Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções
CBPAT2016

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

CAPTURA DE CO_2 DEVIDO À CARBONATAÇÃO DO CONCRETO DURANTE O CICLO DE VIDA DAS ESTRUTURAS

E. POSSAN
Prof. Engª Civil
Unila, CEASB/PTI
Foz do Iguaçu; Brasil
e-mail: epossan@gmail.com

E. F. FELIX
Bolsista de IC
Unila, CEASB/PTI
Foz do Iguaçu; Brasil
e-mail: emerson.felipe.felix@gmail.com

RESUMO

O processo produtivo do cimento é responsável por cerca de 5 a 7% do CO_2 emitido na atmosfera. Todavia, durante o ciclo de vida, as estruturas de concreto estão sujeitas à carbonatação podendo capturar parte do CO_2 emitido na sua construção. A fim de constatar esta potencialidade, esse estudo emprega a modelagem matemática para avaliar o desempenho de concretos de resistência à compressão de 20, 30 e 40 MPa produzidos com diferentes cimentos (CP III, CP IV e CP V ARI) para idades de 0 a 100 anos. Verificou-se que a captura de CO_2 é diretamente proporcional à área superficial de concreto exposta ao CO_2, sendo influenciada pelo tipo de cimento e resistência do concreto. Este balanço das emissões de CO_2 tem potencial de se tornar um indicador de sustentabilidade e, no futuro, ser considerado como medida compensatória no projeto de estruturas de concreto.
Palavras-chave: captura de CO_2, carbonatação, estruturas de concreto, sustentabilidade.

ABSTRACT

The process to produce cement is responsible for 5 to 7% of carbon dioxide emissions. However, the concrete structures are subjected to carbonation over its life cycle, which helps to capture a considerable amount of the CO_2 emitted during construction. To claim this potential, this study utilizes mathematical modeling to evaluate the performance of concrete with compressive resistance of 20, 30 and 40 MPa, and produced with different types of cement (CP III, CP IV e CP V ARI) for ages of 0 to 100 years. Based on these parameters, it was confirmed that the CO_2 capture is directly proportional to the concrete's superficial area that is exposed to the CO_2, influenced by the type of cement and the resistance of the concrete. Thus, in the future, the balance of CO_2 emissions can become a potential indicator of sustainability, in addition to be considered a compensatory measure in the project of concrete structures.
Keywords: CO_2 capture, carbonation, concrete structures, sustainability.

1. INTRODUÇÃO

Face o crescente consumo mundial de concreto, muito se discute sobre alternativas para minimizar as emissões associadas à fabricação do cimento. Estima-se que mais de 2 bilhões de toneladas de dióxido de carbono foram emitidas na última década devido a produção do cimento Portland [1]. Tal fato coloca o cimento na lista dos produtos que mais emitem CO_2, representando cerca de 5% das emissões antropogênicas totais [2], sendo que 50% destas emissões advêm da calcinação da rocha calcária (descarbonatação) e o restante da queima de combustíveis na geração de energia para a produção do clínquer.

Porém, durante a vida útil, os materiais a base de cimento estão sujeitos à carbonatação devido à reação entre o CO_2 que ingressa através do concreto e o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) da matriz cimentante à presença de água.

Em estruturas armadas, a carbonatação é tida como um mecanismo de deterioração, pois causa a diminuição do pH do concreto deixando a armadura suscetível à corrosão. Entretanto, em concretos não armados e/ou não estruturais a carbonatação atua como um processo de captura CO_2 da atmosfera, compensando parcialmente o CO_2 gerado na produção do cimento [3, 4, 5], a qual pode ser considerada no balanço das emissões dos gases causadores do efeito

estufa associados às estruturas de concreto. Para tal, são necessários estudos mais aprofundados a fim de comprovar essa potencialidade, o que motivou o desenvolvimento deste trabalho.

2. CAPTURA DE CO_2 DEVIDO À CARBONATAÇÃO DO CONCRETO

A carbonatação resulta das reações do CO_2 do ambiente com os produtos alcalinos do concreto, formando carbonato de cálcio ($CaCO_3$) e água. Essa reação ($Ca(OH)_2+CO_2 \rightarrow CaCO_3+H_2O$) reduz o pH do concreto, deixando o aço suscetível à corrosão. Por outro lado captura o CO_2, já que o CO_2 que ingressa através do concreto reage com o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), gerando o $CaCO_3$ em um processo inverso ao da produção do cimento ($CaCO_3 \rightarrow CaO+CO_2$).

A reação de carbonatação e, consequentemente, a captura de CO_2, ocorre durante toda a vida útil da estrutura ou elemento de concreto, e segundo Pade e Guimarães [3], continua ocorrendo após a demolição onde o processo pode ser intensificado.

Entretanto, há divergência na literatura em relação à potencialidade do sequestro/captura de CO_2 devido à carbonatação do concreto. Em estudo desenvolvido na Noruega, Jacobsen e Jahren [6] estimaram que 16% do CO_2 emitido na produção do cimento é reabsorvido pelo concreto devido à carbonatação durante sua vida útil. Gajda [7] relata que pode ser absorvido 7,6% do CO_2 emitido. Já Pade e Guimarães [3], em estudo realizado na Dinamarca, estimam, para uma perspectiva de 100 anos, considerando a demolição da estrutura, que o concreto devido à carbonatação pode absorver até 57% do CO_2 emitido na produção do cimento. Caso a demolição da estrutura não seja considerada, esse valor é reduzido para 24%.

Essas divergências encontradas na literatura sobrevêm dos diversos fatores que influenciam a carbonatação do concreto (como resistência, ambiente de exposição, quantidade de cimento utilizada par a produção, idade da estrutura, entre outros), assim como, são dependentes da metodologia empregada pelos pesquisadores. Logo, cada estrutura e região demandam estudos específicos para estas estimativas, devendo ser conduzidos mais estudos correlatos para que o sequestro CO_2 devido o processo de carbonatação do concreto possa ser considerado uma medida compensatória.

3. METODOLOGIA

Para o cálculo da taxa de CO_2 capturado durante o ciclo de vida de estruturas produzidas com diferentes concretos, para um período de 0 a 100 anos, dividiu-se a pesquisa em seis etapas, a saber:

Etapa 1 - Seleção dos concretos:
Para as simulações considerou-se que a estrutura será construída em ambiente urbano com umidade relativa média de 65 % e teor de CO_2 de 0,038 %. Na tabela 1 são apresentados os traços dos concretos utilizados nas simulações, dosados por meio do método ABCP/ACI. O agregado graúdo empregado é de origem basáltica com diâmetro máximo de 19 mm, massa específica de 2.700 kg/m³ e massa unitária de 1.515 kg/m³. Como agregado miúdo empregou-se areia natural quartzosa com módulo de finura de 2,9, massa específica e 2.660 kg/m³ e massa unitária de 1.490Kg/m³.

Tabela 1 – Traços empregados nas simulações

Tipo de Cimento	Adições		Resistência do concreto	Dosagem (kg/m³)				Cenários simulados
	Tipo*	Teor*		Cimento	Brita	Areia	Água	
CP III	Escória	35 - 70	20	370,90	1112,60	741,80	185,00	1
			30	385,20	1155,50	770,30	154,00	2
			40	392,70	1178,20	785,50	137,00	3
CP IV	Cinza volante	15 - 50	20	352,00	1055,90	703,90	211,00	4
			30	371,60	1114,80	743,20	167,00	5
			40	393,50	1180,60	787,10	118,00	6
CP V	Material carbonático	0 - 5	20	364,80	1094,40	729,60	182,00	7
			30	378,60	1135,90	757,30	151,00	8
			40	392,00	1175,90	784,00	122,00	9

* Tipos e teores estabelecidos em [8]

Etapa 2 - Estimativa da emissão de CO_2 decorrente da produção do cimento, agregados e concreto:
As emissões de CO_2 decorrentes da produção do concreto foram estimadas considerando desde a produção do cimento até sua disponibilização no canteiro, seja este oriundo de central dosadora ou produzido em obra, incluindo as emissões oriundas da produção dos agregados.
Com base nas metodologias do IPCC [8] e do CSI [9], para a estimativa das emissões de CO_2 referentes à produção do cimento (E_{cim}), foram considerados as emissões por uso de energia (E_{ene}), decomposição da matéria prima (descarbonatação) (E_{desc}) e pelo transporte na produção do cimento (E_{trans}), utilizando a equação 1.

$$E_{cim} = E_{ene} + E_{desc} + E_{trans} \quad (kgCO_2/t) \quad \text{(Equação 1)}$$

Para os cálculos de E_{ene}, E_{desc} e E_{trans} se utilizou a metodologia empregada por Lima [11]. Para a estimativa das emissões decorrentes da produção dos agregados, foram utilizados indicadores encontrados na literatura, sendo usado 5,81 $kgCO_2/t$ para a areia natural, e 15,46 $kgCO_2/t$ para a brita [12]. Para a estimativa das emissões por transporte utilizou-se 8,4 $kgCO_2/t$ [11]. Os dados de energia foram coletados do Balanço Energético Nacional – BEN [13]. Todos os cálculos e estimativas conduzidos foram realizados em planilhas do Excel®.

Etapa 3 - Estimativa da profundidade de carbonatação:
Com o auxílio do software Excel®, a estimativa da profundidade de carbonatação do concreto ao longo do tempo foi realizada empregando-se o modelo de degradação proposto por Possan [14] (ver equação 2), selecionado devido possuir variáveis de entrada de fácil obtenção (resistência à compressão, tipo de cimento, teor de CO_2 do ambiente de exposição) e à boa representatividade do dano (representa 85% dos casos testados).

$$y = k_c \cdot \left(\frac{20}{f_c}\right)^{k_{fc}} \cdot \left(\frac{t}{20}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot exp\left[\left(\frac{k_{ad} \cdot ad^{\frac{1}{2}}}{40 + f_c}\right) + \left(\frac{k_{co_2} \cdot CO_2^{\frac{1}{2}}}{60 + f_c}\right) - \left(\frac{k_{RU} \cdot (UR - 0{,}58)^2}{100 + f_c}\right)\right] \cdot k_{ce} \quad \text{(Equação 2)}$$

Onde: *(y)* é profundidade de carbonatação média do concreto (em mm), (f_c) é a resistência característica à compressão axial do concreto (em Mpa), (k_c) é o fator referente ao tipo de cimento empregado (tabela 2a), (k_{fc}) é o fator referente à resistência à compressão axial do concreto, em função do tipo de cimento utilizado (tabela 2a), (*t*) é a idade do concreto (em ano), *(ad)* é o teor de adição pozolânica no concreto (em % em relação à massa de cimento), *(kad)* é o fator referente às adições pozolânicas do concreto – sílica ativa, metacaulim e cinza de casca de arroz, em função do tipo de cimento utilizado (tabela 2a), *(UR)* é a umidade relativa média (em %*0,01), (k_{ur}) é o fator referente à umidade relativa, em função do tipo de cimento utilizado (tabela 2a), (CO_2) é o teor de CO_2 da atmosfera, (em %), (k_{co2}) é o fator referente ao teor de CO_2 do ambiente, em função do tipo de cimento utilizado (tabela 2a) e (k_{ce}) é o fator referente à exposição à chuva, em função das condições de exposição da estrutura (tabela 2b).

Tabela 2 - Coeficientes do modelo em função (a) das características do concreto e das condições ambientais (b) das condições de exposição [14]

a)

Tipo de Cimento	Características do concreto			Condições Ambientais	
	Cimento	f_c	Adição	CO_2	UR
	k_c	k_{fc}	k_{ad}	kco_2	kUR
CP I	19,80	1,70	0,24	18,00	1300
CP II E	22,48	1,50	0,32	15,50	1300
CP II F	21,68	1,50	0,24	18,00	1100
CP II Z	23,66	1,50	0,32	15,50	1300
CP III	30,50	1,70	0,32	15,50	1300
CP IV	33,27	1,70	0,32	15,50	1000
CP V ARI	19,80	1,70	0,24	18,00	1300

b)

Condições de exposição da estrutura	
Proteção à chuva	k_{ce}
Ambiente interno Protegido da chuva	1,30
Ambiente externo Protegido da chuva	1,00
Ambiente externo Desprotegido da chuva	0,65

Etapa 4 - Cálculo da captura de CO_2 pelas estruturas do concreto durante sua vida útil (0 a 70 anos):
Para a estimativa da quantidade de CO_2 capturada durante a vida útil (VU) das estruturas (70 anos), foram conduzidos cálculos referentes à carbonatação por parte do concreto em um elemento estrutural representado na figura 1 para

diferentes cenários (conforme tabela 1). Por meio de cálculos estequiométricos, estimou-se a captura de CO_2 devido à carbonatação do concreto pela equação 3.

$$CO_2 = y.c.Cao.r.A.M \qquad CO_2(kg/m^3) \qquad \text{(Equação 3)}$$

Onde: (*y)* é a profundidade de carbonatação do concreto (em metros), (*c)* é a quantidade de cimento empregada para produzir um m³ de concreto (sem considerar as adições), (*CaO)* é a quantidade de óxido de cálcio contido no cimento, (*r)* é a proporção de CaO totalmente carbonatada, ou seja, transformada em $CaCO_3$, (*A)* é a área superficial do concreto exposta à ação do CO_2 (em m²) e (*M)* é a fração molar do CO_2/CaO.

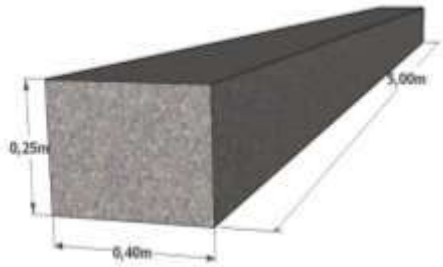

Figura 1: Estrutura de concreto

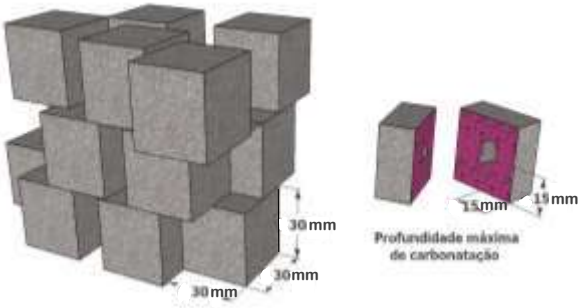

Figura 2: Elementos de concreto após demolição

Etapa 5 - Cálculo da captura de CO_2 pelas estruturas do concreto após sua demolição (de 70 a 100 anos):
Para a estimativa da quantidade de CO_2 capturada pelo concreto no período pós-demolição, foram conduzidas simulações da carbonatação dos resíduos oriundos da demolição da estrutura. Para tal, retirou-se a "capa" já carbonatada durante a vida útil e transformou-se o "concreto não carbonato" em cubos de aproximadamente 30x30x30 mm (figura 2) considerando que estes seriam expostos à ação do CO_2 por um período de até 30 anos. Assim, para a estimativa da taxa de CO_2 capturado pelo concreto após a demolição, empregaram-se as seguintes etapas:

a) Estimativa da profundidade de carbonatação ao final da VU da estrutura (70 anos);
b) Estimativa do volume de concreto carbonatado e não carbonatado durante a VU;
c) Definição das dimensões aproximadas dos elementos de concreto após a demolição (figura 2);
d) Cálculo da nova área superficial total dos elementos de concreto após a demolição, conforme equação 4;
e) Emprego da equação 3 com a nova área superficial para então determinar a quantidade de CO_2 (kg/m³) capturado no pós-demolição.

$$A_{st} = V_{nc}.\left(\frac{A_{sc}}{Vc}\right) \qquad (m^2) \qquad \text{(Equação 4)}$$

Onde: (A_{st}) é a área superficial total que está em contato com a atmosfera (em m²), (A_{sc}) é a área superficial do elemento de concreto (paralelepípedo) (em m²), (V_c) é o volume do elemento de concreto (paralelepípedo) (em m³) e (V_{nc}) é o volume de concreto que ainda não passou pelo processo de carbonatação (em m³).

Etapa 6 – Balanço de CO_2 durante o ciclo de vida (CV) das estruturas de concreto
Para a estimativa do balanço de CO_2 durante o ciclo de vida da estrutura de concreto, utilizou-se a equação 5. O valor calculado refere-se à quantidade de CO_2 emitida para a fabricação de cada concreto (cenários de 1 a 9 da tabela 1) subtraída da quantidade capturada ao longo do CV devido à carbonatação, conforme equação 5.

$$B_{CO_2} = E_{con} - C_{cap} \qquad CO_2(kg) \qquad \text{(Equação 5)}$$

Onde: (B_{co2}) é o balanço de CO_2, (E_{con}) é a quantidade de CO_2 emitida na produção do concreto e (C_{cap}) é a quantidade de CO_2 capturada pelo concreto.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

4. RESULTADOS

Na tabela 3 apresenta-se a profundidade de carbonatação das estruturas ao longo do tempo, calculadas pela equação 2. Observa-se que alguns casos no período de pós-demolição, o concreto foi totalmente carbonatado antes de finalizar o ciclo de vida estimado de 100 anos. Tal fato deve-se ao formato e dimensões das partículas de resíduo utilizadas nas simulações (cúbicas de lados iguais a 30 mm). Considerando que o CO_2 pode ingressar por todas as faces, a profundidade de carbonatação máxima de cada partícula é de 15 mm (ver detalhe da figura 2).

Como esperado (ver tabela 3), o aumento da resistência à compressão do concreto reduz a profundidade de carbonatação do material [14, 15], reduzindo a quantidade de carbono absorvida da atmosfera (ver figuras 3, 5 e 7). Segundo Kumar et al. [16], devido â influência da relação água/cimento, concretos com resistências mais elevadas apresentam menor porosidade. Isso dificulta a entrada e a consequente captura de CO_2.

Tabela 3 - Profundidade de carbonatação ao longo do tempo, em mm, em função do tipo de cimento e da resistência à compressão do concreto

Tipo de Cimento	f_c (MPa)	Profundidade de carbonatação (mm)													
		Estrutura (As=6,5 m²)								Resíduo (pós-demolição)* (As=64±1 m²)					
		5	10	20	30	40	50	60	70	75	80	85	90	95	100
CP III	20	14,9	21,1	29,9	36,6	42,3	47,3	51,8	55,9	14,9	**	**	**	**	**
	30	7,4	10,5	14,9	18,3	21,1	23,6	25,9	28,0	7,4	10,5	12,9	14,9	Carb	Carb
	40	4,5	6,4	9,1	11,2	12,9	14,4	15,8	17,1	4,5	6,4	7,9	9,1	10,2	11,2
CP IV	20	16,9	23,9	33,8	41,4	47,8	53,5	58,6	63,3	13,1	**	**	**	**	**
	30	8,2	11,6	16,5	20,2	23,3	26,1	28,5	30,8	8,2	11,6	14,2	**	**	**
	40	5,0	7,1	10,1	12,4	14,3	16,0	17,6	19,0	4,7	6,7	8,3	9,5	10,7	11,7
CP V	20	9,9	14,0	19,8	24,3	28,0	31,4	34,3	37,1	9,8	13,9	**	**	**	**
	30	4,9	7,0	9,9	12,1	14,0	15,6	17,1	18,5	4,9	7,0	8,5	9,9	11,0	12,1
	40	3,0	4,2	6,0	7,4	8,5	9,5	10,4	11,3	3,0	4,2	5,2	6,0	6,7	7,4

Sendo (f_c) a resistência à compressão axial do concreto (em MPa), (As) a área superficial de concreto exposta à ação do CO_2 (em m²).
* Refere-se à idade do concreto da estrutura. A profundidade de carbonatação nas simulações, por sua vez, é calculada com base na produção do resíduo. Logo, os tempos de 75, 80, 85, 90, 95 e 100 anos, correspondem a 5, 10, 15, 20, 25 e 30 anos de exposição do resíduo a ação do CO_2.
** Partícula de agregado 100% carbonatada (profundidade de carbonatação maior ou igual a 15 mm).

Também se verifica a influência do tipo de cimento na carbonatação do concreto. Concretos produzidos com cimentos sem adições (CP V) tendem a apresentar maior resistência à carbonatação que os com adições (CP III e CP IV). Isso se deve ao fato do avanço da frente de carbonatação ser inversamente proporcional à reserva alcalina disponível na matriz da pasta de cimento hidratada, que por sua vez é função da composição química do cimento [17], influenciada pelo tipo e teor de adições.

Segundo limites estabelecidos pela NBR 11578 [8], no Brasil o cimento CP V ARI pode ter no máximo 5 % de adições carbonáticas enquanto que o CP III e o CP IV podem possuir, respectivamente, teores de adições de 35 a 70 % de escória de alto forno e de 15 a 50% de cinza volante, o que altera a composição química do cimento, com influência direta na carbonatação do concreto assim como na captura de CO_2.

As figuras 3, 5 e 7 apresentam os valores de CO_2 (kg/m³) absorvidos da atmosfera pelas estruturas de concreto durante o período de vida útil (0 a 70 anos) e no período pós-demolição (70 a 100 anos) em função da resistência de dosagem, enquanto as figuras 4, 6 e 8 apresentam as quantidades de CO_2 emitidas para a produção do concreto e a quantidade capturada devido à carbonatação durante o ciclo de vida em função do tipo de cimento (conforme equações 3 e 4).

Nota-se que em concretos de resistência à compressão de 20 MPa, o potencial e captura de CO_2 devido à carbonatação, se considerado o pós-demolição da estrutura, é em média 60% superior ao capturado durante o período de vida útil, evidenciando a importância da consideração da demolição da estrutura no balanço de CO_2. Resultados semelhantes são verificados para os demais concretos. Tal fato é devido a maior área superficial de concreto exposta a ação do CO_2, o que aumenta a área carbonatada e, consequentemente, a captura de CO_2 na reação de carbonatação.

A estrutura considerada nas estimativas de vida útil possui área superficial de 6,5 m² enquanto que no pós-demolição, a área superficial média estimada do resíduo gerado é de aproximadamente 64,47±1 m² (a área no pós-demolição é variável devido o desconto da camada carbonatada durante o período de vida útil, que varia com a resistência e tipo de cimento do concreto).

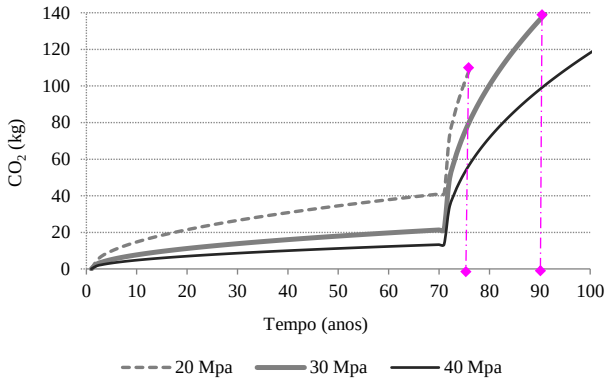

Figura 3: Evolução da captura de CO_2 ao longo do tempo no concreto com cimento CP III

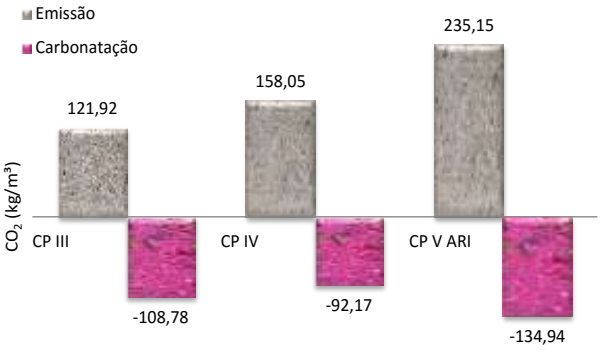

Figura 4: Quantidades de CO_2 emitidas e carbonatadas nos concretos com 20 Mpa

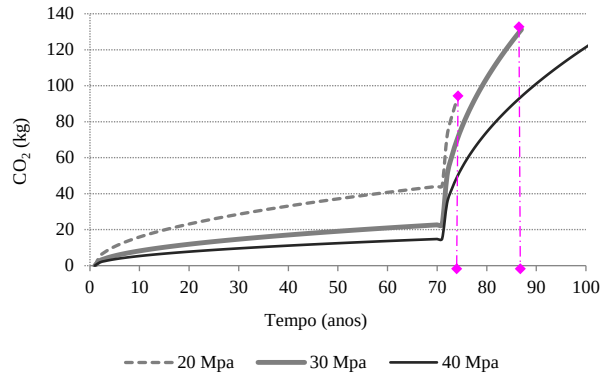

Figura 5: Evolução da captura de CO_2 ao longo do tempo no concreto com cimento CP IV

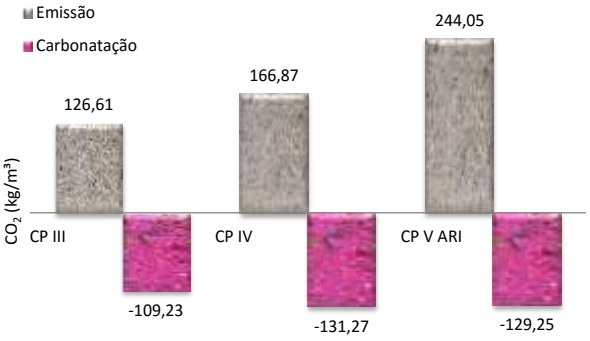

Figura 6: Quantidades de CO_2 emitidas e carbonatadas nos concretos com 30 Mpa

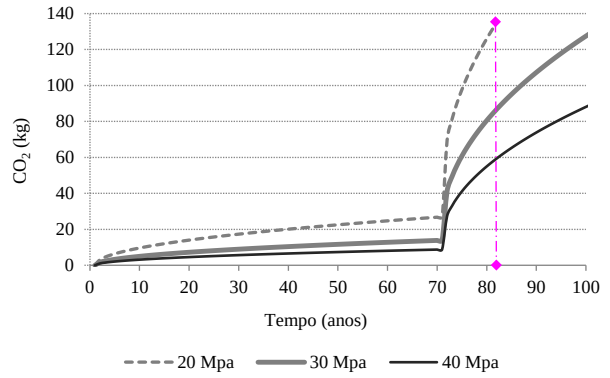

Figura 7: Evolução da captura de CO_2 ao longo do tempo no concreto com cimento CP V ARI

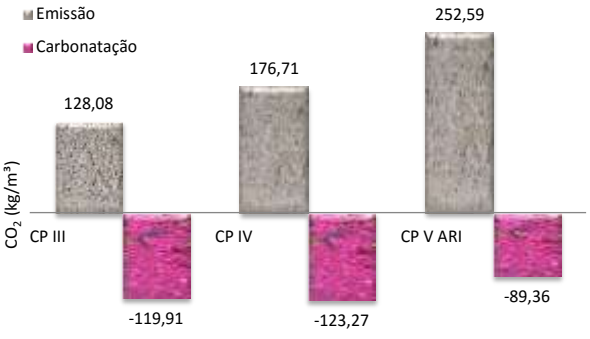

Figura 8: Quantidades de CO_2 emitidas e carbonatadas nos concretos com 40 MPa

Nas figuras 4, 6 e 8 apresentam-se as emissões de CO_2 decorrentes da produção do concreto, onde o quadrante positivo referente às emissões produzidas e o quadrante negativo à captura de CO_2 devido à carbonatação do concreto durante o ciclo de vida da estrutura (vida útil e pós-demolição), considerando o tipo de cimento e a resistência à compressão axial do concreto. Constata-se que o concreto durante sua vida útil pode capturar de 40 a 90% do CO_2 emitido na sua fabricação. Em alguns casos, considerando a demolição da estrutura, a captura pode se aproximar de 100%, é o caso do concreto produzidos com o cimento CP III, onde as emissões da produção do concreto são da ordem de 128 $kgCO_2/t$ e a captura é da ordem de 120 $kgCO_2/t$ (ver figura 8).

Conforme equação 5, na figura 9 apresenta-se o balanço das emissões de CO_2 para os nove cenários do estudo, mostrando a porcentagem de carbono capturada pelo concreto ao longo de toda a VU (70 anos) e no período de exposição após a demolição (até 30 anos), assim como, a porcentagem de CO_2 que permanece na atmosfera, ou seja, o que não foi capturado.

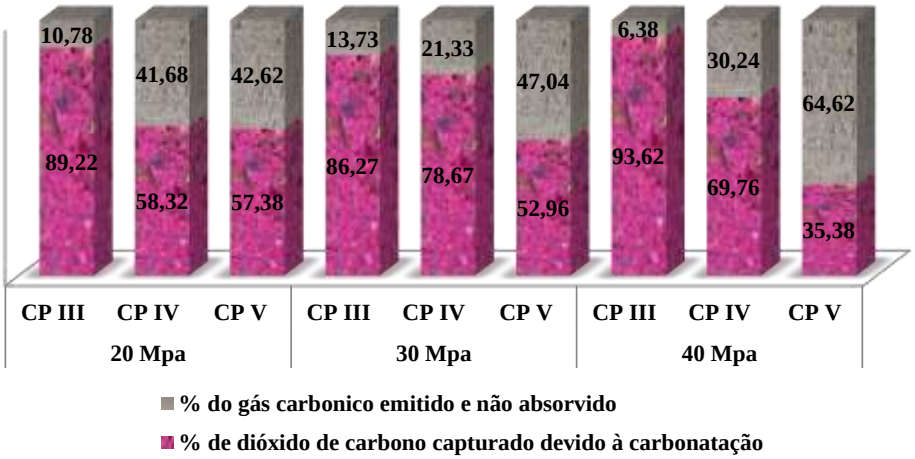

Figura 9: Balanço das emissões de CO_2 devido à carbonatação do concreto

Verifica-se que os concretos produzidos com cimento CP IV ARI são os que apresentam o balanço de emissões menos favorável, porém apresentam melhor desempenho do ponto de vista de durabilidade, já que apresentam maior resistência à carbonatação. Os melhores resultados para o balando de CO_2 para concretos produzidos com cimentos com adições (CP III e CP IV) são atribuídos à fabricação do cimento, uma vez que parte do clínquer é substituído por adições, reduzindo as emissões por tonelada de cimento produzido. Também se deve à redução da reserva alcalina (teor de produtos carbonatáveis) em concretos com adições, o que resulta em frentes de carbonatação mais velozes e, por conseguinte, a maior captura de CO_2.

Cabe destacar que a carbonatação do concreto no pós-demolição é fortemente dependente das condições de exposição e das dimensões do material demolido, sendo necessários estudos específicos para avaliar em escala real a forma e tempo de exposição do resíduo à ação do CO_2.

5. CONCLUSÕES

Via modelagem matemática constatou-se que o concreto apresenta potencial de captura de CO_2 devido sua carbonatação, sendo que no período pós-demolição da estrutura essa potencialidade pode ser aumentada em até 5 vezes.

Além dos fatores que afetam a carbonatação do concreto (resistência à compressão, tipo de cimento, entre outros) a área superficial da estrutura exposta à ação do dióxido de carbono influencia na captura de CO_2. Quanto maior a área em contato com o CO_2 maior o potencial de captura.

A captura de CO_2 decorrente do concreto é de fundamental importância para a construção civil, pois conhecendo este processo é possível indicar concretos pelo desempenho, visando à durabilidade, com um consumo mínimo de cimento Portland, mas que também capture CO_2 da atmosfera durante o ciclo de vida da estrutura, indicando que o balanço das emissões poderá ser no futuro considerado uma medida compensatória no projeto de estruturas de concreto.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

6. REFERÊNCIAS

[1] Yang, K. H. et al. "Carbonation and CO_2 uptake of concrete". *Environmental Impact Assessment Review*, 46, 2014, 43-52 p.
[2] CDIAC - Carbon Dioxide Information Analysis Center. National Cement Production Estimates: 1950 – 2007, 2007. Disponível em http://cdiac.ornl.gov/. Último acesso em 20 de julho de 2011.
[3] Pade, C., Guimaraes, M. "The CO_2 uptake of concrete in a 100 year perspective", *Cement and Concrete Research*, p.1384–1356, 2007.
[4] Galan, I. et al. "Sequestration of CO_2 by concrete carbonation. *Environmental Science & Technology*, p.3181–3186, 2010.
[5] Possan, E. et al. "Sequestro de CO_2 devido à carbonatação do concreto: potencialidades da barragem de Itaipu", *Revista de estudos ambientais*. 2012.
[6] Jacobsen, S., Jahren, P. "Binding of CO_2 by Carbonation of Norwegian OPC Concrete". CANMET/ACI International Conference on Sustainability and Concrete Technology, Lyon, 2002.
[7] Gajda, J. Miller, F. M. "Concrete as a Sink for Atmospheric Carbon Dioxide: a Literature review and estimation of CO_2 absorption by Portland Cement Concrete". PCA, Chicago, R&D Serial no. 2255, 2000.
[8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11578: Cimento Portland composto - Especificação. Rio de Janeiro, 2001. Versão Corrigida:1997, 5 p.
[9] IPCC – Intergovernmental Panel on climate change. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. 2006. Disponível em http://www.ipcc.ch. Último acesso em 05 de Junho de 2012.
[10] CSI. 2005. CO_2 Accounting and Reporting Standard for the Cement Industry. Cement CO_2 Protocol, July. Genebra: WBCSD. Disponível em http://www.wbcsdcement.org/climate.asp. Último acesso em 07 de junho de 2012.
[11] Lima, J. A. R. "Avaliação das consequências da produção de concreto no Brasil para as mudanças climáticas". Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, EPUSP, 2010, 129 p.
[12] Marcos, M. H. C. "Análise da emissão de CO_2 em edificações através de uma ferramenta CAD-BIM". In: *SIGraDi* 2009 sp – From Modern to Digital: The Challenges of a Transition. Novembro 2009, São Paulo. 5 p.
[13] BRASIL - Ministério das Minas e Energia (MME). Balanço Energético Nacional 2012: Ano base 2011 / Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: EPE, 2012. Disponível em: https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2012.pdf. Último acesso em 03 de Junho de 2012.
[14] Possan, E. "Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano". 2010. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.
[15] Pauletti, C. "Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição". 2009. Tese Doutorado em co-tutela (Doutorado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre e École Doctorale Mécanique, Energétique, Génie Civil et Procédés, Institut National des Sciences Appliquées, Toulouse.
[16] Kumar, R, Bhattacharjee, B. "Porosity, pore size distribution and in situ strength of concrete". *Cement and Concrete Research*, 33, 2003, 155–164 p.
[17] Meyer, A. "The importance of the surface layer for the durability of concrete structures". In: International conference on concrete durability. Atlanta, USA, 1987, 48-61 p.