



**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE RESISTENCIA A CARBONATAÇÃO
ENTRE PRODUTOS DE PROTEÇÃO SUPERFICIAL PARA
CONCRETO**

SÃO PAULO

2014



ADMIR PEREIRA LIMA
MÁRCIO NASCIMENTO OLIVEIRA
JOSÉ ROBERTO PSCHIEDT JUNIOR

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE RESISTENCIA A CARBONATAÇÃO
ENTRE PRODUTOS DE PROTEÇÃO SUPERFICIAL PARA
CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Pós Graduação em Patologia nas Obras Cíveis, Pós-Graduação *lato sensu*, do Instituto IDD como requisito parcial para a obtenção do Grau de Especialista em Patologia nas Obras Cíveis.

Orientador: Prof. Luís César De Luca, Msc.

SÃO PAULO

2014

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar ao engenheiro civil professor mestre em ciências Luís César De Luca pela valiosa orientação no direcionamento e no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Instituto IDD e a todos seus professores e profissionais pelo suporte e auxílio durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao laboratório da Qualitec Controle Tecnológico por ceder o laboratório para os experimentos, em especial ao diretor Laerte Brangione Junior.

A central dosadora de concreto Itacomix Concreto e Serviços – Unidade de Itaquaquecetuba, por ceder às dependências da empresa, bem como o concreto para a realização do experimento, em especial aos diretores Luiz Carlos de Faria e Agostinho Luiz de Faria pelo apoio e patrocínio, e aos colaboradores da Itacomix, Sres. Marcos, Hermínio, Jorge e Wesley.

Aos nossos familiares pela compreensão, paciência e apoio.

Por fim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

FOLHA DE APROVAÇÃO

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE RESISTENCIA A CARBONATAÇÃO ENTRE PRODUTOS DE PROTEÇÃO SUPERFICIAL PARA CONCRETO

Por

**ADMIR PEREIRA LIMA
MÁRCIO NASCIMENTO OLIVEIRA
JOSÉ ROBERTO PSCHIEDT JUNIOR**

**TRABALHO APROVADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA A
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE ESPECIALISTA EM PATOLOGIA NAS
OBRAS CIVIS, DO INSTITUTO IDD, PELA COMISSÃO FORMADA PELOS
PROFESSORES A SEGUIR MENCIONADOS.**

São Paulo (SP) 28 de Novembro de 2014.

Prof. Luís César Siqueira De Luca, Msc.

Prof. Cesar Henrique Sato Daher, Msc.

André Tadeu Moreno Figueiró

RESUMO

O presente trabalho avalia comparativamente a eficiência de 4 (quatro) produtos de tratamento superficial (argamassa polimérica, resina acrílica, resina de poliuretano e hidrofugante), através do ensaio acelerado de carbonatação do concreto em uma câmara construída pelos colaboradores deste trabalho, para determinar o produto que proporciona a melhor barreira e proteção contra a penetração de gases externos. Foram moldados corpos de prova de concreto, os quais foram curados durante 7 (sete) dias em câmara úmida saturada com cal, aplicado os produtos de tratamento superficial nos mesmos e submetidos à carbonatação em câmara com aproximadamente 100% de concentração de CO₂ durante o período de 28 dias, controlando a umidade relativa do ar e a temperatura no interior da mesma. A profundidade de carbonatação foi determinada com o rompimento transversal dos corpos-de-prova e aspersão de solução aquosa proveniente da mistura de álcool com fenolftaleína. Os resultados obtidos mostram a tendência real da carbonatação ser maior e mais acelerada nos corpos de prova tratados com argamassa polimérica e mais resistentes nos tratados com resina de poliuretano. Portanto, não é aconselhado o uso somente de produtos com base cimentícia como proteção superficial da estrutura de concreto.

Palavras chave: Carbonatação, argamassa polimérica, resina acrílica, resina de poliuretano, hidrofugante e ensaio acelerado de carbonatação.

ABSTRACT

This paper comparatively assesses the efficiency of four (4) surface treatment products (polymeric mortar , acrylic resin , polyurethane resin and water repellent) through accelerated testing of concrete carbonation in this one built by employees working chamber to determine the product that provides better protection and barrier against the penetration of external gases. Concrete specimens, which were cured for seven (7) days in a moist chamber saturated with lime, applied products on the same surface treatment and underwent carbonation chamber with approximately 100% concentration of CO₂ during the 28 days were shaped, controlling the relative humidity and temperature within the room. The carbonation depth was determined by breaking the cross test-spray test and from the aqueous solution mixed with pHenolpHthalein alcohol. The results show the real trend of the carbonation to be bigger and faster in the specimens treated with polymer and more resistant mortar treaties with polyurethane resin. So it is not advisable to use only products with cementitious as surface protection of concrete structure.

Keywords: Carbonation polymer mortar, acrylic resin, polyurethane, water repellent and accelerated carbonation test.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01- Representação esquemática do processo de carbonatação. Fonte: (RICHARDSON, 1988, apud SILVA, 2007).....	27
Figura 02 - Produtos de proteção superficial empregados nos corpos de prova.	36
Figura 03 - Central dosadora de concreto utilizada.....	37
Figura 04 - Corpos de prova moldados.	38
Figura 05 - Tanque de cura úmida, saturada com cal.....	39
Figura 06 - Secagem dos corpos de prova.....	39
Figura 07 - Produtos de tratamento superficial aplicados.	40
Figura 08 - Corpos de prova com produtos de proteção aplicados.	41
Figura 09 - Croqui do projeto da câmara de carbonatação.	42
Figura 10. Câmara de Carbonatação.	43
Figura 11 - Solução alcalina com fenolftaleína, antes (vermelho carmim) e depois (incolor), obtidas através da passagem do CO ₂ da câmara já saturada. ..	44
Figura 12 - Teste de estanqueidade do tambor com água.	45
Figura 13 - Testes de estanqueidade do tambor e da tampa da câmara de carbonatação.....	45
Figura 14 - Equipamentos de medição utilizados – thermohigrômetro (a) e paquímetro digital(b).	47
Figura 15 - Corpos de prova depositados no interior da câmara.....	48
Figura 16 - Identificação dos corpos de prova no interior da câmara.....	48
Figura 17 - Inserção do thermohigrômetro na câmara de carbonatação.	49
Figura 18 - Instalação de 2 (duas) lâmpadas incandescentes no interior da câmara.....	50
Figura 19 – Rompimento superficial manuais com ponteiro metálico no centro dos corpos de prova.	53
Figura 20 – Rompimento dos corpos de provas na prensa.....	53
Figura 21 – Partes recém fraturadas aspergidas com solução de fenolftaleína..	54

Figura 22 – Medida da frente de carbonatação.	55
Figura 23 - Gráfico com os valores médios de variação das temperaturas no interior da câmara de carbonatação, em relação da temperatura média do período.....	57
Figura 24 - Gráfico com os valores médios de variação das umidades relativas no interior da câmara de carbonatação, em relação da umidade média do período.	58
Figura 25 - Corpos de prova rompidos aos 7 dias, demonstrando as áreas carbonatadas, após aplicação de solução com fenolftaleína.....	60
Figura 26 - Corpos de prova rompidos aos 14 dias, demonstrando as áreas carbonatadas, após aplicação de solução com fenolftaleína.....	62
Figura 27 - Corpos de prova rompidos aos 28 dias, demonstrando as áreas carbonatadas, após aplicação de solução com fenolftaleína.....	64
Figura 28 – Gráfico dos percentuais calculados das frentes de carbonatação aos 28 dias, com relação as amostras ensaiadas aos 7 dias.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 01- Principais fatores que determinam a velocidade de avanço da frente de carbonatação. Fonte: (KAZMIERCZAK, 1995).	30
Tabela 02- Datas dos ensaios de profundidades de carbonatação, de cada tipo de corpos de prova com produto de proteção superficial.....	51
Tabela 03 - Valores médios diários e totais do período das temperaturas e umidades relativas do ar no interior da câmara de carbonatação.	57
Tabela 04 - Análise da temperatura e da umidade relativa do ar, de acordo com cada tipo de intervenção na câmara de carbonatação.....	58
Tabela 05 - Resultados das profundidades de carbonatação dos corpos de prova rompidos aos 7 dias.	61
Tabela 06 - Resultados das profundidades de carbonatação dos corpos de prova rompidos aos 14 dias.	63
Tabela 07 - Resultados das profundidades de carbonatação dos corpos de prova rompidos aos 28 dias.	65
Tabela 08 - Resultados dos aumentos das profundidades de carbonatação aos 28 dias, em relação aos 7 dias, para o concreto convencional.	66
Tabela 09 - Resultados dos aumentos das profundidades de carbonatação aos 28 dias, em relação aos 7 dias, para o concreto com ar incorporado.	67

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	2
FOLHA DE APROVAÇÃO	3
RESUMO	4
ABSTRACT	5
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	6
LISTA DE TABELAS.....	8
1. INTRODUÇÃO	11
1.1. PROBLEMA DE PESQUISA.....	12
1.2. OBJETIVO GERAL.....	12
1.3. JUSTIFICATIVAS.....	12
1.3.1. Tecnológicas.....	12
1.3.2. Econômicas	13
1.3.3. Sociais	13
1.3.4. Ecológicas	13
1.4. HIPÓTESE	14
1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	14
1.6. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1. CONCRETO	16
2.1.1. Definições.....	16
2.1.2. Histórico	17
2.1.3. Características	18
2.2. MATERIAIS PARA TRATAMENTO SUPERFICIAL.....	22
2.2.1. Argamassa Polimérica.....	22
2.2.2. Hidrofugante.....	24
2.2.3. Resina Acrílica	25
2.2.4. Resina de Poliuretano.....	26
2.3. CARBONATAÇÃO.....	27

2.3.1. Fatores que Influenciam a Carbonatação	30
2.3.2. Determinação da Carbonatação.....	33
2.4. CÂMARA DE CARBONATAÇÃO– ENSAIO ACELERADO.....	34
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	36
3.1. MATERIAIS	36
3.2. TRAÇO DO CONCRETO	37
3.3. MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA.....	38
3.4. CURA DOS CORPOS DE PROVA	38
3.5. SECAGEM DOS CORPOS DE PROVA	39
3.6. APLICAÇÃO DOS PRODUTOS DE PROTEÇÃO SUPERFICIAL	40
3.7. CÂMARA DE CARBONATAÇÃO.....	41
3.8. VARIÁVEIS	46
3.9. MEDIÇÕES.....	46
3.10. ENSAIOS.....	47
3.10.1. Ensaio de Carbonatação Acelerada.....	47
3.10.2. Ensaio de Profundidade de Carbonatação.....	52
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	56
4.1. CONTROLE DE TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR	56
4.2. ENSAIO DE FRENTE DE CARBONATAÇÃO	59
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	69
5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
5.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	70
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72

1. INTRODUÇÃO

O foco principal deste trabalho é a análise comparativa entre 4 (quatro) produtos de tratamento superficial, para proteção da estrutura de concreto armado, sob avaliação da resistência a carbonatação.

A concentração de gás carbônico disperso na atmosfera, atrelada a temperatura ambiente, a umidade relativa do ar, ao baixo cobrimento das armaduras das estruturas e a ausência de manutenção das edificações, desrespeitando os prazos determinados por normas para cada tipo de intervenção, são fatores que causam danos às estruturas, tais como a carbonatação do concreto, acelerando os processos de oxidação e corrosão das armaduras, despassivando-as por sua vez, tornando cada vez mais graves e onerosos o reparo os problemas.

Em virtude da diversidade de produtos e de fabricantes no mercado da construção civil, escolheu-se 4 (quatro) tipos de produtos de diferentes empresas multinacionais, conceituadas no mercado Brasileiro e mundial, para uma avaliação visual e laboratorial em termos de proteção do concreto a longo prazo, através do ensaio acelerado de resistência a carbonatação, para analisar a eficiência de cada produto.

Para tanto, foram realizadas as moldagens de corpos de prova cilíndricos, medindo 10 x 20 cm (diâmetro x altura), com concreto usinado convencional, e posteriormente aplicado os diferentes tipos de produtos de proteção superficial.

Também foi construída uma câmara de carbonatação, para realizar os ensaios de forma acelerada das amostras avaliadas.

Os produtos de tratamento superficial utilizados são à base de polímeros, resinas e hidrofugantes.

Partindo-se dessa premissa, e considerando que as propriedades físicas do concreto também são de fundamental importância para proteção das armaduras do concreto, é que se propõe o tema dessa pesquisa para investigação.

1.1. PROBLEMA DE PESQUISA

O problema de pesquisa se resume na seguinte questão: “Qual o produto de proteção superficial (argamassa polimérica, resina acrílica, resina de poliuretano e hidrofugante) propicia ao concreto aparente uma maior resistência à penetração por difusão de CO_2 ?”

1.2. OBJETIVO GERAL

Avaliar comparativamente a eficácia de cada produto (argamassa polimérica, resina acrílica, resina de poliuretano e hidrofugante), através de ensaios acelerados quanto à resistência a carbonatação.

1.3. JUSTIFICATIVAS

Neste item apresentam-se as justificativas para a pesquisa, a saber: tecnológicas, econômicas, sociais e ecológicas.

1.3.1. Tecnológicas

As estruturas construídas em concreto têm como proposta de projeto a agilidade na execução da obra com estilo arquitetônico, entretanto, alguns métodos executivos não costumam receber acabamentos tais como emboço, revestimento cerâmico, pintura, etc.

Execuções indevidas em estruturas antigas e até mesmo atuais contendo baixo cobrimento, manutenção preventiva ineficiente, etc, deixam a estrutura vulnerável às ações das intempéries favorecendo as manifestações patológicas.

A carbonatação sendo um fenômeno natural nesse meio representa como um dos fatores mais importantes da corrosão de armaduras tendo-o como um processo lento atenuando-se com o tempo diminuindo a vida útil da estrutura e requerendo intervenções para sua reconstituição original.

1.3.2. Econômicas

Ao realizar as intervenções de manutenção e restauro das estruturas de concreto, se forem empregados materiais que proporcionem maior durabilidade, proporcionaremos uma menor periodicidade de manutenção e conseqüentemente menor custo de operação ao longo do tempo.

1.3.3. Sociais

Esse estudo objetiva mostrar produtos de proteção da estrutura de concreto com materiais e técnicas que proporcionem maior durabilidade, garantindo a otimização dos recursos financeiros e materiais empregados toda vez que haja necessidade dessas intervenções.

1.3.4. Ecológicas

Estudando, especificando e empregando materiais e técnicas de execução mais apropriadas para manutenção e aumento da durabilidade de estrutura de concreto, diminui-se a periodicidade de novas intervenções futuras de conservação.

Desta forma, consomem-se menos materiais provenientes de recursos materiais e/ ou manufaturados, diminuindo também a geração de resíduos em geral que degradam o meio ambiente, tornando a medida ecologicamente correta.

1.4. HIPÓTESE

Acredita-se que os produtos a base de poliuretanos são mais impermeáveis que os produtos de base cimentícias para a proteção da superfície de concreto, pois segundo os fabricantes os produtos de base de poliuretanos possuem cadeias fechadas dos materiais componentes, ou seja, bloqueiam a passagem dos fluidos no estado gasoso.

1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para atingir os objetivos focados neste trabalho serão seguidos os seguintes procedimentos metodológicos.

Preliminarmente será realizada uma revisão bibliográfica junto às normas aplicáveis, artigos científicos, dissertações, teses, monografias e livros editados sobre o assunto.

Em seguida será executado um programa experimental com materiais de tratamento nas superfícies aplicados sobre corpos de prova cilíndricos, para realização de estudo laboratorial e visual com cada tipo distinto de material.

Finalmente, a pesquisa fará uma compilação dos resultados obtidos dos ensaios para realizar as considerações finais.

1.6. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

Este item apresenta resumidamente o conteúdo de cada capítulo do trabalho:

O **Capítulo 1** apresenta o problema de pesquisa e seus objetivos, bem como as principais justificativas para a realização deste estudo e os procedimentos metodológicos a serem adotados.

O **Capítulo 2** apresenta a revisão bibliográfica e discorre sobre o concreto, os tipos de materiais de tratamento superficial utilizados neste estudo, o processo de carbonatação e métodos de medição da frente de carbonatação através da construção de uma câmara de ensaios acelerados..

O **Capítulo 3** trata sobre o programa experimental realizado neste trabalho, apresentando a moldagem dos corpos de prova, a aplicação dos produtos de tratamento superficial, os processos e ensaios de carbonatação acelerado, bem como as medições realizadas.

O **Capítulo 4** apresenta os resultados deste estudo bem como análise dos mesmos com base no programa experimental, descrevendo a influência dos diferentes tipos produtos de tratamento superficial na resistência à carbonatação.

O **Capítulo 5** apresenta a as considerações finais acerca da pesquisa e as recomendações para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo apresentar-se-á as definições, o histórico e as características do concreto, os tipos de materiais de tratamento superficial utilizados, o processo de carbonatação e os métodos de medição da frente de carbonatação através da construção de uma câmara de ensaios acelerados.

2.1. CONCRETO

Neste item serão apresentados as definições, o histórico e as características do concreto armado.

2.1.1. Definições

Concreto é uma mistura formada por água, cimento, agregado graúdo (brita) e agregado miúdo (areia) cujo estado fresco possui consistência plástica e o estado endurecido é caracterizado por uma resistência à compressão elevada, porém, baixa resistência à tração. Sua durabilidade é alta pois a sua resistência mecânica eleva-se com o passar do tempo quando exposto à intempéries (HELENE, 2009).

Na concepção de Mehta e Monteiro (2008), concreto é um material compósito, composto por matriz - meio aglomerante comumente formado por cimento hidráulico e água - e elemento de reforço (agregados como brita e areia), podendo conter ainda aditivos, fibras, pigmentos e adições em benefício de propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade. Quando para uso estrutural, requer a união do material resistente à tração, geralmente o aço, na forma de barra ou cabo, formando o concreto estrutural, resistente às solicitações de tração, de compressão e à flexão.

O concreto é um material da construção civil composto por uma mistura de cimento, areia, pedras britadas e água, pode-se ainda, se necessário, usar aditivos e outras adições (NEVILLE, 1997).

2.1.2. Histórico

O concreto é um material milenar descoberto a aproximadamente 2500 anos e redescoberto na segunda metade do século XX. Os primeiros registros que se tem notícia, vem da Civilização Romana que descobriram que misturando uma cinza vulcânica encontrada nas proximidades do Vesúvio chamada “Pozolana” com cal hidratada (obtidos pela calcinação de rochas calcárias) em proporções de 25 à 45%, obtinham um efeito aglomerante que endurecia em contato com a água criando uma “pasta” (CECHELLA, 2004)

O surgimento do concreto foi condicionado à descoberta de um agente aglomerante cimentício. Dessa forma, pode-se considerar como o início do concreto o século II AC, quando surgiu o primeiro aglomerante conhecido. Era um tipo especial de areia vulcânica chamada ‘pozolana’, encontrada apenas na região sul da Itália, na baía de Nápoles, próximo a Pozzuoli, de onde o nome se originou. Foi bastante usada pelos romanos em sua argamassa, dando origem a diversas construções, das quais a mais antiga de que se tem notícia é o Pórtico Amélia, construída em 193 AC. A pozolana é na verdade uma ‘areia’ especial, que reage quimicamente com cal e água, para endurecer formando uma pedra artificial, resistente mesmo quando submersa. Esse material era usado com pedras de diferentes tamanhos, mantendo as unidas e formando um tipo rudimentar de concreto (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Entre 1700 e 1800, em Paris, o concreto era chamado de “pedra artificial”, uma vez que as pedras eram executadas primeiro e depois armadas. Num segundo momento a armadura era feita primeiro e depois a pedra era trabalhada, Por volta de 1824, veio a descoberta de um processo industrial para a

fabricação da “pedra artificial”, que passou a ser chamada de “cimento Portland endurecido”. Na Alemanha, em 1855, foi apresentado oficialmente ao mundo um novo material, o “cimento armado”. A novidade foi publicada pelo engenheiro Joseph Louis Lambot, que efetuou sua primeira experiência construindo o barco de concreto armado na França. Em 1949 comemorasse os quase cem anos do concreto armado. O fato de Lambot ter construído um barco, mostrou que se ele tivesse feito qualquer outra peça em vez de um barco, teria mudado o destino do concreto armado por apresentar cobrimento insuficiente, prejudicando a durabilidade (VASCONCELOS, 1992)

2.1.3. Características

Segundo Mehta e Monteiro (1994), concreto é um material composto que consiste, essencialmente, de um aglomerante no qual estão aglutinados partículas ou fragmentos de agregados. No concreto de cimento hidráulico, o aglomerante é formado por uma mistura de cimento hidráulico e água.

A trabalhabilidade é a característica fundamental para que o concreto seja bem adensado, ou seja, é a adequação da consistência ao processo utilizado para o lançamento e adensamento. (GIAMUSSO, 1992).

Alves (1993) destaca também como trabalhabilidade do concreto, a propriedade de ser misturado, transportado, lançado e vibrado, sem mudança de homogeneidade.

Andriolo (1984) relata que a trabalhabilidade do concreto é a facilidade de mistura, manuseio, transporte, colocação e compactação com a menor perda de homogeneidade.

De acordo com Kaefer (2002), segregação do concreto no estado fresco é a perda de homogeneidade a partir do momento em que os seus componentes se redistribuem na mistura de modo heterogêneo acarretando em problemas como: perda de resistência e retração do concreto.

A consistência é usada como um simples índice da mobilidade ou da fluidez do concreto fresco e pode ser medida pelo ensaio de abatimento de tronco de cone. (MEHTA e MONTEIRO, 1994)

Para aumentar a durabilidade do concreto e verificar a sua aceitação, devem ser utilizados métodos de controle tecnológico através de uma empresa de serviços especializada e concreteiras que executem os ensaios de acordo com as normas brasileiras regulamentadoras (NEVILLE, 1997).

Outra forma de controlar a qualidade do concreto é o controle de produção do concreto em central, de acordo com a NBR 7212 (1984), método esse que reduz as perdas de materiais como brita e areia, além de agilizar o serviço e garantir a qualidade do mesmo. Todos os profissionais envolvidos na produção do concreto têm certas obrigações que ao serem bem exercidas, garantem o trabalho em conformidade com as verificações normativas, esse processo certifica ao comprador que todas as exigências foram cumpridas e que a segurança do empreendimento é existente, além disso, facilita a correção de patologias típicas em edificações, como por exemplo, rachaduras, trincas entre outras (VASCONCELOS, 2002).

O concreto é um material que apresenta duas fases: o concreto fresco e o concreto endurecido. De acordo com Helene e Andrade (2005), o estado fresco dura de uma a cinco horas, tempo que compreende os processos de mistura, transporte, lançamento e adensamento. A trabalhabilidade é propriedade do concreto fresco, que possibilita a sua passagem por todos esses processos, mantendo-se homogêneo. Influi diretamente na construtibilidade, no custo e na qualidade do concreto - nos desempenhos mecânico, de durabilidade, de sustentabilidade e estético.

Preleciona Guimarães (2005), que a trabalhabilidade deve ser determinada em função das condições dos referidos processos, das características das fôrmas, disposição e densidade de armadura, da técnica a ser utilizada, da geometria da peça estrutural, do tipo de acabamento especificado, dentre outros.

Fluidez e coesão são qualidades do concreto, indispensáveis durante o processo de execução. O concreto fluido e coeso passa por todos os obstáculos preenchendo toda a fôrma da peça estrutural sem que ocorram falhas, exsudação e segregação. Relaciona o mesmo autor os seguintes fatores que afetam a trabalhabilidade:

- i. O consumo de água - mantendo mesma quantidade de cimento e acrescentando quantidade de água (aumento do fator água/cimento) obtêm-se: maior trabalhabilidade, maior fluidez, menor coesão; aumento da porosidade; diminuição da resistência, da durabilidade e da vida útil da estrutura. Segundo Mehta e Monteiro (1994) a classificação da água presente na pasta de cimento hidratada é baseada no grau de dificuldade ou de facilidade com que pode ser removida. São elas, na ordem crescente de dificuldade de remoção: Água capilar ou água livre (presente nos vazios maiores); Água adsorvida (que se encontra próxima à superfície do agregado, sob influência das forças de atração dos sólidos da pasta de cimento hidratada); Água Inter lamelar (associada com a estrutura do C-S-H); Água quimicamente combinada (aquela que faz parte da estrutura de vários produtos hidratados do cimento).
- ii. Agregados - é necessária uma quantidade mínima de finos para garantir a coesão. Formato e textura- agregados angulosos, alongados e ásperos, requerem mais pasta de cimento para alcançar a trabalhabilidade ideal, o que eleva o custo. Ensina Mehta e Monteiro (2008), que a granulometria contínua, com equilíbrio na proporção dos quantitativos de dimensões, produz concreto trabalhável e econômico.
- iii. Consumo de cimento - baixo consumo de cimento produz concreto áspero, de difícil acabamento e superfície de baixa qualidade estética.
- iv. Relação água/cimento, agregado/cimento e consumo de cimento- para mesmo consumo de água, se aumenta o cimento, maior a trabalhabilidade

e coesão. Aumentando apenas a relação agregado/cimento, haverá diminuição de água e, reduzindo água, diminui a trabalhabilidade. A relação água/cimento, de acordo com Neville (1997), estabelece ainda a porosidade da pasta de cimento endurecida em qualquer estágio de hidratação. Desta forma, nota-se que a relação água/cimento influencia, juntamente com o grau de adensamento, o volume de vazios do concreto.

- v. Adições – Cinza volante em substituição de parte do agregado miúdo aumenta a coesão e diminui a trabalhabilidade. O fíler, como agregado ultrafino concede trabalhabilidade para concreto bombeado.
- vi. Aditivos – Incorporador de ar aumenta a consistência e a coesão do concreto, aumenta a porosidade, e aumenta a trabalhabilidade, o que permite reduzir o fator água/cimento, que diminui a porosidade, mantendo, finalmente, a porosidade que teria sem o aditivo. Plastificantes e superplastificantes aumentam a trabalhabilidade por tempo específico, possibilitando concretos com baixo fator água/cimento, estruturas de altas resistências e durabilidade.

A segunda fase - concreto endurecido - que dura por toda a vida do concreto tem início na hidratação do cimento. Segundo Andrade (2005) o grau de hidratação e o fator água/cimento são os principais parâmetros que dirigem as propriedades do concreto, que é um material conhecido pela capacidade de resistir aos esforços de compressão. A resistência à compressão é diretamente relacionada à durabilidade das estruturas, que vai depender também de várias outras características da construção e seu entorno, como veremos neste estudo.

Desde o início o aço tem sido o grande aliado do concreto para elevar a resistência aos valores necessários ao uso estrutural e, conforme visto pode ser utilizado no sistema armado e protendido. Segundo Mehta e Monteiro (2008) concreto armado é o que normalmente contém barras de aço que atuam junto ao concreto na resistência aos esforços de tração e o concreto protendido, segundo

Andriolo (1984) é aquele no qual, a tensão de tração aplicada, antes do lançamento do concreto (pré-tensão) ou depois do concreto ter atingido resistência desejável (pós-tensão), à armadura inserida no concreto, origina esforços de compressão, anulando ou reduzindo aqueles de tração.

O concreto para uso aparente, segundo Helene (2005), deve ter resistência à compressão superior à 40MPa, fator água/cimento inferior a 0,45 e cimentos com baixo teor de silicato tri-cálcico, para reduzir ocorrência de eflorescências. Também deve ser executado com traço mais argamassado, para efetuar adequado acabamento superficial e sua desforma ser efetuada em mesmo tempo, para obter coloração homogênea. Além do tempo na fôrma, também influem na cor/tonalidade final do concreto aparente, dentre outros, o cimento, o tipo e o teor de adições (escória, pozolanas, metacaulin, sílica ativa, etc.) e os agregados miúdos e graúdos. Definido o padrão a ser utilizado na obra é importante que as características dos materiais do concreto aparente sejam mantidas até sua finalização para que se obtenha resultado homogêneo.

2.2. MATERIAIS PARA TRATAMENTO SUPERFICIAL

Neste item, serão descritos os materiais de tratamento superficial utilizados para os ensaios acelerados de carbonatação.

2.2.1. Argamassa Polimérica

As indústrias estão desenvolvendo produtos impermeabilizantes cada vez mais eficazes, entre estes produtos estão as argamassas poliméricas.

As indústrias estão desenvolvendo produtos impermeabilizantes cada vez mais eficazes, entre estes produtos estão as argamassas poliméricas.

Todos os produtos com esta característica contêm uma parte em pó e outra em líquido que, se misturados e corretamente aplicados, impermeabilizam

certas superfícies. Com o tempo adquiriram diversos nomes (cimento polimérico, cimento com cristalizante, argamassa polimérica ou argamassa impermeabilizante), mas estamos falando de uma coisa só.

Segundo o Instituto Brasileiro de Impermeabilização (IBI, 2009), argamassa polimérica (rígida), é um produto constituído de resina acrílica e cimentos especiais. Após a cura é um material inodoro e atóxico.

A argamassa polimérica tem excelente aderência sobre substratos de base de cimento e com excelente resistência à pressão hidrostática negativa e positiva, porém, por se tratar de material com característica rígida não é recomendado utilizá-lo em áreas com movimentações e variações térmicas. É utilizado para impermeabilizar piscina enterrada com presença de umidade do solo ou com lençol freático por resistir à pressão hidrostática negativa.

Segundo Arantes (2007):

As cargas atuantes e o tipo de estrutura poderão indicar uma deformação que poderá exigir maior elasticidade, flexibilidade, resistência à fadiga do sistema impermeabilizante, levando-os a indicar um produto de melhores características para obter um desempenho adequado.

A aplicação da argamassa polimérica é realizada na forma de pintura com auxílio de trinchinha ou vassoura de pelo. Por ser produto de base de cimento, é necessário molhar o substrato, pois, dessa forma evitará que a camada aplicada fique pulverulenta. A homogeneização do produto pode ser manual ou mecânica. Para Sayegh (2001) a argamassa polimérica é resistente à pressão hidrostática negativa e positiva e acompanha as movimentações estruturais.

A NBR 9575/2010 estabelece que a argamassa polimérica é um : “tipo de impermeabilização industrializada, aplicada em substrato de concreto ou alvenaria, constituído de agregados minerais inertes, cimento e polímeros, formando um revestimento com propriedades impermeabilizantes”.

O polímero acrílico (resina) tem a função de dar flexibilidade, além da vedação dos poros. Ele atua em conjunto com o hidrosilicato, também

preenchendo a porosidade da argamassa, e oferecendo uma boa resistência às dilatações e trabalhos mecânicos.

Lembrando que, apesar de um sistema mais flexível, ainda se trata de uma argamassa dura como cimento (pois é realmente cimento), com um cristal interno (mais duro ainda que o cimento), com um polímero fazendo as honras da dilatação.

Por isso é correto chamar estas argamassas de semi-flexíveis, diferentes das argamassas flexíveis, que possuem maior quantidade resina termoplástica. As argamassas poliméricas termoplásticas (flexíveis) têm uma relação maior de resina (fluido) em relação a parte cimentícia (pó).

Existem argamassas bi-componentes e argamassas mono-componentes. Estas últimas (mono-componentes) os polímeros são em pó e adicionado com cimento, areia e agregados.

2.2.2. Hidrofugante

Conforme Iliescu (2009), o tratamento superficial a base de impermeabilizante e hidrofugante, incolor a base de silano e siloxano, um poli polímero de silicone, garante uma proteção durável e maior facilidade de limpeza. É versátil, de fácil aplicação e tem excelente desempenho em diversos tipos de superfícies lisas e rugosas, com excelente adesividade química. Pode ser aplicado em fachadas de concreto, fuget, blocos, telhas, pedras e materiais porosos como cerâmica e tijolos, forma uma camada invisível sem alterar as características das superfícies.

Para Medeiros (2008), tais produtos hidrófugos alteram as propriedades dos poros capilares tornando-os hidro-repelentes, enquanto os produtos impermeabilizantes formadores de película, protegem o concreto pela constituição de uma barreira superficial que diminui ou impede a permeabilidade a líquido e gases.

Conforme Medeiros (2008), os hidro-repelentes ou hidrofugantes repelem com eficiência, água e líquidos, protegendo a superfície quanto à ação das chuvas, atuando como barreira contra a umidade exterior, evita o envelhecimento de fachadas. Promove uma cobertura transparente e impermeável, permite a respiração do substrato, sem alterar a textura superficial, dificultando a impregnação de sujeiras, facilitando a limpeza e evitando a formação de manchas.

Segundo Medeiros (2008), os hidrofugantes permitem a saída de umidade do concreto na forma de vapor d'água e possuem uma alta resistência alcalina aos raios ultravioleta.

Segundo a Vedacit, hidrorrepelente é: “Líquido incolor de baixa viscosidade que penetra no substrato e altera a absorção capilar por meio da redução do ângulo de tensão superficial (...) entre a superfície do concreto e a gota (...) tornando-a hidrorrepelente”. (VEDACIT, s/d)

2.2.3. Resina Acrílica

Conforme Anghinetti (2012), a resina acrílica é indicada para superfícies externas e internas de pedras naturais (Ardósia, Pedra Mineira, São Tomé, Pedra Goiana, entre outras), concreto aparente, fibrocimento, telhas de barro, tijolos aparentes. As resinas acrílicas são obtidas da reação entre a polimerização de monômeros acrílicos como o metacrilato de metila e o acrilato de butila. Podem ser diluídas em água ou solvente orgânico.

De acordo com a Vedacit (s/d), a resina acrílica impermeabiliza a superfície protegendo-a contra a ação das intempéries, devido a sua excelente resistência. É um produto de fácil aplicação, excelente rendimento e manutenção de brilho, além de proporcionar belíssimo acabamento.

A aplicação é realizada através de rolo de lã, trincha, pincel de cerdas macias ou ariless (pistola). O fabricante recomenda que o substrato deve estar

limpo, isento de graxa, óleo e partículas soltas e seco. Aplicar a primeira demão e aguardar o tempo recomendado pelos fabricantes e aplicar a segunda demão do produto e aguardar a secagem final para trafegar quando aplicado em piso.

2.2.4. Resina de Poliuretano

Conforme Saleme Jr. (s/d), o verniz à base de resina de poliuretano alifático, tem acabamento transparente e brilhante, indicado como tratamento superficial para concreto aparente, bem como para ser aplicado sobre áreas internas e externas, de indústrias e residências, com acabamento transparente protetor para fachadas, paredes, pisos de concreto, ardósia, cerâmicas, etc.

As resinas de poliuretano são obtidas pelo resultado da condensação poliácóois com isocianatos. As tintas de poliuretano são fornecidas em duas embalagens (bicomponente A+B), uma contendo a resina polihidroxilidata e a outra agente de cura à base de poliisoacionato aromático, alifático ou cicloalifático (FAZENDA, 2009).

De acordo com o Saleme Jr. (s/d), este produto possui uma alta resistência mecânica, à abrasão, água e solventes e protegem as superfícies contra a ação de chuvas e agentes agressivos presentes na atmosfera (ex. dióxido de carbono), resistência à alcalinidade do substrato, facilitando a remoção de pichações com removedores adequados, evitando o desgaste precoce das superfícies tratadas, impedindo a impregnação das superfícies por óleos e graxas bem como a formação de fungos e microrganismos. O agente de cura a base isocianato aromático tem baixa resistência ao intemperismo (raio ultravioleta) enquanto que o alifático e cicloalifático são resistentes ao intemperismo, logo a aplicação do produto tende a ser mais durável mantendo a cor e brilho.

Os fabricantes recomendam que o substrato deve estar limpo, sem partículas soltas, isento de óleo e graxa e com teor de umidade inferior a 5%. Homogeneizar totalmente os dois componentes (A+B) manualmente ou

mecanicamente adaptando a haste metálica na furadeira. Aplicar duas demãos ou mais até atingir o consumo recomendado, devendo aguardar a secagem entre as demãos e a secagem final para a utilização com tráfego de pessoas ou automóvel.

2.3. CARBONATAÇÃO

É um agente agressivo em edificações, o gás carbônico presente na atmosfera, ele penetra no concreto e causa despassivação da camada protetora, deixando a armadura vulnerável à corrosão, principalmente em concretos que possuem elevada porosidade e permeabilidade, isso porque o gás carbônico reage com os compostos da pasta de cimento reduzindo a alcalinidade do material (RIBEIRO, PELISSER, GLEIZE, 2009).

A penetração de CO_2 no concreto e sua transformação em ácido na água dos poros faz com que o valor do pH da solução aquosa ali contida seja alterado, de 12,5 para um pH em torno de 8,5, e assim causando destruição da camada passivante ocasionando condições para que a corrosão da armadura ocorra. A Figura 01 apresenta um esquema com área despassivada e não despassivada (HELENE, 1993).

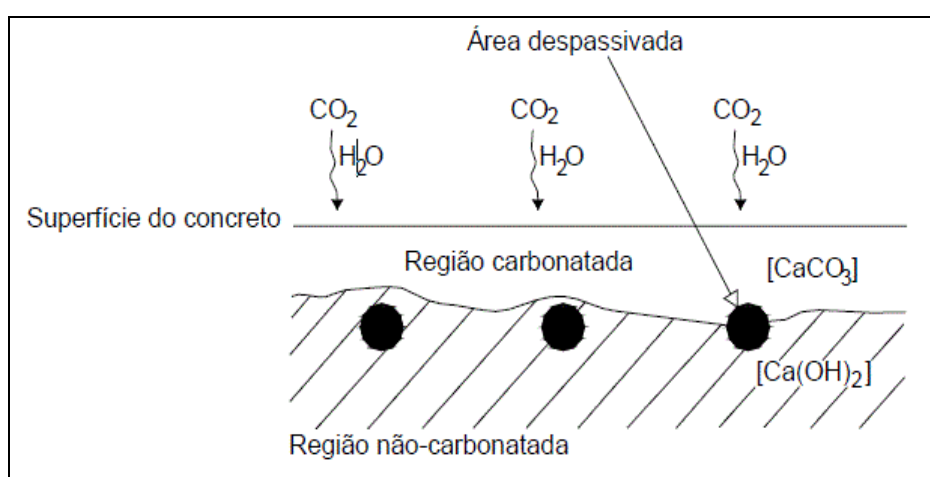


Figura 01- Representação esquemática do processo de carbonatação. Fonte: (RICHARDSON, 1988, apud SILVA, 2007)

Hoppe (2005) afirma que a carbonatação é caracterizada pela formação de uma frente de avanço no processo, amplamente conhecida como “frente de carbonatação”, que separa duas zonas com pH diferentes, uma com pH > 12 e outra com pH < 9. O período de iniciação desse processo corresponde ao tempo que leva a frente de carbonatação chegar até a armadura e, quando isso ocorre, a camada de passivação que envolve a armadura fica desestabilizada devido ao pH baixo, típico de um concreto carbonatado.

A carbonatação forma no interior do concreto três zonas distintas de pH: zona completamente carbonatada; parcialmente carbonatada; e zona não carbonatada. Na zona totalmente carbonatada o pH é inferior a 9,0. Na zona parcialmente carbonatada o pH se apresenta na faixa de 9,0 e 11,5 com índice menor de carbonatação. E na zona não carbonatada o pH é 11,5 (HOPPE, 2008).

Alguns efeitos positivos da carbonatação são evidenciados, entre eles a diminuição da porosidade, devido ao resultado da carbonatação, o carbonato de cálcio (CaCO_3) ocupa um volume maior que o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) o qual ele substitui. Além da liberação da água do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) que se em contato com partículas de cimento que ficaram sem hidratação, podem levar a hidratação delas, resultando em maior dureza superficial, menor permeabilidade superficial, menor movimentação de umidade, aumentando a resistência às formas de ataque controladas pela permeabilidade do concreto. (NEVILLE, 1997).

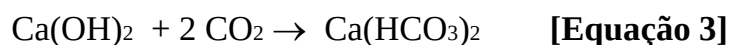
Na preparação do concreto, é gerado o hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 , conforme a Equação 1, proveniente da hidratação dos silicatos e da cal (CaO) contida no cimento:



Definindo carbonatação como a reação entre os produtos hidratados do cimento, principalmente o Ca(OH)_2 e o CO_2 presente na atmosfera, formando carbonato de cálcio e água, tem-se a Equação 2.



Posteriormente, o ataque do dióxido de carbono (CO_2), presente na água e no ar, sobre o hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 , conforme Equação 3, e o carbonato de cálcio CaCO_3 , gera o bicarbonato de cálcio $\text{Ca(HCO}_3)_2$, tem-se a Equação 4:



Bicarbonato de cálcio $\text{Ca(HCO}_3)_2$, que é solúvel em água, portanto, a exposição da estrutura de concreto à água com altos teores de CO_2 , ocasionará a lavagem da estrutura e as fissuras ao longo do tempo.

A carbonatação é um processo que ocorre naturalmente, porém em é intensificado através de agentes antrópicos. Segundo Gasparim (2007), estudar a carbonatação é interessante para a análise de concretos aplicados a situações onde ocorre grande incidência de dióxido de carbono, como túneis rodoviários, túneis metroviários. Estacionamentos no subsolo ou em ambientes fechados também sofrem com essa alta incidência de dióxido de carbono. A necessidade fez com que vários autores estudassem formas de carbonatar o concreto de maneira acelerada, em períodos curtos e obtivessem resultados de anos.

2.3.1. Fatores que Influenciam a Carbonatação

Conforme a Tabela 01, os fatores como concentração de CO₂, a umidade relativa do ar, a temperatura ambiente as características do concreto influenciam na profundidade de carbonatação do concreto (KAZMIERCZAK,1995).

	Fatores condicionantes	Características influenciadas
Condições de exposição	Concentração de CO ₂	- Mecanismos físico-químico - Velocidade de carbonatação
	Umidade reatica do ambiente	- Grau de saturação dos poros - Velocidade de carbonatação
	Temperatura	- Velocidade de carbonatação
Características do concreto	Composição química do cimento: - Características do clínquer - Teor de adições	- Porosidade da pasta carbonatada - Reserva alcalina
	Traço	- Porosidade
	Qualidade de execução: - Defeitos - Cuidados com a cura	- Porosidade - Grau de hidratação

Tabela 01- Principais fatores que determinam a velocidade de avanço da frente de carbonatação. Fonte: (KAZMIERCZAK, 1995).

2.3.1.1. Relação Água/ Cimento

Ribeiro, Pelisser e Gleize (2009) em seu estudo concluíram que a profundidade média de carbonatação para relação a/c 0,40 é 524% inferior a relação com 0,50 o qual apresenta profundidade inferior de 258% em relação à a/c 0,65. Comparando a a/c 0,40 com 0,65 obtêm uma espessura de carbonatação de 2133%.

O aumento da porosidade, em tese, significa aumento da velocidade de carbonatação, ocasionando a diminuição dos poros, devido aos produtos da carbonatação se depositarem nestes locais. A diminuição da carbonatação pode ser realizada através da diminuição da relação a/c. Porém a cura e as pozolanas

também exerce influência por estar diretamente ligadas a porosidade do concreto (HELENE, 1986, apud NEVILLE, 1997).

Vieira e Marques (2009) constataram que concretos mais porosos possuem profundidades de carbonatação mais acentuadas, isso devido à maior facilidade que o CO₂ tem de movimentação no concreto, nesse sentido, nota-se que os concretos de menor relação a/c, dificultam o acesso de CO₂ em função da sua menor porosidade.

2.3.1.2. Cura do Concreto

A cura tem fundamental importância para que o concreto tenha uma boa hidratação. Secagens sem tempo adequado, prematuras, resultam em camadas superficiais porosas, que possuem baixa resistência ao ataque de agentes agressivos, como é o caso da carbonatação (LEVY e HELENE, 1996 apud CAVALCANTI FILHO, 2009).

De acordo com Cavalcanti Filho e Cafange (2009) a carbonatação superficial está intimamente relacionada com a cura, pois esta afeta a hidratação nos primeiros milímetros.

2.3.1.3. Umidade Relativa do Ar

Um procedimento com menor eficiência, porém muito utilizado é a exposição das amostras em ambiente de laboratório, com umidade e temperatura não controladas, como a temperatura varia bastante dependendo da região, torna-se um problema de normatização. Porém alguns centros de pesquisa realizam o pré-condicionamento em salas climatizadas, outros em estufa e por fim algumas pesquisas não mencionam tal etapa, o que resulta em resultados heterogêneos para um mesmo material (SILVA e HELENE, 2007).

O processo de carbonatação do concreto acontece com maior velocidade quando a umidade relativa do ar situa-se entre 50 e 70%. Ambientes muito secos com umidade relativa inferior a 20% ou saturados com umidade superior a 95% não induzem absolutamente ao fenômeno de carbonatação ou então o mesmo ocorre muito lentamente (FIGUEIREDO, 1993).

2.3.1.4. Temperatura Ambiente

A temperatura é outro parâmetro que influencia o processo da carbonatação, e já se tem algum conhecimento a mais, dependendo do valor da temperatura ao qual o concreto é exposto, ocorre uma aceleração das reações de hidratação do cimento, melhorando ou piorando as condições microestruturais, caso a temperatura for alta ocorre a microfissuração do material causando a aceleração do ingresso dos agentes agressivos no concreto (SILVA e HELENE, 2007). Silva ainda cita que a maioria dos centros de pesquisa adotam temperaturas em torno de 23 a 25°C. Visto que a temperatura não possui padrão, assim como a umidade relativa, a variação entre as pesquisas ocorre entre 20 a 27°C, não se sabe ao certo qual temperatura possui melhor eficácia, aliado a falta de padronização dos experimentos dificulta qual temperatura ideal se adotar. Nota-se também que a temperatura tem um efeito pequeno no fenômeno da carbonatação, em ensaios acelerados, o meio de transporte preponderante é a difusão do CO_2 , cuja velocidade é pouco influenciada por variações de temperatura, especialmente sob as temperaturas usualmente empregadas.

2.3.1.5. Concentração de CO_2

Uma das principais variáveis ou se não a principal variável no processo de carbonatação em câmara acelerada é o teor de CO_2 , que variam de 1% a condições de saturação. A literatura traz que quanto maior a concentração

de CO₂ no ambiente, em contato com a superfície do concreto, maior será a carbonatação (SILVA e HELENE, 2007).

A concentração de CO₂ pode variar até 0,05% em atmosferas rurais, em até 1,2% em atmosferas urbanas com tráfego intenso, e até 1,8% em atmosferas extremamente poluídas (HELENE, 1986)

Observa-se na literatura divergências em todos os parâmetros adotados para realização da carbonatação acelerada, principalmente a falta de informações sobre a concentração de CO₂.

Alguns fatores com nível maior de conhecimento como é o caso da temperatura, umidade e a utilização de indicadores trazem segurança à normatização, porém a falta de informações sobre os demais parâmetros dificultam a comparação entre pesquisas realizadas.

2.3.2. Determinação da Carbonatação

A medida da frente ou profundidade de carbonatação é comumente e facilmente determinada através de indicadores de pH, o mais utilizado é a fenolftaleína, outros também são utilizados, mas com menor frequência são eles: timolftaleína; amarelo de alizarina GG; e amarelo de alizarina R (SILVA e HELENE, 2007).

Segundo os estudos de Pauletti (2004), a determinação da profundidade de carbonatação pode ser feita através do indicador químico de pH, fenolftaleína, sendo este o método mais difundido, pela sua praticidade e custo baixo.

O indicador deve ser aspergido na região recém-fraturada, para que não ocorra reação entre a face exposta pela fratura e o CO₂ do ar. Após a secagem do indicador pode-se utilizar uma resina incolor para que ocorra a fixação da cor. O limite entre as faces carbonatadas e as que não sofreram carbonatação é mais evidente não superior ao de 24h após a aspersão do

indicador, subentende-se que a medição da profundidade de carbonatação seja feita nesse período. A precisão deve ser de 0,5mm, valores inferiores devem ser descartados. Em amostras com agregados muito grandes, a carbonatação deve apenas ser medida na pasta de cimento (RILEM, 1988).

Coelho (2002) também utilizou corpos-de-prova cilíndricos seccionados transversalmente, por flexão, de modo a obter segmentos cilíndricos com aproximadamente 5 (cinco) cm de altura. Com mesma metodologia de marcação utilizada por Bourguignon (2004), justificando a marcação prévia como forma encontrada para não haver interferência, por parte do observador, na escolha dos pontos analisados e, para manter constantes as linhas para cada uma das determinações, em cada idade. A profundidade de carbonatação não varia ao longo da altura do corpo-de-prova o que justifica o rompimento ao longo de sua altura.

A espessura da camada carbonatada foi determinada por Coelho (2002) com aspersão de solução de fenolftaleína na face de ruptura das amostras. E a região carbonatada, com pH inferior a 9, permaneceu com a cor natural do concreto, já a superfície não carbonatada se mostrou em vermelho carmim.

2.4. CÂMARA DE CARBONATAÇÃO– ENSAIO ACELERADO

O ensaio acelerado de carbonatação está sendo aperfeiçoado em cada programa experimental onde é empregado, porém, consiste basicamente da construção de uma câmara de carbonatação, onde é introduzido dióxido de carbono sob pressão e os corpos de prova a serem ensaiados são submetidos a esse meio por tempo controlado, porém todo processo não é normatizado ainda, sendo realizado apenas de forma experimental.

No programa experimental realizado, o ensaio resume-se em fechar hermeticamente a tampa da câmara de carbonatação (tambor metálico de 200 litros), e posteriormente injetar níveis de dióxido de carbono superiores em

volume ao encontrado na atmosfera, até tornar o volume interno da câmara com concentração gasosa de CO_2 praticamente saturado.

Serão monitoradas e controladas as variações da umidade relativa do ar e da temperatura, para que as mesmas permaneçam em torno de 60% e de 35°C , respectivamente. A entrada de dióxido de carbono dar-se-á por orifício na base inferior da câmara conectada por uma mangueira a um cilindro de CO_2 . A saída do gás será na parte superior da mesma, no lado inverso da entrada, com a passagem do gás controlada por um registro esférico, fechado posteriormente a constatação da saturação da câmara para aumentar a pressão interna da mesma e impedir que ocorra trocas gasosas com o ambiente externo.

A verificação da saturação de CO_2 do interior da câmara será realizada através de uma mangueira conectada no registro esférico de saída da câmara com a outra extremidade imersa em um recipiente contendo uma solução alcoólica e alcalina com fenolftaleína. A solução terá a coloração vermelho carmim, até que o CO_2 preencha toda a câmara e comece sair pela mangueira, provocando a carbonatação da solução alcalina contida no recipiente, tornando-a incolor.

No capítulo seguinte será descrito o programa experimental para confecção da câmara de ensaio acelerado de carbonatação, bem como a preparação das amostras para realização dos ensaios.

3.PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental será descrito detalhadamente neste capítulo. Resumidamente o programa experimental consistiu em moldagem de corpos de prova, aplicação dos produtos de tratamento superficial nos mesmos, exposição à câmara de carbonatação, medição das profundidades carbonatadas atingidas com o avanço do tempo.

3.1. MATERIAIS

No programa experimental deste estudo optou-se por comparar resultados obtidos utilizando 4 (quatro) produtos de tratamento superficial para concreto: Argamassa Polimérica, Resina Acrílica, Resina de Poliuretano e Hidrofugante, conforme Figura 02.



Figura 02 - Produtos de proteção superficial empregados nos corpos de prova.

Os materiais empregados na moldagem dos corpos de prova foram: cimento CP V ARI RS, areia natural, areia artificial, brita 0 e 1, aditivos polifuncionais e incorporadores de ar e água.

A dosagem, a mistura e a homogeneização dos materiais foi realizada através central dosadora de concreto, conforme Figura 03, sendo o mesmo considerado um concreto usinado bombeável, com resistência de 30 MPa.



Figura 03 - Central dosadora de concreto utilizada.

3.2. TRAÇO DO CONCRETO

O Traço experimental utilizado nos corpos de prova de concreto convencional bombeável foi 1:1,80:2,25:0,46 (cimento: areia natural e areia artificial: brita 0 e 1: água), com teor de argamassa de 54,4%, conforme a ABNT NBR 12655:2006 - Concreto de cimento Portland - Preparo, controle e recebimento – Procedimento.

Foi adotado fator água cimento de 0,46 para obtenção de concreto usinado bombeável, adotando-se o mesmo como o mais utilizado nas obras viárias, visando proporcionar o mesmo tipo de material para estudar o avanço da profundidade de carbonatação.

Também foram confeccionados corpos de prova com ar incorporado, para visualizar melhor os resultados de carbonatação do concreto. Nestes moldes foi utilizado um traço de 1:1,76:1,75:0,44 (cimento: areia natural e areia artificial: brita 0: água), com teor de argamassa de 61% e fator água/cimento de 0,44.

3.3. MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos-de-prova de concreto foram confeccionados com a utilização de formas metálicas cilíndricas e a moldagem dos mesmos seguiu os procedimentos constantes na Norma da ABNT NBR 5738:2003 – Emenda 2008 - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova, conforme a Figura 04.



Figura 04 - Corpos de prova moldados.

3.4. CURA DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos-de-prova foram desmoldados após 24 (vinte e quatro) horas e imersos em solução aquosa saturada com cal no tanque de cura úmida durante o período de 7 (sete) dias, conforme a Figura 05.



Figura 05 - Tanque de cura úmida, saturada com cal.

3.5. SECAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Após a retirada do tanque de cura, os corpos de prova foram deixados numa área com o ambiente seco para realizar a secagem dos mesmos durante um período de 24 (vinte e quatro) horas, conforme a Figura 06.



Figura 06 - Secagem dos corpos de prova.

3.6. APLICAÇÃO DOS PRODUTOS DE PROTEÇÃO SUPERFICIAL

Somente com as peças de concreto totalmente secas, foram realizadas as aplicações dos produtos de tratamento superficial nos corpos de prova, conforme amostras na Figura 07.



Figura 07 - Produtos de tratamento superficial aplicados.

Foram ensaiados 6 (seis) corpos de prova padrão e 2 (dois) corpos de prova com ar incorporado para cada produto de proteção superficial, com os traços de concreto acima mencionados e sem armadura, no formato cilíndrico com dimensões de 10x20 cm, para aplicação de cada tipo de produto de tratamento superficial, totalizando 32 (trinta e duas) unidades, conforme mostra a Figura 08.



Figura 08 - Corpos de prova com produtos de proteção aplicados.

Além destes, também foram moldados mais 6 (seis) corpos de prova padrão e 2 (dois) corpos de prova com ar incorporado com o concreto acima mencionado e sem armadura, os quais não foram aplicados nenhum produto de tratamento superficial, apenas para comparação da profundidade de carbonatação com os demais ensaios.

3.7. CÂMARA DE CARBONATAÇÃO

Com o intuito de acelerar o processo do avanço da frente de carbonatação do concreto e verificação da eficácia de cada tipo de produto de proteção superficial, foi elaborada e desenvolvida pelos próprios colaboradores desta pesquisa uma câmara de carbonatação, conforme a Figura 09, para submeter os corpos de prova estudados à exposição de uma alta concentração do gás CO_2 durante um período de 28 dias.

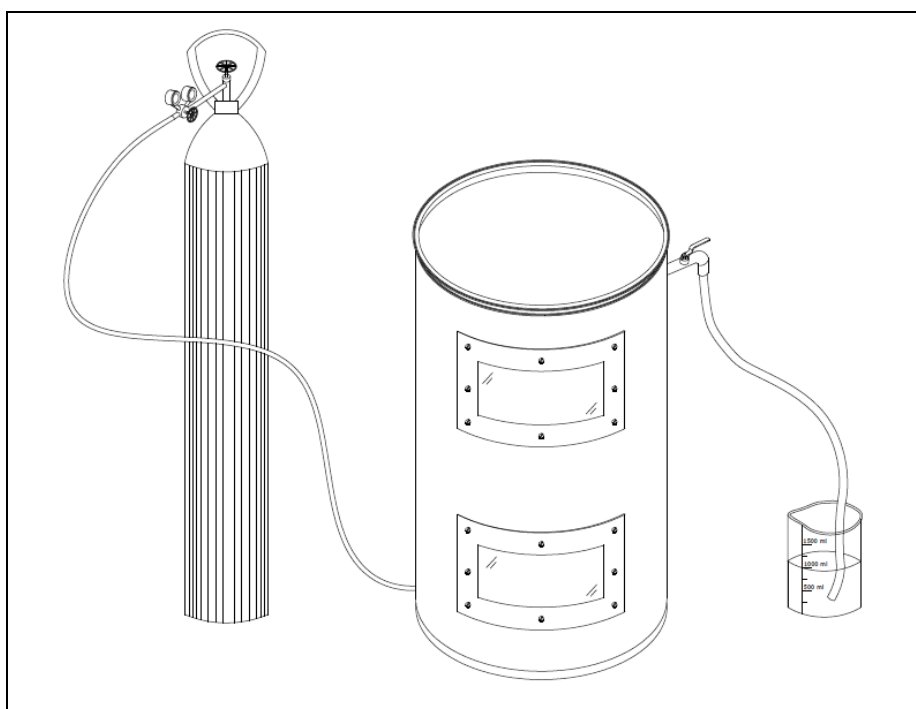


Figura 09 - Croqui do projeto da câmara de carbonatação.

A carbonatação foi obtida com concentração aproximada de gás carbônico de 100% (cem por cento), durante os 28 (vinte e oito) dias do experimento.

A câmara de carbonatação foi confeccionada com a utilização de um tambor metálico com tampa revestido com pintura com tinta esmalte na cor branca com capacidade volumétrica para 200 (duzentos) litros no qual foram realizadas 3 (três) aberturas horizontais e uma vertical, com dimensões de 40 x 20 cm (largura x altura) e 20 x 100 cm (largura x altura), respectivamente, para visualização dos corpos de prova, monitoramento e controle da temperatura e de umidade relativa do ar do interior da câmara.

Para a vedação destas aberturas, foram colocadas placas de acrílico transparente com espessura de 2 (dois) mm, fixadas com parafusos, arruelas e porcas, e realizada a vedação do perímetro de toda a placa com um adesivo composto por silicone e outro com resina epóxi.

Foi utilizado um cilindro de CO₂ com capacidade volumétrica de 43,7 litros, conectado na parte inferior da câmara através de uma mangueira emborrachada com diâmetro interno de 5/16" e comprimento de 3 m. A mangueira por sua vez, foi direcionada para cima no interior da câmara, para evitar que a entrada de dióxido de carbono seja projetada diretamente sobre algumas áreas superficiais dos corpos de prova.

Já na parte superior, no lado oposto da entrada, foi instalada uma torneira com válvula esférica conectada a uma mangueira também emborrachada com diâmetro interno de 5/16" e comprimento de 1 m para a retirada da maior quantidade do oxigênio presente no interior da câmara, mantendo a mesma saturada com CO₂ e possibilitar a verificação da saturação da mesma na solução aquosa alcalina com fenolftaleína. O conjunto completo dos materiais que compõem a câmara de carbonatação, estão registrados na Figura 10.



Figura 10. Câmara de Carbonatação.

Por fim, foi utilizado um recipiente plástico transparente com capacidade para 2 (dois) litros, contendo uma solução aquosa alcalina com o PH

de 10 e com volume de 1 (um) litro, misturada com 100 ml de álcool 96° e 5g de fenolftaleína, na qual foi imersa a outra extremidade da mangueira emborrachada de saída, e quando a concentração de CO_2 no interior da câmara estivesse saturada, o gás carbônico excedente passaria por esta solução, alterando a coloração da mesma de vermelho carmim para branca ou incolor, conforme Figura 11.



Antes

Depois

Figura 11 - Solução alcalina com fenolftaleína, antes (vermelho carmim) e depois (incolor), obtidas através da passagem do CO_2 da câmara já saturada.

Para garantir que a câmara de carbonatação estivesse totalmente vedada, nas aberturas com acrílico, e nas de entrada e saída do dióxido de carbono foram realizados testes de estanqueidade do tambor, preenchendo todo volume interno do mesmo com água, conforme Figura 12.



Figura 12 - Teste de estanqueidade do tambor com água.

Posteriormente após lacrada a tampa, foram realizados os ensaios com espuma de detergente nas bordas da mesma e submetida a câmara a pressão gasosa, abrindo o registro de entrada e mantendo o de saída fechado, verificando a ausência da formação de bolhas na espuma, conforme Figura 13.



Figura 13 - Testes de estanqueidade do tambor e da tampa da câmara de carbonatação.

3.8. VARIÁVEIS

As variáveis independentes desse programa experimental foram os tipos de produtos de tratamento superficial (argamassa polimérica, resina acrílica, resina de poliuretano e hidrofugante).

Neste trabalho as variáveis dependentes foram à medição da temperatura e da umidade relativa do ar no interior da câmara de ensaio acelerado de carbonatação, a verificação da saturação do tambor com o gás carbônico e a profundidade de carbonatação.

As variáveis supramencionadas permitem a discussão técnica da profundidade de frente de carbonatação com 4 (quatro) tipos de produtos de proteção superficial do concreto.

3.9. MEDIÇÕES

Foram realizadas medições de temperatura e de umidade relativa do ar durante o ensaio de carbonatação acelerada, além da saturação diária da câmara com CO₂.

Após retirada dos corpos de prova da câmara de carbonatação foram realizadas as medições de profundidade de carbonatação. Para tanto, foram empregados os equipamentos descritos a seguir.

Os equipamentos de medição utilizados, expostos na Figura 14 serão apresentados brevemente a seguir.



Figura 14 - Equipamentos de medição utilizados – thermohigrômetro (a) e paquímetro digital(b).

Para controle de umidade relativa do ar e temperatura no interior da câmara de carbonatação foi utilizado o thermohigrômetro, conforme figura 14 (a).

Para a medição da profundidade de carbonatação, após a retirada dos corpos de prova da câmara, foi utilizado um paquímetro digital, conforme figura 14 (b).

3.10. ENSAIOS

Neste item serão descritos os ensaios realizados e sua metodologia.

3.10.1.Ensaio de Carbonatação Acelerada

Posteriormente a construção da câmara de carbonatação, e verificação da sua estanqueidade, foram depositados no interior do tambor 40 (quarenta) corpos de prova, empilhados uns sobre os outros, conforme Figura 15.



Figura 15 - Corpos de prova depositados no interior da câmara.

Os corpos de prova no interior da câmara foram identificados para facilitar a visualização dos mesmos, conforme a Figura 16.



Figura 16 - Identificação dos corpos de prova no interior da câmara.

Depois de acondicionados todos os corpos de prova, foi inserido na câmara um thermohigrômetro, Figura 17, para controle e monitoramento da temperatura e da umidade relativa do ar interna.



Figura 17 - Inserção do thermohigrômetro na câmara de carbonatação.

Com a tampa da câmara fechada e lacrada, iniciou-se o processo de insulflamento de dióxido de carbono pela base do tambor, mantendo o registro da saída aberto, durante um período aproximado de 7 (sete) minutos, até que a maior parte do oxigênio interno fosse eliminado pela saída na parte superior, pois a densidade deste gás é menor em relação ao CO_2 .

Uma das pontas da mangueira de saída foi imersa numa solução aquosa alcalina com fenolftaleína, a qual se manteve com a coloração vermelho carmim durante a saída do oxigênio. Ao iniciar a saída do gás carbônico, a solução começou a alterar a coloração ficando cada vez mais clara até permanecer com uma coloração esbranquiçada ou incolor. Neste instante, o registro de saída foi fechado, mantendo por mais 10 segundos a válvula do cilindro de CO_2 aberta, para aumentar a pressão interna da câmara. Após este procedimento a válvula de entrada também foi fechada mantendo aproximadamente uma pressão interna constante de dióxido de carbono.

Entretanto, ao ser fechado a válvula de entrada, foram verificados os valores medidos no thermohigrômetro, e percebeu-se uma saturação da umidade relativa do ar no interior da câmara, com valores próximos de 99%, devido a baixa temperatura do CO_2 dentro do cilindro, mantendo a temperatura ambiente em torno de 20°C .

Optou-se por instalar na face inferior da tampa da câmara 2 (duas) lâmpadas incandescentes de 60 Watts, Figura 18, com intuito de diminuir a umidade interna da câmara de carbonatação. Com estas instaladas, os valores medidos pelo thermohigrometro da temperatura e da umidade relativa foram de aproximadamente 35° C e 60% respectivamente.



Figura 18 - Instalação de 2 (duas) lâmpadas incandescentes no interior da câmara.

A inserção de dióxido de carbono no interior da câmara foi realizada 2 (duas) vezes ao dia, manhã e tarde, durante todo o período dos 28 (vinte e oito) dias ensaiados, sempre sendo verificado com os testes de saturação com solução aquosa alcalina.

O ensaio acelerado de carbonatação não é normatizado, sendo que optou-se por realizar retiradas dos corpos de prova da câmara, para realização das verificações de profundidades de carbonatação, conforme Tabela 02 abaixo:

Data do Rompimento	Corpos de Prova		Quantidade
7º Dia	CP de Concreto Convencional Bombeável	(Sem Produto)	2 unidades
		(Argamassa Polimérica)	2 unidades
		(Hidrofugante)	2 unidades
		(Resina Acrílica)	2 unidades
		(Resina de Poliuretano)	2 unidades
	CP de Concreto com Ar Incorporado	(Sem Produto)	1 unidade
		(Argamassa Polimérica)	1 unidade
		(Hidrofugante)	1 unidade
		(Resina Acrílica)	1 unidade
		(Resina de Poliuretano)	1 unidade
14º Dia	CP de Concreto Convencional Bombeável	(Sem Produto)	2 unidades
		(Argamassa Polimérica)	2 unidades
		(Hidrofugante)	2 unidades
		(Resina Acrílica)	2 unidades
		(Resina de Poliuretano)	2 unidades
28º Dia	CP de Concreto Convencional Bombeável	(Sem Produto)	2 unidades
		(Argamassa Polimérica)	2 unidades
		(Hidrofugante)	2 unidades
		(Resina Acrílica)	2 unidades
		(Resina de Poliuretano)	2 unidades
	CP de Concreto com Ar Incorporado	(Sem Produto)	1 unidade
		(Argamassa Polimérica)	1 unidade
		(Hidrofugante)	1 unidade
		(Resina Acrílica)	1 unidade
		(Resina de Poliuretano)	1 unidade

Tabela 02- Datas dos ensaios de profundidades de carbonatação, de cada tipo de corpos de prova com produto de proteção superficial.

Foram ensaiados os corpos de prova com ar incorporado somente no 7º e no 28º dias, apenas para uma comprovação da permeabilidade do CO₂, e melhor visualização das profundidades de carbonatação, devido a maior porosidade deste concreto em relação ao convencional.

3.10.2. Ensaio de Profundidade de Carbonatação

A profundidade de carbonatação foi obtida através da utilização de uma solução ácido/base nas proporções de 1% de fenolftaleína, 70% de álcool etílico e 29% de água destilada, esse indicador em contato com a região carbonatada não altera a cor do concreto, mas quando em contato com a região não carbonatada a mesma é alterada para vermelho carmim.

A análise da profundidade carbonatada foi feita a partir da medida em dois pontos de cada amostra fraturada, as quais foram seccionadas ao meio. Cada produto de tratamento e proteção superficiais possui 8 (oito) amostras (16 partes seccionadas). Destes corpos de prova 6 (seis) são de concreto convencionais e 2 (dois) de concreto com ar incorporado.

As medidas das profundidades de carbonatação foram realizadas manualmente com auxílio de um paquímetro digital de medição com precisão de décimos de milímetro.

As etapas para realização das medidas das profundidades de cada amostra foram as seguintes:

- a) Foram realizados rompimentos superficiais iniciais manuais com ponteiro metálico no centro dos corpos de prova, conforme Figura 19, para induzir a ruptura dos mesmos na prensa.



Figura 19 – Rompimento superficial manual com ponteiro metálico no centro dos corpos de prova.

- b) Após o rompimento inicial, as amostras foram posicionada na prensa, Figura 20, e os corpos de prova foram fixados com a elevação dos pratos de sustentação para serem comprimidos e rompidos ao meio.



Figura 20 – Rompimento dos corpos de provas na prensa.

- c) Em seguida, nas partes recém fraturadas foram aspergidas com auxílio de um borrifador uma solução aquosa com fenolftaleína, como mostra a Figura 21.



Figura 21 – Partes recém fraturadas aspergidas com solução de fenolftaleína.

- d) Decorrido aproximadamente 5 (cinco) minutos após a aspersão solução com fenolftaleína e secagem das amostras, foram realizadas as medições da frente de carbonatação no interior do concreto. Nas medições foram consideradas as duas laterais dos corpos de prova, a fim diminuir o erro da análise estatística. Foram realizadas medições com auxílio de um paquímetro digital, conforme a Figura 22.



Figura 22 – Medida da frente de carbonatação.

No capítulo seguinte serão apresentados os resultados e as análises desses ensaios e a discussão em torno dos mesmos.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos no programa experimental, seguido de análise, conforme a hipótese criada no capítulo 1 e embasada teoricamente com a revisão bibliográfica realizada no capítulo 2.

4.1. CONTROLE DE TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR

Durante o período dos 28 (vinte e oito) dias que as amostras estiveram no interior da câmara de carbonatação, submetidas a um ambiente saturado com dióxido de carbono, foram realizadas medições 2 (duas) vezes ao dia para monitoramento e controle da temperatura interna e da umidade relativa do ar. Com estes valores, foram calculados os valores médios por dia e totais do período, conforme descrito na tabela 03.

Dia	Temperatura (°C)	Umidade Relativa do Ar (%)
	Média	Média
1 °	33,55	59,00
2 °	38,25	64,00
3 °	34,55	63,50
4 °	34,75	61,00
5 °	37,30	59,00
6 °	38,05	55,50
7 °	37,50	48,00
8 °	43,50	55,50
9 °	34,50	51,00
10 °	35,50	63,50
11 °	39,00	47,50
12 °	38,50	51,00
13 °	42,00	65,00
14 °	44,00	61,00
15 °	39,50	55,50
16 °	40,50	67,50
17 °	31,50	70,00

18 °	33,50	63,00
19 °	32,50	61,00
20 °	38,50	78,00
21 °	39,50	69,00
22 °	35,50	64,50
23 °	35,50	69,00
24 °	32,00	44,00
25 °	32,50	54,50
26 °	36,50	77,00
27 °	40,00	62,50
28 °	37,50	60,50
Médias	37,00	60,73

Tabela 03 - Valores médios diários e totais do período das temperaturas e umidades relativas do ar no interior da câmara de carbonatação.

A maioria dos valores médios das temperaturas da tabela 03, demonstra uma variação aproximada de 15% para cima ou para baixo em relação ao valor médio do período, conforme o Figura 23 abaixo:

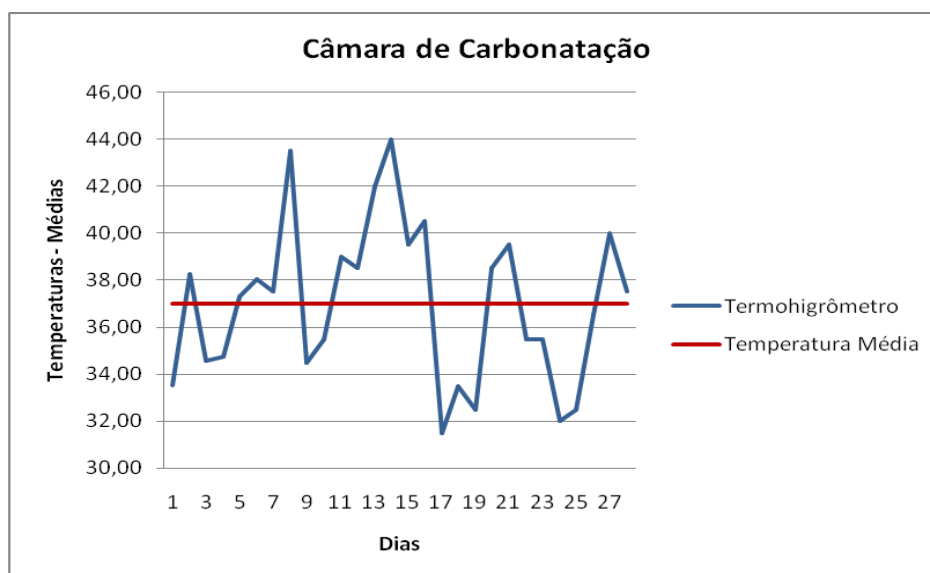


Figura 23 - Gráfico com os valores médios de variação das temperaturas no interior da câmara de carbonatação, em relação da temperatura média do período.

Assim também como os valores médios das umidades relativas do ar da Tabela 03, demonstram uma variação aproximada de 20% para cima ou para baixo em relação ao valor médio do período, conforme a Figura 24 abaixo:

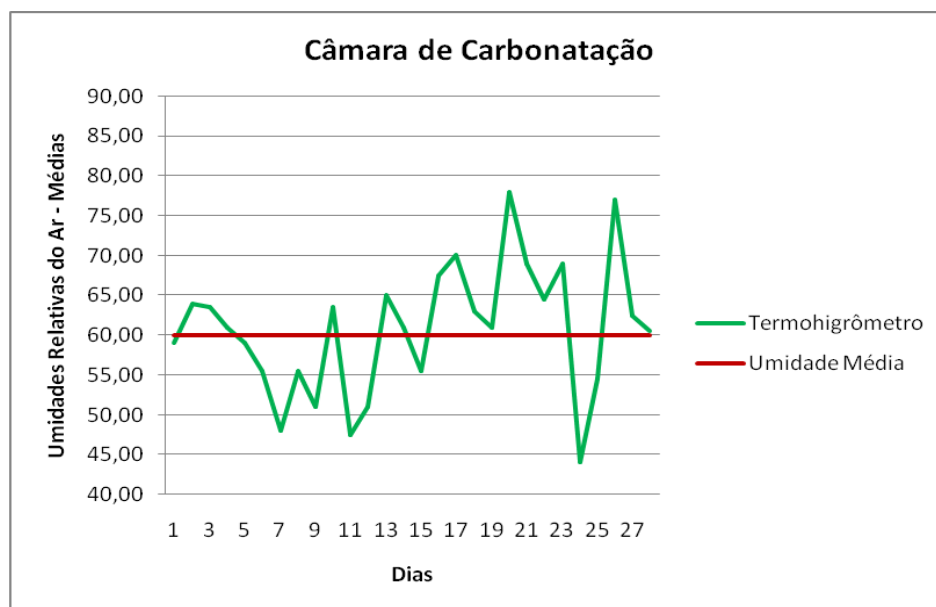


Figura 24 - Gráfico com os valores médios de variação das umidades relativas no interior da câmara de carbonatação, em relação da umidade média do período.

Estas variações acontecem, em virtude das intervenções necessárias ocorridas na câmara de carbonatação, tais como descritas na Tabela 04:

Intervenções / Ocorrências	Temperatura	Umidade Relativa
Abertura da Tampa para Substituição de Lâmpadas Queimadas	Diminui	Diminui
Abertura da Tampa para Retirada dos Corpos de Prova para Ensaios	Diminui	Diminui
Inserção de CO ₂ no Interior da Câmara de Carbonatação	Diminui	Aumenta
Período de Estabilização das Lâmpadas Após Substituição das Queimadas	Aumenta	Diminui

Tabela 04 - Análise da temperatura e da umidade relativa do ar, de acordo com cada tipo de intervenção na câmara de carbonatação.

De acordo com a Tabela 04, sempre que a tampa da câmara é aberta a temperatura e a umidade relativa do ar se igualam com as registradas no ambiente externo, causando uma diminuição dos valores de ambas.

Entretanto, o CO₂ quando injetado no interior causa aumento da umidade relativa do ar e diminuição da temperatura. Estas só permanecem nos padrões ideais para ocorrer o processo de carbonatação somente quando as lâmpadas incandescentes estiverem estabilizadas.

Desta forma, durante o período dos 28 (vinte e oito) dias de ensaios com a câmara de carbonatação construída, foram monitorados e controlados o ambiente interno da câmara, de acordo com a revisão bibliográfica pesquisada constante no capítulo 2, os níveis e os índices descritos a seguir: saturação do volume interno com dióxido de carbono, temperatura ambiente entre 20°C e 45°C e umidade relativa do ar entre 50 a 70%.

4.2. ENSAIO DE FRENTE DE CARBONATAÇÃO

Foram realizados ensaios de frente de carbonatação tanto nos corpos de prova com concreto convencional bombeável, quanto nos com concreto com ar incorporado.

Ocorreram diferenças de valores consideráveis do avanço das frentes de carbonatação entre os 4 (quatro) produtos de proteção superficial analisados. Observa-se um avanço maior nos corpos de prova protegidos com argamassa polimérica e hidrofugante (Silicone), enquanto as amostras protegidas com resinas acrílicas e resinas de poliuretano (PU) apresentaram um menor avanço da carbonatação, devido a cadeia de mistura do produto ser mais fechada, diminuindo a ocorrência de vazios.

Na Figura 25, observa-se mais claramente nas amostras com ar incorporado que as profundidades de carbonatação dos corpos de prova protegidos com argamassa polimérica e hidrofugante foram maiores do que nas amostras tratadas com resinas, no ensaio aos 7 dias. Na parte superior estão representados os corpos de prova com concreto convencional bombeável e na parte inferior os com ar incorporado.

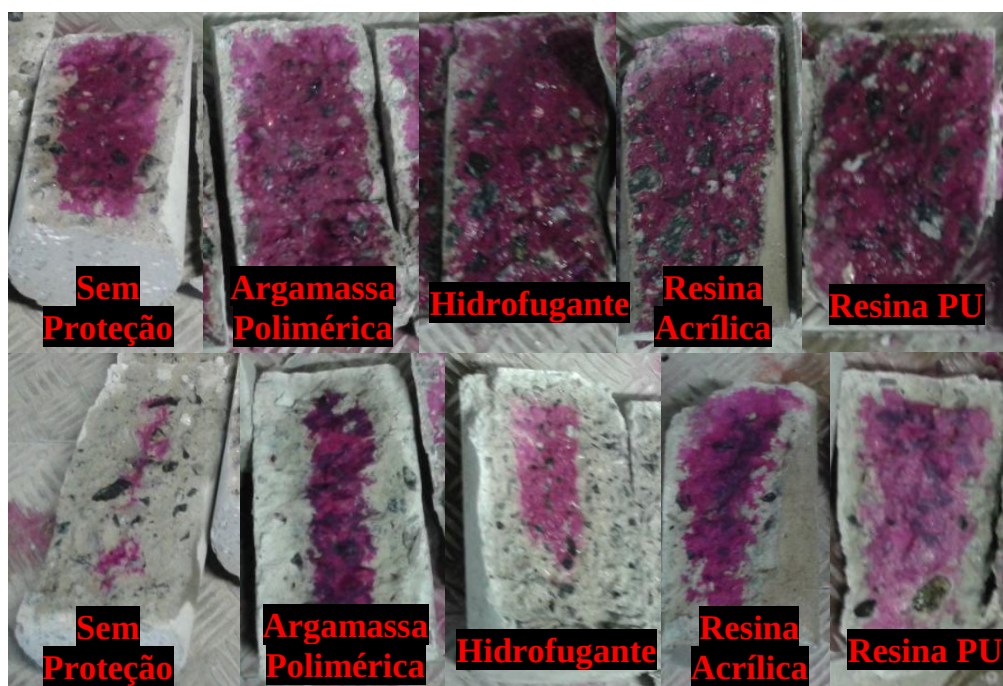


Figura 25 - Corpos de prova rompidos aos 7 dias, demonstrando as áreas carbonatadas, após aplicação de solução com fenolftaleína.

Na Tabela 5 estão representados os valores das profundidades de carbonatação tanto para os corpos de prova de concreto convencional, quanto para os confeccionados com ar incorporado, após serem rompidos decorridos 7 dias da exposição dos mesmos as altas concentrações de CO_2 da câmara de carbonatação.

Corpo de Prova	Concreto Utilizado no CP	Produto de Proteção Superficial	Profundidade de Carbonatação Parcial (mm)	Profundidade de Carbonatação Média (mm)
CP 1	Convencional Bombeável	Sem Tratamento	12,35	13,76
CP 2			12,41	
			15,17	
			15,09	
CP 1		Argamassa Polimérica	5,43	6,27
CP 2			5,48	
			7,01	
			7,17	
CP 1		Hidrofugante	3,67	4,25
CP 2			3,58	
			4,83	
			4,91	
CP 1		Resina Acrílica	4,23	3,86
CP 2			4,07	
			3,61	
			3,54	
CP 1	Resina de Poliuretano	3,47	2,81	
CP 2		3,61		
		2,14		
		2,03		
CP 3	Ar Incorporado	Sem Tratamento	70,61	70,61
CP 3			70,43	
		Argamassa Polimérica	37,78	37,78
37,64				
CP 3		Hidrofugante	26,31	26,31
26,16				
CP 3		Resina Acrílica	16,49	16,49
16,57				
CP 3		Resina de Poliuretano	9,73	9,73
			9,82	

Tabela 05 - Resultados das profundidades de carbonatação dos corpos de prova rompidos aos 7 dias.

Segundo os dados da Tabela 5, verificou-se que os corpos de prova com concreto convencional bombeável protegidos com argamassa polimérica

tiveram os maiores valores de profundidades de carbonatação em relação aos menores valores da resina de poliuretano, com variação entre ambos da ordem de grandeza de 223% aos 7 dias. Porém, nos corpos de prova com ar incorporado a variação observada é da ordem de 388%, devido a porosidade do corpo de prova.

Nos ensaios realizados as 14 dias, somente com corpos de prova com concreto convencional bombeável, notou-se a continuidade na diferença das profundidades de carbonatação dos corpos de prova protegidos com argamassa polimérica e hidrofugante sendo maiores do que nas amostras tratadas com resinas, conforme a Figura 26.

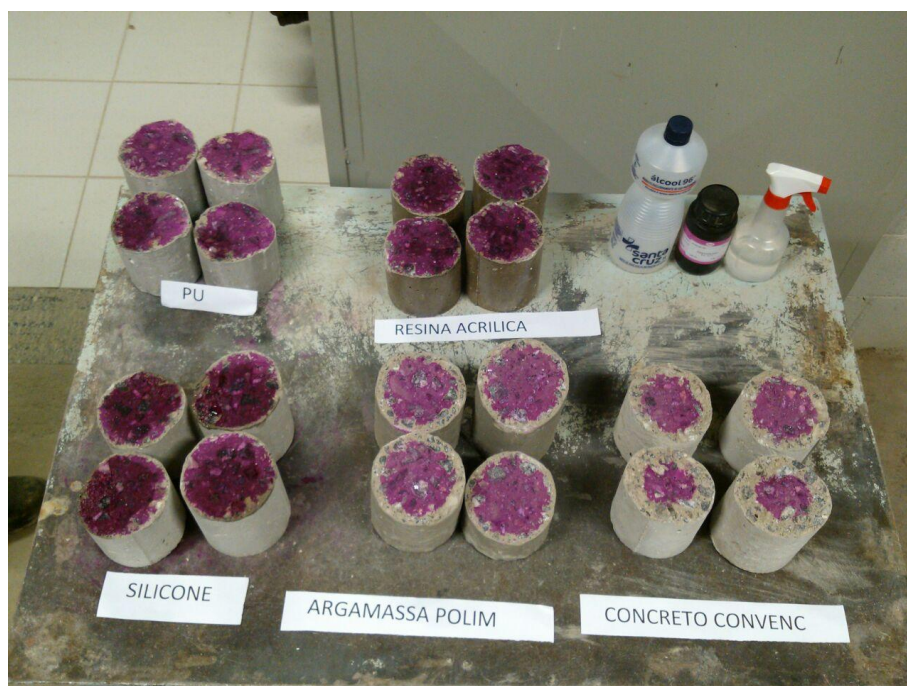


Figura 26 - Corpos de prova rompidos aos 14 dias, demonstrando as áreas carbonatadas, após aplicação de solução com fenolftaleína.

Na Tabela 6 estão representados os valores das profundidades de carbonatação somente para os corpos de prova de concreto convencional, após serem rompidos decorridos 14 dias da exposição dos mesmos as altas concentrações de CO_2 da câmara de carbonatação. Optou-se apenas pelos ensaios dos corpos de prova com ar incorporado com idades de 7 e 28 dias.

Corpo de Prova	Concreto Utilizado no CP	Produto de Proteção Superficial	Profundidade de Carbonatação Parcial (mm)	Profundidade de Carbonatação Média (mm)
CP 4	Convencional Bombeável	Sem Tratamento	15,63	16,87
CP 5			15,61	
			18,04	
			18,21	
CP 4		Argamassa Polimérica	9,93	10,28
CP 5			9,81	
			10,76	
			10,62	
CP 4		Hidrofugante	4,04	4,67
CP 5			4,26	
			5,12	
			5,24	
CP 4		Resina Acrílica	5,92	5,13
CP 5			5,98	
			4,25	
			4,37	
CP 4	Resina de Poliuretano	3,83	3,57	
CP 5		3,75		
		3,27		
		3,43		

Tabela 06 - Resultados das profundidades de carbonatação dos corpos de prova rompidos aos 14 dias.

Pela Tabela 6, verificou-se que os corpos de prova com concreto convencional bombeável protegidos com argamassa polimérica tiveram diferença dos valores médios de profundidades de carbonatação em relação aos das amostras protegidas com resina de poliuretano, da ordem de grandeza de 288% aos 14 dias.

Na Figura 27, após 28 dias de exposição dos corpos de prova na câmara de carbonatação, com ambiente interno saturado de dióxido de carbono observa-se nas amostras com ar incorporado que tanto o corpo de prova com concreto sem proteção, quanto os protegidos com argamassa polimérica e com

hidrofugante, tiveram carbonatação de 100%. Já nas amostras com concreto convencional a penetração do CO_2 não é profunda tanto quanto nos de ar incorporado, devido ao concreto possuir uma cadeia de materiais mais fechada, com menor índice de vazios. Na primeira fileira inferior estão representados os corpos de prova com ar incorporado. Nas demais os com concreto convencional bombeável.



Figura 27 - Corpos de prova rompidos aos 28 dias, demonstrando as áreas carbonatadas, após aplicação de solução com fenolftaleína.

Na Tabela 7 estão representados os valores das profundidades de carbonatação tanto para os corpos de prova de concreto convencional, quanto para os confeccionados com ar incorporado, após serem rompidos decorridos 28 dias da exposição dos mesmos as altas concentrações de CO_2 da câmara de carbonatação.

Corpo de Prova	Concreto Utilizado no CP	Produto de Proteção Superficial	Profundidade de Carbonatação Parcial (mm)	Profundidade de Carbonatação Média (mm)
CP 6	Convencional Bombeável	Sem Tratamento	19,38	20,27
CP 7			19,51	
			21,14	
			21,03	
CP 6		Argamassa Polimérica	11,89	11,58
CP 7			11,76	
			11,24	
			11,41	
CP 6		Hidrofugante	9,46	10,08
CP 7			9,58	
			10,59	
			10,67	
CP 6		Resina Acrílica	7,37	6,69
CP 7			7,24	
			6,02	
			6,11	
CP 6	Resina de Poliuretano	3,08	3,81	
CP 7		3,14		
		4,46		
		4,55		
CP 8	Ar Incorporado	Sem Tratamento	100	100
CP 8			100	
		Argamassa Polimérica	100	100
100				
CP 8		Hidrofugante	100	100
100				
CP 8		Resina Acrílica	20,52	20,52
20,73				
CP 8	Resina de Poliuretano	14,31	14,31	
14,09				

Tabela 07 - Resultados das profundidades de carbonatação dos corpos de prova rompidos aos 28 dias.

Observando os valores da Tabela 7, comparando as profundidades de carbonatação entre os corpos de prova com concreto convencional bombeável

protegidos com argamassa polimérica em relação aos protegidos com resina de poliuretano, os valores obtidos demonstram uma diferença de 304% aos 28 dias. Nos corpos de prova com ar incorporado esta diferença é de aproximadamente 700%, tanto em relação a argamassa polimérica, quanto ao hidrofugante.

Comparados os valores médios das frentes de carbonatação de todos os corpos de prova confeccionados com concreto convencional bombeável, resultou a Tabela 08 abaixo, com os percentuais de aumento dos valores de permeabilidade de CO₂ aos 28 dias, em relação dos valores obtidos aos 7 dias.

Concreto Utilizado no CP	Produto de Proteção Superficial	Frente de Carbonatação Média (mm)			Aumento da Frente de Carbonatação entre 7 e 28 Dias
		7 Dias	14 Dias	28 Dias	
Convencional Bombeável	Sem Tratamento	13,76	16,87	20,27	47%
	Argamassa Polimérica	6,27	10,28	11,58	85%
	Hidrofugante	4,25	4,67	10,08	137%
	Resina Acrílica	3,86	5,13	6,69	73%
	Resina de Poliuretano	2,81	3,57	3,81	35%

Tabela 08 - Resultados dos aumentos das profundidades de carbonatação aos 28 dias, em relação aos 7 dias, para o concreto convencional.

Segundo os percentuais calculados dos avanços das frentes de carbonatação, Tabela 08, verificou-se que os corpos de prova revestidos com produto hidrofugante ou hidrorrepelente tiveram valores 137% maiores aos 28 dias, do que em relação aos medidos aos 7 dias. Estes foram os que tiveram maiores percentuais de avanço comparados com o restante das amostras.

Entretanto, ainda na Tabela 08, as amostras com valores de avanço em torno de 35% maiores aos 28 dias foram os corpos de prova revestidos com resina de poliuretano, sendo o menor índice calculado através das médias obtidas.

Também, por sua vez, foram comparados os valores médios das frentes de carbonatação de todos os corpos de prova confeccionados com concreto com ar incorporado, aos 7 e aos 28 dias, resultando nos percentuais da Tabela 09 abaixo.

Concreto Utilizado no CP	Produto de Proteção Superficial	Frente de Carbonatação Média (mm)			Aumento da Frente de Carbonatação entre 7 e 28 Dias
		7 Dias	14 Dias	28 Dias	
Ar Incorporado	Sem Tratamento	70,61	-	100	42%
	Argamassa Polimérica	37,78	-	100	165%
	Hidrofugante	26,31	-	100	280%
	Resina Acrílica	16,49	-	20,52	24%
	Resina de Poliuretano	9,73	-	14,31	47%

Tabela 09 - Resultados dos aumentos das profundidades de carbonatação aos 28 dias, em relação aos 7 dias, para o concreto com ar incorporado.

Analisando os dados da Tabela 09, e os percentuais calculados dos avanços das frentes de carbonatação, observa-se que os corpos de prova revestidos com produto hidrofugante ou hidrorepelente tiveram valores ainda maiores de penetração de CO₂, com percentuais na ordem de 280%, devido ao maior índice de vazios dos corpos de prova com ar incorporado.

Por outro lado, nota-se que os corpos de prova com ar incorporado que tiveram os menores percentuais de avanço das frentes de carbonatação foram os revestidos com resina acrílica, com valores de 24% maiores aos 28 dias,

diferentemente dos resultados obtidos com os corpos de prova com concretos com cadeias de materiais mais fechadas.

Desta forma, para melhorar a visualização dos percentuais de avanços das frentes de carbonatação aos 28 dias em relação as médias obtidas nos ensaios aos 7 dias, calculados nas Tabelas 08 e 09, resultou-se na Figura 28 abaixo.

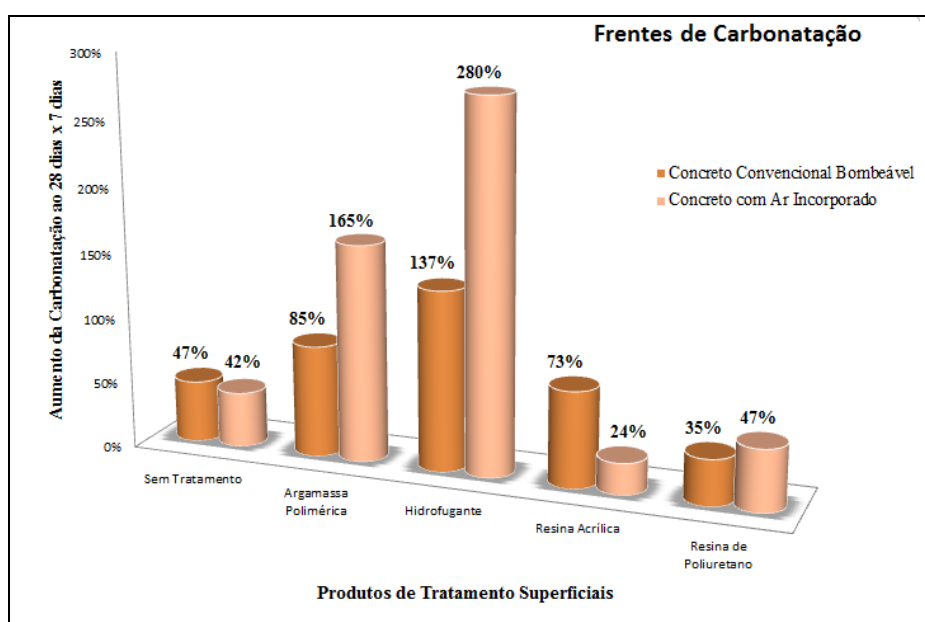


Figura 28 – Gráfico dos percentuais calculados das frentes de carbonatação aos 28 dias, com relação as amostras ensaiadas aos 7 dias.

No capítulo seguinte serão apresentadas as considerações finais da pesquisa e algumas sugestões e orientações para realização de trabalhos futuros.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo serão apresentadas as considerações finais deste trabalho, bem como as sugestões para novos estudos futuros com relação a este assunto.

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta de avaliação comparativa entre os 4 (quatro) produtos de proteção superficial para concreto com relação a resistência à frente de carbonatação, foi viabilizada através do estudo detalhado da bibliografia disponível, aplicação das normas vigentes e da construção de uma câmara para ensaios acelerados de carbonatação.

Os objetivos propostos no trabalho foram atingidos, comprovando-se a hipótese descrita no capítulo 1.

Os resultados dos ensaios confirmaram os diferentes comportamentos de cada tipo de material de proteção superficial frente à carbonatação, observando que:

- i) Corpos de prova inseridos na câmara de carbonatação com produtos de proteção superficial a base de Resina de Poliuretano (PU) apresentou maior resistência à Carbonatação.
- ii) Corpos de prova inseridos na câmara de carbonatação com produtos de proteção superficial de Argamassa Polimérica apresentou menor resistência à Carbonatação.

- iii) Notou-se também que corpos de prova inseridos na câmara sem a aplicação de qualquer produto de proteção superficial apresentou a maior permeabilidade de CO_2 . Vale lembrar que os mesmos foram inseridos na Câmara com o intuito de compará-los caso todos os corpos de prova revestidos com produtos de proteção superficial não demonstrassem qualquer tipo de resultado referente à Carbonatação.
- iv) Observou-se também, que tanto nos corpos de prova confeccionados com concreto convencional bombeável, quanto com concreto com ar incorporado, revestidos com os produtos de proteção superficiais analisados, todos os produtos permitiram a penetração de dióxido de carbono no concreto, carbonatando-os.
- v) O produto de proteção a base de resina de poliuretano apresentou índice de 176% melhor que o produto com base de resina acrílica, 265% melhor que o hidrofugante e 304% melhor que o produto com base cimentícia.
- vi) O produto de proteção com base cimentícia apresentou índice de 13% pior que os produtos hidrofugantes, 42% pior com base de resina acrílica, e 67% pior com produto com base de poliuretano.

5.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se, abaixo, proposições para novos trabalhos relacionados ao presente estudo:

- a) Estudar o grau de penetração de CO_2 em concretos de diferentes classes de resistência à compressão;

- b) Estudar o grau de penetração de CO₂ com 2 (duas) câmaras idênticas, sendo uma com controle de temperatura interna e de umidade relativa do ar, e outra câmara sem controle de nenhum destes dois índices.
- c) Estudar o grau de penetração de CO₂ em concretos de Auto Desempenho CAD.
- d) Estudar o grau de penetração de CO₂ em concretos com traços com adição de fibras de aço, e/ou fibras sintéticas, e/ou fibras de retração.
- e) Comparar ensaio acelerado de carbonatação com o ensaio de carbonatação no ambiente normal.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655 – Concreto de Cimento Portland – Preparo, Controle e Recebimento - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738- Concreto - Procedimento para Moldagem e Cura de Corpos-de-Prova.** Rio de Janeiro, 2003 – Emenda 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9575 – Impermeabilização – Seleção e projeto.** Rio de Janeiro, 2010.

ALVES, J.D. **Manual de Tecnologia do Concreto.** 3º edição, Goiânia, Editora UFG, 1993.

ANDRADE, T.; SILVA, A.J.C. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações, Vol.2 – Patologia das Estruturas.** Ed.Geraldo Cechella Isaia- São Paulo: IBRACON, 2005.

ANDRIOLO, F.R. **Construção de Concreto, Manual de Práticas para Controle e Execução.** São Paulo: PINI, 1984.

ANGHINETTI, I. C. B. **Tintas, suas Propriedades e Aplicações Imobiliárias.** Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Construção Civil da Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte, 2012.

ARANTES, Yara de Kassia. **Uma Visão sobre Impermeabilização na Construção Civil**. Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Construção Civil da Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte, 2007.

BOURGUINGNON, K. M. B. G. B. **Influencia da Resistência a Compressão na Carbonatação de Concretos com Diferentes Teores de Escoria de Alto Forno**. 150p. Dissertação (Mestrado em eng. Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo. Vitoria- ES.2004.

CAVALCANTI FILHO, A. N.; CAFANGE, D. M. P. J. **Carbonatação: Estudo de Ensaio Acelerados por Ciclagem em Concretos com Diferentes Períodos de Cura**. In: 51º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON, 2009.

CECHELLA, G. **Estudo da Permeabilidade à Água na Camada de Cobrimento de Protótipos Concretos com Altos Teores de Cinza Volante**. Santa Maria – RS – Dissertação de Mestrado, 2004.

COELHO, M. A. M. et al. **Estudo da Carbonatação e Retração em Concretos de Alto Desempenho com Elevados Teores de Escória de Alto-Forno**, Belo Horizonte. Congresso Brasileiro de Concreto, 2002.

FAZENDA, J. M. R. **Tintas: Ciência e Tecnologia**. 4. edição São Paulo: Blucher, 2009.

FIGUEIREDO, E. J. P., HELENE, P. R. L., ANDRADE, C., **Fatores Determinantes da Iniciação e Propagação da Corrosão da Armadura de Concreto** - São Paulo: EPUSP, 32p. - (Boletim técnico da Escola Politécnica da USP - BT/PCC/121, Departamento de Engenharia de Construção Civil), 1993.

GASPARIM, J. C. **Concreto Planejado Elaborado com Cimentos Especiais: Análise Segundo Parâmetros de Durabilidade**. São Paulo, 111 p. dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, USP, 2007.

GIAMMUSSO, S. **Manual do Concreto**. São Paulo. PINI, 1992.

GUIMARÃES, A.T.C. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações, Vol.1 - Propriedades do Concreto Fresco**. Ed.Geraldo Cechella Isaia - São Paulo: IBRACON, 2005.

HELENE, P.; ANDRADE T. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais - Concreto de Cimento Portland**. ed. G. C. Isaia. – São Paulo: IBRACON, 2007.

HELENE, P. **Corrosão das Armaduras para Concreto Armado**. São Paulo, IPT, PINI, 1986.

HELENE, P. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações, Vol.1 - Dosagem dos Concretos de Cimento Portland**. Ed.Geraldo Cechella Isaia - São Paulo: IBRACON, 2005. 1v.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HELENE, P. **Manual para Reparo, Reforço e Proteção de Estruturas de Concreto**. Ed. Pini, São Paulo, 2009.

HOPPE, A. E. **Carbonatação em Concreto com Cinza de Casca de Arroz sem Moagem**. Santa Maria, 147 p. dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, 2008.

HOPPE, T. F. **Resistividade Elétrica de Concretos Contendo Diferentes Teores de Cinza de Casca de Arroz**. Santa Maria, 147 p. dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, 2005.

ILIESCU, M. **Silicones–Silanos–Siloxanos**. (2009) Disponível:< <http://www.iliescu.com.br/palestras/silicones-silanos-siloxanos.swf>>. Acesso em: 23 out 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE IMPERMEABILIZAÇÃO. **Sistemas Impermeabilizantes x Subsolos**. 2009. Disponível em: <http://www.ibisp.org.br/?pagid=vrevista_techne&id=19>. Acesso em: 25 ago. 2014.

KAEFER, L.F. **Considerações sobre a Microestrutura do Concreto**. Notas e aula Escola politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

KAZMIERCZAK, C. S. **Contribuição para Análise de Eficiência de Películas Aplicadas sobre Estruturas de Concreto Armado com o Objetivo de Proteção contra a Carbonatação**. 168 p. Tese (Doutorado) – CPGECC, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 1995.

LEVY, S.; HELENE, P. **Cura: Como, Quando e Por quê**. Téchne – Revista de Tecnologia da Construção, nº 20, Editora Pini, São Paulo, 1996.

MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de. **Contribuição ao Estudo da Durabilidade de Concreto com Proteção Superficial Frente à Ação de Íons Cloretos**. Doutorado em Engenharia – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo. PINI, 1994.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 674p. 1.edição. São Paulo: Editora IBRACON, 2008.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. Tradução: Salvador E. Giammusso. 828p. 2ªed. rev. atual., São Paulo: Pini, 1997.

RIBEIRO, D. C. F.; PELISSER, F.; GLEIZE, J. P.. **Estudo da Porosidade em Concretos com Diferentes Classes de Resistência e Adições Minerais**. Anais do 51º Congresso Brasileiro do Concreto - CBC2009 – 51CBC0124. 2009.

RICHARDSON, M. G. **Carbonation of Reinforced Concrete**: Its causes and management. New York: CITIS Ltd. Publishers. 205 p, 1988.

RILEM. **Measurement of Hardened Concrete Carbonation depth**. Materials and Structures Journal, vol. 21, 1988.

SALEME, J. R., **Innovation in Building Chemicals**. Disponível em: <http://www.der.pr.gov.br/arquivos/File/9EncontroTecnico/Tecnologias_e_Solucoes_MC-Bauchemie_Jose_R_Saleme.pdf> Acesso em 22 out 2014.

SAYEGH, S. **Cimentos e Poliméricos contra a Umidade**. Técnica, São Paulo, n. 56, p. 42-44, Nov. 2001.

SILVA, V. M. **Ação da Carbonatação em Vigas de Concreto Armado em Serviço, Construídas em Escala Natural e Reduzida**. São Carlos. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos, 2007.

VASCONCELOS, A. C. **O Concreto no Brasil**. Vol. 2, Ed. PINI, São Paulo, 2002.

VASCONCELOS, A. C. **O Concreto no Brasil: Recordes – Realizações – História**. Vol. 2. Ed. PINI, São Paulo, 1992.

VEDACIT **Manual Técnico. Recuperação de Estruturas (3ª edição)**. Disponível: <<http://www.vedacit.com.br/neu/images/edi/lib/8.pdf>>. Acesso em: 24 out 2014.

VIEIRA, R. M. S.; MARQUES, V. C. **Carbonatação Natural de Concretos – Influência de Características dos Materiais e de Fatores Ambientais**. In: 51º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON, 2009.