Avaliação da Durabilidade de Concretos Estruturais com Agregados Leves Inovadores Utilizando a Carbonatação Acelerada

13

Bruno Carlos de Santis
Juliano Fioreli
Holmer Savastano Junior
João Adriano Rossignolo

Este trabalho tem por objetivo a avaliação da durabilidade de concretos estruturais com agregados leves inovadores, utilizando a metodologia de carbonatação acelerada. Tal metodologia foi definida, inicialmente, considerando as etapas de moldagem, cura e preparação dos corpos de prova de concreto de cimento Portland, assim como as condições de exposição (idade, tempo de exposição, teor de CO₂, temperatura e umidade relativa). Para avaliação e validação da metodologia, foram analisados concretos com agregados convencionais (basalto), agregados leves comerciais (argila expandida) e dois tipos de agregados leves inovadores (argila vermelha calcinada), produzidos especificamente para o presente estudo. Os resultados desta pesquisa indicam que a metodologia de carbonatação acelerada escolhida foi eficaz na identificação da influência dos agregados leves inovadores na velocidade da frente de carbonatação em concretos estruturais.

1. Introdução

O concreto é um material de construção consagrado em todo o mundo, com diferentes tipos de utilização residencial, industrial, comercial e de infraestrutura. O grande número de utilização desse material dá-

se, principalmente, pelas características ótimas que o concreto estrutural promove às estruturas, devido à combinação do concreto com o aço.

A junção desses dois materiais distintos possibilita a confecção de estruturas amplas, com grandes vãos, curvas e diferentes tipos de arquitetura. Além do viés construtivo, a junção do concreto com o aço promove também uma maior proteção à armadura de aço, uma vez que o concreto que reveste o aço o protege física e quimicamente da ação do ambiente.

A substituição dos agregados graúdos convencionais por agregados leves proporciona a produção de concretos leves, com massa específica menor que a dos concretos convencionais, gerando uma economia nas fundações e em fôrmas e cimbramentos, com a possibilidade de aplicação em diversas áreas da construção civil, como em edificações pré-fabricadas, pontes e plataformas marítimas (SANTIS, 2012).

A durabilidade das armaduras de aço nas estruturas de concreto armado depende da espessura da camada de cobrimento do concreto, que deve ter uma proporção adequada, alta compacidade e ser homogênea, além de possuir alcalinidade apropriada, uma vez que quanto mais alcalina e mais espessa a camada de cobertura do concreto, maior a proteção que ele exercerá sobre a armadura, podendo o concreto armado ser mais durável (CAFANGE, 2011).

Porém, a partir do desenvolvimento de cimentos com características especiais, bem como do desenvolvimento de técnicas construtivas inovadoras, muitas vezes, as estruturas de concreto são projetadas prevendo-se um cobrimento mínimo, que, atrelado ao grande aumento da poluição das cidades, prejudica a proteção oferecida pelo concreto à armadura, causando uma diminuição na durabilidade dos concretos estruturais.

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), a durabilidade das estruturas de concreto define-se pela capacidade da estrutura em resistir às influencias ambientais previstas e pré-definidas pelo autor do projeto e o contratante, no momento da execução do projeto de construção.

A durabilidade dos concretos pode ser influenciada por diversos fatores, dentre eles a deficiência de projetos específicos e detalhados das construções, falhas na execução das estruturas, utilização de materiais inadequados nas construções e falta de manutenção dos edifícios.

Os custos de reparos e substituições em estruturas de concreto têm aumentado substancialmente. Em países desenvolvidos, estima-se que cerca de 40% dos recursos empregados no setor da construção civil são injetados em recuperação, manutenção e reformas de estruturas, e, em países em desenvolvimento, calcula-se que esses valores podem chegar a 60% dos recursos da indústria da construção civil (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

De acordo com Silva (2007), cerca de 30% das patologias observadas em estruturas de concreto são causadas pela corrosão das armaduras, decorrente do efeito da carbonatação, que consiste em um processo físico-químico de difusão e dissolução do gás carbônico nos poros do concreto.

Ainda segundo Silva (2007), a carbonatação ocorre naturalmente em estruturas de concreto expostas ao CO_2 , que se difunde pela superfície do concreto, pela presença de umidade e dos poros do concreto.

Nesse contexto, concretos leves estruturais merecem atenção especial, uma vez que, por serem constituídos de agregados mais porosos, muitas vezes apresentam maior porosidade e, conseqüentemente, maior possibilidade de absorção de água que os concretos convencionais, podendo assim estar mais suscetíveis ao processo de carbonatação.

O dióxido de carbono penetra nos poros do concreto pelo processo de difusão, por meio de fissuras ou poros interconectados. Em alguns casos, agregados muito porosos também influenciam no processo de difusão do CO_2 no concreto, fato que está diretamente ligado à porosidade dos concretos, posto que quanto maior a quantidade de poros interconectados, maior a difusão do CO_2 para o interior dos concretos (SILVA, 2007).

Nessa perspectiva este trabalho tem por objetivo avaliar a influência dos agregados leves (comerciais e inovadores) na velocidade de carbonatação em concretos estruturais.

2. Carbonatação em Concretos Estruturais

A junção das propriedades do concreto com as do aço transformou o concreto armado em um dos materiais de construção mais utilizados em todo o mundo, possibilitando construções com formas complexas e com grandes vãos livres.

Além disso, devido à sua alta alcalinidade, o concreto promove uma proteção para as armaduras de aço, que, quando em contato com o concreto, recobrem-se com uma camada passivante, capaz de as proteger das ações do ambiente.

A formação desse ambiente alcalino dá-se pela hidratação do cimento, que gera, genericamente, silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) e hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), sendo os primeiros responsáveis pela resistência do concreto e os segundos pela criação do ambiente alcalino propriamente dito (pH na ordem de 13) (WERLE, 2010).

Segundo Werle (2011), o contato do CO_2 presente na atmosfera com os produtos da hidratação do concreto (presentes nos poros intersticiais) gera reações químicas que podem desencadear o processo de carbonatação dos concretos.

A carbonatação mostra-se como um dos principais mecanismos de envelhecimento dos concretos, podendo acarretar o processo de corrosão das armaduras, que muitos estudiosos consideram como o mais grave e frequente problema estrutural dos concretos armados, podendo causar até a ruína das estruturas (CAFANGE, 2011).

Segundo Rilem (1999), a carbonatação é um processo que ocorre naturalmente nas estruturas de concreto armado e é definida como a neutralização da fase líquida intersticial saturada de hidróxido de cálcio e outros compostos alcalinos hidratados do concreto, como o NaOH e o KOH, pelo CO_2 presente na atmosfera, que precipitam como carbonato de cálcio.

Por ser menos solúvel que os outros álcalis do cimento, o hidróxido de cálcio apresenta-se normalmente nos poros do concreto na forma de cristais, enquanto os álcalis apresentam-se dissolvidos na forma de íons. Dessa forma, a reação de carbonatação começa pelos álcalis NaOH e KOH, passando depois para o hidróxido de cálcio, uma vez que sua solubilidade depende da concentração de OH^- na solução intersticial (GOMES, 2006).

Antes do início da carbonatação propriamente dita, ocorre a difusão do CO_2 nos poros do concreto (na presença de umidade) para posteriormente ocorrer a reação química do CO_2 com os componentes alcalinos, como ilustram as Equações 1, 2 e 3 (ANDRADE, 1992).

Segundo Hoppe Filho (2008), além da reação principal de transformação de um composto cristalino ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) em outro também cristalino (CaCO_3), ocorrem também outras reações, as quais se verificam a formação de compostos cristalinos como o Al_2O_3 e o Fe_2O_3 .

O elevado pH do concreto (em torno de 13) permite a passivação da armadura, protegendo-a contra a corrosão, uma vez que nessas condições extremamente alcalinas ocorre a formação de uma fina camada oxidante que envolve e protege o aço da armadura. Porém, quando o hidróxido de cálcio é consumido pelas reações de carbonatação, ocorre a diminuição do pH do concreto, ocasionando a despassivação da armadura (WERLE, 2010).

Hoppe Filho (2008) ressalta que o processo de corrosão da armadura não se inicia imediatamente com o início do processo de carbonatação do concreto, mas sim no instante da despassivação da armadura, causada pela remoção da camada oxidante que a envolve.

Segundo Reis (2013), o processo de carbonatação necessita de umidade para ocorrer, uma vez que o processo consiste na difusão do CO_2 e dissolução desse composto químico na água presente nos poros do concreto. Com a presença de CO_2 na água dos poros, ocorre a diminuição da concentração de íons OH^- , ocasionando diminuição do pH do concreto.

Dessa forma, a área de avanço da carbonatação pode ser dividida em 3 partes, sendo elas: região carbonatada (pH abaixo de 9), denominada profundidade de carbonatação; região em carbonatação (pH entre 9 e 12), denominada frente de carbonatação; e região sem carbonatação (pH acima de 12) (KULAKOWSKI, 2002).

Portanto, a durabilidade dos concretos está ligada à sua estrutura porosa e à conectividade dos poros. Dessa forma, a durabilidade relaciona-se à permeabilidade dos concretos, e não apenas à porosidade, posto que a melhoria da zona de transição pasta-agregado contribui significativamente

para a redução da permeabilidade, tendo em vista que a origem das microfissuras dos concretos ocorre nessa região. Isso fica evidente quando se estuda a carbonatação dos concretos, que ocorre intensamente em regiões de maior permeabilidade nos concretos (SANTIS, 2016).

Portanto, durante o processo de dosagem, produção e cura dos concretos deve haver rigoroso cuidado, conhecendo-se os materiais a serem utilizados e os processos para a produção dos concretos, principalmente se forem utilizados agregados leves para a produção de concretos leves estruturais, procurando-se assim diminuir a quantidade dos poros dos concretos e suas conectividades, menores profundidades de carbonatação e maior durabilidade dos concretos.

3. Fatores que Influenciam o Processo de Carbonatação em Concretos

Diferentes tipos de concreto apresentam diferentes velocidades de carbonatação, uma vez que a difusão do CO_2 varia com o tipo de cimento e a relação água/cimento utilizados para a confecção do concreto, o tipo e o tempo de cura do concreto, a temperatura e umidade de exposição da estrutura e a resistência à compressão do concreto (CASCUDO, 1997).

3.1. Concentração de CO_2

A difusão do CO_2 do ambiente externo para o ambiente interno do concreto dá-se pela diferença de concentração desse gás entre os dois ambientes. Dessa forma, segundo Hoppe Filho (2008), quanto maior a diferença de concentração de CO_2 entre os ambientes externos e internos, maior será a penetração do gás no concreto.

Segundo Helene (1993), a concentração de CO_2 no meio externo varia de 0,03% a 0,05% para atmosferas rurais, de 0,1% a 1,2% para ambientes urbanos e acima de 1,8% para ambientes onde não há troca de ar, quando a atmosfera já está “viciada”.

A escolha de concentração de CO_2 para realização de ensaio acelerado de carbonatação não é consenso entre os pesquisadores, sendo encontrados na literatura trabalhos que utilizam concentração de CO_2 variando de 1% a 100% (PAULETTI, 2009).

Ainda segundo Pauletti (2009), diversos ensaios realizados por diferentes pesquisadores indicam que o incremento da difusão do CO_2 dá-se até uma concentração de cerca de 10%. Porém, como já mencionado, não há consenso sobre isso, uma vez que diferentes trabalhos científicos apresentam concentrações de CO_2 superiores a esse patamar.

A autora ainda ressalta que a norma europeia (ANFOR, NF EN 13295, 2004) indica que, para ensaios acelerados de carbonatação, a concentração ótima de CO_2 deve ser de 1%, justificando que os produtos formados nas reações de carbonatação durante o ensaio são os mesmos formados em condições naturais e reais de concentração de CO_2 .

3.2. Umidade

A umidade do ensaio de carbonatação não diz respeito à umidade do concreto propriamente dito, mas concerne à umidade de equilíbrio entre o concreto e o meio externo, ou seja, à umidade do ambiente de exposição do concreto.

O processo de carbonatação em ensaios acelerados não é perceptível em ambientes com umidade relativa inferior a 50% mas, por outro lado, quando a umidade do ambiente é muito alta, ocorre a saturação dos poros, causando diminuição na potencialidade de difusão do CO_2 , diminuindo-se assim o processo de carbonatação (WERLE et al., 2011)

Ainda de acordo com Werle et al. (2011), alguns estudos indicam que as maiores velocidades de carbonatação ocorrem em ambientes com umidade variando de 40% a 80%, outros indicam que a umidade ótima para o ensaio acelerado é a que varia de 50 a 70%, mas a maioria dos estudos atuais têm adotado umidade relativa igual a $60 \pm 5\%$.

3.3. Temperatura

Segundo Cafange (2011), a temperatura de exposição das estruturas de concreto pode contribuir para a melhoria das condições microestruturais do concreto, devido à aceleração de reações de hidratação do cimento.

Em contrapartida, grandes variações térmicas podem causar choques térmicos nas estruturas de concreto, que, por serem compostas de diferentes materiais com características térmicas diferentes, podem causar microfissuras

nos concretos, possibilitando assim maior facilidade para penetração de agentes agressivos (PELLIZZER, 2015).

Porém, segundo Pauletti (2009), a temperatura exerce pouca influência no processo de carbonatação dos concretos, levando em consideração que estudos indicam que a variação da temperatura entre 20°C e 40°C exerce pouca ou nenhuma influência em ensaios acelerados de carbonatação.

3.4. Cimento

O tipo e a quantidade de cimento influenciam no processo de carbonatação dos concretos devido à quantidade de compostos alcalinos disponíveis para reagir com o CO_2 da atmosfera, visto que quanto mais puro e fino o cimento, maior a produção de álcalis e, conseqüentemente, maior a quantidade de produto para reagir com o CO_2 , aumentando-se a carbonatação do concreto (WERLE, 2010).

Segundo Cafange (2011), as adições de escórias e pozolanas nos cimentos tipo CPIII e CP IV contribuem para o aumento da velocidade de carbonatação dos concretos produzidos com esses tipos de cimento, uma vez que esses tipos de cimento apresentam menores quantidades de Ca(OH)_2 , facilitando-se assim a difusão do CO_2 .

3.5. Cura

As condições de cura do concreto interferem diretamente nas propriedades do produto final, pois quanto melhores as condições de cura, melhores as condições de hidratação do concreto, tornando-o menos poroso e, conseqüentemente, menos passível à difusão do CO_2 .

Segundo Pauletti (2009), a cura submersa ou úmida propicia melhores condições de hidratação do cimento, causando fechamento dos poros e conseqüentemente diminuição da velocidade de carbonatação dos concretos.

3.6. Tipo de Agregado

Por serem considerados inertes ao processo de carbonatação, os tipos de agregado são tratados como fator de pouca influência no processo de carbonatação dos concretos.

Porém, as características dos agregados, como granulometria, porosidade e absorção de água, interferem diretamente nas características de moldagem dos concretos, gerando grandes influências na zona de transição pasta – agregado que, em razão da utilização de agregados porosos, pode tornar-se 50% mais porosa que a pasta de cimento (CAFANGE, 2011).

Durante o período inicial de hidratação, a zona de transição é vulnerável, devido às deformações entre a pasta de cimento e o agregado. Essas deformações geram pequenas fissuras, que contribuem diretamente para o aumento da velocidade de carbonatação dos concretos (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Além disso, com a utilização de agregados porosos, com camada externa não vitrificada e com conectividade entre os poros, como ocorre em alguns casos com agregados leves de argila calcinada ou agregados provenientes de resíduos de construção e demolição, altera-se consideravelmente a porosidade dos concretos, tornando-os mais porosos e, possivelmente, mais suscetíveis ao processo de carbonatação (WERLE et al., 2011).

Ainda segundo Werle et al. (2011), essa afirmação ainda não é consensual entre os pesquisadores, tendo em vista que, em alguns trabalhos, a substituição de agregados convencionais por agregados provenientes de resíduos de construção e demolição não causou aumento da profundidade de carbonatação dos concretos. Os autores explicam que esse comportamento dá-se pela formação de uma barreira localizada na interface pasta/agregado, a qual minimiza a profundidade de carbonatação dos concretos.

4. Materiais e Métodos

Para a presente pesquisa, foram confeccionados corpos de prova de concreto cilíndricos, com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, utilizando-se agregados leves de argila calcinada proveniente de Itu/SP e Porto Ferreira/SP, agregados leves de argila expandida e agregados convencionais de basalto (SANTIS, 2012).

Os corpos de prova foram confeccionados no Laboratório de Construção Civil (LCC) do Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos, SP - USP. A Tabela 1 apresenta as características dos quatro tipos de agregados utilizados.

Tabela 1. Características físicas dos agregados graúdos utilizados na produção dos concretos. Fonte: Santis, 2012.

Agregado	Absorção de água (%) – 24 horas de imersão	Massa específica aparente (kg/m ³)	Resistência à compressão (MPa)*
Brita nº 1	2,00	2934	-
Argila expandida	12,61	975	-
Argila calcinada de Itu	15,67	1791	39,50
Argila calcinada de Porto Ferreira	21,64	1555	18,00

*Método adaptado da NBR 5739 (ABNT, 2007) para corpos de prova cerâmicos cilíndricos com base de 15 mm e altura de 30 mm.

Conhecendo-se as características de cada um dos agregados, procurou-se manter em um mesmo patamar os consumos de cimento para os quatro tipos de concreto, assim como a relação água/cimento de 0,5 e o volume dos agregados miúdos e graúdos para todas as dosagens, como ilustra a Tabela 2.

Tabela 2. Consumo real dos materiais para a produção de 1 m³ de concreto.

CP	Cimento (kg)	Areia (kg)	Agregado (kg)	Relação água/cimento
Brita nº 1	387,53	968,84	821,58	0,5
Argila expandida	377,40	943,51	271,73	0,5
Argila calcinada de Itu	389,17	972,92	537,06	0,5
Argila calcinada de Porto Ferreira	383,94	959,84	479,92	0,5

Os concretos foram secos no ambiente do laboratório por 24 horas. Após esse período, foram desenformados e submetidos ao processo de cura em uma câmara úmida, com umidade variando de 90% a 95% e temperatura variando de 20°C a 23°C, até atingirem a idade de 28 dias. Após esse período, foram transferidos para uma sala climatizada, com temperatura variando de 22°C a 26°C e umidade variando de 62% a 78%, na qual permaneceram até 91 dias de idade. Após esse período, foram transferidos para o ambiente do laboratório, em que permaneceram por um período de 365 dias, para garantir a uniformidade da umidade dos corpos de prova. Em seguida, foram submetidos ao processo de corte, em três partes cilíndricas iguais, com 100 mm de diâmetro e 66,67 mm de altura, como ilustram as Figuras 1 e 2.

Figura 1. Corte dos corpos de prova.

Figura 2. Corpos de prova cortados.

Após o corte, os corpos de prova permaneceram em descanso no ambiente do laboratório por um período de 3 dias, apenas para reestabelecimento da umidade uniforme, uma vez que para o corte dos corpos de prova foi utilizada uma serra com jato de água.

Em seguida, os corpos de prova foram selados por meio da aplicação de um verniz acrílico incolor de secagem rápida, específico para estruturas de concreto. Os corpos de prova foram selados em suas extremidades laterais e

em uma de suas outras extremidades, sempre escolhendo a que apresentava pior acabamento. Foram aplicadas 2 demãos de verniz em cada um dos corpos de prova.

Após a selagem dos corpos de prova com verniz, eles foram envoltos por 5 camadas de filme de PVC e, em seguida, embalados por um saco plástico, como ilustra a Figura 3.

Figura 3. Corpos de prova ensacados para o ensaio de carbonatação.

Após a preparação, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de carbonatação acelerada em câmara de carbonatação com teor de CO_2 igual a 10%, umidade de 65% e temperatura de 23°C , como ilustra a Figura 4.

Figura 4. Corpos de prova na câmara de carbonatação acelerada.

Além do ensaio de carbonatação, os corpos de prova, antes de serem cortados, foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão, absorção de água e massa específica aparente [NBR 5739, (ABNT, 2007), NBR 9778 (ABNT, 2005, versão corrigida 2009)].

5. Resultados e Discussões

As propriedades dos concretos no estado fresco são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Propriedades dos corpos de prova no estado fresco.

CP	Massa específica (Kg/m ³)	Slump (mm)	Teor de ar incorporado (%)
Brita nº 1	2386	40	2,03
Argila expandida	1766	50	4,59
Argila calcinada de Itu	2151	45	2,66
Argila calcinada de Porto Ferreira	2124	50	2,82

Analisando-se a Tabela 3, observa-se que os valores de massa específica no estado fresco dos concretos variaram entre 2386 Kg/m³ para os corpos de prova produzidos com brita como agregado e 1766 Kg/m³ para os corpos de prova produzidos com agregados de argila expandida. Os corpos de prova produzidos com os agregados de Itu e Porto Ferreira apresentaram uma redução em massa de 10,93% e 12,34% respectivamente, quando comparados aos corpos de prova produzidos com brita.

Ainda examinando-se a Tabela 3, percebe-se que os corpos de prova produzidos com os agregados de Itu e Porto Ferreira apresentaram valores de teor de ar incorporado muito próximos, 2,66% e 2,82%, respectivamente, permanecendo em um patamar intermediário entre os corpos de prova produzidos com brita (2,03%) e argila expandida (4,59%).

Os valores de resistência à compressão dos concretos são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Valores de resistência à compressão dos corpos de prova de concreto.

CP	Resistência à compressão (MPa)					
	7 dias	Desvio padrão	28 dias	Desvio padrão	91 dias	Desvio padrão
Brita nº 1	25,55	1,15	34,07	1,38	42,77	1,03
Argila expandida	20,32	0,58	23,68	0,59	28,08	0,71
Argila calcinada de Itu	18,95	0,68	23,94	0,96	29,70	0,72
Argila calcinada de Porto Ferreira	16,22	0,86	19,79	1,35	25,82	1,24

De acordo com a Tabela 4, aos 7 dias de idade, os valores de resistência dos corpos de prova são muito próximos, uma vez que, nessa idade, a pasta de cimento ainda não atingiu sua resistência máxima, e, com isso, os agregados apresentam menos influência na resistência dos concretos do que em idades mais avançadas.

Já aos 91 dias de idade, quando a pasta de cimento, areia e água já atingiu boa parte de sua resistência, os agregados apresentam grande influência na resistência dos concretos, uma vez que concretos produzidos com brita (agregado com valor de resistência à compressão da ordem de 120 MPa) apresentaram valor de resistência à compressão (42,77 MPa) superior aos valores observados para os concretos confeccionados com agregados leves.

A Tabela 5 apresenta os valores de absorção de água e massa específica aparente seca dos corpos de prova de concreto.

Tabela 5. Absorção de água e massa específica aparente seca dos corpos de prova de concreto.

CP	Absorção de água – 24 horas (%)	Absorção de água - 48 horas (%)	Absorção de água 72 horas (%)	Massa específica aparente seca (Kg/m ³)
Brita nº 1	4,71	5,87	6,28	2235
Argila expandida	6,6	8,84	9,23	1608
Argila calcinada de Itu	10,53	10,88	11,02	1948
Argila calcinada de Porto Ferreira	11,31	11,97	12,12	1896

Analisando-se a Tabela 5, percebe-se que os corpos de prova absorvem a maior quantidade de água nas primeiras 24 horas de imersão, principalmente os corpos de prova confeccionados com agregados leves de Itu e Porto Ferreira, uma vez que esses tipos de agregados apresentam elevados valores de absorção de água, quando comparados à argila expandida e à brita, o que explica os elevados valores de absorção de água apresentados pelos concretos produzidos com agregados leves de argila calcinada de Itu e Porto Ferreira, como ilustra a Figura 5.

Figura 5. Evolução da absorção de água dos corpos de prova de concreto.

A Tabela 6 apresenta os valores de profundidade de carbonatação dos corpos de prova de concreto.

Analisando-se a Tabela 5, percebe-se que a profundidade de carbonatação dos corpos de prova de concreto aumenta gradativamente com o aumento da idade de exposição dessas mesmas amostras, devido à difusão do CO_2 do ambiente para o interior do concreto.

Tabela 6. Profundidade de carbonatação dos corpos de prova de concreto.

Idade (dias)	Profundidade de carbonatação (mm)			
	Brita nº 1	Argila expandida	Argila calcinada de Itu	Argila calcinada de Porto Ferreira
0	0	0	0	0
3	5,14	6,26	5,10	6,57
5	7,97	9,16	9,39	9,41
7	9,00	12,31	11,07	13,54
12	10,50	15,37	14,32	17,17
17	12,72	17,46	18,50	20,79
21	13,71	19,06	20,39	22,74
26	13,75	20,60	21,26	23,91
31	14,27	21,64	21,76	25,75

Percebe-se também que concretos confeccionados com agregados leves de argila calcinada de Porto Ferreira (agregados mais porosos - 37,59%) e absorventes (24,18% - entre os utilizados) apresentaram as maiores profundidades de carbonatação dentre todos os concretos analisados, em todas as idades, devido à maior porosidade existente, o que facilita a difusão do CO₂ para o interior do concreto.

Esse comportamento também pode ser explicado pela absorção de água desse tipo de concreto, que por ser muito poroso e ter os poros interconectados, contribui para a difusão do CO₂ para o interior do concreto, em um meio úmido e propício para a carbonatação.

Fica evidente também que a profundidade de carbonatação dos concretos confeccionados com argila expandida e agregados leves de argila calcinada de Itu é muito semelhante, uma vez que esses concretos apresentaram valores de resistência à compressão aos 91 dias (28,08 MPa e 29,70 MPa, respectivamente) e absorção de água (9,23% e 11,02%, respectivamente) muito semelhantes.

Já os concretos produzidos com brita, agregado menos poroso e mais resistente, proporcionando menos poros e maior resistência e densificação a esse tipo de concreto, apresentaram as menores profundidades de carbonatação dentre os concretos analisados, uma vez que com um número menor de poros e com menos poros interconectados, dificulta-se a difusão do

CO₂, diminuindo-se assim a profundidade de carbonatação, como ilustra a Figura 6.

Figura 6. Evolução da profundidade de carbonatação nos corpos de prova de concreto.

Ressalta-se aqui que os agregados utilizados para a pesquisa foram utilizados, na ocasião da moldagem dos concretos, saturados de água, para que os agregados leves de argila calcinada (muito absorventes) não absorvessem a água necessária para a hidratação do cimento.

Dessa forma, como os agregados leves de argila calcinada absorvem grande quantidade de água, a zona de transição pasta-agregado nos concretos produzidos com esses tipos de agregado tornou-se, possivelmente, mais úmida que a dos concretos produzidos com agregados de argila expandida e basalto, o que pode ter contribuído para o aumento da profundidade de carbonatação nesses concretos, principalmente nos produzidos com agregados leves de argila calcinada de Porto Ferreira, que é o agregado mais absorvente dentre os utilizados.

A Tabela 7 apresenta a evolução da profundidade de carbonatação nos concretos analisados em função do tempo de exposição, por meio de imagens registradas dos concretos sob o efeito da fenolftaleína, em que fica evidente o aumento da profundidade de carbonatação com o aumento da idade dos concretos.

Tabela 6. Profundidade de carbonatação dos corpos de prova de concreto após exposição na câmara de carbonatação acelerada.

Idade (dias)	Tipo de Concreto			
	Brita nº 1	Argila expandida	Argila calcinada de Itu	Argila calcinada de Porto Ferreira
0
3
5
7
12
17
21
26
31

Analisando-se as imagens da Tabela 7, percebe-se que, em idades mais avançadas, quando a frente de carbonatação atinge regiões em que os agregados estão presentes, há um avanço significativo da profundidade de carbonatação no entorno dos agregados leves de argila vermelha calcinada, uma vez que esse tipo de agregado é muito poroso, e sua zona de transição é mais frágil e apresenta, provavelmente, pequenas microfissuras que contribuem para a difusão do CO_2 .

6. Conclusões

Analisando-se os resultados apresentados nesta pesquisa, podemos concluir que a frente de carbonatação até o quinto dia de exposição dos corpos de prova é muito semelhante. Porém, a partir dessa idade, os concretos produzidos com brita apresentam menores profundidades de carbonatação dentre os concretos analisados, uma vez que esse tipo de agregado é o menos poroso em relação aos outros agregados utilizados na investigação.

Percebe-se também que os concretos produzidos com agregados leves de argila calcinada de Itu apresentaram profundidades de carbonatação muito semelhantes aos produzidos com argila expandida, uma vez que, mesmo a argila expandida sendo mais porosa que os agregados de Itu, ela apresenta uma camada externa vitrificada, o que contribui para uma menor umidade na zona de transição, retardando o avanço da frente de carbonatação.

Já os concretos produzidos com agregados leves de argila calcinada de Porto Ferreira apresentaram os maiores valores de carbonatação para todas as idades ensaiadas, o que pode estar relacionado à grande porosidade e absorção de água desse tipo de agregado, tornando a zona de transição pasta-agregado mais frágil e úmida, favorecendo assim o processo de carbonatação.

Dessa forma, pode-se concluir que, além do tipo e quantidade de cimento, da relação água-cimento e do tipo de cura dos concretos, os agregados utilizados no momento da produção dos concretos apresentam grande influência na profundidade de carbonatação, tendo em vista que agregados mais porosos e com conectividade entre os poros contribuem mais para o efeito da carbonatação dos concretos do que agregados mais densos ou sem conectividade entre os poros.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005, versão corrigida: 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5739:** Ensaio de Compressão de Corpos-de-prova Cilíndricos de Concreto. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6118:** Projetos de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

CAFANGE, D.M.P.J. **Estudo de propriedades auxiliares no controle tecnológico dos concretos de cimento Portland com vistas à resistência à carbonatação.** 375 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia e Construção Civil Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto:** inspeção e técnicas eletroquímicas. Ed. PINI. São Paulo, 1997.

GOMES, N.A. **Estruturas de concreto armado em ambiente urbano: avaliação da carbonatação à luz das recomendações da NBR 6118:2003.** 99 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Civil, São Carlos, 2006.

HELENE, P.R.L. **Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado.** 231 f. 1993, São Paulo. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação microestrutura e carbonatação de concreto.** Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

KULAKOWSKI, M.P. **Contribuição ao Estudo da Carbonatação em Concretos e Argamassas Compostos com Adição de Sílica Ativa.** 199 f. 2002. Porto Alegre. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

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

MEHTA, K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais.** São Paulo. IBRACON, 2008.

PAULETTI, C. **Estimativa da Carbonatação Natural de Materiais Cimentícios a partir de Ensaio Acelerados e de Modelos de Predição.** 238 f. 2009. Toulouse. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul e Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Toulouse, 2009.

PELLIZZER, G.P. **Análise mecânica e probabilística da corrosão de armaduras de estruturas de concreto armado submetidas à penetração de cloretos.** 247 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

REIS, F.J.L. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados provenientes de cerâmicas vermelhas com diferentes taxas de pré-saturação.** 141 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Belém, 2013.

RILEM TC 116 PCD. Permeability of Concrete as a Criterion of Its Durability: concrete durability: an approach towards performance testing. **Materials and Structures**, v. 32, n. 217, p. 163-173, abr. 1999.

SANTIS, B.C. **Agregado Leve de Argila Calcinada Para Uso em Concreto Estrutural: viabilidade da cerâmica vermelha do estado de São Paulo.** 132 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

SANTIS, B.C. **Concretos leves com agregados inovadores de argila vermelha calcinada e subprodutos agroindustriais.** 110 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós – Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos – FZEA/USP, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2016.

SILVA, V.M. **Ação da carbonatação em vigas de concreto armado em serviço, construídas em escala natural e reduzida.** 281f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

WERLE, A.P. **Determinação de Propriedades de Concretos Com Agregados Reciclados de Concreto, Com Ênfase na Carbonatação.** 159 f. 2010 São Leopoldo. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2010.

WERLE, A.P.; KAZMIERCZAK, C.S.; KULAKOWSKI, M.P. 2011. **Carbonatação em concretos com agregados reciclados de concreto.** Ambiente Construído, v. 11, n. 2, p. 213-228, 2011.