



VIABILIDADE DO EMPREGO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ NATURAL EM CONCRETO ESTRUTURAL. PARTE II: PROPRIEDADES DA DURABILIDADE

**Geraldo C. Isaia (1); Antonio L. G. Gastaldini (2); Raul Zerbino (3); Gemma Sensale (4),
Tatiana Cervo (5)**

- (1) Departamento de Estruturas e Construção Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria – e-mail: gisaia@terra.com.br
(2) Departamento de Estruturas e Construção Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria – e-mail: gastaldn@ct.ufsm.br
(3) LEMIT-CIC, La Plata, Buenos Aires, Argentina – e-mail: zerbino@ing.unlp.edu.ar
(4) Facultad Ingeniería, UDELAR, Montevideo, Uruguay – e-mail: gemma@fing.edu.uy
(5) Departamento de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria – e-mail: tcervo@terra.com.br

RESUMO

Atualmente, a casca de arroz para ser utilizada em concreto estrutural necessita de queima com temperatura controlada e de moagem para conferir maior reatividade pozolânica. Para simplificar o processamento da CCA e ampliar seu uso em locais próximos onde é produzida, este trabalho estuda o emprego de CCA natural e residual, sem moagem, para uso em concreto convencional. Estudou-se a seqüência de colocação e o tempo de mistura dos materiais na betoneira, para obtenção do melhor desempenho da moagem no tambor. Testaram-se misturas de concreto de referência com 100% de cimento e com 15% e 25% de substituição de cimento, em massa, por CCA natural (CCAN) e moída (CCAM). Realizou-se ensaios de resistência à compressão axial, carbonatação, penetração de cloreto, resistividade elétrica, absorção de água, permeabilidade ao oxigênio, resistência a sulfatos e reação álcali-sílica. Os resultados indicam que há viabilidade técnica para o uso de CCAN em concreto estrutural. À exceção dos ensaios de expansão das reações álcali-sílica, os dados dos demais ensaios indicam que, para as variáveis estudadas, os resultados foram satisfatórios para CCAN no teor de 15%. Para teores maiores é necessária investigação mais profunda para avaliar o paradoxo do aumento do desempenho das variáveis da durabilidade e diminuição das propriedades mecânicas. Estudos em andamento revelam que a expansão da RAS pode ser mitigada pela troca do cimento CPIIF por CPIIZ.

Palavras-chave: cinza da casca do arroz natural, cinza de casca de arroz moída, concreto estrutural, durabilidade, agentes agressivos.

1 INTRODUÇÃO

Entre as pozolanas para uso em concreto estrutural, a cinza volante e a cinza de casca de arroz destacam-se por serem subprodutos agro-industriais para a produção de energia. Para melhorar as propriedades das cinzas de origem vegetal misturadas ao concreto relatam que, conforme conhecimento atual, devem ser previamente queimadas com controle de temperatura e, ainda, moídas com o intuito de aumentar a sua finura para incrementar as suas propriedades gerais.

Por questões de sustentabilidade, a CCA deve ser aproveitada em concreto, maior consumidor potencial deste resíduo. A indisponibilidade de CCA no mercado com características adequadas para tal uso resulta em grandes quantidades depositadas a céu aberto, causando a poluição ambiental de solos e mananciais aquíferos. O não aproveitamento da CCA, descartada em condições não sustentáveis, é destino que não pode ser aceito pela sociedade, razão pela quais muitas pesquisas foram realizadas nos últimos anos sobre o seu emprego em concreto.

A maioria delas aponta, como condição para seu emprego com fins estruturais, que deva possuir alta reatividade química para que as reações pozolânicas se processem em condições mais favoráveis e potencializem o desempenho requerido para o concreto (MEHTA, 1994, FENG et al., 2003). Alguns pesquisadores são de opinião que a CCA residual, produzida sem temperatura controlada e de menor finura, também pode ser utilizada em estruturas de concreto, porque podem apresentar características de qualidade suficientes para bom desempenho mecânico e à durabilidade (ISAIA, 1995, REGO, 2004). Resultados significativos com a CCA residual são devidos ao efeito pozolânico e às ações físicas de dispersão e nucleação das partículas de cimento em razão do potencial zeta e de tamponamento dos poros (ISAIA et al., 2003, SENSALE, 2006).

A maioria dos engenhos de arroz brasileiros não se interessa no beneficiamento da CCA descartando-a como resíduo, muitas vezes contra as normas ambientais ocasionando poluição ambiental. Empresas de outros segmentos industriais não têm mostrado interesse no seu beneficiamento seja pelo investimento necessário em equipamentos, seja pelo consumo de energia agregado ao produto final, o que aumenta o seu custo. Procedimento para aumentar o uso da CCA residual em concreto estrutural, dando-lhe destino mais sustentável, seria sua utilização no estado como é obtida após a queima, sem moagem. Adicionada diretamente na betoneira, auto-moída com os demais agregados, resultando em maior finura, reproduziria, em parte, o processo de moagem prévia em moinhos, processo utilizado nas pesquisas atuais. Com esta estratégia, seria aumentado o seu potencial de utilização, especialmente em obras de pequeno e médio porte, em regiões próximas às zonas produtoras de CCA, quando concreto é misturado no próprio canteiro. Como benefícios, seria minimizado o custo de transporte, não seria consumida energia para o seu beneficiamento e seria dado destino sustentável pela diminuição do consumo de clinquer e demais benefícios decorrentes relacionados ao meio ambiente.

Este trabalho apresenta resultados de pesquisa coordenada pelo Grupo de Estudos e Pesquisas em Concreto (GEPECON) da Universidade Federal de Santa Maria, Brasil, realizada em conjunto com o LEMIT de La Plata, Argentina e a UDELAR de Montevidéu. No concreto fresco determinou-se a seqüência de colocação dos materiais na betoneira e o tempo de mistura para maximizar as propriedades da resistência mecânica e durabilidade. Neste trabalho é apresentada a segunda parte deste projeto de pesquisa, com os resultados dos ensaios de durabilidade de concretos com CCA natural e moída, para comparar seus desempenhos e averiguar a viabilidade do seu uso em concreto estrutural. A primeira parte desta pesquisa constou do estudo das propriedades mecânicas, elásticas, deformação e microestrutura dos mesmos concretos com CCA natural e moída, cujos resultados foram publicados em (ISAIA et al., 2010).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Estudos prévios com CCA natural e moída

Foram amostradas CCAs de 17 engenhos de arroz da região de Santa Maria, RS, recolhidas no estado em que saíram das fornalhas, sem controle de temperatura. Realizaram-se ensaios de resistência à compressão de argamassa, NBR 7215, com as CCAN e as respectivas CCAM moídas em moinho de bolas metálicas por 1h, com teores de substituição de cimento entre 15% e 30% em massa. Adotou-se a resistência à compressão dos corpos-de-prova (CP) como parâmetro de comparação. A Figura 1 apresenta CCAN, amostrada no engenho de arroz e a CCAM moída em laboratório.

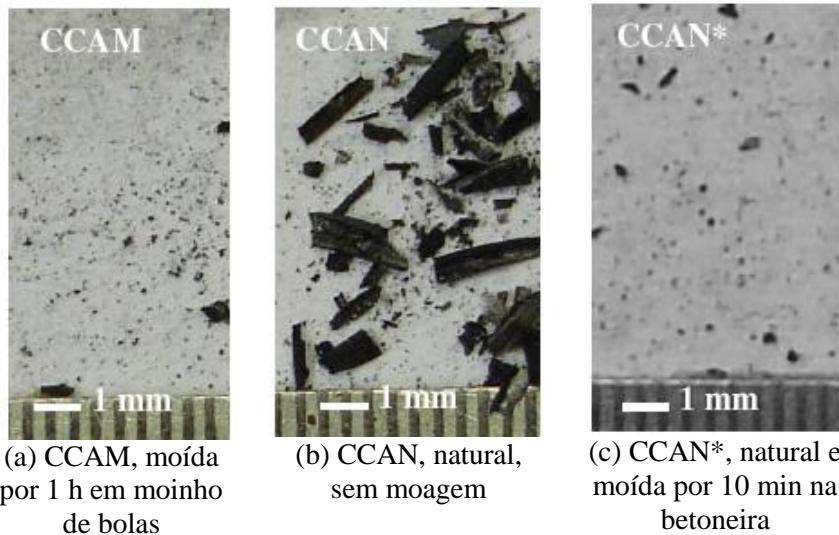


Figura 1 - Cinza natural (CCAN) e moída (CCAM) (a): CCAM moída por 1 h em moinho de bolas; (b): CCAN natural, sem moagem; (c): CCAN natural moída por 10 min. na betoneira.

Estudou-se a seqüência de colocação dos materiais na betoneira e o tempo de mistura com concreto de relação a/mc = 0,55, com cimento CPIIF e substituição de 15% e 25% de sua massa por CCAN e CCAM. Empregou-se betoneira de eixo inclinado com cuba de 120 dm³ e capacidade de mistura de 40 dm³. O parâmetro de controle foi a resistência à compressão axial de CPs 10x20 cm, a 28 dias (f_{c28}), e os teores de material retido nas #0,075 e #0,044 mm por peneiração úmida seguida por seca, retirados da argamassa do concreto fresco. Sendo todos os materiais do mesmo lote, a finura das CCAN foi a variável que forneceu valor comparativo sobre a influência do tempo de moagem dos materiais na betoneira, combinada com os resultados de f_{c28} . Após as simulações experimentais, foram adotadas as ordenações de colocação dos materiais no tambor e os tempos de mistura, que produziram os melhores resultados de resistências à compressão e menores teores de material retido no ensaio de peneiramento: (a) Misturas CCAN: (britas + CCAN = 2'), (água + aditivo = 2'), cimento = 2' e areias = 9'. Tempo total = 15'; (b) Misturas CCAM: (britas + água = 2'), cimento = 2', aditivo = 2', CCAM = 2' e areias = 2'. Tempo total = 10'.

2.2 Características dos materiais cimentícios

Utilizou-se cimento CPII F-32, conforme NBR 11578, CCAN do engenho Induber e a mesma CCAM moída, conforme descrito em 2.1. A moagem da CCAN durante a mistura foi realizada com os agregados a seco, sem cimento, respeitando-se a composição dos traços e o teor de 15% e 25% de substituição de cimento por CCA. A Tabela 1 apresenta os resultados dos ensaios dos materiais cimentícios. A soma de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 50\%$, o teor de $\text{SO}_3 < 3,0\%$ e de $\text{Na}_2\text{O} < 1,5\%$ contemplam os requisitos da norma NBR 12653 para material pozolânico classe E. O teor relativamente alto de potássio poderia ser uma das causas da maior cristalização das partículas amorfas, na formação de cristobalita, conforme Figura 3. A Tabela 1 mostra que a CCAN apresentou massa específica 48% menor do que a CCAM e, após a moagem na betoneira diminuição de apenas 7%. O diâmetro médio da CCAN foi praticamente o dobro da CCAM, mostrando que a auto-moagem da CCAN promoveu fragmentação dos grãos, entretanto não reproduziu os valores obtidos para a CCA moída.

A Figura 2 apresenta o DRX da CCAM com picos de cristobalita, devido a sua queima não controlada em temperaturas mais altas (acima de 600°C) e da presença de teor de potássio relativamente elevado.

2.3 Características físicas dos agregados

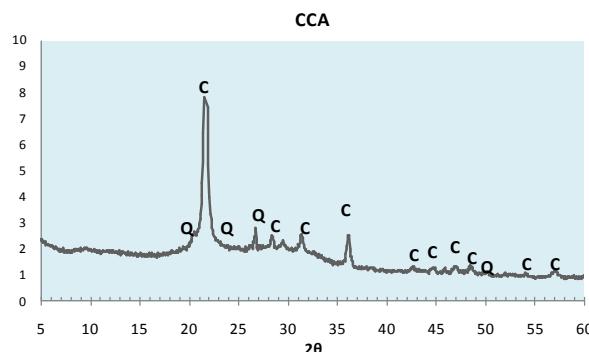
Usaram-se duas areias naturais quartzosas: fina e grossa, da zona utilizável, NBR 7211, secas em estufa, peneiradas na #4,8mm, e duas britas diabásicas, nº 1 e 2 lavadas e peneiradas entre #19 mm e #6,3 mm, secas ao ar. Realizou-se composição granulométrica em várias proporções pelo ensaio da massa unitária compactada a seco que apontaram a proporção de 50% para cada tipo de agregado. A Tabela 2 mostra as características físicas dos agregados

Tabela 1 - Características físicas e químicas dos materiais cimentícios

<i>Propriedades</i>	<i>Cimento</i>	<i>CCAM¹</i>	<i>CCAN²</i>	<i>CCAN15³</i>	<i>CCAN25³</i>
Físicas					
Massa específica, kg/dm ³	3,06	2,09	1,41	1,96	1,93
Área específica BET, m ² /g	1,44	49,25	19,67	44,41	45,01
Resíduo #0,075 mm, %	2,98	4,97	82,18	9,09	4,84
Início de pega, min	157				
Fim de pega, min	205				
Análise granulométrica					
Diâmetro médio, µm	11,5	15,5	n.d.	33,2	26,7
Diâmetro < 10%, µm	1,3	2,4	n.d.	5,2	4,3
Diâmetro < 90%, µm	41,6	54,1	n.d.	80,5	69,4
Análise química, %					
Perda ao fogo	1,31	0,25	0,51		
SiO ₂	18,92	94,84	95,04		
Al ₂ O ₃	4,32	0,39	0,00		
Fe ₂ O ₃	2,58	0,54	0,44		
CaO	60,15	1,32	1,25		
MgO	4,91	0,40	0,45		
SO ₃	3,19	0,01	0,01		
Na ₂ O	-	0,11	0,09		
K ₂ O	-	1,45	1,40		

¹CCAM: CCA moída por 1 h em moinho de bolas; ²CCAN: CCA natural, conforme amostrada

³CCAN15 e CCAN25: CCA natural nos teores de 15 e 25%, respectivamente, moídas na betoneira juntamente com os demais materiais a seco.



C = cristobalita; Q = quartzo

Figura 2 - DRX da amostra de cinza de casca de arroz moída

Tabela 2 - Características físicas dos agregados

	<i>Agregados miúdos</i>			<i>Agregados graúdos</i>		
	Areia 1	Areia 2	ΣAreia	Brita 1	Brita 2	ΣBrita
Massa específica, kg/dm ³	2,60	2,63	2,62	2,55	2,49	2,52
Massa unitária, kg/dm ³	1,51	1,57	1,54	1,40	1,39	1,40
Módulo de finura	2,81	1,89	2,35	5,42	6,91	6,17
D. máx. característica, mm	4,75	1,18	4,75	9,5	19	19

2.4 Aditivo

Usou-se aditivo superplasticante à base de carboxilatos, com densidade 1,1 kg/dm³ e 30% de sólidos, para obtenção de abatimento 80±15 mm.

2.5 Concreto

Dosou-se 5 famílias de traços: referência (REF:100% de CP), CCAM15 (M15: 15% de CCA), em massa; CCAM25 (M25: 25% de CCA); CCAN15 (N15: 15% de CCA) e CCAN25 (N25: 25% de CCA). Foram estudadas as relações a/mc: 0,45, 0,55 e 0,65. Manteve-se o volume de argamassa (V_{arg})

seca em 50%, diminuindo-se na areia o aumento do volume de pasta nos traços com CCA. A Tabela 3 apresenta a quantidade de materiais por m³. As moldagens dos CPs atenderam as normas NBR 5738 e NBR 5739 e o adensamento foi realizado em mesa vibratória. Permaneceram à temperatura ambiente por 24 horas cobertos com tecidos saturados, posteriormente desmoldados e acondicionados em câmara úmida a 23±2°C e umidade relativa >95%, onde ficaram até as datas dos ensaios.

Tabela 3 - Consumo de materiais por m³ de concreto¹

Traços	CCA %	Relação a/mc	Cimento kg/m ³	CCA kg/m ³	Areia kg/m ³	Aditivo dm ³ /m ³
REF		0,45	407		688	0,1
		0,55	320		779	0,3
		0,65	263		838	0,1
M15	15	0,45	346	61,1	664	1,3
		0,55	272	47,9	760	1,4
		0,65	223	39,4	822	1,2
M25	25	0,45	305	102	647	1,8
		0,55	240	79,8	747	1,8
		0,65	197	65,7	812	1,3
N15	15	0,45	346	61,1	627	2,2
		0,55	272	47,9	732	2,1
		0,65	223	39,4	799	2,2
N25	25	0,45	305	102	586	3,6
		0,55	240	79,8	699	3,2
		0,65	197	65,7	772	3,1

¹ Britas: 1095 (0,45), 1099 (0,55), 1101 (0,65) kg/m³

Água: 183 (0,45), 176 (0,55), 171 (0,65) dm³/m³.

3 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

3.1 Resistências à compressão axial

A Figura 6 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial a 28 e 91 dias. Os traços CCAM apresentaram resistências mais elevadas, em especial M15, mostrando que a moagem da cinza foi determinante para o aumento da resistência devido à menor dimensão das partículas, o que favoreceu a nucleação de compostos hidratados. Os traços CCAN apresentaram menores resistências f_{c28} que REF₂₈ e menores ainda quando comparados aos CCAM, porque aqueles apresentaram grãos maiores, e o efeito das reações pozolânicas não foi muito significativo nessa idade. Os traços N25 apresentaram as menores resistências pelo maior tamanho e teor de partículas mais grossas.

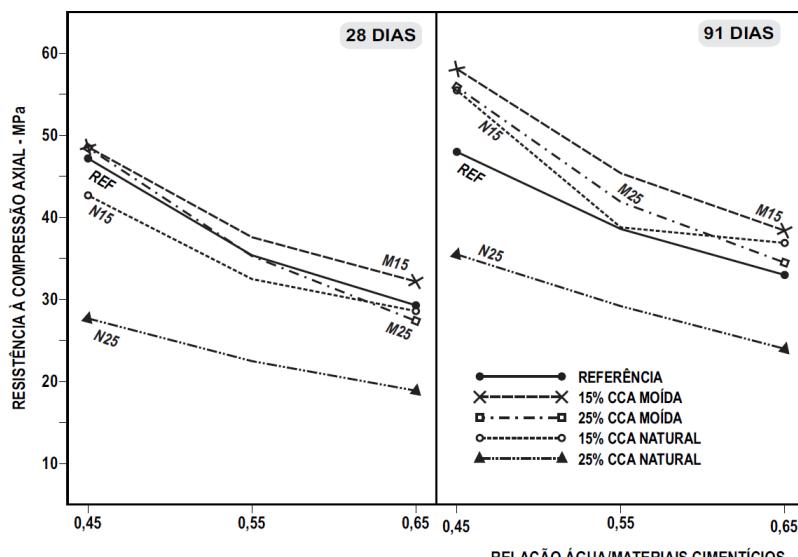


Figura 6 - Resistência à compressão axial a 28 dias (a) e 91 dias (b)

A 91 dias os traços N15 cresceram de resistência à compressão, em nível similar aos CCAM, superando em até 18% os REF₉₁. A partir de a/mc = 0,55 a inflexão da curva de N15 foi mais pronunciada comparada aos demais traços, ou seja, para menores a/mc, maior foi o efeito positivo da CCAN, que praticamente igualou-se em resistência aos traços CCAM para a relação a/mc = 0,45. O aumento da idade de 28 para 91 dias foi benéfico para N15 com resultados iguais ou maiores que os REF₉₁ igualando-se, praticamente, com os M25.

A maior finura e reatividade de CCAM contribuíram para aumento da resistência, mais para M15 que M25. As misturas N15 apresentaram aumento de resistência em relação às REF₉₁; para N25 diminuiu para percentuais similares, quando comparadas aos traços M25. O teor de 15% foi mais compensador do que 25%, especialmente para CCAN. A menor finura da CCAN afetou negativamente os traços com teor maior e a/mc mais altos, comparadas às aos REF.

3.2 Viabilidade técnica

A Tabela 4 apresenta as relações a/mc, consumo de cimento para três níveis de resistências de dosagem a 28 dias (f_{c28}): 25, 30 e 40 MPa, que são usualmente empregadas no cálculo de estruturas. Os traços $f_{c28-25MPa}$ preenchem a condição a/mc ≤ 0,65 (classe de agressividade I: rural, NBR 12655, $f_{c28-30MPa}$ a condição a/mc ≤ 0,60 (classe II: urbana), $f_{c28-40MPa}$ a condição a/mc ≤ 0,55 (classe III: marinha). Os consumos mínimos de materiais cimentícios foram cumpridos.

Tabela 4 - Relações a/mc e consumo de cimento para f_{c28} : 25, 30 e 40 MPa

f_{c28} MPa	Parâmetros de análise	REF	CCA M15	CCA M25	CCA N15	CCA N25
25	Relação a/mc	0,63	0,65 ¹	0,61	0,61	0,42
	Consumo cimento	271	223	212	241	332
	f_{c91} (p/ f_{c28} =25 MPa)	28,9	33,1	32,2	32,1	32,7
30	Relação a/mc	0,56	0,60	0,55	0,53	
	Consumo cimento	313	247	239	284	
	f_{c91} (p/ f_{c28} =30 MPa)	33,2	36,8	37,5	39,3	
40	Relação a/mc	0,46	0,48	0,47	0,42	
	Consumo cimento	392	322	289	369	
	f_{c91} (p/ f_{c28} =40 MPa)	41,8	48,6	47,4	55,1	

¹Adotou-se o valor mínimo da NBR 12655 para a classe I: a/mc≤0,65

O traço N25 preencheu somente as condições de $f_{c28-25MPa}$, com consumo de cimento 63% mais elevado que REF₂₈, sendo economicamente inviável. Os demais apresentaram consumos abaixo da REF: N15: -12% (25 MPa), -9% (30 MPa) e -6% (40 MPa). Os traços CCAM apresentaram consumos menores do que com CCAN pelas razões apontadas em 3.1. Houve crescimento superior a 30% de f_{c28} para f_{c91} dos traços N15, alcançando 39,3 MPa ($f_{c28-30MPa}$) e 55,1 MPa ($f_{c28-40MPa}$), que os elevaria para esses níveis de dosagem mais alta se fossem ensaiados a f_{c91} . As resistências a f_{c91} da Tabela 4 serão utilizadas para a discussão de resultados das variáveis da durabilidade a seguir, em igualdade de resistência à compressão, por meio de regressões lineares ou não lineares.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DAS VARIÁVEIS DA DURABILIDADE

4.1 Carbonatação acelerada

Utilizaram-se CPs 10x20 cm curados até 7 dias em câmara úmida, posteriormente em sala climatizada durante o período de sazonamento até o início do pré-condicionamento da umidade interna, realizada conforme norma RILEM TC 116-PCD (1999). O ensaio de carbonatação acelerado foi realizado em câmara climatizada a 23°C e 70% U.R., com teor de CO₂ de 5%, em volume. As profundidades de carbonatação foram medidas após 3, 6, 9 e 12 semanas na câmara, conforme RILEM CPC-18, sendo posteriormente medidas por meio de digitalização de imagem e por rotina do software CAD. Adotaram-se o modelo de Tuuti (1982) para o cálculo dos coeficientes de carbonatação, apresentados na Figura 7, relacionados com as respectivas resistência à compressão.

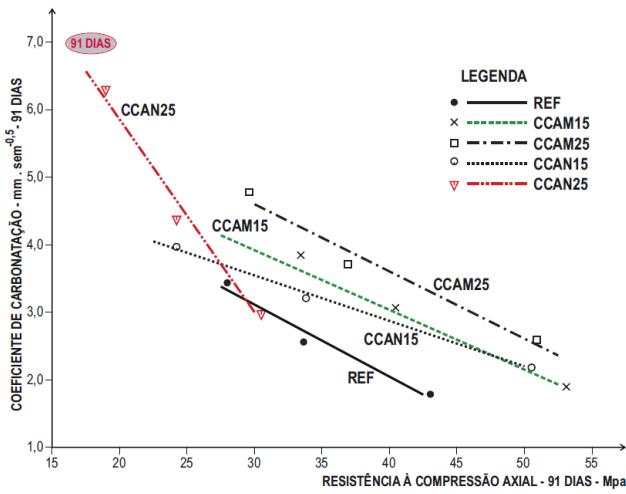


Figura 7 - Coeficiente de carbonatação e resistência à compressão a 91 dias

Todos os traços apresentam linhas aproximadamente paralelas, denotando crescimento do coeficiente de carbonatação à medida que aumenta o teor de substituição de cimento, com exceção do traço N25. Neste, o crescimento da carbonatação é fortemente influenciada pelo decréscimo da resistência ou da relação a/mc, visto que para $f_{c91} \approx 30$ Mpa ($f_{c28} \approx 25$ MPa, a/mc $\approx 0,42$ – Tabela 4) o coeficiente é similar ao do REF com a/mc $\approx 0,63$. Os coeficientes de carbonatação dos traços N15 e M15 são muito similares e sem diferenças significativas, mostrando que a ausência de moagem da CCA praticamente não modificou o comportamento frente às reações de neutralização. O traço M25 apresentou ligeiro acréscimo em relação aos anteriores. Com exceção dos traços N25, os demais ficaram abaixo do valor $4 \text{ mm.semanas}^{-0,5}$, para $f_{c91} \geq 35$ MPa ($f_{c28} \geq 30$ MPa), o que corresponde a carbonatação de concreto durável, com profundidade neutralizada de 40 mm em 100 anos, considerando-se a relação entre carbonatação acelerada e natural de $1 \text{ mm.semana}^{-0,5} = 1 \text{ mm.ano}^{-0,5}$ (HO, LEWIS, 1987).

4.2 Penetração acelerada e coeficientes de penetração de cloreto por imersão

O ensaio acelerado de penetração de cloreto foi realizado conforme ASTM C 1202, em fatias de 10x5 cm cortadas dos CPs 10x20 cm, medindo-se a carga passante em Coulomb com diferença de potencial de 60V. Os ensaios de penetração de Cl⁻ por imersão foram realizados em CPs 10x10 cm, tendo as faces transversais impermeabilizadas e imersos em tanque com solução saturada de NaCl, com concentração de Cl⁻ semelhante à da água do mar (20.000 mg/l) conforme (MEHTA, MONTEIRO, 2008). As medidas da profundidade de penetração foram realizadas a 0, 7, 14, 28, 56 e 91 dias e os procedimentos de cálculo dos coeficientes foram os mesmos do ensaio de carbonatação. A Figura 8 mostra as cargas em Coulomb relacionadas com as resistências à compressão, a 91 dias. A figura mostra a classificação dos concretos quanto à penetração de cloreto, segundo a ASTM C1202.

A penetração de Cl⁻ decresceu com o aumento da resistência (< relação a/mc = aumento da compacidade) e com o teor de substituição de cimento, fato relacionado com o refinamento dos poros e dos grãos derivados das reações pozolânicas. Os traços N15 e N25 apresentaram penetração de Cl⁻ maiores que M15 e M25 devido a menor finura e compacidade. Entretanto, todas as misturas com CCA apresentaram valores menores que REF que se situou na classificação de penetração moderada, assim como as N15, enquanto as misturas M15 e N25 entre moderada e baixa e a M25 entre baixa e muito baixa. A Figura 9 relaciona as cargas passantes com os coeficientes de penetração de Cl⁻. Todas as misturas apresentaram coeficientes inferiores a $11 \text{ mm.semanas}^{-0,5}$, exceção da N25 com resultados de 12 a $23 \text{ mm.semanas}^{-0,5}$, o dobro dos anteriores. Embora o ensaio de penetração de Cl⁻ tenha mostrado desempenho distinto para os traços com CCA em relação à REF, os coeficientes de penetração foram similares, mostrando a necessidade da durabilidade dos concretos frente aos cloreto ser analisada por mais de um ângulo de abordagem. Essa dicotomia ocorre pela ação dos mecanismos que regem os dois ensaios: migração no ensaio de ASTM e difusão no ensaio de imersão. Observa-se que os traços N15, comparados aos M15 tiveram desempenho um pouco mais baixo por migração e semelhante na difusão. As diferenças se acentuaram nos traços N25 e M25, visto que o primeiro

apresentou coeficientes de penetração bem superiores, pela sua menor compacidade e teor mais elevado de cinza de granulometria mais grossa.

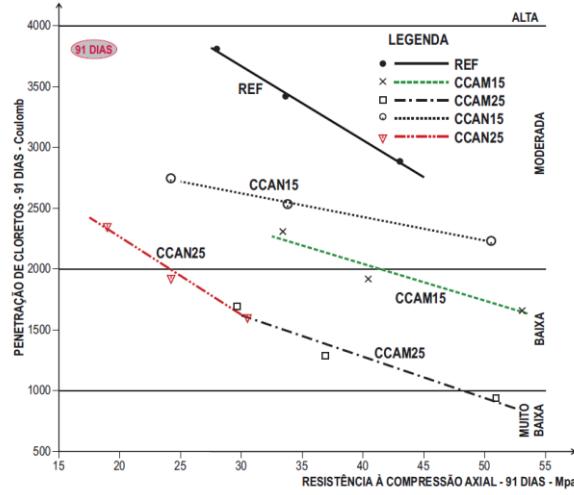


Figura 8 - Penetração de cloreto e resistência à compressão a 91 dias

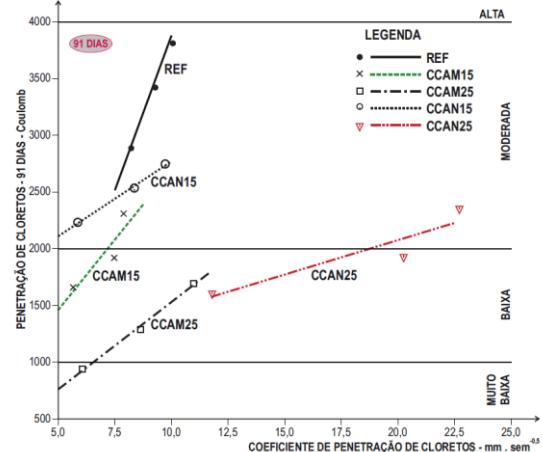


Figura 9 - Penetração de Cl^- e coeficiente de penetração de Cl^-

4.3 Resistividade aparente e condutividade elétrica específica

O ensaio de resistividade elétrica aparente foi realizado conforme ASTM G57 adaptado para concreto por Wenner (método dos quatro eletrodos). Foram moldados CPs prismáticos 10x10x17 cm ensaiados a 3, 7, 14, 28, 56 e 91 dias. A condutividade elétrica específica foi calculada pela composição iônica dos poros dos íons: Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , OH^- e SO_4^{2-} , conforme Shi et al.(1998). A Figura 10 relaciona a resistividade elétrica aparente e as resistências à compressão axial a 91 dias. No gráfico consta ainda a classificação proposta pelo CEB-FIP (1992) quanto à probabilidade de corrosão da armadura.

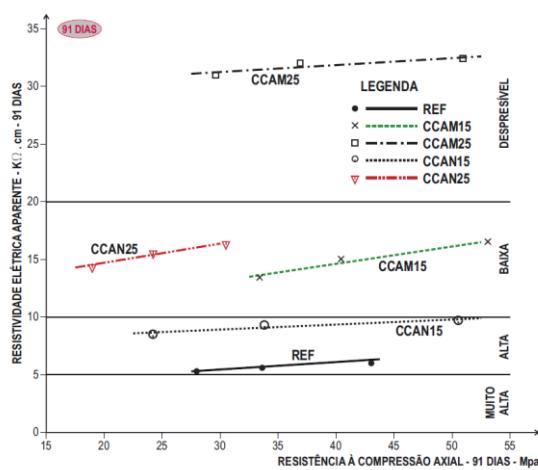


Figura 10 Resistividade elétrica aparente e resistência à compressão axial a 91 dias.

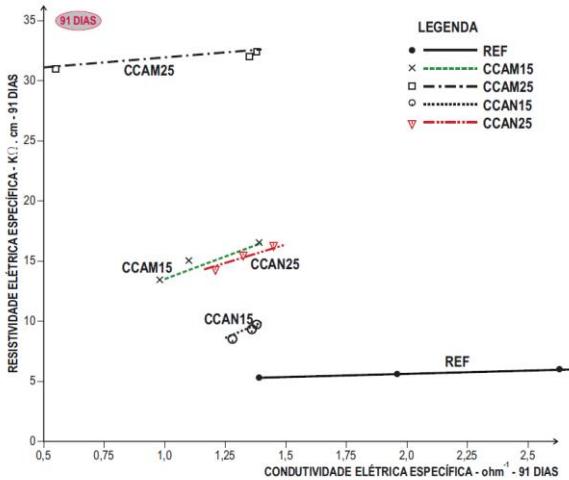


Figura 11 Resistividade elétrica aparente e condutividade elétrica específica, a 91 dias.

Todas as misturas com CCA apresentaram resistividade mais alta do que as REF, revelando o benefício desta adição mineral no combate à corrosão. As misturas N15 se enquadram dentro da categoria de probabilidade alta ($\approx 9 \text{ K}\Omega\text{cm}$) enquanto as demais se situaram entre baixa (M15 e N25) e desprezível (M25). Observa-se que o aumento do teor de CCA natural e moída diminui a resistividade, devido ao refinamento dos poros resultante das reações pozolânicas. As retas da Figura 10 se posicionam quase horizontalmente em relação às abscissas revelando que a resistividade depende menos da resistência à compressão e mais da composição iônica. A Figura 11 relaciona a resistividade e a condutividade elétrica onde todas as misturas, com exceção das REF, apresentaram condutividade elétrica específica inferior a $1,5 \text{ ohm}^{-1}$, com valores muitos similares para os traços com CCAM e

CCAN. Como nas figuras 9 e 10, observa-se que a resistividade elétrica aparente não se relaciona diretamente com a condutividade específica porque são medidas de modos distintos, a primeira diretamente e a segunda por cálculo a partir da concentração dos íons presentes na solução dos poros.

4.4 Permeabilidade ao oxigênio e absorção capilar de água

Os ensaios de penetração de oxigênio e de absorção de água capilar foram executados de acordo com o método RILEM TC 116-PCD (1999) em CPs de dimensão 15x30 cm e serrados em fatias de 15x5 cm, em função das dimensões das células de difusão ao O₂. A Figura 12 mostra os coeficientes de permeabilidade ao O₂ e as resistências à compressão axial a 91 dias, juntamente com a classificação dos concreto de acordo com Lee et al (1997).

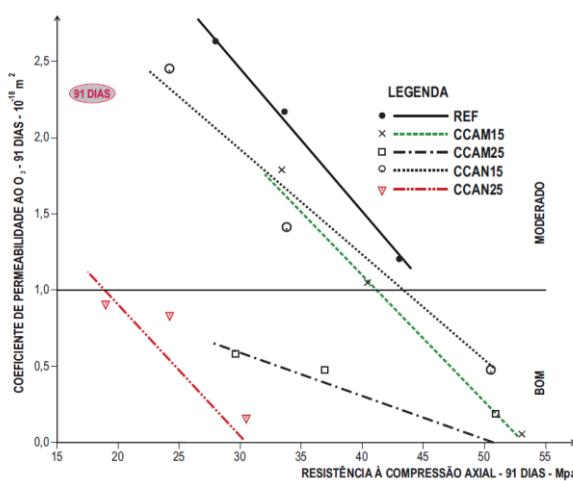


Figura 12 Coeficientes de permeabilidade ao O₂ e resistência à compressão axial a 91 dias

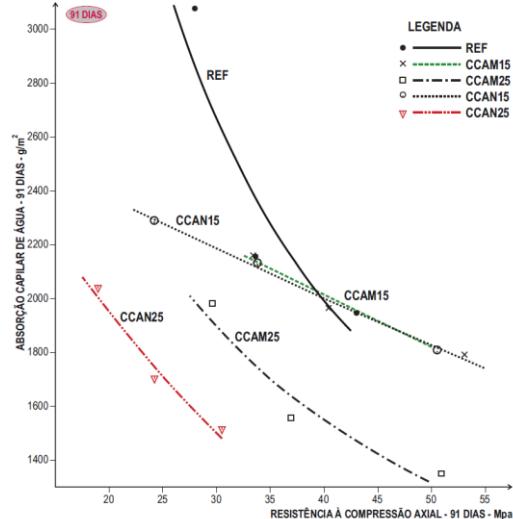


Figura 13 Absorção de água capilar e resistência à compressão axial a 91 dias.

A Figura 12 mostra que todas as misturas com CCA tiveram coeficientes de permeabilidade ao O₂ inferiores ao concreto REF, tão menores quanto maior foi o teor de substituição de cimento, denotando que o efeito do refinamento dos poros e obstrução física das partículas da CCA são eficientes para diminuir o fluxo deste fluido. As misturas M15 e N15 tiveram comportamentos similares, quase superpostos, permanecendo entre as classificações bom e moderado, enquanto que as M25 e N25 ficaram na faixa de desempenho bom. O desempenho das misturas quanto à absorção capilar de água é semelhante ao dos coeficientes de permeabilidade ao O₂, com as mesmas posições relativas no gráfico em relação à evolução dos efeitos da capilaridade com a resistência à compressão. Este comportamento está relacionado com os mecanismos de transporte dos fluidos que, em ambos os casos, dependem da conectividade e continuidade dos poros.

5 CONCLUSÃO

O estudo de viabilidade da substituição de 15% e 25% de cimento por CCAM e CCAN em concreto estrutural mostrou que as resistências à compressão axial dos traços M15, M25 e N15 permitiram a obtenção de níveis de resistência 25 MPa, 30 MPa e 40 MPa. Os consumos de cimento foram inferiores ao concreto de referência. As resistências dos traços N25 somente alcançaram o patamar 25 MPa com consumo de cimento elevado, tornando-o economicamente inviável. Para as propriedades da durabilidade estudadas: carbonatação, permeabilidade ao O₂, absorção de água o desempenho das misturas com cinza natural foi melhor do que com cinza moída. Para as propriedades penetração de cloreto, resistividade e condutividade elétrica, permeabilidade ao ar e água, a cinza moída apresentou melhor desempenho, entretanto, para os traços N15 as diferenças não são significativas. Os resultados permitem concluir que existe viabilidade de utilização de 15% de CCAN, sem moagem, em substituição ao cimento, em concreto para fins estruturais. Os desempenhos para esse teor foram, de modo geral, iguais ou um pouco mais baixos do que aqueles para misturas com CCAM, a 91 dias,

entretanto ainda dentro de parâmetros considerados adequados para estruturas convencionais. O teor de 25% de CCAN não foi técnica e economicamente viável para uso em concreto.

6 REFERÊNCIAS

- COMITÉ EUROTINTERNATIONAL DU BÉTO – CEB – FIP. **Durable concrete structures: Design guide.** London: Thomas Telford, 1992.
- FENG, QINGGE ET AL. Efficiency of highly active rice husk ash on the High-strength concrete. In: International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC), 11, 2003, Durban, Africa do Sul. **Proceedings.** The Cement and Concrete Institute of South Africa, 2003.
- HO, D. W. S., LEWIS, R. K. Carbonation of concrete and its prediction. **Cement and Concrete Research**, v. 17, n. 3, p. 489-504, 1987.
- ISAIA, G. C. **Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura.** São Paulo, 1995. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1995.
- ISAIA, G. C., GASTALDINI, A . L. G., MEIRA, L., DUART, M., ZERBINO, R. Viabilidade do emprego de cinza de casca de arroz natural em concreto estrutural. Parte I: propriedades mecânicas e microestrutura. **Ambiente Construído.** Porto Alegre, v. 10, n. 1, p. 37-49, 2010.
- 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 and Concrete Composites**, Barking, Essex, England, v. 25, n. 1, p. 65-72, 2003.
- LEE, C. Y., MACCARTHY. M.J., DHIR, R. K. Intrinsic permeability of fly ash concrete. In: Malhotra, V. M. (ed.) International Conference on Durability of Concrete, 4th, Sydney, 1997. **Proceedings.** American Concrete Institute, 2 v., v. 1, p. 247-266 (SP-170).
- MEHTA, P. K. Rice husk ash – A unique supplementary cementing material. In: MALHOTRA, V. M. (ed). **Advances in Concrete Technology.** MSL Report 94-1 (R) CANMET, 1994.
- MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais.** 3 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2008.
- REGO, J.H.S. Caracterização do resíduo cinza de casca de arroz (CCA) no Brasil. In: Jornadas Sud-Americanas de Ingeniería Estructural, 2004, Mendoza-Argentina. **Anais.** Mendoza, Argentina: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, 2004. 1 CD-ROM.
- RILEM. Recommendation of TC 116-PCD. Tests for gas permeability of concrete. **Materials and Structures.** V. 32, n. 217, p. 163-179, abril 1999.
- SENSALE, G. R. Strength development of concrete with rice-husk ash. **Cement and Concrete Composites**, v. 28, n. 2, p. 158-160, 2006.
- SHI, C.; STEGEMANN, J.A.; CALDEWELL, 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**, v. 95, n. 4, p. 389-394, Farmington Hills, 1998.
- TUUTI, K. **Corrosion of steel in concrete.** Swedish Cement and Concrete Research Institute. Stockholm, Sweden, 1982. 469p.

7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq - Programa PROSUL, pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa, e à CAPES, FAPERGS e CNPq, pelas bolsas ofertadas. Este projeto teve a coordenação geral do primeiro autor deste trabalho e, como coordenadores locais, o Prof. Dr. Raúl Zerbino do LEMIT-CIC, La Plata, Argentina e da Profa. Dra. Gemma Sensale da Facultad de Ingeniería da Universidad de La República, Montevideo, Uruguay.