



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA – UEPB
CAMPUS VIII - ARARUNA
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIA E SAÚDE
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

JÚLIO LOPES DA SILVA

**INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO
MIÚDO POR PÓ DE GRANITO EM ARGAMASSAS NO PROCESSO
DE CARBONATAÇÃO NATURAL**

Araruna - PB
2017

JÚLIO LOPES DA SILVA

**INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO
MIÚDO POR PÓ DE GRANITO EM ARGAMASSAS NO PROCESSO
DE CARBONATAÇÃO NATURAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual da Paraíba - Campus VIII, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Materiais de Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Baracuy da Cunha Campos.

Araruna - PB
2017

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

S586i Silva, Júlio Lopes da.
Influência da substituição parcial do agregado miúdo por pó de granito em argamassas no processo de carbonatação natural [manuscrito] : / Julio Lopes da Silva. - 2017.
24 p. : il. colorido.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde, 2017.

"Orientação : Prof. Dr. Daniel Baracuy da Cunha Campos, Coordenação do Curso de Engenharia Civil - CCTS."

1. Durabilidade. 2. Argamassa com resíduo. 3. Carbonatação. 4. Planejamento Experimental.

21. ed. CDD 624.153

JÚLIO LOPES DA SILVA

**INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO
MIÚDO POR PÓ DE GRANITO EM ARGAMASSAS NO PROCESSO
DE CARBONATAÇÃO NATURAL**

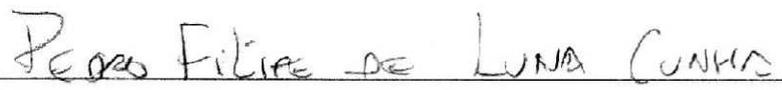
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação em Engenharia Civil
da Universidade Estadual da Paraíba - Campus
VIII, como requisito parcial à obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Materiais de Construção
Civil.

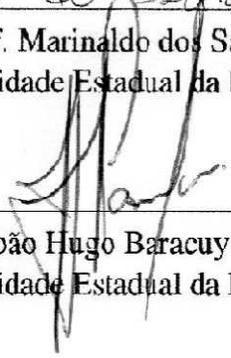
Aprovado em: 06 / 12 / 2017

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Daniel Baracuy da Cunha Campos (Orientador)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)


Prof. Me. Pedro Filipe da Luna Cunha
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)


Prof. Marinaldo dos Santos Júnior
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)


Prof. Dr. João Hugo Baracuy da Cunha Campos
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

Dedico esse trabalho à toda minha família, em especial ao meu pai José Cícero, por todo apoio e principalmente compreensão durante esses anos de curso, além de todos amigos que estiverem próximos durante essa caminhada.
DEDICO

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pelo dom da vida, assim como capacidade de aprendizado e evolução, que vieram a formar a pessoa que sou hoje.

Ao meu pai o Sr. Dedé e minhas irmãs Isabelle e Zaiana Lopes, por todo apoio emocional e incentivo, além de terem acreditado em mim durante esse período de curso.

Ao professor, orientador e amigo Daniel Baracuy, por todo apoio e incentivo acadêmico, por ter confiado em mim durante todo o processo de pesquisa. Agradeço por toda orientação e auxílio necessário durante o curso.

Ao amigo José Arnaldo Pina, por ter compartilhado vários anos de graduação na mesma casa, se tornando praticamente um irmão, sem dúvidas tornaram a distância de casa e familiares no início mais fáceis.

À amigos da graduação, tantos que citar um ou outro não seria justo, agradeço por todas horas de estudo, trabalhos infundáveis e todo companheirismo de todos.

À Brunna Grisi, por ter dado um novo sentido a esse último ano de graduação, obrigado por estar comigo e tornar meus dias mais felizes.

À Larissa Chaves, que sempre acreditou e esteve comigo me dando forças desde o início do curso.

Aos funcionários da UEPB, pela disponibilidade e atendimento quando necessário. Obrigado ao técnico de laboratório Divaldo pelo auxílio em certos procedimentos desse trabalho.

Um agradecimento em especial ao amigo Rubens Max e a Vitória Mochizuki do laboratório TECNOMAT da UFPB, pelo auxílio em um dos ensaios realizados.

E a todas as pessoas que contribuíram direta e indiretamente, que não foram citadas mas não menos importantes, para que eu chegasse ao fim dessa etapa, meu muito obrigado à todos.

"Não importa que você vá devagar, contanto que
você não pare."

Confúcio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	OBJETIVOS	9
2.1	Objetivo Geral	9
2.2	Objetivos específicos	10
3	MATERIAIS E MÉTODOS	10
3.1	Materiais	10
3.2	Métodos	11
3.2.1	Preparação das argamassas	11
3.2.2	Análise da profundidade de carbonatação	13
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	14
4.1	Ambiente Interno	15
4.2	Ambiente Externo	17
5	CONCLUSÃO	21
	REFERÊNCIAS	22

INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO POR PÓ DE GRANITO EM ARGAMASSAS NO PROCESSO DE CARBONATAÇÃO NATURAL

Júlio Lopes da Silva *

RESUMO

Anualmente as empresas de beneficiamento de granito, geram volumes consideráveis de resíduo, os quais em sua maioria não recebem um destino adequado, despertando assim interesse por parte do meio acadêmico em tornar esse material descartado, em algo útil na construção civil. Dentro desse contexto, poucos trabalhos relacionam o comportamento de novos materiais quanto a sua durabilidade frente a manifestações patológicas. Sendo assim o presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência da utilização do resíduo do corte de granito como substituição ao agregado miúdo em argamassas, no processo de carbonatação natural, em ambiente externo e interno a uma edificação. A metodologia adotada consistiu na substituição do agregado miúdo por resíduo de corte de granito, analisando a profundidade de carbonatação com auxílio de uma matriz de planejamento experimental $2^3 + 3$ repetições no ponto central. Foram avaliados a influência do tempo de exposição dos corpos de prova (30, 60 e 90 dias), a porcentagem de resíduo substituído à argamassa (5%, 10% e 15%) e a granulometria do resíduo utilizado (0,3mm, 0,6mm e 1,2mm). Para aferição da profundidade de carbonatação, foi utilizada solução de fenolftaleína a 1% na face cortada dos corpos de prova. Pôde-se observar através do Diagrama de Pareto, que a variável tempo de exposição teve maior influência no processo de carbonatação seguido pela granulometria do resíduo utilizado, também foi analisado que os corpos de prova expostos ao ambiente interno carbonataram mais que os externos. Os corpos de prova expostos em ambiente interno tiveram uma redução na profundidade de carbonatação para a idade de 30 dias de 43,0%, para 60 dias de 28,8% enquanto para 90 dias a redução foi de 24,9%, quando analisado o ambiente externo a redução para 30 dias foi de 16,5%, para 60 dias de 26,8% enquanto para 90 dias a redução de 21,8%. De acordo com a condições analisadas, verificou-se que o resíduo do granito se mostrou benéfico, reduzindo a profundidade de carbonatação.

Palavra-Chave: Durabilidade. Argamassa com Resíduo. Carbonatação. Planejamento Experimental.

1 INTRODUÇÃO

Hoje a indústria da construção civil é responsável pelo emprego em larga escala de uma grande variedades de materiais. Como consequência, acaba por ser uma grande geradora de resíduos, que em sua maioria não recebe um direcionamento correto. Com isso, surge a problemática relativa ao tratamento, reciclagem, reutilização e/ou processamento dos resíduos sólidos gerados que são depositados na natureza, provocando sérios impactos ambientais.

* Aluno de Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Estadual da Paraíba - Campus VIII.
E-mail: engjuliolopes@outlook.com

O reaproveitamento de resíduos deve ser tratado como uma alternativa econômica e ecologicamente viável que favorece um destino definitivo para os resíduos provenientes não só da construção civil, como também de indústrias de mineração, como exemplo a extração de mármore e granito. Durante o beneficiamento das rochas naturais, 25% a 30% são transformados em pó, sendo que no Brasil, estima-se que sejam geradas 240.000 toneladas/ano de resíduos destas rochas. Sem um direcionamento correto, esse pó é depositado em locais totalmente inapropriados, gerando graves impactos ambientais (FORMIGONI, 2006).

Segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004) os resíduos do beneficiamento de granito são basicamente de dois tipos: pedaços de pedras desperdiçadas por possuírem menor qualidade ou pouco valor comercial e o resíduo de granito (RG) também chamado lama granítica que se caracteriza como sendo a massa mineral resultante dos processos de serragem, polimento e corte. Esses resíduos não biodegradáveis são classificados como resíduo classe IIIB – inerte e sem toxicidade. Algumas características específicas do RG, como granulometria fina, composição química predefinida e a inexistência de grãos mistos entre os componentes básicos, favorecem seu aproveitamento e reciclagem na produção de materiais cerâmicos como tijolos, telhas, blocos de concreto (FEITOSA, 2004; LIMA et al. 2010).

Diante disso alguns pesquisadores vêm estudando estas alternativas, tais como adição em materiais cimentícios, como argamassas e concretos. Moura (2002), relata que a adição do Resíduo de Corte de Mármore e Granito (RCMG) em 10% de substituição da areia, apresenta uma elevada resistência à compressão em todas as idades de ensaio, comparados aos valores da argamassa estabelecidos por norma e aos valores encontrados com a adição de 5% de resíduo a mistura.

Matta et al. (2013) utilizaram na produção da argamassa o traço 1:2,6:0,59, onde foi acrescentado a proporção de 5%, 10% e 15% de resíduo de granito em relação à massa de cimento, mantendo a relação de água e cimento, sem adição de aditivos para uniformizar a consistência da argamassa. Os ensaios de resistência mecânica foram realizados nas idades de 3, 7, 28 e 63 dias, verificando a resistência à compressão e a tração dos corpos de prova moldados. A adição de resíduo em substituição de massa de cimento se mostrou benéfica à proporção de 5% apenas, chegando a um aumento de 9% na resistência à compressão, em relação à argamassa tradicional. Para adições superiores a 5% não se mostrou vantajoso, pois o resíduo é composto de partículas de finura elevada, que se aglomeram e retêm a parte da água de amassamento, reduzindo a água disponível para as reações de hidratação do cimento.

Santos (2012) constatou que o reaproveitamento dos resíduos da britagem de granito como agregado em argamassa, reflete positivamente na resistência à compressão e flexão. Mas para se obter um agregado com bom desempenho é preciso classificar o material, sendo necessária a utilização de classificadores para se eliminar as frações mais finas e mais grossas, possibilitando assim as suas aplicações um desempenho aceitável.

Farias Filho (2007) estudou a durabilidade de argamassas alternativas produzidas com resíduos de construção e granito em porcentagens que variou de 30% a 50%, observando que o

resíduo possuía baixa atividade pozolânica, assim como houve comprometimento da durabilidade do material produzido após os 60 dias com redução do comportamento mecânico, sendo o processo de carbonatação como um dos fatores para alteração desse comportamento.

Entretanto, o estudo da aplicação de materiais alternativos em concretos e argamassas demanda uma atenção especial em relação à sua durabilidade, e poucos são os trabalhos que destacam esse assunto. Neste contexto, o efeito da carbonatação apresenta-se como um dos principais problemas de degradação de estruturas de concreto devido à sua ação na despassivação das armaduras.

Partindo do conceito que o concreto é um material de alta alcalinidade, o que confere proteção às armaduras, a carbonatação surge como um dos principais agentes iniciadores da corrosão em armaduras, especialmente em ambientes urbanos, devido a alta concentração de CO_2 . A carbonatação ocorre à partir da reação dos compostos alcalinos do cimento com o dióxido de carbono presente na atmosfera, reduzindo assim a alcalinidade do concreto e enfraquecendo a camada passivadora que protege as armaduras.

Apesar da ação da carbonatação ser danosa a estruturas de concreto, em muitos casos, para um estudo comparativo, Kulakowski (2002) afirma que a investigação em argamassas é mais favorável que em amostras de concreto. Isso se justifica, pois as dimensões e consumo de materiais utilizados em corpos de prova de argamassa são bastante reduzidos e a leitura pode ser mais clara. A tendência é de que o concreto apresente uma profundidade de carbonatação inferior a da argamassa, logo que a fração de agregado graúdo estabelece uma área menor sujeita a poros permeáveis, favorecendo como barreira para o avanço da frente de carbonatação. Além disso, dificuldade de realização de leituras durante o ensaio em concretos pode levar a maior variabilidade das medidas de profundidade de carbonatação, pois o agregado graúdo apresenta porosidade inferior a da matriz composta pela pasta de cimento. A forma do corpo de prova também influencia na propagação da carbonatação, sendo que nos corpos de prova prismáticos, esta frente pode ser menor do que aquela verificada em corpos de prova cilíndricos.

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo propor uma verificação da influência que o pó de granito adicionado em argamassas como substituição ao agregado miúdo tem, no comportamento quanto à profundidade de carbonatação.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência da utilização do resíduo do corte de granito como substituição parcial ao agregado miúdo em argamassas, na penetração de forma natural do CO_2 em ambientes externos e internos de uma edificação.

2.2 Objetivos específicos

- Verificar o comportamento das argamassas com substituição do pó de granito como agregado miúdo e sem adição, frente ao processo de carbonatação natural utilizando indicador de fenolftaleína.
- Analisar a influência dos ambientes internos e externos a uma edificação, no processo de carbonatação natural em argamassas.
- Avaliar os corpos de prova de argamassa com e sem adição, com auxílio de uma matriz de planejamento experimental 2^3 variando o tempo de exposição, granulometria de adição e o percentual de pó de granito adicionado.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item serão apresentados os materiais estudados e os métodos de ensaios utilizados para execução deste trabalho, conforme é detalhado no fluxograma da Figura 1.

Figura 1 – Fluxograma da metodologia utilizada na pesquisa.



Fonte: Próprio autor.

3.1 Materiais

Agregado: Foi utilizado um agregado miúdo, comercializado na cidade de Araruna – PB.

Cimento: Foi utilizado um cimento Portland CP II Z-32 , comercializado na cidade de Araruna - Paraíba.

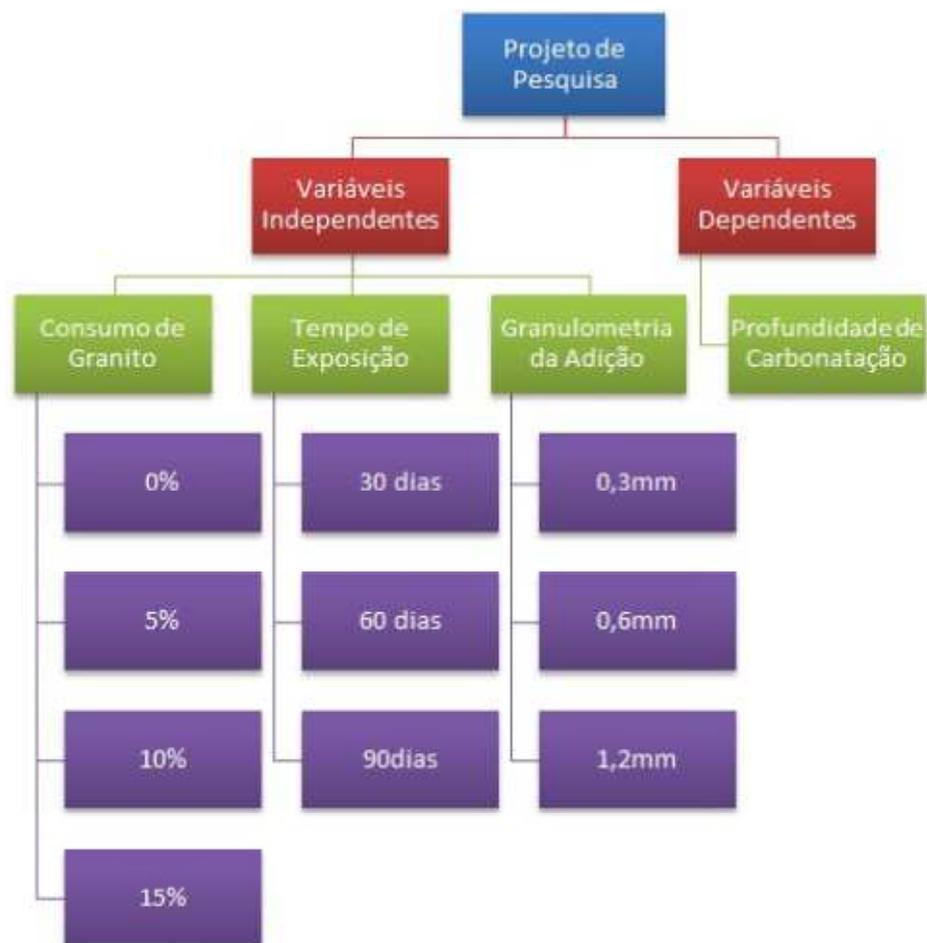
Água: A água utilizada é isenta de impurezas nocivas à hidratação do cimento, como matérias orgânicas e sulfatos, ou seja águas potáveis, obtida da rede de abastecimento do próprio campus.

Pó de Granito: Resíduo da produção de granito adquirido na empresa FUJI S/A Mármore e Granitos, localizada na cidade de Campina Grande-PB.

3.2 Métodos

A execução do presente trabalho consiste nas etapas descritas a seguir, conforme atividades desenvolvidas e ensaios realizados. Foram estudadas quatro tipos de variáveis, sendo três independentes e uma dependente, que são apresentadas na Figura 2.

Figura 2 – Esquema de variáveis do estudo.



Fonte: Próprio autor.

3.2.1 Preparação das argamassas

Neste estudo foram moldados corpos de prova cilíndricos de argamassa com dimensões de 5x10 cm no traço de 1:3 sem substituição do pó de granito com fator a/c de 0,48, conforme NBR

7215 (ABNT, 1996). A partir do traço de referência, foram moldados corpos-de-prova de argamassa com substituição do agregado miúdo por pó de granito em determinadas granulometrias (Figura 3).

Figura 3 – Corpos de prova cilíndricos.



Fonte: Próprio autor.

A verificação da influência que o pó de granito exerce sobre a profundidade de carbonatação nas argamassas com substituição, expostos em ambientes interno e externo, foram realizados através do ensaio de profundidade de carbonatação, de acordo com a matriz de planejamento fatorial do tipo $2^3 + 3$ repetições no ponto central, elaborada e analisada com auxílio do software Statistica 7.0. A matriz de planejamento é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Matriz do planejamento experimental do tipo $2^3 + 3$ repetições no ponto central.

Experimento	Granito (%)	Exposição (dias)	Granulometria substituição (mm)
1	5 (-1)	30 (-1)	0,3 (-1)
2	15 (+1)	30 (-1)	0,3 (-1)
3	5 (-1)	90 (+1)	0,3 (-1)
4	15 (+1)	90 (+1)	0,3 (-1)
5	5 (-1)	30 (-1)	1,2 (+1)
6	15 (+1)	30 (-1)	1,2 (+1)
7	5 (-1)	90 (+1)	1,2 (+1)
8	15 (+1)	90 (+1)	1,2 (+1)
9	10 (0)	60 (0)	0,6 (0)
10	10 (0)	60 (0)	0,6 (0)
11	10 (0)	60 (0)	0,6 (0)

Fonte: Próprio autor.

O processo de cura foi executado pelo método de imersão em água saturada com cal, num período de 28 dias. Para cada ambiente foi realizada uma matriz de acordo com a Tabela 1.

3.2.2 Análise da profundidade de carbonatação

Para o ensaio de carbonatação natural, os corpos de prova de argamassa passaram por uma camada de epóxi na base circular e no topo com intuito de controlar a entrada de CO_2 , em seguida foram deixados em ambiente de laboratório e num ambiente externo sem proteção de intempéries (Figura 4).

O local de exposição é classificado como classe de agressividade ambiental I, por estar situado em zona rural, segundo NBR 6118 (ABNT, 2014).

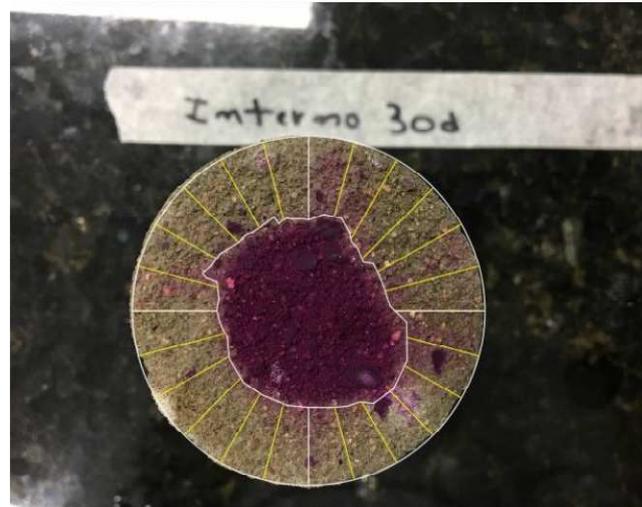
Figura 4 – Corpos de prova expostos em ambiente externo.



Fonte: Próprio autor.

Nas respectivas datas de ensaio, os corpos de prova cilíndricos foram cortados transversalmente, seguidos pelo tratamento da superfície cortada com solução de fenolftaleína a 1% diluída em álcool, conforme procedimento da RILEM CPC-18 (1988). As medidas da frente de carbonatação foram feitas a partir de imagens digitalizadas (Figura 5).

Figura 5 – Imagem digitalizada do corpo de prova para análise da profundidade de carbonatação.



Fonte: Próprio autor.

A frente de carbonatação pode ser percebida pela diferenciação de cor da superfície tratada proporcionada pelo método qualitativo. O hidróxido de cálcio $Ca(OH)_2$ adquire uma tonalidade rosa intenso, enquanto a parte carbonatada permanece inalterada. A cor rosa pode indicar a presença de $Ca(OH)_2$, mas não a ausência total de carbonatação, considerando esta frente de forma gradual (VILLIAN, 2007).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela 2, estão apresentados os dados referentes a profundidade de carbonatação em argamassa padrão sem adição de resíduos.

Tabela 2 – Profundidade de carbonatação para traço de referência.

Exposição (dias)	Interno Profundidade (cm)	Externo Profundidade (cm)
30	1,151 ±0,14	0,662 ±0,07
60	1,420 ±0,17	1,219 ±0,07
90	1,911 ±0,07	1,312 ±0,09

Fonte: Próprio autor.

Observa-se que conforme se aumenta o tempo de exposição dos corpos de prova, há um aumento na profundidade de carbonatação, assim como há também um aumento dessa profundidade para o ambiente interno em relação ao externo. Pulleti (2009) afirma que, para a carbonatação natural, as condições de exposição, como a concentração de CO_2 e a proteção ou não de intempéries, são fatores de grande influência na carbonatação.

4.1 Ambiente Interno

Os dados de profundidade de carbonatação em argamassas com adição de pó de granito expostos em ambiente interno, são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Profundidade de carbonatação média em argamassa com adição de pó de granito em ambiente interno.

Experimento	Granito (%)	Exposição (dias)	Granulometria de substituição (mm)	Profundidade de Carbonatação (cm)
1	5 (-1)	30 (-1)	0,3 (-1)	0,580 ±0,09
2	15 (+1)	30 (-1)	0,3 (-1)	0,886 ±0,07
3	5 (-1)	90 (+1)	0,3 (-1)	1,275 ±0,21
4	15 (+1)	90 (+1)	0,3 (-1)	1,268 ±0,09
5	5 (-1)	30 (-1)	1,2 (+1)	0,596 ±0,12
6	15 (+1)	30 (-1)	1,2 (+1)	0,561 ±0,11
7	5 (-1)	90 (+1)	1,2 (+1)	1,444 ±0,07
8	15 (+1)	90 (+1)	1,2 (+1)	1,751 ±0,08
9	10 (0)	60 (0)	0,6 (0)	0,982 ±0,12
10	10 (0)	60 (0)	0,6 (0)	1,087 ±0,10
11	10 (0)	60 (0)	0,6 (0)	0,965 ±0,09

Fonte: Próprio autor.

Quando comparados ao dados de referência, observa-se que a presença do pó de granito, reduz a profundidade de carbonatação para as idades de trinta dias nos experimentos 1, 2, 5 e 6, em aproximadamente 43,0%. Quando analisamos as idades de sessenta dias temos uma redução na profundidade de carbonatação nos experimentos 9, 10 e 11 de aproximadamente 28,8% e para o tempo de exposição de 90 dias temos que os experimentos 3, 4, 7 e 8 reduziram a profundidade em cerca de 24,9%.

A Tabela 4, apresenta a análise de variância para o modelo apresentado.

Tabela 4 – Análise de variância para a profundidade de carbonatação em ambiente interno.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	GL	Média Quadrática	F_{cal}	F_{tab}	F_{cal}/F_{tab}	R^2
Regressão	1,3853	6	0,23088	14,6899	6,16	2,38	95,06%
Resíduo	0,0629	4	0,01572				
Falta de Ajuste	0,0542	2	0,02708	6,21783			
Erro Puro	0,0087	2	0,00435				
Total	1,4481						

Fonte: Próprio autor.

O Teste F apresenta a razão entre o F calculado e o F tabelado, sempre que esta relação for maior que um a regressão é estatisticamente significativa havendo relação entre as variáveis independentes e dependentes. Para que uma regressão seja não apenas estatisticamente significativa,

mas também útil para fins preditivos, o valor da razão deve ser no mínimo maior que quatro (Barros Neto et al., 1996).

O coeficiente de determinação ou explicação R^2 quantifica a qualidade do ajustamento, pois fornece uma medida da proporção da variação explicada pela equação de regressão em relação à variação total das respostas variando entre 0 a 100% (RODRIGUES & IEMMA, 2005).

O modelo obtido para a profundidade de carbonatação em ambiente interno é apresentado pela equação 1:

$$PF = 1,04 + 0,39 * E + 0,12 * E * G \quad (1)$$

Onde:

PF = Profundidade de Carbonatação (cm)

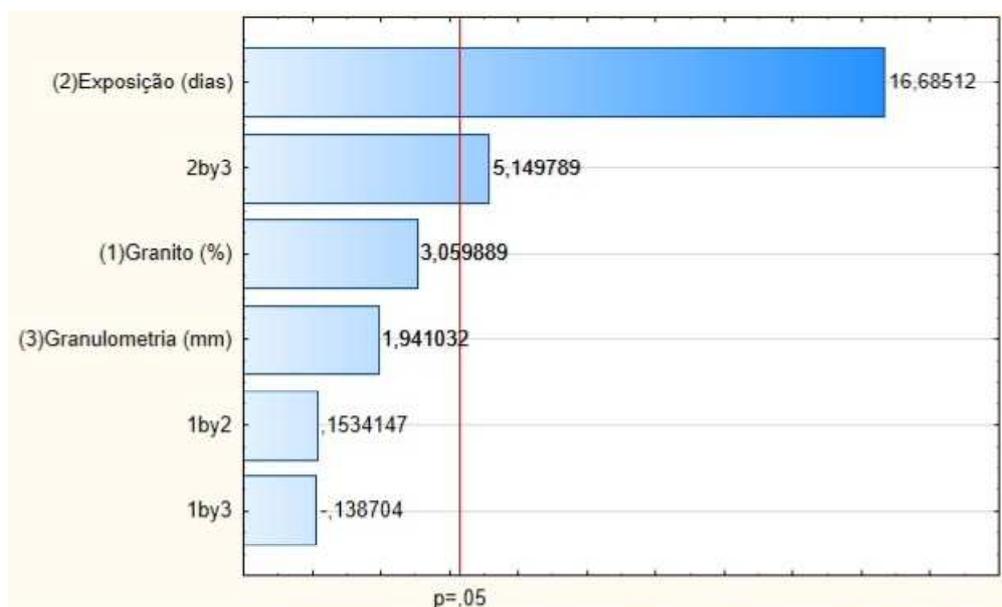
E = Exposição (dias)

G = Granulometria de substituição (mm)

Neste caso, o modelo dos dados apresentados na Tabela 4 tem 95,06% das variações obtidas explicadas pelo modelo e com um valor da razão $F_{calculado}$ e $F_{tabelado}$ de 2,38, indicando que o modelo é estatisticamente significativo.

As análises estatísticas a um nível de significância de 5% mostraram que o tempo de exposição, assim como a interação entre exposição e granulometria da adição são significativos, conforme apresenta o diagrama de Pareto, presente na Figura 6.

Figura 6 – Diagrama de Pareto para interação de variáveis no processo de análise da profundidade de carbonatação.

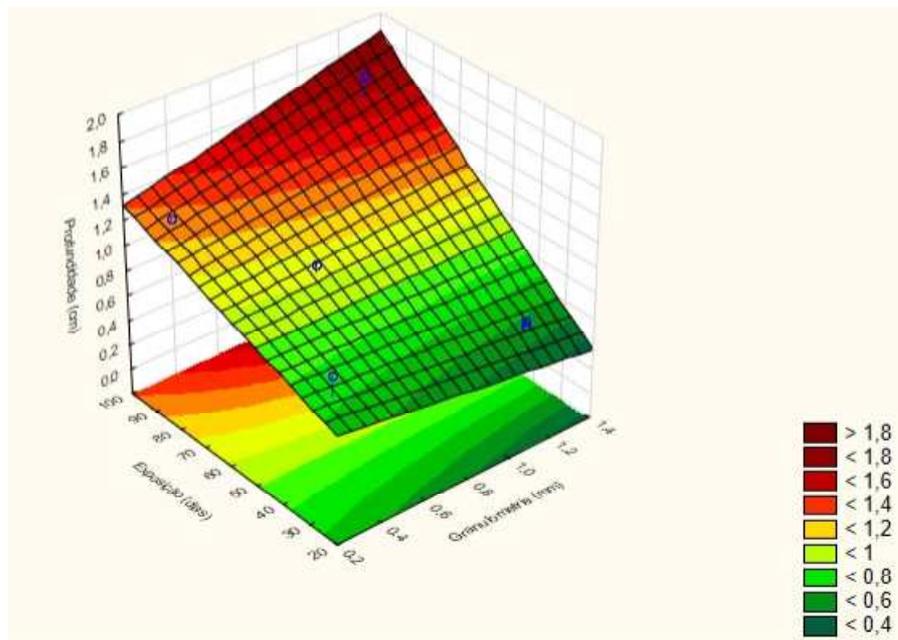


Fonte: Próprio autor.

De acordo com o Diagrama de Pareto, mostrado na Figura 6, verifica-se que a variável com maior influência no processo de carbonatação é o tempo de exposição, e que a interação entre o tempo de exposição e a granulometria da adição apresentam um valor positivo em sua taxa de influência, indicando que com o aumento do tempo de exposição aliado a um aumento da granulometria, há um aumento na taxa de carbonatação dos corpos de prova.

A Figura 7 apresenta a Superfície de Resposta (2^3) para a resposta de profundidade de carbonatação.

Figura 7 – Superfície de resposta para variáveis com maior influencia na profundidade de carbonatação.



Fonte: Próprio autor.

De acordo com a superfície de resposta mostrada na Figura 7, verifica-se que as variáveis independentes, tempo de exposição e granulometria da adição, influenciam aumentando a profundidade de carbonatação, porém, a interação entre elas também é significativa, indicando que quando se diminui o tempo de exposição e a granulometria, diminui também a profundidade de carbonatação.

4.2 Ambiente Externo

Na Tabela 5, são apresentados os dados de profundidade de carbonatação para as argamassas com adição de pó de granito expostos em ambientes externo e desprotegidos de intempéries.

Tabela 5 – Profundidade de carbonatação média em argamassa com adição de pó de granito em ambiente externo.

Experimento	Granito (%)	Exposição (dias)	Granulometria de substituição (mm)	Profundidade de Carbonatação (cm)
1	5 (-1)	30 (-1)	0,3 (-1)	0,534 ±0,10
2	15 (+1)	30 (-1)	0,3 (-1)	0,804 ±0,07
3	5 (-1)	90 (+1)	0,3 (-1)	1,180 ±0,08
4	15 (+1)	90 (+1)	0,3 (-1)	1,045 ±0,11
5	5 (-1)	30 (-1)	1,2 (+1)	0,569 ±0,06
6	15 (+1)	30 (-1)	1,2 (+1)	0,556 ±0,12
7	5 (-1)	90 (+1)	1,2 (+1)	0,888 ±0,10
8	15 (+1)	90 (+1)	1,2 (+1)	0,990 ±0,08
9	10 (0)	60 (0)	0,6 (0)	0,924 ±0,09
10	10 (0)	60 (0)	0,6 (0)	0,910 ±0,12
11	10 (0)	60 (0)	0,6 (0)	0,844 ±0,12

Fonte: Próprio autor.

Assim como os dados de ambiente interno, os dados externos foram comparados ao dados de referência e pôde se observar que a presença do pó de granito reduziu a profundidade de carbonatação para as idades de trinta dias nos experimentos 1, 5 e 6, em aproximadamente 16,5%, analisando as idades de sessenta dias temos uma redução na profundidade de carbonatação nos experimentos 9, 10 e 11 de aproximadamente 26,8% e para o tempo de exposição de 90 dias temos que os experimentos 3, 4, 7 e 8 reduziram a profundidade em cerca de 21,8%.

A Tabela 6, apresenta a análise de variância para o modelo apresentado.

Tabela 6 – Análise de variância para a profundidade de carbonatação em ambiente externo.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	GL	Média Quadrática	F_{cal}	F_{tab}	F_{cal}/F_{tab}	R^2
Regressão	0,4010	6	0,06683	6,2987	6,16	1,02	89,61%
Resíduo	0,0424	4	0,01061				
Falta de Ajuste	0,0388	2	0,01940	0,0000			
Erro Puro	0,0036	2	0,00182				
Total	0,4434						

Fonte: Próprio autor.

O modelo obtido para a profundidade de carbonatação em ambiente externo é apresentado pela equação 2:

$$PF = 0,83 + 0,20 * E - 0,07 * G \quad (2)$$

PF = Profundidade de Carbonatação (cm)

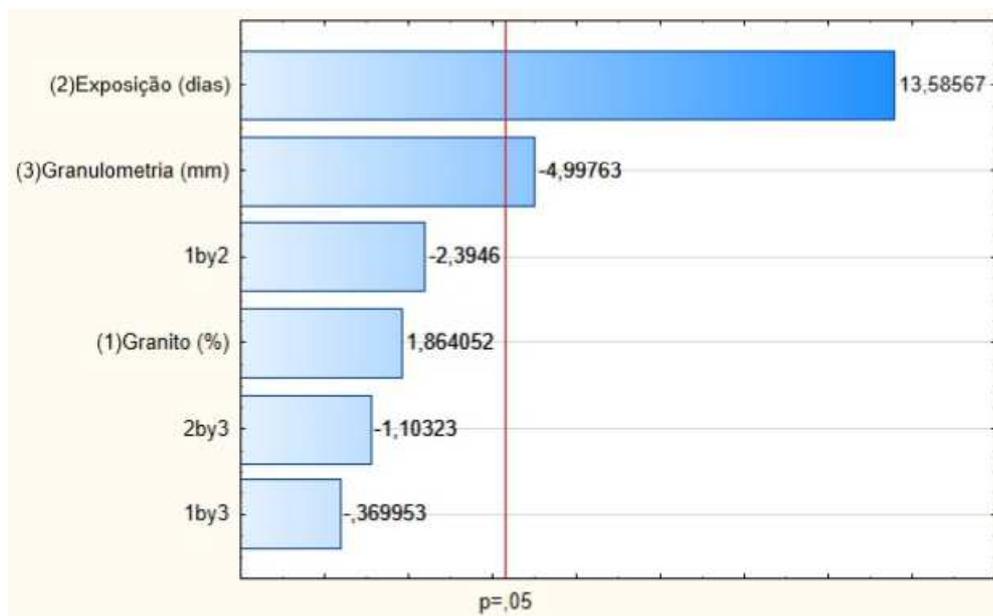
E = Exposição (dias)

G = Granulometria de substituição (mm)

Neste caso, o modelo dos dados apresentados na Tabela 4 tem 89,61% das variações obtidas explicadas pelo modelo e com um valor da razão $F_{calculado}$ e $F_{tabelado}$ de 1,02, indicando que o modelo é estatisticamente significativo.

As análises estatísticas a um nível de significância de 5% mostraram que o tempo de exposição e a granulometria são significativos, conforme apresenta o diagrama de Pareto, presente na Figura 8.

Figura 8 – Diagrama de Pareto para interação de variáveis no processo de análise da profundidade de carbonatação.

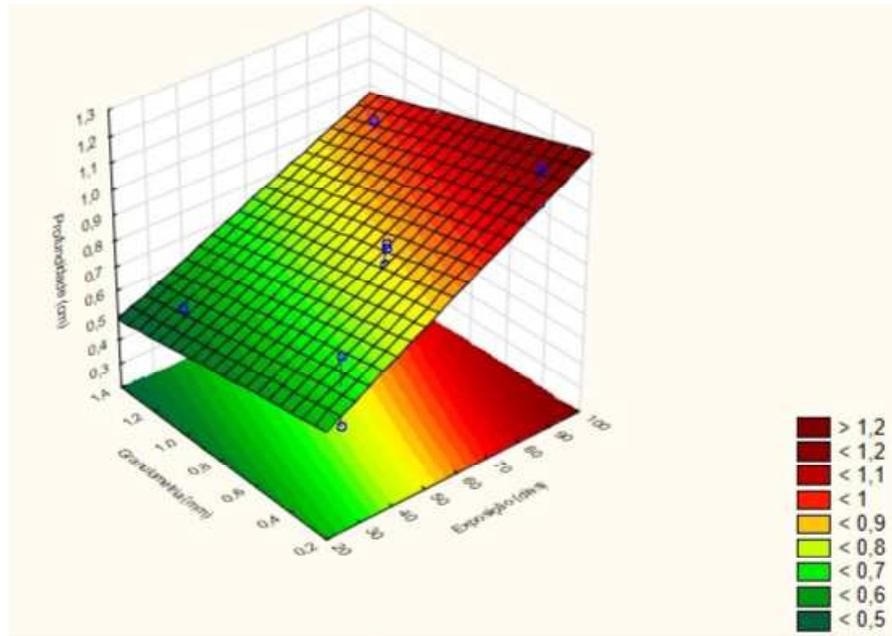


Fonte: Próprio autor.

De acordo com o Diagrama de Pareto, mostrado na Figura 8, verifica-se que a variável com maior influência no processo de carbonatação é o tempo de exposição assim como observado na análise do ambiente interno, além da variável granulometria, que se apresenta como um valor negativo, indicando que conforme se diminui o tamanho dos grãos a profundidade de carbonatação aumenta.

A Figura 9, apresenta a Superfície de Resposta (2^3), para a resposta de profundidade de carbonatação.

Figura 9 – Superfície de resposta para variáveis com maior influencia na profundidade de carbonatação.



Fonte: Próprio autor.

De acordo com a superfície de resposta mostrada na Figura 9, verifica-se que as variáveis independentes, tempo de exposição e granulometria da adição, influenciam aumentando a profundidade de carbonatação, porém, ao contrário do observado anteriormente, a granulometria influencia de maneira inversa, aumentando a profundidade de carbonatação conforme diminui a granulometria do pó de granito.

Estudos feitos por Lima et al., (2011), indicam que o pó de granito referente a Empresa GranFuji S.A. apresenta grande porcentagem de sílica (59,60%), no caso a composição básica de agregados miúdos, porém existe também presenças significativas de alumina (15,31%) e outros óxidos (%25,09).

Os óxidos presentes no pó de granito auxiliam para a manutenção da elevada alcalinidade de argamassas e concretos, sendo a carbonatação que trata de um fenômeno em que o pH do material cimentício é reduzido, ou seja sua alcalinidade é diminuída, devido a reações físico-químicas entre os compostos hidratados do cimento e o CO_2 presente na atmosfera, tendem a deixar concretos e argamassas desprotegidos de ataques de meios agressivos.

De acordo com Neville (2015), cimentos com teor elevado de alumina, são eficazes ao ataques de sulfatos, sendo atribuída tal resistência devido à ausência de $Ca(OH)_2$ em cimentos com teor elevado de alumina hidratada, sem esses também reduzindo o ataque por CO_2 dissolvido em água. Logo tais fatores podem justificar a redução no processo de carbonatação dos corpos de prova com adição de pó de granito.

5 CONCLUSÃO

A metodologia do planejamento experimental serviu para avaliar a profundidade de carbonatação, permitindo observar de forma prática, a melhor condição de operação na moldagem dos corpos de prova, sendo observado nos resultados que em praticamente todos os corpos de prova, no qual foi substituído o agregado miúdo por resíduo proveniente do corte de granito, apresentou redução na profundidade de carbonatação, verificando assim que a utilização do pó de granito não causa prejuízos diretamente a durabilidade da argamassa nas idades iniciais (30, 60 e 90 dias). Também foi constatado no estudo que a variável com maior influência no processo foi o tempo de exposição além da granulometria do agregado substituído apresentando pequena parcela de contribuição.

Entretanto, por se tratar de uma avaliação inicial, se vê necessário que o estudo seja continuado e que seja avaliado idades mais avançadas, para uma melhor análise do comportamento do pó de granito em relação ao processo de carbonatação.

INFLUENCE OF THE REPLACEMENT OF FINE AGGREGATE BY POWDER GRANITE IN MORTAR IN THE PROCESS OF NATURAL CARBONATION

ABSTRACT

Annually granite beneficiation companies generates considerable volume of waste, most of who does not receive an adequate destination, part of the academic environment in making this discarded material, into something useful in construction. Within this context, few papers relate the behavior of new materials to their durability against pathological manifestations. Therefore, this study had the objective of evaluate the influence of granite cutting residue as a replacement for the fine aggregate in mortars, in natural carbonation process, in the external environment and internal into a building. The adopted methodology consisted of replacing the small aggregate by granite cutting residue, analyzing the depth of carbonation with support of an experimental planning matrix of $2^3 + 3$ repetitions in the central point. Were evaluated the influence exposures time of the specimens (30, 60 and 90 days), the percentages (5%, 10% and 15%) and the particle size of the residue used (0.3mm, 0.6mm and 1.2mm). To measure the carbonation depth, a solution of 1% phenolphthalein on the cut face of the specimens. It was possible to observe through Diagram of Pareto, that the variable time of exposure had greater influence in the process of carbonation followed by the granulometry of the residue used, it was also observed that the specimens exposed to the internal environment carbonated more than the external ones. The exposed specimens in the internal environment had a reduction in carbonation depth for the age of 30 days of 43;0% for 60 days of 28;8% while for 90 days the reduction was 24.9% when the external environment was analyzed, the reduction for 30 days was 16.5%, for 60 days, 26.8% while for 90 days the reduction of 21.8%. According to the analyzed conditions, it was verified that the granite residue proved to be beneficial, reducing the depth of carbonation.

Keyword: Durability. Mortar with Residue. Carbonation. Experimental Planning.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 6118: **Projeto e Execução de obras de concreto armado**. Rio de Janeiro, 2014.
- ABNT NBR 7215: **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 1996.
- ABNT NBR 10004: **Resíduos Sólidos: Classificação**. Rio de Janeiro. 2004.
- BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I.; BRUNS, R. **Planejamento e otimização de experimentos**. UNICAMP, Campinas, 1996. p.66.
- FARIAS FILHO, F. J. **Estudo da durabilidade de argamassas alternativas produzidas de resíduos de construção e granito**. 2007. 118p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande/PB, 2007.
- FEITOSA, A. O. **Utilização do resíduo de serragem de granito para uso em blocos de concreto sem função estrutural**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal da Paraíba – Campus II. Campina Grande/PB. 2004.
- FORMIGONI, G.E., BLEGGI, M.A.E., SILVA, L.F., EGERT, P., SILVA, H.R.T. **Aproveitamento de resíduos: reciclagem de rochas naturais**. Universidade do Sul de Santa Catarina. Florianópolis . 2006.
- HELENE, P. R. L. **Vida Útil das Estruturas**. *Téchne*, n. 17, p. 28-31, jul./ago. 1995.
- KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa**. 2002. 199f. Tese (Doutorado em Engenharia), Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Minas e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2002.
- LIMA, R. C. O., NEVES, G. A., CARVALHO, J. B. Q. **Durabilidade de tijolos de solo-cimento produzidos com resíduo de corte de granito**. *REMAP*, vol. 5, n. 2, 24-25, 2010.
- LIMA, R. C. O., LIRA, H. L., NEVES, G.A., SILVA, M.C., SILVA, C.D. **Aproveitamento do Resíduo de Serragem de Granito para Fabricação de membranas Cerâmicas de Baixo Custo**. *Revista Eletrônica de Materiais e Processo*, v. 6, p. 163-169, 2011.

MATTA, V. R. P., APOLINÁRIO, E.C.A., SANTOS, G.R.S., RIBEIRO, D.V. **Efeitos da adição do resíduo de corte de mármore e granito (RCMG) no desempenho das argamassas de cimento portland no estado endurecido.** IX Fórum Ambiental da Alta Paulista, v. 9, n. 1, p. 87-104, 2013.

MOURA, W. A., GONÇALVES, J. P., LEITE, R. S. **Utilização do resíduo de corte de mármore e granito em argamassas de revestimentos e confecção das lajotas para piso.** Sitientibus, n. 26, p. 49-61, jan./jun. 2002.

MOURA, W. A. et al. **Avaliação de desempenho, quanto à carbonatação, de concretos produzidos com resíduos de construção e demolição.** In: 49o Congresso Brasileiro do Concreto, 2007, Bento Gonçalves. Anais do 49o. CBC. São Paulo, SP: IBRACON, 2007.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** 5.ed. São Paulo: Pini, 2015.

PAULETTI, C. **Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição.** 2009. 285 p. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2009.

REUNION INTERNATIONALE DE LABORATOIRES D'ESSAIS ET MATERIAUX. **CPC-18: Measurement of hardened concrete carbonation depth.** RILEM Recommendations CPC-18. Materials and Structures, [s. n.], p. 453-455, 1988.

RODRIGUES, M. I., IEMMA, A. F. **Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos: uma estratégia seqüencial de planejamentos.** Campinas, SP, Casa do Pão Editora, 2005.

SANTOS R. A., LIRA, B. B., RIBEIRO, A. C. M. **Argamassa com substituição de agregado natural por resíduo de britagem de granito.** Rev. Elet. em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, v. 8, n. 8, p. 1818-1828, set./dez. 2012.

VILLAIN, G., THIERY, M., PLATRET, G. **Measurement methods of carbonation profiles in concrete: thermogravimetry, chemical analysis and gammadensimetry.** Cement and Concrete Research, v. 37, p. 1182–1192, 2007.