

## AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DIMENSIONAL E DA DURABILIDADE DE ARGAMASSAS CONFECCIONADAS COM ADIÇÃO DE CINZA DA CASCA DA CASTANHA DE CAJU

Sofia Araújo Lima  
Departamento de Engenharia Civil, DECiv/UFSCar  
Rod. Washington Luís, km 230, São Carlos, SP  
sofiaalima@yahoo.com.br

João Adriano Rossignolo  
Escola de Engenharia de São Carlos – EESC, USP  
Av. Trabalhador Sancarlense, 400, São Carlos, SP  
jarossig@sc.usp.br

### RESUMO

As cinzas ocupam lugar de destaque entre os resíduos agroindustriais por resultarem de processos de geração de energia. Muitas cinzas possuem atividade pozzolânica, podendo ser utilizadas como adição mineral em matrizes cimentícias, como é o caso da cinza da casca de castanha de caju (CCCC), investigada por este trabalho. A atividade pozzolânica caracteriza-se pelo consumo do hidróxido de cálcio (CH) residual pela adição mineral pozzolânica. Sendo a carbonatação um fenômeno que ocorre quando os produtos da hidratação da matriz, principalmente o CH, reagem com o CO<sub>2</sub>. Tal análise permite determinar a quantidade de CH residual que não foi utilizado pela reação pozzolânica, o que determina a durabilidade dos materiais confeccionados com tais adições. Por essa razão, neste trabalho, o método colorimétrico foi utilizado para analisar a profundidade da carbonatação (PC) de corpos-de-prova cilíndricos com substituição de cimento Portland por CCCC. Paralelamente, para entender como se procede a retração por secagem em argamassas com substituição de cimento Portland por CCCC, foram analisados corpos-de-prova (40x40x160mm) aos 14, 28, 56 e 119 dias, divididos em 3 grupos distintos: no Grupo REFERÊNCIA foram moldados traços de acordo com a NBR 12650/92; as amostras do Grupo A foram moldadas com a CCCC moída durante 1 hora; no Grupo B a CCCC foi moída e peneirada. Os resultados apontaram para uma PC 4 vezes maior dos corpos-de-prova com 30% de CCCC em relação aos de referência aos 90 dias, e 6 vezes maior aos 180 dias. Em relação a retração por secagem, os resultados mostraram que a evolução nas primeiras idades foi superior nas amostras que utilizaram CCCC em substituição ao cimento Portland. Para o grupo A, o traço M30 apresentou valores de retração superior ao traço controle em 87% aos 56 dias. No grupo B essa mesma diferença ficou em mais de 130%. Os resultados mostraram que a substituição de cimento Portland por CCCC não retardou o processo de carbonatação e que, para idades de até 56 dias, houve um aumento nos valores de retração por secagem.

Palavras-Chave: Retração por secagem, Carbonatação, Pozzolanicidade, Adições minerais, Cimento Portland.

### ABSTRACT

Among processes which there are in hydration reactions of Portland cement, the shrinkage includes all the main mechanisms which leads, mainly, to the loss of water by drying process. Ashes have got a prominent place among the agro-industrial wastes because they result from energy generation process, and what's more, most ashes have pozzolanic activity, and might be used as cement replacement material, such as cashew nut shell ash (CCCC). Pozzolanic activity is activity is characterized by the consumption of lime (CH) by adding pozzolanic mineral admixtures. Carbonation is a reaction that occurs when the cement hydration products of the matrix, mainly CH, react with CO<sub>2</sub>. Such analysis can determine the amount of residual CH was not used by the pozzolanic reaction, which may determine the durability of the materials made by such admixtures. Therefore, in this work the colorimetric method was used to analyze the depth of carbonation of solid samples with CCCC as cement Portland replacement. For characterizing long-term drying shrinkage in mortars with CCCC as cement replacement, samples (40x40x160mm) were analyzed at 14, 28, 56 e 119 days, in three different groups: Group REFERÊNCIA, based on the method of NBR 12650/92; Group A, the samples were made with ground CCCC for one hour; and at Group B, the CCCC was ground and sieved. The carbonation results pointed to a carbonation depth 4 times higher in 30-percent samples with in relation to the reference at 90 days, and 6 times higher at 180 days. The results also shown that shrinkage at early ages was highest in samples which used CCCC as cement replacement. For A group, the 30-percent sample had a shrinkage value increased 87% in comparison with reference sample at 56 days. For B group, this same sample increased 130%. The results showed that the cement Portland replacement for CCCC increased the carbonation and, for ages up to 56 days, the drying shrinkage was also increased.

Keywords: Drying shrinkage, Carbonation, Pozollanicity, Mineral admixtures, Portland cement.

### 1. INTRODUÇÃO

Os subprodutos de origem vegetal, notadamente os subprodutos agroindustriais, resíduos ou cinzas processadas, vêm sendo estudados para utilização como combustíveis, fertilizantes e estabilizantes de solos. A reciclagem desses resíduos é hoje uma necessidade para a preservação do meio ambiente e redução do custo e do consumo de energia na produção de materiais e componentes de construção. A construção civil, pelo expressivo volume físico de materiais que incorpora, apresenta grande potencial para utilização de materiais reciclados [1].

Segundo Cincotto [2], a potencial utilização de resíduos agroindustriais na obtenção de novos materiais para a construção civil se deve basicamente a: i) necessidade de redução do custo da construção; ii) elevada quantidade de matéria

prima de recursos naturais que é consumida; iii) preocupação com o esgotamento dessas reservas naturais.

Cabe salientar que alguns tratamentos, visando à reutilização, já estão sendo empregados em resíduos agroindustriais, como a incineração (utilização como combustível), no entanto, esses processos geram outros subprodutos (pós, cinzas, lodos e escória), obrigando os produtores a descartarem esses últimos resíduos em aterros.

As cinzas são resíduos gerados por processos industriais ou agroindustriais, ou se originam da queima de outros resíduos, devido à reincorporação destes no processo. Pode ser citado como exemplo, a casca de arroz, resíduo incinerado para obtenção de energia, e que gera a cinza da casca de arroz, um outro subproduto.

Segundo John et al. [3], em princípio, qualquer cinza vegetal, predominantemente siliciosa, que possa ser produzida no estado amorfo e com finura adequada, pode ser utilizada como adição mineral. Sua reatividade vai depender da composição química, fortemente influenciada pelo produto que gerou a cinza, pelo solo e pelo processo da produção da cinza. Uma vez que contenham elevado teor de sílica podem ser de utilização viável como adições minerais. Outro fator relevante referente às adições minerais, deve-se à sua composição física (estado amorfo ou cristalino), e caso apresentem reatividade em meio aquoso com o CH (hidróxido de cálcio), resultando em endurecimento, podem ser utilizados como adição mineral pozolânica [3].

O Estado de São Paulo é um dos maiores produtores de cinzas residuais do Brasil, uma vez que é responsável por um terço do PIB agroindustrial desse país [4]. O Estado produz anualmente cascas de amendoim, bagaço de cana-de-açúcar, palha de arroz, folhas de milho, entre outros. Todos esses resíduos são potencialmente fontes de cinzas que podem ser convertidos em adições para cimento, seja como adição pozolânica ou como filler.

As cinzas da casca de arroz e do bagaço da cana-de-açúcar têm sido objeto de estudo de várias pesquisas, quanto ao seu aproveitamento como substituto ao cimento Portland em matrizes cimentícias [5-9]. Sobre as cinzas da castanha-do-pará, do amendoim e da mamona foram encontrados também alguns estudos na literatura [2, 10, 11]. Entre as cinzas ainda não estudadas, objetivando-se a utilização na construção civil, a casca da castanha de caju é a de maior produção no país e a única que não necessita de calcinação depois de finalizado o processo industrial.

## 1.1. A CINZA DA CASCA DA CASTANHA DE CAJU

Nesta pesquisa, utilizou-se como objeto de estudo a cinza da casca da castanha de caju (CCCC), resíduo final da produção de amêndoas de caju.

O caju é um fruto típico de países de clima tropical, sendo formado por um pedúnculo carnoso, de onde se obtém o suco,

e pelo fruto verdadeiro, a castanha de caju (ou simplesmente castanha), de onde se extrai o principal produto de consumo, a amêndoa [12]. A CCCC representa aproximadamente 5% do peso da castanha inicial e com a atual produtividade da cajucultura, a geração de cinzas pode chegar até 15.000 toneladas por ano.

Várias instituições brasileiras encontram-se desenvolvendo pesquisas que tratam do aproveitamento dos derivados do caju. Quanto ao Estado do Ceará, segundo Paiva et al. [12], detém, no Brasil, juntamente com os estados do Piauí e Rio Grande do Norte, a produção e a exportação da castanha de caju, ocupando com a cultura do caju, metade das áreas cultiváveis pela agroindústria no Nordeste do Brasil. A castanha de caju apresenta-se como o primeiro produto de exportação do Estado do Ceará, que se destina, tradicionalmente, ao mercado externo, gerando em média, divisas na ordem de 150 milhões de dólares anuais. O maior consumidor mundial de amêndoas de castanha são os Estados Unidos, que as consome principalmente como petiscos - snacks [13].

## 1.2. A REAÇÃO POZOLÂNICA E A CARBONATAÇÃO

O uso de adições minerais pozolânicas nas matrizes cimentícias tende a aumentar a durabilidade das mesmas, ao diminuir-lhes o teor de hidróxido de cálcio livre (CH) [14]. Tem-se por reação pozolânica o consumo lento do CH livre após hidratação do cimento anidro, pelo material pozolânico gerando C S H (silicato de cálcio hidratado) adicional. Sabe-se que o C-S-H é o principal produto da hidratação cimentícia [15]. Tal reação pode ser simplificada representada pela Equação 1 [16].



O teor de CH pode ser considerado indesejável por influenciar muito pouco na resistência à compressão final na matriz cimentícia no estado endurecido, como também pela afinidade que o CH apresenta com o CO<sub>2</sub> presente no ar [17]. Os estudos sobre a carbonatação têm crescido nos últimos anos, por ser um dos métodos de determinação da durabilidade de materiais à base de cimento Portland, principalmente das peças armadas [14, 18].

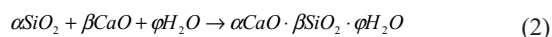
Apesar da discussão do comportamento das matrizes cimentícias serem baseadas, na maioria das vezes, na aceitação de que o ar do meio ambiente não reage com a pasta de cimento hidratada, o gás carbônico (CO<sub>2</sub>) apresenta-se como um agente deletério, ao transformar-se em ácido carbônico. A ação do CO<sub>2</sub> ocorre mesmo em ambientes rurais, onde seus teores ficam em torno de 0,03%. Dos componentes da pasta de cimento, o que reage mais rapidamente com o CO<sub>2</sub> é o hidróxido de cálcio (CH), resultando em CaCO<sub>3</sub> [17].

Para Atis [19], a carbonatação é um fenômeno que ocorre entre a portlandita e o CO<sub>2</sub> presente no ar, e que tal reação depende diretamente da umidade relativa do ar, da concentração de CO<sub>2</sub>, da pressão de penetração e da temperatura do meio ambiente. O CH, no entanto, sofre carbonatação ao mesmo tempo em que o C S H [20]. De acordo com Rilem [21], a car-

1. O hidróxido de cálcio aparece também denominado por este trabalho como Portlandita, símbolo P.

bonatação é “a neutralização da fase líquida intersticial de hidróxido de cálcio, e de outros compostos alcalinos hidratados, presentes na pasta de cimento, pelo agente dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)”.

A reação que define a carbonatação do CH pode ser representada na Equação 2.



Segundo Hobbs [22] o fator água/cimento interfere significativamente na porosidade e permeabilidade da profundidade da carbonatação. Uma vez que a relação água/cimento é responsável pela determinação do tamanho, quantidade e continuidade dos poros presentes na matriz cimentícia, reduzindo-se essa relação, há uma diminuição da profundidade da carbonatação [19].

Pelos motivos apresentados, tem-se que as matrizes cimentícias com menores teores de CH são menos atingidas pela carbonatação, por possuírem menor porosidade e, conseqüentemente, maior densidade, apresentando maior durabilidade frente a agentes agressivos [23, 24].

Considerando-se que o elevado teor de incorporação de ar observado nos corpos-de-prova, com substituição de cimento Portland por CCCC [25], apresenta-se diretamente proporcional ao grau de porosidade de argamassas e concretos, tornou-se necessária a avaliação da durabilidade de corpos-de-prova com adição de teores variados de CCCC pelo ensaio de carbonatação.

### 1.3. A RETRAÇÃO POR SECAGEM

A saída da água da matriz de cimento conservado em ar não saturado causa a retração hidráulica ou por secagem [20]. Segundo Melo Neto [26], a retração por secagem ocorre após o fim da pega, devido a redução dimensional causada pela evaporação da água do poro da matriz cimentícia. Em ambientes com umidade abaixo de 100%, ocorre a perda de água da matriz e a conseqüente retração [27].

Associada à retração por secagem, ocorre a retração autógena, definida como a “diminuição do volume sob temperatura constante, e sem perda de umidade da matriz cimentícia para o meio ambiente, causada pela redução da umidade relativa no interior dos poros em decorrência da evolução na hidratação do cimento”. Este mecanismo também é conhecido como autosssecagem [27].

Dependendo do volume de água que sai da matriz, a tensão causada pela retração por secagem pode ser prejudicial ao equilíbrio dos produtos cimentícios por interferir nas reações de hidratação [28]. Uma retração excessiva, quando não controlada adequadamente pode causar fissuras deletérias e a desintegração do concreto [29].

O uso de adições minerais promove o aumento da durabilidade das matrizes cimentícias ao diminuir a carbonatação e a fissuração por retração, principalmente, devido a menor permeabilidade e teor de CH nas mesmas [30]. Durante as análises de caracterização química e física da cinza da casca de castanha de caju - CCCC [31] objetivando seu uso como adição mineral cimentícia, observou-se, incorporado às argamassas,

o alto teor de ar incorporado, bem como os baixos valores de resistência à compressão [25]. Por tais fatos, considerou-se importante a avaliação da retração por secagem e da carbonatação em matrizes cimentícias com a substituição de cimento Portland por CCCC.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Apresenta-se, neste item, a metodologia empregada para avaliação da estabilidade dimensional e da durabilidade em argamassas confeccionadas com a cinza de casca de castanha de caju. Estas análises fazem parte de um projeto mais amplo que tem como objetivo estudar a viabilidade do uso da CCCC como adição mineral em matrizes de cimento Portland.

O ensaio de retração por secagem, baseado na NBR 12650 [32] foi utilizado para determinar a estabilidade dimensional das argamassas. Para a determinação dos aspectos relacionados à durabilidade, utilizou-se o ensaio de carbonatação pelo método colorimétrico.

### 2.1. MATERIAIS

Para os ensaios, neste estudo, utilizaram-se os seguintes materiais: Cimento de alta resistência inicial, CP V ARI, com massa específica no valor de 3,12g/cm<sup>3</sup> e massa unitária igual a 1,02g/cm<sup>3</sup>; Areia normal do IPT, segundo as recomendações da norma NBR 7214 [36]; Cinza de casca de castanha de caju (CCCC), cedida pela empresa CIONE - Companhia Industrial de Óleos do Nordeste, localizada em Fortaleza-CE.

A CCCC apresentou 12,17% de sílica (SiO<sub>2</sub>) em sua composição química [Tabela 1], massa unitária no valor 0,56 g/cm<sup>3</sup> e massa específica no valor de 2,23 g/cm<sup>3</sup> [31].

**Tabela 1:** Análise química da CCCC

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
12,17%	1,37%	3,06%	2,15%	24,79%
CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MgO	MnO	TiO <sub>2</sub>
6,54%	10,08%	16,34%	0,29%	0,087%
Perda ao fogo			17,90%	

### 2.2. MÉTODOS

#### 2.2.1. ANÁLISE DA DURABILIDADE: CARBONATAÇÃO

As técnicas de laboratório que podem ser utilizadas para determinar a profundidade da carbonatação incluem desde análise química a análise termogravimétrica. Porém esta pesquisa escolheu um método simples e bastante utilizado, denominado método colorimétrico [14, 15], para se determinar a extensão da carbonatação.

O método consistiu em se tratar uma superfície recém-rompida com solução de fenolftaleína diluída em álcool e água destilada. O CH adquire uma tonalidade rosada (componente básico, pH > 7,0) enquanto a parte que sofreu carbonatação (componente ácido, pH < 7,0) permanece inalterada. Neville

[15] adverte que a cor rosa pode indicar a presença de CH, mas não a ausência total de carbonatação. Sabe-se que a frente de carbonatação não deve ser considerada rígida, mas gradual [14]. Portanto, esse tipo de ensaio deve ser empregado como método comparativo entre amostras e essencialmente qualitativo.

Para a análise da influência do uso da CCCC no teor de carbonatação de matrizes cimentícias, foram moldados 2 (dois) corpos-de-prova para cada amostra, analisados aos 90 e 180 dias.

As amostras do Grupo A foram confeccionadas com teores de CCCC entre 2,5 e 30%, sendo esta moída durante 1 hora no moinho de bolas. O Grupo B obteve o mesmo tratamento do grupo anterior, com a diferença de que a CCCC foi passada na peneira nº 200 (abertura 0,075mm), após a moagem, sendo utilizado apenas o material passante.

O teor de água foi determinado pelo índice de consistência (flow table test), no valor entre 220 e 230mm, para os grupos A e B. O fator água/aglomerante do Grupo A foi repetido para o Grupo B para que se pudesse manter fixas todas as variáveis entre esses dois grupos, possibilitando a análise comparativa dos resultados ao término do ensaio. A Tabela 2 apresenta os traços e os materiais utilizados nesse ensaio.

**Tabela 2:** Dados para moldagem dos corpos-de-prova em argamassa para o ensaio de carbonatação:

GRUPOS	AMOSTRAS	MATERIAIS			
		Areia	Cimento	CCCC	a/agl
REFERÊNCIA	P	2,75	1,00	–	0,568
A	M2	2,75	0,975	0,025	0,622
	M5	2,75	0,950	0,05	0,640
	M10	2,75	0,900	0,10	0,614
	M15	2,75	0,850	0,15	0,586
	M20	2,75	0,800	0,20	0,559
	M30	2,75	0,700	0,30	0,570
B	MP2	2,75	0,975	0,025	0,622
	MP5	2,75	0,950	0,05	0,640
	MP10	2,75	0,900	0,10	0,614
	MP15	2,75	0,850	0,15	0,586
	MP20	2,75	0,800	0,20	0,559
	MP30	2,75	0,700	0,30	0,570

Após a moldagem, os corpos-de-prova foram mantidos em seus moldes em câmara seca com temperatura controlada ( $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ) por 24 horas. Ao final deste período foram desmoldados e mantidos em câmara úmida (temperatura de  $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$  e umidade  $95 \pm 5\%$ ), por 27 dias. Após a fase de cura úmida, os corpos-de-prova permaneceram em ambiente de laboratório até a data de análise, nas idades acima mencionadas.

## 2.2.2. ANÁLISE DA ESTABILIDADE DIMENSIONAL: RETRAÇÃO POR SECAGEM

Para entender como se procede a retração por secagem em argamassas com substituição de cimento Portland por CCCC, foram analisados corpos-de-prova prismáticos (40x40x160mm) divididos em 3 (três) diferentes grupos.

O Grupo REFERÊNCIA corresponde aos traços estabelecidos pela NBR 12650 [32] onde parte da areia utilizada no traço denominado P (amostra referência) é substituída pelo material pozzolânico em questão, criando-se o traço N (amostra teste).

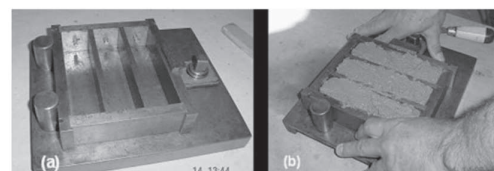
Complementarmente aos traços exigidos por norma, foram propostos outros dois. As amostras do grupo denominado “Grupo A” foram confeccionadas com teores de CCCC entre 2,5 e 30%, sendo esta moída durante 1 hora no moinho de bolas. As do “Grupo B” obtiveram o mesmo tratamento do grupo anterior, com a diferença de que a CCCC foi passada na peneira nº 200 (abertura 0,075mm), após a moagem, sendo utilizado apenas o material passante. Todos os traços utilizados para esse ensaio encontram-se detalhados na Tabela 3.

**Tabela 3:** Dados para moldagem dos corpos-de-prova em argamassa - ensaio de retração:

GRUPOS	AMOSTRAS	MATERIAIS (em massa)			
		Areia	Cimento	CCCC	a/agl
REFERÊNCIA	P	2,75	1,00	–	0,568
	N	2,50	1,00	0,25	0,584
A	M2	2,75	0,975	0,025	0,622
	M5	2,75	0,950	0,05	0,640
	M10	2,75	0,900	0,10	0,614
	M15	2,75	0,850	0,15	0,586
	M20	2,75	0,800	0,20	0,559
	M30	2,75	0,700	0,30	0,570
B	MP2	2,75	0,975	0,025	0,622
	MP5	2,75	0,950	0,05	0,640
	MP10	2,75	0,900	0,10	0,614
	MP15	2,75	0,850	0,15	0,586
	MP20	2,75	0,800	0,20	0,559
	MP30	2,75	0,700	0,30	0,570

A moldagem foi executada segundo as especificações da norma NBR 12651 [33]. Após a moldagem [Figura 1], os corpos-de-prova foram mantidos em seus moldes e colocados em câmara úmida à temperatura de  $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ , por  $22 \pm 2\text{h}$ . Ao final desse período, foram desmoldados e imersos em água saturada com cal, onde permaneceram até a idade de 7 (se-te) dias.

Ao final do período de cura úmida, aos 7 dias, e imediatamente após a medição inicial, os corpos-de-prova permaneceram armazenados na câmara seca à temperatura de  $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 1 :** Ensaio de Retração (a) Forma para moldagem. (b) Moldagem e adensamento.

Decorridos 28 dias de cura em câmara seca, as leituras finais, exigidas pela NBR 12650 [32] foram realizadas dentro da própria câmara a fim de se evitarem influências da umidade e da temperatura sobre os resultados. As leituras foram feitas por aparelho de medição com precisão de 1/100mm, conforme Figura 2.





**Figura 2 :** (a) Corpos-de-prova identificados e armazenados em câmara seca de temperatura controlada. (b) Aparelho de medição da retração – Unidade: 1/100mm.

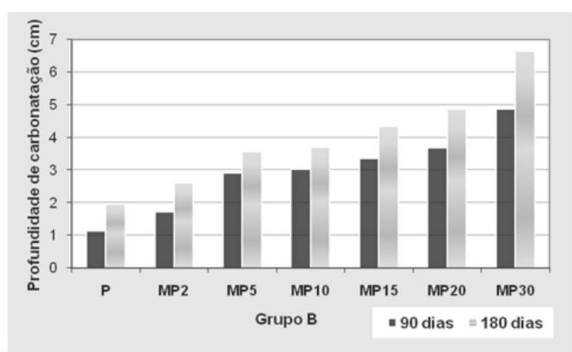
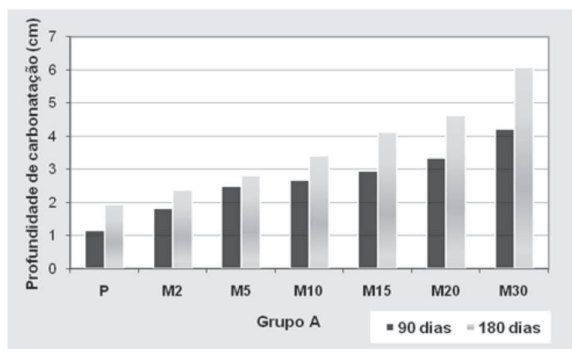
As demais leituras, nas idades adicionais de 14, 56 e 119 dias também foram realizadas nas mesmas condições das anteriores.

### 3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Considerando-se o elevado teor de incorporação de ar no estado fresco observado nos corpos-de-prova com substituição de cimento Portland por CCCC [25], tornou-se necessária a avaliação da durabilidade e da estabilidade dimensional utilizando, respectivamente, os ensaios de profundidade de carbonatação e retração por secagem em corpos-de-prova com adição de teores variados de CCCC.

#### 3.1. AVALIAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

Após o contato com a fenolftaleína, tornou-se bem visível a carbonatação dos corpos-de-prova confeccionados com CCCC [Figura 3].



e Grupo B (cinza moída e peneirada)

Em alguns exemplares, essa carbonatação ocorreu inclusive no interior dos corpos-de-prova (substituição acima de 20%). Tal fato pode ser devido ao alto teor de ar incorporado, aferido no estado fresco, em argamassas com CCCC em substituição ao cimento Portland [25].

Sabe-se que a reação pozolânica das adições minerais tem grande importância na diminuição do avanço da carbonatação em exemplares confeccionados com cimento Portland. Algumas pesquisas com a cinza volante [34, 35] mostraram que os concretos confeccionados com essa adição mineral tiveram um maior avanço da carbonatação quando comparados aos exemplares de referência.

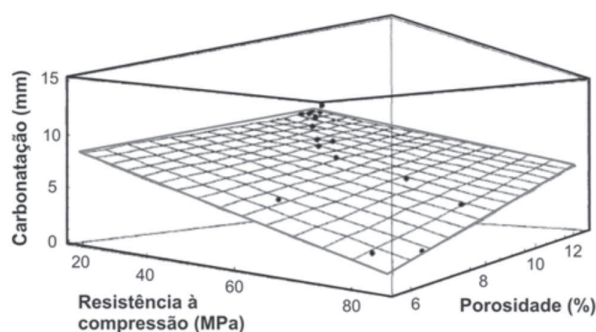
A profundidade da carbonatação aumentou na mesma proporção do teor de cinza volante e do ar incorporado nas amostras. Processo semelhante ocorreu com as argamassas contendo CCCC.

Pode-se observar que a substituição do cimento Portland por CCCC em 30% aumentou mais de 3 (três) vezes a profundidade da carbonatação aos 90 e aos 180 dias, tanto nas amostras do grupo A quanto do grupo B. Em teores menores (até 10% de substituição), a profundidade da carbonatação também se mantém elevada, chegando a valores quase 3 vezes maiores que o da amostra de referência, aos 90 dias.

A porosidade da matriz sofre alterações ao longo do tempo, sob o efeito da carbonatação, pois o volume molar da calcita é maior que o da portlandita [24]. Sendo assim, a velocidade da carbonatação tende a diminuir com o tempo, por causa do fechamento dos poros provocado pelas próprias reações químicas da carbonatação. Talvez por esse fato, tenha ocorrido a diminuição da diferença na profundidade de carbonatação relativa entre os exemplares de referência e os demais com adição de CCCC, na idade de 180 dias.

Nota-se também, que a carbonatação foi maior nas amostras do Grupo B, o que pode ter sido provocado pela maior finura da CCCC. Para esse grupo, pode-se observar maior demanda de água e um maior teor de ar incorporado no estado fresco. Como no ensaio de carbonatação o fator a/c foi mantido constante, a trabalhabilidade apresentou-se menor nas amostras do Grupo B.

Atis [19] estudou a cinza volante e estabeleceu uma relação entre porosidade, carbonatação e resistência à compressão e observou que quanto maior a resistência à compressão, menor a profundidade da carbonatação e menor porosidade [Figura 5].



ida)

**Figura 5:** Esquema tridimensional da relação entre carbonatação, resistência à compressão e porosidade em concretos. Fonte: Atis [19] (adaptado).

Esse estudo confirma o fenômeno que ocorreu nos corpos-de-prova de argamassa moldados com a CCCC, no qual o teor de ar incorporado no estado fresco pode ter contribuído para a porosidade no estado endurecido, facilitando o avanço da frente da carbonatação. Portanto, ao aumento do teor de CCCC em substituição ao cimento Portland, seguiu-se a diminuição da resistência à compressão, bem como o aumento da porosidade e da profundidade da carbonatação.

### 3.2 .AVALIAÇÃO DA RETRAÇÃO POR SECAGEM

A NBR 12650 [32] estabelece a determinação da retração por secagem devido à utilização de materiais pozolânicos por meio da análise de corpos-de-prova com a substituição do agregado miúdo por material pozolânico.

Neville [15] afirma que a maior influência na retração deve ser creditada ao agregado, uma vez que a adição deste restringe a retração que deveria efetivamente ocorrer. Uma vez que para esse ensaio de retração houve a substituição de agregado miúdo (areia normal) por CCCC, tal mudança pode ter favorecido o pequeno aumento no valor da retração para o traço N, denominado “controle”. Portanto, não se podem desconsiderar os efeitos da diminuição do teor de agregado e aumento da CCCC na mistura “controle”.

Os valores obtidos pelas leituras aos 7 e 28 dias, conforme exigido pela NBR 12650 [32] são apresentados na Tabela 4

**Tabela 2:** Resultado - Ensaio NBR 12650 / 9

R <sub>SE</sub> (%)	R <sub>SC</sub> (%)	VR <sub>S</sub> (%)
0,11	0,16	0,05

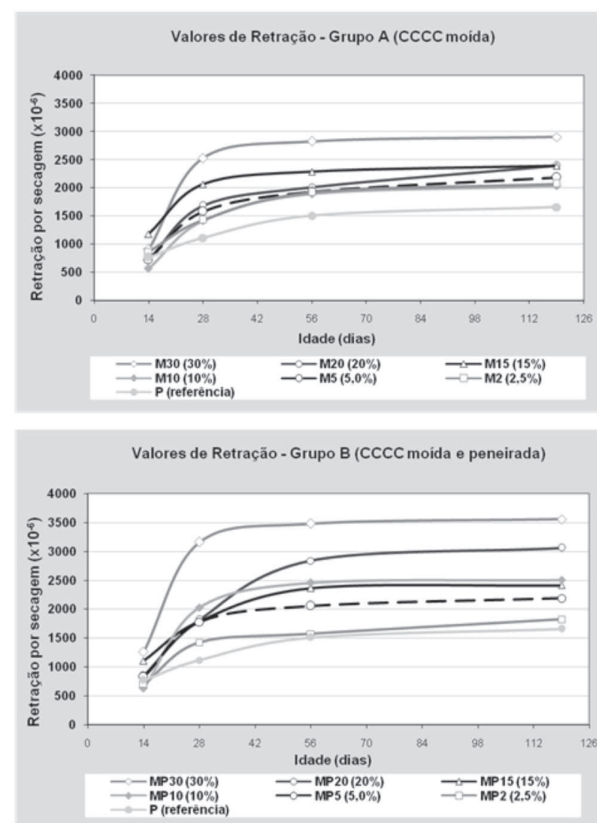
Onde: R<sub>SE</sub> - retração média por secagem das barras da mistura “ensaio” – traço P (%); R<sub>SC</sub> - retração média por secagem das barras da mistura “controle” – traço N (%); e VR<sub>S</sub> - variação da retração por secagem entre as barras da mistura “ensaio” e “controle” (%).

A referida norma, contudo, não estabelece parâmetros comparativos para esses resultados e não possibilita uma análise correta sobre a estabilidade dimensional de corpos-de-prova de argamassas confeccionados com materiais pozolânicos.

Com isso, devido à ausência de informações comparativas, paralelamente às análises de retração segundo a norma supracitada, esta pesquisa determinou outros 12 (doze) traços com o intuito de verificar a influência do teor de substituição de CCCC na retração de corpos-de-prova de argamassas em várias idades. Esses traços foram divididos em 2 (dois) grupos, segundo o tratamento dado à CCCC, e analisados os valores de retração aos 14, 28, 56 e 119 dias. Os resultados encontram-se na Figura 6.

Os resultados indicam que o aumento do teor de CCCC foi diretamente proporcional ao aumento dos valores de ret-

ração, até a idade de 56 dias, em ambos os grupos. No grupo B, onde a CCCC foi moída e peneirada, os valores da retração dos traços MP10, MP15, MP20 e MP30 foram superiores aos respectivos traços encontrados no grupo A. Tal fato pode ser devido a maior finura da cinza utilizada nesses traços. Sabe-se que variações na finura e composição do cimento Portland tendem a influenciar o comportamento da re-tração por secagem de pequenos corpos-de-prova de pasta de cimento ou de argamassa [37].



**Figura 6:** Valores de retração (x106) – Grupo A e Grupo B

Melo Neto et al. [38] estudaram a retração do cimento de escória ativada (CEA), após utilização de vários ativadores, e constataram que a retração do CEA foi maior que a do cimento Portland, e que grande parte desse fenômeno ocorreu até os 7 dias.

A retração por secagem apresentou-se muito mais elevada nos traços confeccionados com CCCC, principalmente em pequenas idades. Para o grupo A, o traço M30 apresentou valores de retração, aos 56 dias, superior em 87% em relação ao traço controle. No grupo B essa mesma diferença fica em mais de 130%.

Apesar do expressivo aumento dos valores de retração em até 28 dias, após esse período, torna-se clara a tendência de estabilização em todos os traços, de ambos os grupos. Os corpos-de-prova confeccionados com altos teores de CCCC (acima de 15%) apresentaram elevado teor de ar incorporado (Figura 5), fato que pode ser determinado principalmente pela excessiva e rápida perda de água do sistema.

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados das análises de profundidade de carbonatação mostraram que o uso de CCCC não retardou o processo de carbonatação em argamassas. Notou-se também que, para altos teores de substituição (acima de 20%) a carbonatação ocorreu inclusive no interior dos corpos-de-prova, principalmente devido ao alto teor de ar incorporado das argamassas confeccionadas com a CCCC. Entendeu-se que o teor de ar incorporado aferido, ainda no estado fresco, favoreceu o aparecimento de poros internamente conectados, no estado endurecido, o que facilitou a difusão do CO<sub>2</sub> até o interior dos corpos-de-prova confeccionados com teores de CCCC acima de 15%.

Os resultados das análises dos corpos-de-prova, submetidos à retração por secagem, indicaram que o aumento do teor de CCCC foi proporcional ao aumento dos valores de retração, até a idade de 56 dias. Os corpos-de-prova confeccionados com altos teores de CCCC (acima de 15%) apresentaram elevado teor de ar incorporado, fato que pode ter sido responsável pela rápida perda de água do sistema, o que aumentou a retração por secagem.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP, pelo apoio financeiro, à empresa CIONE, na pessoa do Sr. Gerardo Aguiar, e ao Laboratório de Construção Civil da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP).

#### 6. REFERÊNCIAS

- [1] M. G. Silva; F. L. S. Souza. Proposta de utilização de resíduos da indústria de celulose e papel e entulho de obra em componentes de construção. VI Encontro de Tecnologia no Ambiente Construído, Rio de Janeiro, 1995. Anais... Rio de Janeiro : ANTAC (1995).
- [2] M. A. Cincotto. Utilização de subprodutos e resíduos na indústria da construção civil. Tecnologia de Edificações. São Paulo, Pini/ IPT (1988).
- [3] V. M. John, M. A. Cincotto, M. G. Silva. Cinzas e aglomerantes alternativos. Tecnologias e materiais alternativos de construção. Campinas, SP : Editora da UNICAMP, p. 145-190 (2003).
- [4] PORTAL DE INVESTIMENTOS DE SP. Agronegócios. Disponível em: <<http://www.investimentos.sp.gov.br/setores/agronegocios.htm>> (2006)
- [5] E. G. A. Freitas. Obtenção de tijolos de solo-cimento com adição de cinzas de bagaço de cana para uso em construção civil. 196f. Dissertação (Mestrado em Eng. Civil) – Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, Brasil (1996).
- [6] J. F. M. Hernández et al. Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: study of the reactions. *Cem Conc Research*. V. 28, p. 1525-1536 (1998).
- [7] J. H. S. Rêgo et al. Estudo de aglomerantes compostos por cimento Portland comum (CPI) e as cinzas de casca de arroz (CCA) amorfa e cristalina. 46º IBRACON. Anais... Florianópolis, Brasil : IBRACON (2004).
- [8] G. C. Cordeiro; et al. Avaliação da reatividade da cinza residual do bagaço de cana de açúcar com cimento Portland e cal. 47º IBRACON. Anais... Olinda, Brasil : IBRACON (2005).
- [9] G. N. Souza; et al. Desenvolvimento de argamassas com substituição parcial do cimento portland por cinzas residuais do bagaço de cana-de-açúcar. 49º IBRACON, 2007, Bento Gonçalves, RS, Brasil. Anais .... São Paulo, SP : IBRACON (2007).
- [10] M. A. Cincotto; R. Z. Kaupatez. Seleção de materiais quanto à atividade pozzolânica. In: *Tecnologia de Edificações*. São Paulo, Pini/ IPT, 1988 p.23-26.
- [11] D. Camelo; et al. Contribuição ao estudo de aproveitamento da cinza da casca da castanha-do-pará como material pozzolânico. 47º IBRACON. Anais... Olinda, Brasil : IBRACON (2005).
- [12] F. F. A. Paiva; et al. Aproveitamento industrial do caju. EMBRAPA/ SEBRAE-CE, 83p. (2000)
- [13] A. Lopes Neto. Agroindústria do caju. Fortaleza: IPLANCE, 263 p. (1997).
- [14] G. Villain, et al. Measurement methods of carbonation profiles in concrete: Thermogravimetry, chemical analysis and gammadensimetry. *Cem Conc Research*. v. 37 p. 1182-1192 (2007).
- [15] A. M. Neville. Propriedades do concreto. São Paulo : PINI (1997).
- [16] M. A. Cincotto. Materiais pozzolânicos. Nota de aula da disciplina “Aglomerantes de argamassas e concretos”. PCC/ EPUSP (2007).
- [17] P. Sulapha, et al. Carbonation of concrete containing mineral admixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE (2003)
- [18] M. G. Richardson. Carbonation of reinforced concrete: Its causes and management. New York: CITIS Ltd, Publishers (1988).
- [19] C. D. Atis. Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash. *Construction and Building Materials*. V. 17, p.147-152 (2003).

- [20] V. M. Silva. Ação da carbonatação em vigas de concreto armado em serviço, construídas em escala natural e reduzida. São Carlos, 2007. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (2007).
- [21] RILEM Concrete Permanent Committee CPC-18. Measurement of hardened concrete carbonation depth. *Materiaux et Constructions*. Vol. 17, n° 102 (1984).
- [22] D. W. Hobbs. Carbonation of concrete containing pfa. *Magazine of Concrete Research*. v. 40, n. 143, p. 69-78 (1988).
- [23] V. M. Malhotra; P. K. Mehta. Pozzolanic and cementitious materials. – (Advances in Concrete Technology, ISSN 1024-5308; vol. 1 (1996).
- [24] T. V. Gerven, et al. Effects of carbonation and leaching on porosity in cement-bound waste. *Waste Management*, vol 27, p. 977–985 (2007).
- [25] S. A. Lima, J. A. Rossignolo. Análise das propriedades mecânicas de argamassas confeccionadas com teores variados de cinza vegetal em substituição ao cimento Portland. XII Encontro Nacional do Ambiente Construído – ENTAC. Fortaleza, CE, Brasil. (2008).
- [26] A. A. Melo Neto. Estudo da retração em argamassa com cimento de escória ativada / Antônio Acácio de Melo Neto. São Paulo, 2002. 161 p. Dissertação (Mestrado) – EPUSP. Departamento de Construção Civil e Urbana, 2002.
- [27] T. C. Powers. The thermodynamics of volume change and creep. *Materiaux et Constructions*. v. 1, n. 6, p. 487-507. 1968.
- [28] M. Y. Han; R. L. Lytton. Theoretical prediction of drying shrinkage of concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 1995.
- [29] S. A. Al-Saleh; R. Z. Al-Zaid. Effects of drying conditions, admixtures and specimen size on shrinkage strains. *Cement and Concrete Research*, v. 36, p. 1985– 1991. 2006.
- [30] R. P. Lothia, R. C. Joshi. Mineral Admixtures. In: V. S. Ramachandran (ed.) *Concrete admixtures handbook – properties, science, and technology*. Building Materials Science Series. 2a. edição. ISBN 0-8155-1373-9, 1995. p. 657-739.
- [31] S. A. Lima, J. A. Rossignolo. Caracterização física e química de cinza vegetal visando aproveitamento como adição mineral em matrizes cimentícias In: VI ENTECA, 2007, Maringá, PR. Anais do IV ENTECA. Maringá, PR: UEM, 2007.
- [32] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 12650 - Materiais Pozolânicos – determinação da variação da retração por secagem devido à utilização de materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 1992.
- [33] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 12651 - Materiais pozolânicos - Determinação da aptidão de materiais pozolânicos em evitar a expansão do concreto devido à reação álcali-agregado - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1992.
- [34] D. W. S. Ho; R. K. Lewis. Car-bonation of concrete incorporating fly ash or a chemical admixture. First International Conference on The Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and other Mineral By-Products in Concrete. *Proceedings...* Montebello, Canada. pp. 333–346 (1983).
- [35] K. Byfors. Carbonation of concrete with silica fume and fly ash. *Nordic Concrete Research*, no. 4, pp. 26–35 (1985).
- [36] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 7214 - Areia normal para ensaio de cimento – Especificação. Rio de Janeiro, 1982.
- [37] P. K. Mehta, P. J. M. Monteiro. *Concreto – estrutura, propriedades, materiais*. São Paulo : PINI, 1994. p. 290-309.
- [38] A. A. Melo Neto, M. A. Cincotto, W. Repette, Drying and autogenous shrinkage of pastes and mortars with activated slag cement. *Cem and Conc Research*, v. 38, p. 565–574, 2008.