3	*	*			
	7	0,32	80,0	508	426	MB
	28	0,56	50,1	333	775	MB
20CCA	3	*	*	*		
	7	*	*	*		
	28	0,53	56,7	349	500	MB
30CCA	3	*	*	*		
	7	0,35	75,1	481	356	MB
	28	0,44	67,2	412	334	MB
35CV	3	*	*	*		
	7	*	*	*		
	28	0,39	61,0	448	383	MB
50EAF	3	0,37	53,6	466	772	MB
	7	0,42	51,0	428	720	MB
	28	0,55	38,4	336	860	MB

LEGENDA: CURA: Período de cura em câmara úmida, em dias; a/ag: relação água/aglomerante; fc: resistência à compressão axial, em MPa; C: consumo de aglomerante, em kg/m³; Q: carga total passante, em Coulomb.

A: Classificação dos concretos quanto à penetração de cloretos, segundo ASTM C1202: MB; muito baixa ($1000 < Q < 2000$); B: baixa ($100 < Q < 1000$).

* Valores que não devem ser considerados válidos, pois excedem os limites de extrapolação das curvas de regressão.

Dependendo do tipo de adição e do período de cura considerado, a quantidade de aglomerante para atender a um mesmo valor de k pode variar em mais de 1,5 vez, conforme Figura 5.29. Com efeito, a mistura 10CCA, curada por 7 dias, apresenta um consumo de

aglomerante de 508 kg/m^3 . O prolongamento do período de cura de 7 para 28 dias faz desta mistura a de menor consumo de aglomerante, por volta de 333 kg/m^3 de concreto.

Os benefícios do aumento no período de cura úmida são também observados para as demais misturas, sendo o consumo de aglomerante da mistura 50EAF reduzido em 9%, quando o período de cura passa de 3 para 7 dias, e de 28% com o prolongamento da cura de 3 para 28 dias.

Através dos valores de carga total passante calculados, cada mistura foi classificada quanto à penetração de cloretos, de acordo com a ASTM C1202. Como pode ser visto, todas as misturas (dados válidos) são classificadas como concretos de penetração de cloretos muito baixa, com exceção da mistura sem adição, que pertence à classe dos concretos de baixa penetração de cloretos.

Deste modo, pode-se concluir que, independente da durabilidade e vida útil requeridas para uma estrutura, esta poderá ser executada com concretos de diferentes resistências à compressão, dependendo do tipo de aglomerante (cimento+adição mineral) utilizado e do período de cura no qual o concreto será submetido. Portanto, pode-se encontrar entre estas misturas aquela que resultaria mais econômica para a execução de determinada estrutura, levando em consideração os custos relativos ao concreto, armadura, formas, lançamento, adensamento e cura, assim como os respectivos custos de mão-de-obra.

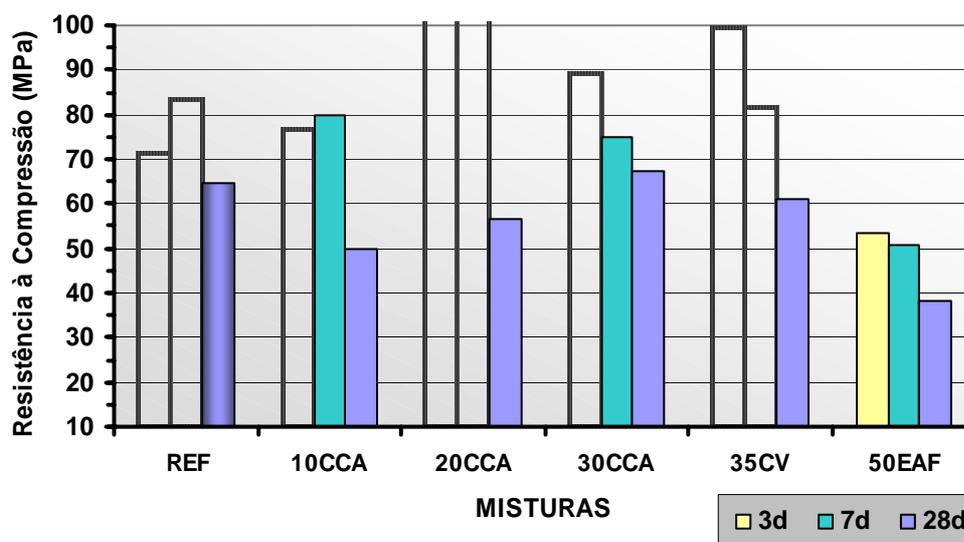


Figura 5.28 – Resistência à compressão axial, aos 91 dias, correspondente a um coeficiente de difusão k de $2,25 \text{ mm}/(\text{semanas})^{1/2}$, para cada mistura, em função do período de cura úmida. As barras vazadas não são válidas por excederem os limites de extrapolação das curvas de regressão.

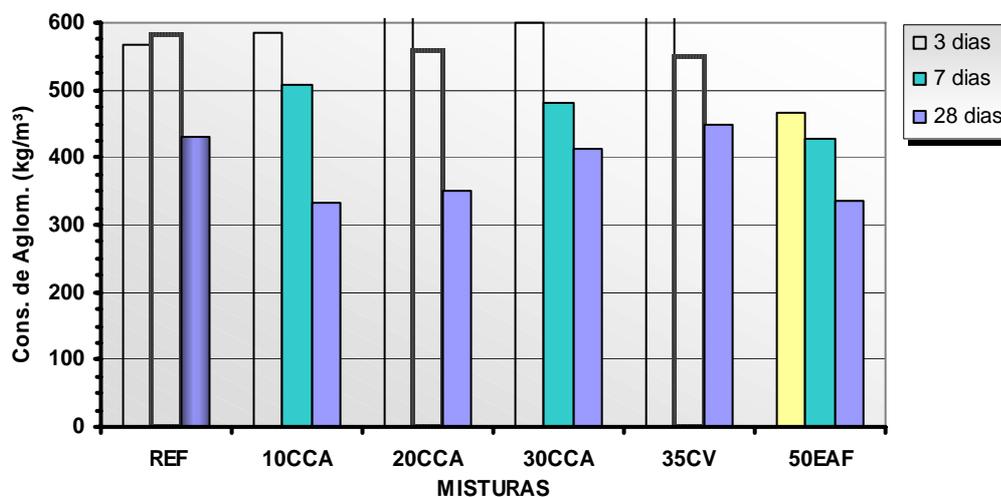


Figura 5.29 – Consumo de aglomerante por m^3 de concreto correspondente a um coeficiente de difusão de $2,25 \text{ mm}/(\text{semana})^{1/2}$, para cada mistura, em função do período de cura úmida. As barras vazadas não são válidas por excederem os limites de extrapolação das curvas de regressão.

CONCLUSÃO

A presente dissertação teve como principal objetivo investigar o comportamento, frente à ação de cloretos, de concretos compostos com adições minerais, em especial a cinza de casca de arroz, quando submetidos a diferentes períodos de cura úmida (3, 7 e 28 dias). Para isto foram utilizadas misturas em que a massa de cimento foi substituída por 10%, 20% e 30% de cinza de casca de arroz (CCA), que tiveram seu desempenho comparado ao de misturas com 35% de cinza volante (CV), 50% de escória de alto forno (EAF) e com cimento puro (sem adição), esta última chamada de mistura de referência (REF). As misturas com cinza volante, escória de alto forno e de referência representaram os cimentos comerciais CP III, CP IV e CP V-ARI, respectivamente.

O desempenho das diversas misturas foi verificado através da análise dos resultados de resistência à compressão axial (28 e 91 dias) e de penetração de cloretos (91 dias), segundo o Teste Rápido de Penetração de Cloretos (TRPC - ASTM C1202) e o Ensaio de Penetração de Cloretos por Aspersão de Nitrato de Prata (EPCANP - AASHTO T259). Todas as misturas foram dosadas com relações água/aglomerante 0,35, 0,50 e 0,65.

Buscou-se desta maneira responder os questionamentos pré-estabelecidos, a fim de melhor compreender os efeitos da cura sobre a resistência e a durabilidade das estruturas de concreto.

Assim, do presente estudo decorrem as seguintes conclusões quanto à compressão axial:

- a resistência à compressão axial do concreto foi elevada com a redução da relação água/aglomerante, com o aumento idade de ensaio e com o prolongamento do período de cura. As misturas contendo 20% de CCA foram as que apresentaram as maiores resistências e as misturas com 35% de CV as menores, tanto aos 28 dias quanto aos 91 dias de idade;
- a taxa de crescimento da resistência à compressão foi dependente, entre outros fatores, da reatividade de cada adição, do teor de substituição, da relação a/ag e do período de cura. Os ganhos de resistência dos 28 aos 91 dias foram mais elevados naqueles concretos com maior relação a/ag;
- em todos os concretos em que o cimento foi substituído pela CCA, as resistências à compressão foram iguais ou superiores às das misturas de referência, em ambas as idades, atestando a grande reatividade desta pozolana. Já nas misturas com EAF e CV, apenas aquelas com relação a/ag 0,35, na idade de 28 dias, apresentaram desempenho igual ou superior à REF;
- o prolongamento do período de cura resultou em maiores resistências à compressão (28 e 91 dias) para todas as misturas investigadas. Com exceção dos concretos com EAF, todos os demais tiveram melhorias significativas de resistência. Nas misturas com CCA, os incrementos de resistência são tão maiores quanto mais elevada for a relação a/ag. Aos 28 dias, a mistura com 20CCA, curada por 7 dias, teve resistência à compressão 32% superior àquela quando esta mistura foi curada por apenas 3 dias. O aumento no período de cura desta mistura, de 3 para 28 dias, forneceu incremento de resistência de 61%.

No que diz respeito ao coeficiente k de difusão de cloretos (EPCANP), foram observados os seguintes comportamentos:

- o coeficiente k é inversamente proporcional à relação a/ag e ao período de cura do concreto. Existe uma grande amplitude no valor de k entre as diferentes misturas estudadas. A mistura 10CCA ($a/ag = 0,35$; cura de 28 dias) apresentou o menor coeficiente de difusão, $1,12\text{mm}/(\text{semana})^{1/2}$ e a mistura 35CV ($a/ag = 0,65$; cura de 28 dias) o maior valor, k igual a $6,19\text{mm}/(\text{semana})^{1/2}$. Entre as misturas curadas por 3 e 7 dias, aquelas com EAF foram as que tiveram o melhor desempenho;
- com exceção das misturas 10CCA ($a/ag = 0,50$) e 20CCA ($a/ag = 0,35$ e $0,65$), ambas com cura de 3 dias, todas as demais apresentaram coeficientes de difusão inferiores aos dos concretos de referência. Na mistura 10CCA ($a/ag = 0,35$ e cura de 28 dias) o valor do k foi cerca de 42% inferior ao da mistura REF;
- o aumento no percentual de CCA na mistura teve clara tendência apenas para o período de cura úmida de 28 dias, onde o coeficiente de difusão de cloretos aumentou na razão direta do teor de substituição. Este comportamento pode estar relacionado à redução no teor de aluminatos do aglomerante, responsáveis pela fixação dos íons cloretos no concreto sob a forma de sais de Friedel, à medida que o cimento é substituído por maiores quantidades de CCA, que é praticamente desprovida de alumina. Assim, haveria um predomínio das interações químicas (combinação de cloretos) sobre os efeitos de densificação da pasta, nas misturas em que o teor de CCA é mais elevado. A combinação destes dois fatores na redução da penetração de cloretos estaria associada ainda às condições de cura e ao grau de formação da estrutura da pasta no momento do ensaio. O desempenho superior das misturas com EAF, quando o período de cura foi de 3 e 7 dias, pode ser atribuído ao mesmo fato, uma vez que esta adição possui certa quantidade de alumina em sua composição. Nestas misturas, os efeitos de densificação da pasta, devido às reações pozolânicas, se somam a sua maior capacidade de fixação/combinação de cloretos, aumentando sua resistência à penetração destes íons;
- a eficiência do prolongamento do período de cura na redução do k é função do tipo de adição, do teor de substituição e da relação a/ag utilizados. As misturas REF, CV e CCA sofreram reduções significativas no k quando o período de cura passou de 3 para 28 dias (34-67%), ao passo que nas misturas com EAF esta redução foi menos expressiva (16-26%).

Dos resultados do Teste Rápido de Penetração de Cloretos (TRPC) realizados nesta pesquisa, conclui-se que:

- a redução da relação a/ag , a substituição do cimento por adições minerais e o prolongamento no período de cura diminuíram a carga total passante (Q) através dos concretos investigados. As misturas com menor carga passante foram aquelas contendo 20% e 30% de CCA;
- a redução na relação a/ag de 0,65 para 0,35 reduziu a carga passante das misturas 10CCA (cura de 3 dias) e 35CV (cura de 7 dias) em 71% e 75%, respectivamente;

- com exceção da mistura 10CCA, com a/ag 0,65 e cura de 3 dias, que foi classificada como de moderada penetração de cloretos, segundo os critérios da ASTM C1202, todas as demais misturas contendo CCA pertencem às classes dos concretos de baixa e muito baixa penetração de cloretos. A mistura 30% de CCA foi a que teve a maior taxa de desempenho, chegando a apresentar reduções na carga passante até 74% inferiores ao concreto de referência;
- o aumento no teor de CCA, em geral, reduziu os valores de carga passante, resultando em concretos de maior resistência à penetração de cloretos;
- o prolongamento do período de cura úmida reduziu a carga passante para todas as misturas analisadas, sendo o percentual de redução tanto maior quanto mais elevada for a relação a/ag. As misturas REF e 35CV foram as que tiveram maiores reduções na carga passante quando o período de cura passou de 3 para 28 dias. Entre as misturas com CCA, os decréscimos na carga passante com o prolongamento da cura de 3 para 28 dias foram de 20%, 30% e 38%, em média, para as relações a/ag 0,35, 0,50 e 0,65, respectivamente.

A análise global dos dados permitiu verificar a impossibilidade de estabelecer uma boa correlação entre as variáveis investigadas, quando são considerados os dados de diferentes misturas aglomerantes conjuntamente. Todavia, boas correlações (coeficientes de determinação entre 0,85 e 1,00) foram conseguidas eliminando-se as variáveis tipo e teor de adição mineral e tempo de cura. Assim, para cada mistura aglomerante correspondeu uma curva de correlação. Com isto pôde-se verificar que:

- tanto a carga passante quanto o coeficiente de difusão de cloretos se relacionam de forma inversa com a resistência à compressão axial do concreto. Ou seja, quanto maior a resistência à compressão da mistura em questão, menor serão os valores de Q e k ;
- para uma mesma mistura, o coeficiente de difusão de cloretos e a carga passante são diretamente proporcionais. A elevação da carga passante de determinada mistura é acompanhada pelo aumento no seu coeficiente de difusão.

A comparação entre os resultados do TRPC e do EPCANP permite concluir que o método proposto pela ASTM C1202, para determinar a capacidade do concreto de resistir à penetração de cloretos, fornece resultados irreais quando são analisados concretos com diferentes aglomerantes. De fato, misturas que apresentaram igual coeficiente de difusão no EPCANP pertencem a distintas classes de penetração de cloretos, segundo os critérios da ASTM C1202. Foi verificado ainda que misturas pertencentes a uma mesma classe de penetração apresentam tempo de penetração⁶ tp que pode variar em até 6,7 vezes. Portanto, a medida da carga passante através do concreto fornece uma idéia da qualidade do concreto, porém deve ser utilizada com cautela para especificar concretos que atendam determinada exigência de durabilidade.

⁶ O tempo de penetração tp foi definido no Capítulo 5 como sendo correspondente ao período necessário para que os íons cloreto penetrem através da camada de cobrimento do concreto até atingirem a armadura.

Quando analisados os resultados de concretos com igual resistência à compressão, executados com as diferentes misturas aglomerantes, pôde-se chegar as seguintes conclusões:

- concretos de igual resistência à compressão podem apresentar durabilidades distintas, dependendo do tipo de aglomerante utilizado e do período de cura imposto. O coeficiente de difusão das misturas 50EAF e 35CV, curadas por 3 dias, difere em 1,7 vez, ambas com resistência de 30MPa. Para as misturas com CCA, com resistência de 60 MPa, o prolongamento no período de 3 para 28 dias reduziu o coeficiente de difusão de cloretos de 25% a 43%, ou seja, houve melhoria na durabilidade do concreto sem elevar a sua resistência à compressão;
- o prolongamento do período de cura permitiu também reduzir o consumo de aglomerante das misturas investigadas, tanto para concretos de igual resistência quanto de igual durabilidade;
- as misturas com CCA foram as que apresentaram o menor consumo de aglomerante para ambos os níveis de resistência (30 e 60MPa), atestando a grande reatividade desta adição, que contribuiu para os ganhos de resistência tanto nos períodos inicial quanto final.

A elevação no nível de resistência à compressão do concreto de 30 MPa para 60 MPa resultou no aumento do consumo de aglomerante e da resistência à penetração de cloretos, para todas as misturas investigadas.

Da análise dos resultados das misturas com igual coeficiente de difusão de cloretos conclui-se que, independente da durabilidade e vida útil requerida para uma estrutura, esta poderá ser executada com concretos de diferentes resistências à compressão, dependendo do tipo de aglomerante utilizado e do período de cura ao qual o concreto será submetido.

Portanto, a cura adequada do concreto deve ser encarada como uma forma de aumentar a sua durabilidade, sendo uma alternativa para elevar sua resistência à compressão ou reduzir o consumo de aglomerante.

No presente estudo, tanto as misturas com adições quanto aquelas com cimento puro se mostraram fortemente influenciadas pelo prolongamento do período de cura úmida. No entanto, a magnitude dos efeitos da cura sobre a resistência mecânica e à penetração de cloretos no concreto depende do tipo de adição, do teor de substituição, da relação a/ag, assim como do período de cura adotado. Tal comportamento sugere a existência de um período de cura ótimo para cada tipo de aglomerante (cimento + adição), levando em conta critérios técnicos e econômicos, que é função da durabilidade e da resistência mecânica especificados para a estrutura.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Devido ao importante papel da cinza de casca de arroz no cenário da sustentabilidade da indústria da construção, abaixo são descritas algumas sugestões para a realização de futuras pesquisas, com o objetivo de gerar informações que auxiliem o desenvolvimento tecnológico de concretos compostos com esta adição:

- realizar ensaios para determinar os efeitos do prolongamento do período de cura úmida na absorção capilar, por ser um fator de grande influência na penetração de agentes agressivos no concreto;
- determinar a influência do prolongamento do período de cura na carbonatação e na permeabilidade ao oxigênio nestes concretos, já que o primeiro é responsável pela despassivação da armadura e segundo participa diretamente das reações de corrosão;
- investigar as alterações na microestrutura (porosidade, teor de hidróxido de cálcio e água combinada) de pastas de cimento e cinza de casca de arroz, submetidas a diferentes períodos de cura, em diferentes níveis de profundidade (camada de cobrimento);
- avaliar a eficiência de outros procedimentos de cura nas propriedades de durabilidade de concretos com cinza de casca de arroz;
- realizar análise de variância entre as variáveis independentes para aferir a influência relativa entre elas e suas interações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACAA - AMERICAN COAL ASH ASSOCIATION. **2003 Coal Combustion Product – Production and Use Survey**. 2004. Disponível em: < [http://www.acaa-usa.org/PDF/2003_CCP_Survey\(10-1-04\).pdf](http://www.acaa-usa.org/PDF/2003_CCP_Survey(10-1-04).pdf)>. Acesso em: 16 jun. 2005.

AGUILAR, M.T.P. *et al.* Cura acelerada do concreto utilizando microondas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO-IBRACON, 44., 2002. Brasília-DF. **Anais...** Brasília: Instituto Brasileiro do Concreto, 2002. 1 CD-ROM.

AÏTCIN, P.C. **Concreto de Alto Desempenho**. 1. ed. São Paulo: Ed. Pini, 2000. 667p.

_____. The durability characteristics of High-Performance Concrete: a review. **Cement & Concrete Composites**, Great Britain: Elsevier Science, v. 25, p. 409-420, 2003.

ALONSO, C. *et al.* Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar. **Cement and Concrete Research**, USA: Pergamon, v. 30, p. 1047-1055, 2000.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Standard specifications for transportation materials and methods of sampling and testing - Part II Tests**. Resistance of concrete to chloride ion penetration : AASHTO T 259, Washington. D. C, 1980.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Manual of Concrete Practice**. Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete: ACI 233R, Farmington Hills, 1995.

_____. **Manual of Concrete Practice**. Use of Fly Ash in Concrete: ACI 232.2R, Farmington Hills, 1996.

_____. **Manual of Concrete Practice**. Use of Raw or Processed Natural Pozzolans in Concrete: ACI 232.1R, Farmington Hills, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Anual Book of ASTM Standards**. Standard Test Method for Electrical Indication of concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration: ASTM C 1202, Philadelphia, 1997.

_____. **Anual Book of ASTM Standards**. Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete: ASTM C 1152, Philadelphia, 1992.

ANDRADE, C. Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements. **Cement and Concrete Research**, USA: Pergamon, v. 23, p. 724-742, 1993.

_____. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. São Paulo: Ed. Pini, 1992. 105p.

_____. Últimos avances en el calculo de la vida util del hormigon estructural. In: JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 29., 2000. Punta Del Este. **Anais...** Punta Del Este, Uruguay: Novembro, 2000. 1 CD-ROM.

ANDRADE, C.; ALONSO, C.; SARRÍA, J. Corrosion rate evolution in concrete structures exposed to the atmosphere. **Cement & Concrete Composites**, Great Britain: Elsevier Science, v. 24, p. 55-64, 2002.

ANDRADE, C. *et al.* Relation between colourimetric chloride penetration depth and charge passed in migration tests of the type of standard ASTM C1202-91. **Cement and Concrete Research**, USA: Pergamon, v. 29, p. 417-421, 1999.

ANDRADE, J.J.O. **Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão das armaduras: iniciação por cloretos.** 2001. 277f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS, Porto Alegre, 2001.

ANDRADE, T.; HELENE, P.R.L. Influence of the HPC in the performance of the concrete ties used in the suburban electrical train system of the Metropolitan Region of Recife (MRR). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 3., 2002. Recife-PE. **Proceedings...**Recife: UPE, 2002. 1 CD-ROM.

ANTIOHOS, S.; *et al.* The development of blended supplementary cementing materials consisting of high and low calcium fly ashes. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 11., 2003. Durban-South Africa. **Proceedings...**Durban: The Cement and Concrete Institute of South Africa, 2003. p.747-757. 1 CD-ROM.

ARYA, C.; XU, Y. Effect of cement type on chloride binding and corrosion of steel in concrete. **Cement and Concrete Research**, USA: Pergamon, v. 25, p. 893-902, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland de Alto-Forno:** NBR 5735. Rio de Janeiro. 1991.

_____. **Cimento Portland de Alta Resistência:** NBR 5733. Rio de Janeiro. 1980.

_____. **Determinação da consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone – ensaio de abatimento:** NBR 7223. Rio de Janeiro, 1982.

_____. **Ensaio de cimento Portland – Método de ensaio:** NBR 7215. Rio de Janeiro. 1982.

_____. **Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto:** NBR 5739. Rio de Janeiro, 1980.

_____. **Execução de Estruturas de Concreto Armado:** NBR 14931. Rio de Janeiro. 2003.

_____. **Moldagem e cura de corpos-de-prova de concreto cilíndricos ou prismáticos:** NBR 5738. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **Projeto de estruturas de concreto**: NBR 6118. Rio de Janeiro. 2001. Projeto de Revisão da Norma.

BAKKER, R. F. Initiation period. In: SHIESSL, P. (ed.). **Corrosion of steel in concrete**. London: Chapman and Hall, 1988, p.22-25. (RILEM Report TC 60-CSC).

BATTAGIN, A.F. *et al.* Influência das condições de cura em algumas propriedades dos concretos convencionais e de alto desempenho. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO-IBRACON, 44., 2002. Brasília-DF. **Anais...** Brasília: Instituto Brasileiro do Concreto, 2002. 1 CD-ROM.

BARBOSA, M.P. *et al.* A influência do processo de cura nas propriedades mecânicas dos concretos de elevado desempenho (CED). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO-IBRACON, 41., 1999. Salvador-BA. **Anais...** Salvador: Instituto Brasileiro do Concreto, 1999. 1 CD-ROM.

BAUER, R.J.F. *et al.* Estudo de característica física e mecânica do concreto pelo efeito de vários tipos de cura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO-IBRACON, 41., 1999. Salvador-BA. **Anais...** Salvador: Instituto Brasileiro do Concreto, 1999. 1 CD-ROM.

BISSONETTE, B.; PIERRE, P.; PIGEON, M. Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, USA: Pergamon, v. 29, p. 1655-1662, 1999.

CALÇADA, L.M.L.; *et al.* Evaluation of the effectiveness of ASTM C1202 in measuring the concrete's ability to resist chloride ion penetration. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 3., 2002. Recife-PE. **Proceedings...** Recife: UPE, 2002. 1 CD-ROM.

CAMARINI, G. Caracterização da durabilidade do concreto pela absorção de água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO-IBRACON, 41., 1999. Salvador-BA. **Anais...** Salvador: Instituto Brasileiro do Concreto, 1999. 1 CD-ROM.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto**: Inspeção e Técnicas Eletroquímicas. São Paulo: Ed. Pini, 1997. 237p.

CASTELLOTE, M.; *et al.* Critical comparative analysis of the steady and non-steady-state chloride diffusion coefficients for several types of concretes. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 11., 2003. Durban-South Africa. **Proceedings...** Durban: The Cement and Concrete Institute of South Africa, 2003. p.105-114. 1 CD-ROM.

CHIES, F.; SILVA, N.I.W.; ZWONOK, O. Desenvolvimento de blocos e tijolos a partir de cinzas de fundo de carvão - CIPECAL. In: **Utilização de Resíduos na Construção Habitacional** – Coleção Habitare, v. 4. Porto Alegre-RS: ANTAC, 2003. p.218-239.

CHINDAPRASIRT, P.; JATURAPITAKKUL, C.; SINSIRI, T. Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste. **Cement & Concrete Composites**, Great Britain: Elsevier Science, v. 27, p. 425-428, 2005.

COELLO, E. *et al.* Metodologia del curado del hormigón y su influencia en las propiedades físicas i mecánicas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO-IBRACON, 43., 2001. Foz do Iguaçu-PR. **Anais...** Foz do Iguaçu: Instituto Brasileiro do Concreto, 2001. 1 CD-ROM.

CST – COMPANHIA SIDERÚRGICA DE TUBARÃO. **Site da Empresa.** Disponível em: <<http://www.cst.com.br>>. Acesso em: 26 mai. 2005.

CORDEIRO, G.C.; TOLEDO FILHO, R.D.; FAIRBAIRN, E.M.R. Otimização do processo de queima da casca de arroz visando a obtenção de uma pozolana de elevada reatividade. In: JORNADAS SUD-AMERICANAS DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL, 31., 2004, Mendoza-Argentina. **Anais...** Mendoza, Argentina: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, 2004. 1 CD-ROM.

COSTA, A.; APPLETON, J. Case studies of concrete deterioration in marine environment in Portugal. **Cement & Concrete Composites**, Great Britain: Elsevier Science, v. 24, p. 169-179, 2002.

COSTENARO, F.L.; LIBORIO, J.B.L. Efeito da adição de cinza e sílica da casca de arroz em concretos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO-IBRACON, 45., 2003. Vitória-ES. **Anais...** Vitória: Instituto Brasileiro do Concreto, 2003. 1 CD-ROM.

CSIZMADIA, J.; BALÁZS, G.; TAMÁS, F.D. Chloride ion binding capacity of aluminoferrites. **Cement and Concrete Research**, USA: Pergamon, v. 31, p. 577-588, 2001.

DAL RI, M. **Efeitos da adição de cal hidratada em concretos com altos teores de adição mineral na penetração de cloretos e na solução aquosa dos poros do concreto.** 2002. 111f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC - Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Santa Maria, 2002.

DAL RI, M.; GASTALDINI, A.L.G.; ISAIA, G.C. Penetração de cloretos de concretos com diferentes composições aglomerantes contendo adição de cal hidratada. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUCTURAL, 30., 2002, Brasília. **Anais...** Brasília: Universidade de Brasília, 2002. 1 CD-ROM.

DELAGRAVE, A. *et al.* Chloride binding capacity of various hydrated cement paste systems. **Advanced Cement Based Materials**, New York: Elsevier Science, v. 6, p. 28-35, 1997.

DHIR, R.K.; JONES, M.R.; McCARTHY, M.J. Binder content influences on chloride ingress in concrete. **Cement and Concrete Research**, USA: Pergamon, v. 26, p. 1761-1766, 1996.

DHIR, R.K.; MOHR, M.A.K.; DYER, T.D. Developing chloride resisting concrete using PFA. **Cement and Concrete Research**, USA: Pergamon, v. 27, p. 1633-1639, 1997.

ECOBA – EUROPEAN COAL COMBUSTION PRODUCTS ASSOCIATION. **Production and Utilisation of CCPs in 2003 in Europe (EU 15).** 2004. Disponível em: <<http://www.ecoba.com/index.html>>. Acesso em: 26 mai. 2005.

FAGURY, S.C.; LIBORIO, J. Considerações na utilização das cinzas da casca do arroz residual de termoeletricas como adição na produção de concretos estruturais. In: JORNADAS SUD-AMERICANAS DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL, 31., 2004, Mendoza-Argentina. **Anais...** Mendoza, Argentina: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, 2004. 1 CD-ROM.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF UNITED NATIONS. **FAO Statistical Databases**. 2005. Disponível em: <<http://faostat.fao.org>>. Acesso em: 30 mai. 2005.

FENG, Q.; *et al.* Efficiency of highly active rice husk ash on the high-strength concrete. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 11., 2003. Durban-South Africa. **Proceedings...**Durban: The Cement and Concrete Institute of South Africa, 2003. p.816-822. 1 CD-ROM.

FERREIRA, R.; *et al.* Influência das adições minerais na penetrabilidade de íons cloreto no concreto de cobrimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO-IBRACON, 45., 2003. Vitória-ES. **Anais...** Vitória: Instituto Brasileiro do Concreto, 2003. 1 CD-ROM.

FIGUEIREDO, C.R.; NEPOMUCENO, A.A. Influência da permeabilidade na carbonatação de estruturas de concreto-Estudo de casos. In: JORNADAS SUD-AMERICANAS DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL, 31., 2004, Mendoza-Argentina. **Anais...** Mendoza, Argentina: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, 2004. 1 CD-ROM.

GALVÃO, J.C.A. *et al.* Desempenho elétrico e mecânico de concretos fabricados sob diferentes temperaturas de mistura e condições de cura: Estudo preliminar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO-IBRACON, 44., 2002. Brasília-DF. **Anais...** Brasília: Instituto Brasileiro do Concreto, 2002. 1 CD-ROM.

GASTALDINI, A.L.G.; ISAIA, G.C. Chloride permeability of high performance concrete with mineral addition : binary and ternary mixtures. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE AND PERFORMANCE QUALITY OF CONCRETE, 1999, Gramado-RS. **Proceedings of 2nd Cammet/aci International Conference on HPC..** Farmington Hills, Mi: American Concrete Institute, 1999. v. 1.

_____. Porosidade de pastas compostas de misturas binárias e ternárias de adições minerais. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 7., 1998. Florianópolis-SC. **Anais...**Florianópolis: UFSC, 1998. v.1, p.35-43.

GASTALDINI, A.L.G; ISAIA, G.C.; CERVO, T.C. The effect of pozzolans on the resistance to chloride penetration in concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 3., 2002. Recife-PE. **Proceedings...**Recife: UPE, 2002. 1 CD-ROM.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996. 345p.

GEYER, A.L.B.; MEIRELES, L.R.; VALINOTE, O. Efeito da cura em concretos executados em região de baixa umidade relativa do ar ($H < 45\%$). In: JORNADAS SUD-AMERICANAS DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL, 31., 2004, Mendoza-Argentina. **Anais...** Mendoza, Argentina: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, 2004. 1 CD-ROM.

GOMES, P.C.C. *et al.* Concreto auto-adensável um aliado ao desenvolvimento sustentável do concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO-IBRACON, 45., 2003. Vitória-ES. **Anais...** Vitória: Instituto Brasileiro do Concreto, 2003. 1 CD-ROM.

GUIMARÃES, A.T.C.; HELENE, P.R.L. Difusão de cloretos e a influência do grau de saturação do concreto: ensaio em laboratório e medição de obra em uso. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP – BT/PCC/265**, São Paulo, 2000. 24p. Disponível em: <<http://www.infohab.org.br>>. Acesso em: 18mai. 2005.

GÜNEYISI, E.; OZTURAN, T.; GESOGLU, M. A study on reinforcement corrosion and related properties of plain and blended cement concretes under different curing conditions. **Cement & Concrete Composites**, Great Britain: Elsevier Science, v. 27, p. 449-461, 2005.

HASSAN, K.E.; CABRERA, J.G.; MALIEHE, R.S. The effect of mineral admixtures on the properties of high-performance concrete. **Cement & Concrete Composites**, Great Britain: Elsevier Science, v. 22, p. 267-271, 2000.

HELENE, P.R.L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993a. 271f. Tese (Livre Docência em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP, São Paulo, 1993a.

_____. Durabilidade as estruturas de concreto armado. In: SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, 3., 1993b, São Paulo. **Anais...**São Paulo: EPUSP, 1993b. p.37-48.

_____. Introdução da durabilidade no projeto das estruturas de concreto. **Ambiente Construído**, São Paulo: ANTAC, v. 1, n. 2, p. 45-57, jul/dez. 1997.

HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Ed. Pini, 1992. 349p.

HISADA, H.; NAGATAKI, S.; OTSUKI, N. Evaluation of mineral admixtures on the viewpoint of chloride ion migration through mortar. **Cement & Concrete Composites**, Great Britain: Elsevier Science, v. 21, p. 443-448, 1999.

HOFFMANN, A.T. **Influência da adição de sílica ativa, relação a/ag, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de cloretos em concretos**. 2001. 133f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS, Porto Alegre, 2001.

HOFFMANN, A.T.; DAL MOLIN, D. Influência da adição de sílica ativa, relação água/aglomerante, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de cloretos e na vida útil de concretos. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 30., 2002, Brasília. **Anais...** Brasília: Universidade de Brasília, 2002. 1 CD-ROM.

HUSSAIN, S.E. *et al.* Factors affecting threshold chloride for reinforcement corrosion in concrete. **Cement and Concrete Research**, USA: Pergamon, v. 25, p. 1543-1555, 1995.

HUSSAIN, S.E. RASHEEDUZZAFAR, S.; AL-GAHTANI, A.S. Influence of sulfates on chloride binding in cements. **Cement and Concrete Research**, USA: Pergamon, v. 24, p. 8-24, 1994.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção Agrícola Municipal – Cerais, Legumes e Oleaginosas 2004**. Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Producao_Agricola_Municipal_Cereais_Leguminosas_Oleaginosas/2004/>. Acesso em: 2 jun. 2005.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **IEA Statistics: Coal Information 2004**. Paris: IEA Books. 2004. 487p.

ILLSTON, J.M.; DOMONE, P.L.J. **Construction Materials: Their nature and behaviour**. 3.ed. Taylor & Francis e-Library, 2002. 515p. Disponível em: <http://www.engnetbase.com>. Acesso em: 22 jun, 2005.

ISAIA, G.C. Durabilidade do concreto ou das estruturas de concreto? Reflexões sobre o tema. In: WORKDUR – WORKSHOP SOBRE DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES, 2., 2001. São José dos Campos-SP. **Anais...** São José dos Campos: Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica - ITA, 2001. 1 CD-ROM.

_____. **Efeitos de Misturas Binárias e Ternárias de Pozolanas em Concreto de Elevado Desempenho: um estudo de Durabilidade com Vistas à Corrosão da Armadura**. 1995. 280f. Tese (Doutor em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP, São Paulo, 1995.

_____. Validade do ensaio de penetração de cloretos (ASTM C 1202) para avaliação da durabilidade de concreto de elevado desempenho com pozolanas. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 1996. Florianópolis-RS. **Proceedings...** Florianópolis, 1996, p. 554-565.

ISAIA, G.C.; GASTALDINI, A.L.G. A influência da resistência à compressão do projeto estrutural sobre o desempenho do concreto com altos teores de pozolanas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO-IBRACON, 45., 2003. Vitória-ES. **Anais...** Vitória: Instituto Brasileiro do Concreto, 2003. 1 CD-ROM.

_____. Perspectivas ambientais e econômicas do concreto com altos teores de adições minerais: um estudo de caso. **Ambiente Construído**, Porto Alegre: ANTAC, v. 4, n. 2, p. 19-30, abr/jun. 2004.

ISAIA, G.C.; GASTALDINI, A.L.G.; MORAES, R. Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete. **Cement & Concrete Composites**, Great Britain: Elsevier Science, v. 25, p. 69-76, 2003.

ISAIA, G.C.; VAGHETTI, M.A.; GASTALDINI, A.L.G. Carbonatação acelerada e natural de concreto com alto teor de pozolanas: um estudo preliminar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO-IBRACON, 43., 2001. Foz do Iguaçu-PR. **Anais...** Foz do Iguaçu: Instituto Brasileiro do Concreto, 2001. 1 CD-ROM.

JAMBOR, J. Pore structure and strength development of cement composites. **Cement and Concrete Research**, USA: Pergamon, v. 20, p. 948-954, 1990.

JENSEN, O. M.; HANSEN, P. F. Water-intrained cement-based materials: I. Principles and theoretical background. **Cement and Concrete Research**, USA: Pergamon, v. 31, p. 647-654, 2001.

JIANG, L. LIN, B. CAI, Y. A model for predicting carbonation of high-volume fly ash concrete. **Cement and Concrete Research**, USA: Pergamon, v. 30, p. 699-702, 2000.

KOPSCH, W.; PADARATZ, I.J. Durabilidade de estruturas de concreto armado em ambiente marinho – Estudo de caso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO-IBRACON, 43., 2001. Foz do Iguaçu-PR. **Anais...** Foz do Iguaçu: Instituto Brasileiro do Concreto, 2001. 1 CD-ROM.

LACERDA, C.S.; HELENE, P. Estudo da durabilidade, frente à penetração de íons cloretos, em concretos de alto desempenho com metacaulin. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO-IBRACON, 45., 2003. Vitória-ES. **Anais...** Vitória: Instituto Brasileiro do Concreto, 2003. 1 CD-ROM.

LIMA, E.P.; HELENE, P.R.L. Influência do volume de pasta na zona de transição pasta/agregado com relação às propriedades mecânicas e de durabilidade. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP – BT/PCC/270**, São Paulo, 2001. 17p. Disponível em: <<http://www.infohab.org.br>>. Acesso em: 18mai. 2005.

LORENZETTI, U.V.; FREDEL, M.C.; GLEISE, P.J. Avaliação da eficiência dos procedimentos de cura na durabilidade do concreto: resistência à compressão, perda de massa e absorção de água por capilaridade. In: WORKDUR – WORKSHOP SOBRE DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES, 2., 2001. São José dos Campos-SP. **Anais...** São José dos Campos: Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica - ITA, 2001. 1 CD-ROM.

LORENZETTI, U.V.; GLEISE, P.J.; FREDEL, M.C. Avaliação de características associadas à durabilidade em função da cura, da dosagem e do tipo de cimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO-IBRACON, 45., 2003. Vitória-ES. **Anais...** Vitória: Instituto Brasileiro do Concreto, 2003. 1 CD-ROM.

LURA, P.; VAN BREUGEL, K. Effect of curing temperature on autogenous deformations of cement paste and high performance concrete for different cement types. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 11., 2003. Durban-South Africa. **Proceedings...** Durban: The Cement and Concrete Institute of South Africa, 2003. p. 1616-1626. 1 CD-ROM.

MALHOTRA, V.M.; HEMMING, R.T. Blended cements in North America – A review. **Cement & Concrete Composites**, Great Britain: Elsevier Science, v. 17, p. 23-35, 1995.

MANGAT, P.S.; MOLLOY, B.T. Chloride binding in concrete containing PFA, gbs or silica fume under sea water exposure. **Magazine of Concrete Research**, London: Thomas Telford Ltd, v. 47, p. 129-141, 1995.

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Agricultura Mundial**. 2005. Disponível em: < <http://www.agricultura.gov.br> >. Acessado em: 23 mai. 2005.

MARTINS, A.R.; MONTICELLI, I.; CAMARINI, G. Carbonatação em concretos submetidos a diferentes procedimentos de cura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO-IBRACON, 43., 2001. Foz do Iguaçu-PR. **Anais...** Foz do Iguaçu: Instituto Brasileiro do Concreto, 2001. 1 CD-ROM.

MEHTA, P.K. **Concrete in the marine environment**. Taylor & Francis e-Library, 2003. 206p. Disponível em: <<http://www.engnetbase.com>>. Acesso em: 22 jun, 2005.

_____. Role of pozzolanic and cementitious material in sustainable development of the concrete industry. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZZOLANS, 6., 1998. Farmington Hills. **Proceedings...**Farmington Hills: American Concrete Institute, p.1-20, 1998.

_____. Advancements in Concrete Technology. **Concrete International**, Farmington Hills: American Concrete Institute. v. 21, n. 6, p.69-76, 1999.

MEHTA, P.K., AİTCIN, P.C. Principles underlying production of High-Performance Concrete. **Cement, Concrete e Aggregates**, Philadelphia: ASTM. v. 12, n. 2, p.70-78, 1990.

MEHTA, P.K.; BURROWS, R.W. Building durable structures in the 21st Century. **Concrete International**, Farmington Hills: American Concrete Institute. v. 23, n. 3, p.57-63, 2001.

MEHTA. P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: Ed. Pini, 1994. 573p.

MEIRA, G.R. *et al.* Agressividade por cloretos em estruturas de concreto em ambientes de atmosfera marinha. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO-IBRACON, 45., 2003.Vitória-ES. **Anais...**Vitória: Instituto Brasileiro do Concreto, 2003. 1 CD-ROM.

MINEO, N.J.; JÁUREGUI, N. Prevención de las patologias de las estructuras de hormigón armado en ambiente marino. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 30., 2002, Brasília. **Anais...** Brasília: Universidade de Brasília, 2002. 1 CD-ROM.

MISSAU, F. **Penetração de Cloretos em concretos compostos com diferentes teores de cinza de casca de arroz**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC - Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Santa Maria, 2004.

MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Anuário Estatístico: Setor Metalúrgico 2004**. 2004. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em 23 mai. 2005.

_____. **Balanco Energético Nacional – Ano Base 2004 (BEN 2005)**. 2005. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em 23 mai. 2005.

NASSIF, H.H.; NAJM, H.; SUKSAWANG, N. Effect of pozzolanic materials and curing methods on the elastic modulus of HPC. **Cement & Concrete Composites**, Great Britain : Elsevier Science, v. 27, p. 661-670, 2005.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: Ed. Pini, 1997. 828p.

NGALA, V.T. *et al.* Diffusion in cementitious materials: II. further investigations of chloride and oxygen diffusion in well-cured OPC and OPC/30% PFA pastes. **Cement and Concrete Research**, USA: Pergamon, v. 25, p. 819-826, 1995.

NEHDI, M.; DUQUETTE, J.; EL DAMATTY, A. Performance of rice husk ash produced using a new technology as a mineral admixture in concrete. **Cement and Concrete Research**, USA: Pergamon, v. 33, p. 1203-1210, 2003.

NMAI, C.K.; FACI, P.E. Durability considerations for reinforced concrete structures in tropical marine environments. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO-IBRACON, 45., 2003. Vitória-ES. **Anais...** Vitória: Instituto Brasileiro do Concreto, 2003. 1 CD-ROM.

NUGUE, F.; LORENTE, S.; OLLIVIER, J.P. Basis for prediction of chloride ingress into cement-based materials. **e-Mat – Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil**, Florianópolis, v. 1, n.1, p.10-21, mai. 2004. Disponível em: <<http://www.e-mat.info/volumes-V1-N1.htm>>. Acesso em: 10jun. 2005.

OLIVEIRA, C.T.A. **Água do Poro de pastas de cimento e escória**. 2000. 178f. Tese (Doutor em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP, São Paulo, 2000.

PARROTT, L.J. Factors influencing relative humidity in concrete. **Magazine of Concrete Research**, London: Thomas Telford Ltd, v. 43, p. 45-52, 1991.

PAULA COUTO, A. B. *et al.* Influência das condições de cura na durabilidade de diferentes concretos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO-IBRACON, 45., 2003. Vitória-ES. **Anais...** Vitória: Instituto Brasileiro do Concreto, 2003. 1 CD-ROM.

PAULETTI, C.; DAL MOLIN, D.C.C.; KAZMIERCZAK, C.S. Influência da idade de cura na profundidade de carbonatação de cimentos com ou sem adição de cinza volante. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO-IBRACON, 46., 2004. Florianópolis-SC. **Anais...** Florianópolis: Instituto Brasileiro do Concreto, 2004. 1CD-ROM.

PEREIRA, V.G.A. **Avaliação do coeficiente de difusão de cloretos em concretos: Influência do tipo de cimento, da relação A/C, da temperatura e do tempo de cura**. 2001. 138f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS, Porto Alegre, 2001.

PEREIRA, V.G.A.; DAL MOLIN, D.C.C. Estudo da influência do tipo de cimento, da relação água/cimento, da temperatura e do tempo de cura na resistência à compressão de concretos. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 30., 2002, Brasília. **Anais...** Brasília: Universidade de Brasília, 2002. 1 CD-ROM.

PINTO, R.O.; GEYER, A.L.B. Aplicação de diferentes procedimentos de cura no concreto de alto desempenho (CAD). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO-IBRACON, 45., 2003. Vitória-ES. **Anais...** Vitória: Instituto Brasileiro do Concreto, 2003. 1 CD-ROM.

PRUDÊNCIO JR., L.R.; SANTOS, S.; DAFICO, D.A. Cinza de Casca de Arroz. In: **Utilização de Resíduos na Construção Habitacional** – Coleção Habitar, v. 4. Porto Alegre-RS: ANTAC, 2003. p.240-261.

RAMEZANIANPOUR, A.A.; MALHOTRA, V.M. Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume. **Cement & Concrete Composites**, Great Britain: Elsevier Science, v. 17, p. 125-133, 1995.

RASHEEDUZZAFAR, R.; HUSSAIN, S.E. AL-SADOOM, S.S. Effect of cement composition on chloride binding in cements. **Cement and Concrete Research**, USA: Pergamon, v. 21, p. 777-794, 1991.

RASHEEDUZZAFAR, X.; *et al.* Effect of tricalcium aluminate content of cement on corrosion of reinforcing steel in concrete. **Cement and Concrete Research**, USA: Pergamon, v. 20, p. 723-738, 1990.

RÊGO, J.H.S. *et al.* Caracterização do resíduo cinza de casca de arroz (CCA) no Brasil. In: JORNADAS SUD-AMERICANAS DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL, 31., 2004, Mendoza-Argentina. **Anais...** Mendoza, Argentina: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, 2004. 1 CD-ROM.

RÊGO, J.H.S.; FIGUEIREDO, E.P. Rice husk ash (RHA) obtained without temperature control as partial substitute of cement in high performance concretes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 3., 2002. Recife-PE. **Proceedings...** Recife: UPE, 2002. 1 CD-ROM.

REPETTE, W.L.; BENINCÁ, M.A. Avaliação da eficiência de agentes de cura química segundo a capacidade de retenção de água nas idades iniciais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO-IBRACON, 46., 2004. Florianópolis-SC. **Anais...** Florianópolis: Instituto Brasileiro do Concreto, 2004. 1 CD-ROM.

RODRIGUEZ DE SENSALÉ, G.; REINA, D. Influencia de la incorporación de ceniza de cáscara de arroz residual uruguayana como material cementíceo suplementario en hormigones de alto desempeño. In: JORNADAS SUD-AMERICANAS DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL, 31., 2004, Mendoza-Argentina. **Anais...** Mendoza, Argentina: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, 2004. 1 CD-ROM.

SGARBOSSA, F.; ANDRADE, J.S.; VALDUGA, L. A influência de baixas temperaturas de cura na resistência à compressão do concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO-IBRACON, 46., 2004. Florianópolis-SC. **Anais...** Florianópolis: Instituto Brasileiro do Concreto, 2004. 1 CD-ROM.

SHAFIQ, N.; CABRERA, J.G. Effects of initial curing condition on fluid transport properties in OPC and fly ash blended cement concrete. **Cement & Concrete Composites**, Great Britain: Elsevier Science, v. 26, p. 499-507, 2004.

SHI, C.; STEGEMANN, J.A.; CALDWELL, R.J. Effect of supplementary cementing materials on the specific conductivity of pore solution and this implications on the Rapid Chloride Permeability Test (AASHTO T277 and ASTM C1202) results. **ACI Materials Journal**, USA: American Concrete Institute, v. 95, p. 389-394, 1998.

SILVA, C.O.; VIEIRA, S.R.S.S. Influência da temperatura de cura nas características reológicas, físico-mecânicas e microestruturais do concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO-IBRACON, 43., 2001. Foz do Iguaçu-PR. **Anais...** Foz do Iguaçu: Instituto Brasileiro do Concreto, 2001. 1 CD-ROM.

SINDUSCON – SP – SINDICATO DAS INDÚSTRIAS DA CONSTRUÇÃO CIVIL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Informalidade, carga tributária e burocracia: Propostas para a superação dos obstáculos na construção civil.** 2005. Disponível em: < http://www.sindusconsp.com.br/especiais/carga_tributaria/Informalidade_carga_tributaria_2.pt >. Acesso em: 22 jun. 2005.

SOUZA, U.E.L.; *et al.* Diagnóstico e combate à geração de resíduos na produção de obras de construção de edifícios: uma abordagem progressiva. **Ambiente Construído**, Porto Alegre: ANTAC, v. 4, n. 4, p. 33-46, out/dez. 2004.

SOUZA, V.C.M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto.** São Paulo: Ed. Pini, 1998. 255p.

SUDERJ – SUPERINTENDÊNCIA DE DESPORTOS DO RIO DE JANEIRO. Disponível em: < <http://www.suderj.rj.gov.br/maracana/curiosidades.html> >. Acesso em: 22 jun. 2005.

SURYAVANSHI, A.K.; SCANTLEBURY, J.D.; LYON, S.B. Corrosion of reinforcement steel embedded in high water-cement ratio concrete contaminated with chloride. **Cement & Concrete Composites**, Great Britain: Elsevier Science, v. 20, p. 263-381, 1998.

_____. The binding of chloride ions by sulphate resistant portland cement. **Cement and Concrete Research**, USA: Pergamon, v. 25, p. 581-592, 1995.

TALBOT, C.; *et al.* Properties of mortar mixtures containing high amount of various supplementary cementitious materials. In: MALHOTRA, V. M. (ed.) INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE, 5., 1995, Wisconsin. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1995. v. 1, p.125-131. (SP-153).

TAN, K.; GJÖRV, O.E. Performance of concrete under different curing conditions. **Cement and Concrete Research**, USA: Pergamon, v. 26, p. 355-361, 1996.

TANG, L. Concentration dependence of diffusion and migration of chloride ions. Part 1. Theoretical considerations. **Cement and Concrete Research**, USA: Pergamon, v. 29, p. 1463-1468, 1999a.

_____. Concentration dependence of diffusion and migration of chloride ions. Part 2. Experimental evaluations. **Cement and Concrete Research**, USA: Pergamon, v. 29, p. 1469-1474, 1999b.

TASHIMA, M.M.; SILVA, C.A.R.; AKASAKI, J.L. Concreto com adição de cinza de casca de arroz (CCA) obtida através de um processo de combustão não controlada. In: JORNADAS SUD-AMERICANAS DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL, 31., 2004, Mendoza-Argentina. **Anais...** Mendoza, Argentina: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, 2004. 1 CD-ROM.

TORII, K.; KAWAMURA, M. Pore structure and chloride permeability of concretes containing fly ash, blast-furnace slag and silica fume. In: MALHOTRA, V. M. (ed.) INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURALS POZZOLANS IN CONCRETE, 4., 1993, Istanbul. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1993. v. 1, p.135-150. (SP-132).

USCB – U.S. CENSUS BUREAU. Disponível em: < <http://www.census.gov> >. Acesso em: 11 jun. 2005.

USGS – U.S. GEOLOGICAL SURVEY. **Mineral Commodity Summaries**. 2005. Disponível em: < <http://minerals.er.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/> >. Acesso em: 29 mai. 2005.

VAGHETTI, M.A.O. **Efeitos da cinza volante com cinza de casca de arroz ou sílica ativa sobre a carbonatação do concreto de cimento Portland**. 1999. 113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC, Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria, 1999.

VENQUIARUTO, S.D.; ISAIA, G.C.; GASTALDINI, A.L.G. Influência do teor e da quantidade de adições minerais na carbonatação do concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO-IBRACON, 43., 2001. Foz do Iguaçu-PR. **Anais...** Foz do Iguaçu: Instituto Brasileiro do Concreto, 2001. 1 CD-ROM.

VENTA, G.J.; NISBET, M. Potential for reduction of CO₂ emissions in Canada through greater use of fly ash in concrete. In: VANCOUVER CANMET/ACI INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CONCRETE TECHNOLOGY FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 1999. Vancouver. **Proceedings...** Disponível em: <<http://www.ecosmart.ca/kbase/filedocs/trventa99.pdf>>. Acesso em: 12 jun, 2005.

WBCSD – WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **Iniciativa para a sustentabilidade de cimento (CSI): Plano de Ação**. 2002. Disponível em: < <http://www.abcp.org.br> >. Acesso em: 3 jun. 2005.

WCI – WORLD COAL INSTITUTE. **The Coal Resource: A comprehensive overview of coal**. London: WCI. 2005. 48p. Disponível em: < <http://www.worldcoal.org> >. Acesso em: 29 mai. 2005.

WEBER, S.; REINHARDT, H.W. A new generation of high performance concrete: concrete with autogenous curing. **Advanced Cement Based Materials**, New York: Elsevier Science, v. 6, p. 59-68, 1997.

WEE, T.H.; SURYAVANSHI, A.K.; TIN, S.S. Evaluation of Rapid Chloride Permeability Test (RCPT) results for concrete containing Mineral Admixtures. **ACI Materials Journal**, USA: American Concrete Institute, v. 97, p. 221-232, 2000.

WORKDUR – II WORKSHOP SOBRE DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES. **Relatos da Mesa Redonda 1: Durabilidade do concreto ou das estruturas de concreto? Reflexões sobre o tema**. 2001. São José dos Campos-SP. **Anais...** São José dos Campos: Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica - ITA, 2001. 1 CD-ROM.

XU, Y. The influence of sulphates on chloride binding and pore solution chemistry. **Cement and Concrete Research**, USA: Pergamon, v. 27, p. 1841-1850, 1997.

YEAU, K.Y.; KIM, E.K. An experimental study on corrosion resistance of concrete with ground granulate blast-furnace slag. **Cement and Concrete Research**, USA: Pergamon, v. 35, p. 1391-1399, 2005.

ZHANG, T.; GJÖRV, O.E. Diffusion behavior of chloride ions in concrete. **Cement and Concrete Research**, USA: Pergamon, v. 26, p. 907-977, 1996.

ZHANG, T.; GJÖRV, O.E. Effect of ionic interaction in migration testing of chloride diffusivity in concrete. **Cement and Concrete Research**, USA: Pergamon, v. 25, p. 1535-1542, 1995.

ZHUTOVSKY, S.; KOVLER, K.; BENTUR, A. Influence of cement paste matrix properties on the autogenous curing of high-performance concrete. **Cement & Concrete Composites**, Great Britain: Elsevier Science, v. 26, p. 499-507, 2004.