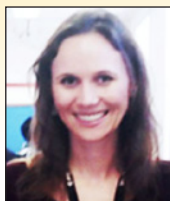
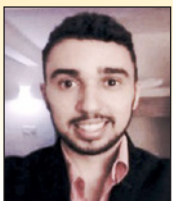


Balance emissions and CO₂ uptake in concrete structures: simulation based on the cement content and type

Balanço das emissões e da captura de CO₂ em estruturas de concreto: simulação em função do consumo e tipo de cimento



E. F. FELIX^a
emerson.felipe.felix@gmail.com

E. POSSAN^b
epossan@gmail.com

Abstract

While the cement plant is considered one of the most polluting industry, responsible for about 5% of global CO₂ emissions, the concrete has the potential to uptake this gas through the carbonation process, offset in part the emissions generated in its production. With the purpose to analyze this process, this study aims to evaluate emissions and CO₂ uptake with cement content 300-580 kg produced with different cement types (CP II F, CP II E, CP II Z, CP III, CP IV and CP V). Through mathematical modeling, the emissions balance was made, identifying the mix that shows good resistance to carbonation and greater absorption of CO₂ during the concrete life cycle. The results show that concrete with cement consumption between 380 and 420 kg/m³ showed better balance emissions.

Keywords: CO₂ sequestration, cement content, CO₂ emissions, compensatory measures, sustainability.

Resumo

Apesar da indústria cimenteira ser considerada uma das mais poluentes do setor, responsável por aproximadamente 5% das emissões mundiais de CO₂, o concreto tem a potencialidade de absorver esse gás, através do processo de carbonatação, compensando em partes as emissões geradas na sua produção. Com o objetivo de analisar este processo, o presente estudo avalia por meio de simulações as emissões e a captura de CO₂ de concretos com consumos de 300 a 580 kg de cimento por metro cúbico de concreto, produzidos com diferentes tipos de cimento Portland (CP II F, CP II E, CP II Z, CP III, CP IV e CP V). Por meio da modelagem matemática fez-se o balanço das emissões, identificando o traço que apresenta boa resistência à carbonatação e maior absorção de CO₂ durante o ciclo de vida do concreto. Os resultados apontam que concretos com consumo de cimento entre 380 e 420 kg/m³ e com maiores taxas de adições apresentam melhores balanços de emissões.

Palavras-chave: sequestro de CO₂, consumo de cimento, emissões de CO₂, medidas compensatórias, sustentabilidade.

^a Department of Structural Engineering, São Carlos School Engineering, University of São Paulo, São Carlos, SP, Brazil;
^b Postgraduate Program in Civil Engineering, Federal University of Latin American Integration, Foz do Iguaçu, PR, Brazil.

1. Introdução

As elevadas emissões gasosas do processo de produção do cimento têm chamado a atenção do setor produtivo, uma vez que a indústria cimenteira sozinha é responsável por cerca de 5 a 7% das emissões globais de CO₂ [1, 2, 3].

Como é crescente o consumo mundial de concreto, e consequentemente de cimento, muito se discute sobre alternativas para minimizar as emissões associadas ao concreto, segundo material mais consumido no mundo [3]. De acordo com o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento [4], na América Latina, o Brasil se encontra entre os países que mais produzem e consomem cimento, chegando a uma produção de 68 milhões de toneladas no ano de 2012. No mesmo período, a China apresentou um consumo que ultrapassou a casa dos 2 bilhões de toneladas, sendo a maior produtora e consumidora de cimento do mundo, emitindo quase essa mesma quantidade de CO₂, uma vez que segundo a literatura [5], para a produção de uma tonelada de clínquer, mundialmente são gerados de 700 a 1100 kg de CO₂.

No cenário nacional, devido a ações do setor cimenteiro, as emissões de CO₂, por parte da produção do cimento, representam uma participação de 3%, segundo dados do 2º Inventário brasileiro de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa, com dados referentes aos anos de 1990 a 2005, sendo que o país emite em torno de 536 kg de CO₂ por tonelada de cimento produzido [6]. Porém, uma importante característica dos materiais a base de cimento refere-se a capacidade de reabsorção de CO₂ da atmosfera durante o processo de carbonatação: reação entre o CO₂, que ingressa através do concreto, e o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) presente na matriz cimentante, na presença de água. Segundo Pade e Guimarães [7], a carbonatação e consequente captura de CO₂, ocorrem em toda a vida útil de uma estrutura de

concreto e até mesmo após a sua demolição, onde é mais intensa. Em estruturas de concreto armado, a carbonatação é considerada um mecanismo de deterioração, pois causa a diminuição do pH do concreto deixando a armadura suscetível à corrosão. O concreto à temperatura ambiente apresenta pH em torno de 12,5 em virtude da presença de Ca(OH)₂. Com a redução do teor de hidróxido de cálcio no interior dos poros da pasta de cimento hidratado e, posteriormente sua transformação em carbonato de cálcio (CaCO₃), devido às reações de carbonatação, o pH é reduzido para valores próximos ou inferiores a 9 [8, 9, 10, 11].

Entretanto, em elementos de concreto não armado (i.e., barragens, paredes de concreto, pavers, peças de ornamentação e outras) a carbonatação pode ser benéfica, atuando como um processo de captura de CO₂ da atmosfera, compensando parcialmente o CO₂ gerado na produção do cimento [7, 12, 13, 14], podendo ser considerada no balanço das emissões dos gases causadores do efeito estufa.

Neste contexto, o presente trabalho propõe realizar um balanço das emissões de CO₂ e da captura deste gás através da carbonatação para concretos com diferentes tipos de aglomerantes e níveis de resistência, expresso pelo consumo de cimento do traço. Para tal, empregando simulação e modelagem matemática, será analisado um período de 100 anos, período este compreendido por 70 anos de vida útil da estrutura de concreto e 30 anos referentes ao período de pós-demolição.

2. Emissões associadas ao cimento e a captura de CO₂ devido à carbonatação do concreto

As emissões do processo de produção do cimento decorrem especialmente da descarbonatação da rocha calcária, conforme

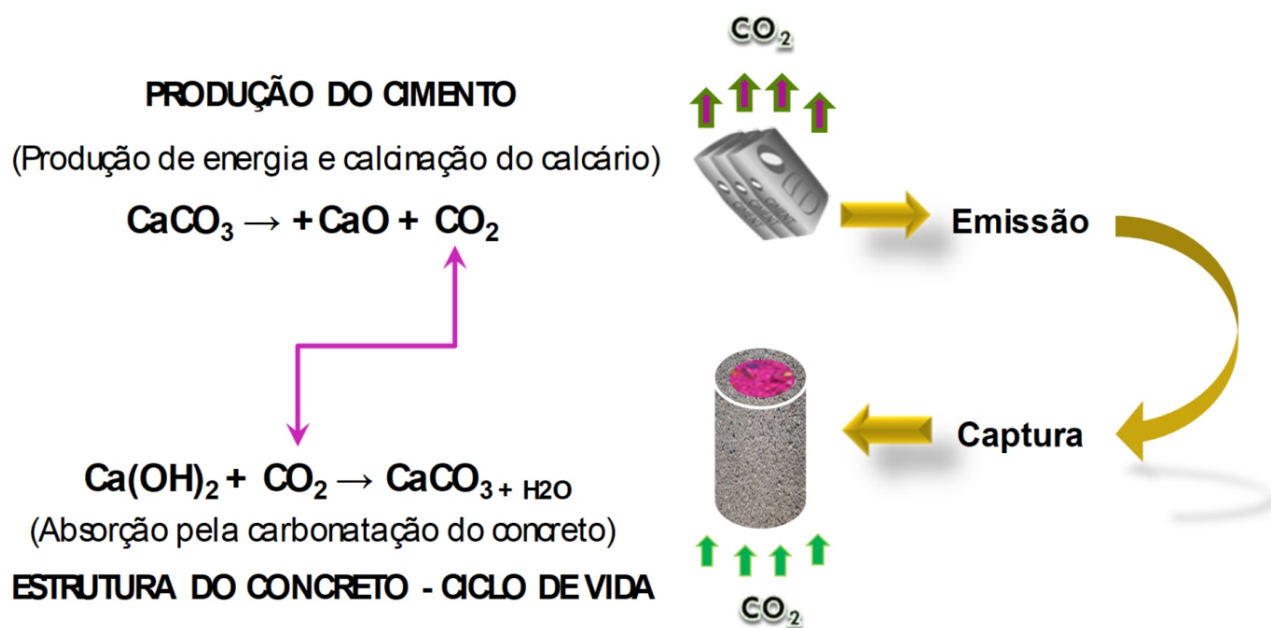
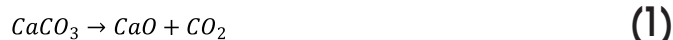


Figura 1
Carbonatação do concreto *versus* captura de CO₂ [22]

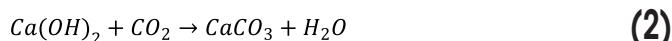
reação simplificada apresentada na Equação 1, e da queima de combustíveis fósseis para a produção do clínquer.



No ciclo de vida do cimento, 95% do total de CO_2 emitido advém da etapa de produção [15], sendo que quase toda a emissão na indústria cimenteira se concentra na produção do clínquer [5], pois durante o processo de produção do cimento, metade do CO_2 emitido se refere à calcinação da rocha calcária (descarbonatação), enquanto que a parte restante é decorrente da queima de combustíveis para a geração de energia no processo de clinkerização [6].

Porém, tem-se discutido que o concreto tem a potencialidade de capturar CO_2 da atmosfera por um processo denominado

carbonatação [16, 7, 13]. Um dos resultados desta reação (Equação 2) é a redução do pH do concreto, que despassiva o aço imerso, deixando a armadura suscetível à corrosão, o que não é desejável do ponto de vista de durabilidade. Outro resultado é a captura do CO_2 da atmosfera, gerando o carbonato de cálcio (CaCO_3) que aprisiona o dióxido de carbono na estrutura de concreto, retirando-o da atmosfera, em um processo inverso ao de produção do cimento (Equação 1).



De modo geral, o processo de captura de CO_2 devido à carbonatação do concreto pode ser esquematizado conforme a Figura 1.

Verifica-se que há divergências na literatura em relação à poten-

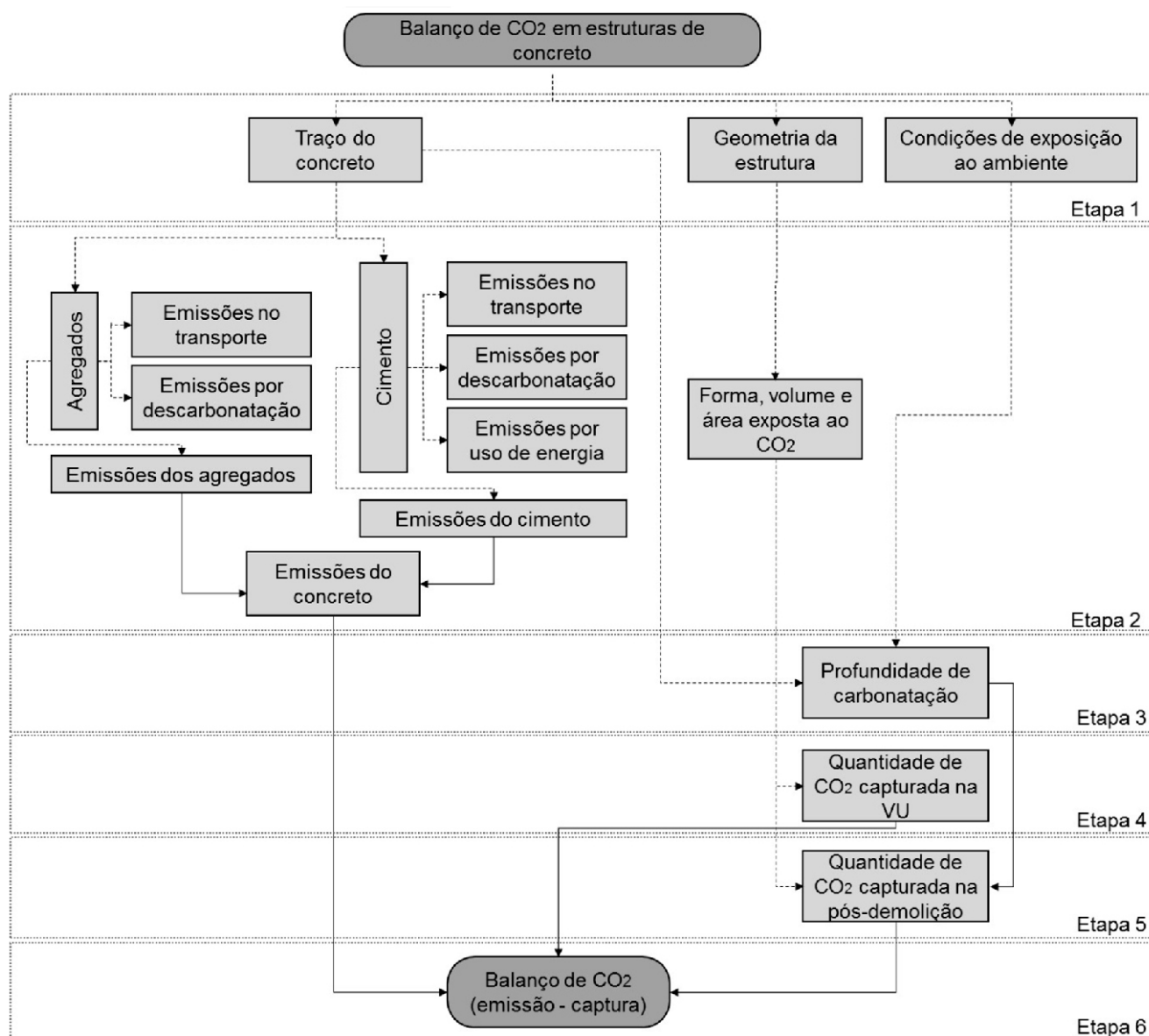


Figura 2

Metodologia de cálculo para o balanço das emissões de CO_2 [22]

cialidade da captura de CO₂ devido à carbonatação do concreto. Pade [17] destaca uma potencialidade mundial de captura de CO₂ devido à carbonatação de estruturas de concreto de 33-57%, enquanto Gajda [18] relata que podem ser absorvidos apenas 7,6% do CO₂ emitido. Na Coreia do Sul, Lee, Park e Lee [19] citam a captura de apenas 2,9% de CO₂ em 20 anos de vida útil da estrutura. Em estudo desenvolvido na Noruega, Jacobsen e Jahren [20] estimaram que 11% do CO₂ emitido na produção do cimento é reabsorvido pelo concreto devido à carbonatação durante sua vida útil. Nos Estados Unidos, Haselbach e Thomas [21] citam a captura de 28,2% de CO₂ durante a vida útil. Pade e Guimarães [7], 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 CO₂ emitido na produção do cimento. Caso a demolição da estrutura não seja considerada, esse valor é reduzido para 24%. A metodologia adotada por Pade e Guimarães [7] assume que o concreto possui um grau de hidratação de 100%, sendo a difusão e concentração de CO₂ considerados constantes no tempo. Também considera que os agregados gerados na demolição da estrutura serão 100% carbonatados durante um período de 30 anos, sendo que estrutura e os resíduos oriundos da sua demolição estão sob as mesmas condições ambientais.

Felix e Possan [22] destacam que a carbonatação do concreto no pós-demolição é fortemente dependente das condições de exposição e das dimensões do material demolido, existindo alguns

Tabela 1

Traços empregados nas simulações (com cimentos compostos: CP II Z, E e F)

Tipo de Cimento	Adições		F _{ci} (MPa)	Dosagem (kg/m ³)			
	Tipo*	Teor*		Cimento	Brita	Areia	Água
CP II-E	Escória	6 - 34	20,92	300,00	864,17	1056,21	120,00
			25,55	340,00	860,41	1051,61	136,00
			29,78	380,00	849,14	1037,84	152,00
			31,75	400,00	845,39	1033,25	160,00
			33,63	420,00	841,63	1028,66	168,00
			37,13	460,00	834,12	1019,47	184,00
			40,30	500,00	826,60	1010,29	200,00
			43,20	540,00	819,09	1001,11	216,00
			45,84	580,00	811,57	991,92	232,00
CP II-F	Material carbonático	15 - 50	20,22	300,00	818,24	1000,07	120,00
			24,87	340,00	808,99	988,76	136,00
			29,90	380,00	799,74	977,46	152,00
			32,59	400,00	842,95	1090,77	160,00
			34,48	420,00	790,49	966,15	168,00
			38,66	460,00	781,24	954,85	184,00
			42,46	500,00	771,99	943,54	200,00
			45,93	540,00	762,74	932,24	216,00
			49,10	580,00	753,49	920,94	232,00
CP II-Z	Material pozolânico	15 - 50	21,98	300,00	926,26	1132,09	120,00
			26,56	340,00	912,73	1115,56	136,00
			30,69	380,00	899,21	1099,04	152,00
			32,24	400,00	795,11	971,81	160,00
			34,39	420,00	885,69	1082,51	168,00
			37,72	460,00	872,16	1065,98	184,00
			40,73	500,00	858,64	1049,45	200,00
			43,45	540,00	845,12	1032,92	216,00
			45,92	580,00	831,60	1016,39	232,00

* ABNT NBR 11578:1991 Versão Corrigida: 1997.

problemas de ordem prática na metodologia de cálculo empregada por alguns autores. Um dos grandes problemas encontrados é como viabilizar a exposição do resíduo gerado da demolição de uma estrutura, de forma que o mesmo fique em contato com o CO₂ para que ocorra a carbonatação. Neste sentido, o tema de captura de CO₂ devido à carbonatação do concreto no período pós-demolição da estrutura requer estudos adicionais a fim de constatar se o mesmo pode ser conduzido em escala real.

Felix e Possan [22] destacam que essas divergências encontradas na literatura sobrevivem dos diversos fatores que influenciam o fenômeno de carbonatação do concreto (resistência, ambiente de exposição, quantidade de cimento utilizada para produção, idade da estrutura, entre outros). São, também, dependentes da

metodologia de cálculo utilizada e pressupostos assumidos pelo pesquisador, o que dificulta a comparação de resultados gerados em diferentes pesquisas.

3. Metodologia para a estimativa do balanço de CO₂

Tendo em vista que a temática sobre captura de CO₂ associada às estruturas de concreto é recente, são poucos os trabalhos na literatura que descrevem detalhadamente a metodologia empregada para estas estimativas. Neste sentido Felix, Possan e Thomaz [23] desenvolveram uma metodologia de cálculo conforme fluxograma da Figura 2, à qual foi adotada neste trabalho.

Tabela 2

Traços empregados nas simulações (com cimentos: CP III, IV e V)

Tipo de Cimento	Adições		F _{ci} (MPa)	Dosagem (kg/m ³)			
	Tipo*	Teor*		Cimento	Brita	Areia	Água
CP III*	Escória	6 - 34	19,64	300,00	875,35	1069,88	120,00
			22,53	340,00	860,82	1052,11	136,00
			28,19	380,00	846,28	1034,34	152,00
			30,92	400,00	839,01	1025,46	160,00
			33,56	420,00	831,74	1016,58	168,00
			38,61	460,00	817,21	998,81	184,00
			43,33	500,00	802,67	981,04	200,00
			47,73	540,00	788,13	963,28	216,00
			51,83	580,00	773,60	945,51	232,00
CP IV**	Material pozolânico	15 - 50	25,09	300,00	757,21	925,48	120,00
			30,62	340,00	746,04	911,82	136,00
			35,68	380,00	734,86	898,16	152,00
			38,03	400,00	729,27	891,33	160,00
			40,28	420,00	723,68	884,50	168,00
			44,46	460,00	712,50	870,84	184,00
			48,26	500,00	701,32	857,17	200,00
			51,73	540,00	690,15	843,51	216,00
			54,89	580,00	678,97	829,85	232,00
CP V ARI***	Material carbonático	0 - 5	24,01	300,00	785,03	959,48	120,00
			30,26	340,00	774,23	946,28	136,00
			36,32	380,00	763,44	933,09	152,00
			39,25	400,00	758,04	926,49	160,00
			42,10	420,00	752,64	919,89	168,00
			47,57	460,00	741,84	906,70	184,00
			52,70	500,00	731,05	893,50	200,00
			57,51	540,00	720,25	880,30	216,00
			62,02	580,00	709,45	867,11	232,00

* ABNT NBR 5735:1991; ** ABNT NBR 5736:1991; *** ABNT NBR 5733:1991.

Composta por seis etapas, a metodologia inicia com a descrição do cenário da estrutura (Etapa 1), passando para as estimativas das emissões associadas ao cimento e aos agregados (Etapa 2) e da profundidade de carbonatação do concreto ao longo do tempo (Etapa 3). Nas Etapas 4 e 5 estima-se o potencial de captura de CO₂ devido à carbonatação do concreto, durante a vida útil e no período pós-demolição da estrutura, respectivamente, culminando na etapa 6, no balanço das emissões (diferença entre CO₂ emitido e CO₂ capturado). Na sequência apresentam-se detalhadamente os métodos e os materiais adotados neste trabalho, em consonância com o fluxograma da Figura 2.

3.1 Etapa 1 – Determinação das características do concreto e das condições de exposição da estrutura

Tendo em vista que diversos fatores influenciam a carbonatação do concreto, especialmente o traço (consumo de cimento, resistência à compressão, fator água/cimento, tipo de cimento empregado, entre outros), as características geométricas da estrutura ou elementos estruturais (forma, volume e área superficial em contato com a atmosfera) e as características do ambiente de exposição da estrutura (teor de CO₂ do ambiente, umidade relativa do ar, situação de exposição à chuva – ambiente interno ou externo, protegido ou desprotegido da chuva) [23], nesta etapa torna-se de importante descrever claramente as variáveis empregadas na simulação.

Em relação aos concretos, neste estudo foram simulados diferentes traços por meio do método ABCP/ACI. Os traços foram obtidos fixando uma relação água/cimento de 0,4. Para os materiais constituintes

do concreto, adotou-se agregado graúdo de origem basáltica com diâmetro máximo de 19 mm, massa específica de 2.700 kg/m³ e massa unitária de 1.515 kg/m³. Para o 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 1.490 kg/m³.

Quanto ao aglomerante, foram considerados nas simulações seis tipos de cimentos Portland, sendo três compostos (CP II E, com escória, CP II F, com fíler e CP II Z, com pozolana) [25], um com escória (CP III) [26], um pozolânico (CP IV) [27] e um de alta resistência inicial (CP V ARI) [28].

Os traços obtidos por meio do método ABCP/ACI (Tabelas 1 e 2) diferenciam-se pelo consumo de cimento, variando de 300 a 580 kg/m³.

Considera-se que a estrutura será construída em ambiente urbano, desprotegida da chuva, com umidade média anual de 70%¹ e com um teor de CO₂ local de 0,04%². Não será considerada proteção da estrutura (concreto aparente, sem pintura). Todas estas variáveis avaliadas são apresentadas na Tabela 3.

3.2 Etapa 2 – Estimativa das emissões de CO₂

As emissões de CO₂ decorrentes da produção do concreto foram estimadas considerando as emissões referentes à fabricação do cimento, à produção de agregados e ao transporte, até sua disponibilização no canteiro, seja este oriundo de central dosadora ou produzido em obra.

Assim, com base nas metodologias do IPCC [29] e do CSI [30], para a estimativa das emissões de CO₂ referentes à produção do cimento (E_{cim}) empregou-se a Equação 3, na qual são consideradas as

Tabela 3

Dados de entrada para a determinação da profundidade de carbonatação

Variáveis de análise	Concretos					
	CP II E ¹	CP II Z ¹	CP II F ¹	CP III ²	CP IV ³	CP V ARI ⁴
Resistência à compressão axial do concreto (MPa)	Variável	Variável	Variável	Variável	Variável	Variável
Teor de adição (%)	6 – 34	6 – 14	0 – 10	35 – 70	15 – 50	0 – 5
Tipo de adição	Escória	Pozolana	Fíler	Escória	Pozolana	Fíler
Ambiente de exposição ⁵	EP	EP	EP	EP	EP	EP
Umidade relativa (%)	70	70	70	70	70	70
Teor de CO ₂ (%)	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Tempo (anos)	1 - 100	1 - 100	1 - 100	1 - 100	1 - 100	1 - 100

¹ABNT NBR 11578:1991 Versão Corrigida: 1997; ²ABNT NBR 5735:1991; ³ABNT NBR 5736:1991; ⁴ABNT NBR 5733:1991; ⁵EP = externo protegido da chuva.

Tabela 4

Emissões de CO₂ (em kg) na produção de uma tonelada de cimento [29]

Emissões/ano	2008	2009	2010	2011	2012
Por uso de energia	246,00	224,00	210,00	214,38	210,27
Pela descarbonatação	368,00	363,00	358,00	364,78	361,10
No transporte	33,00	31,00	31,00	30,66	30,26

¹ Umidade média estimada para a cidade de Foz do Iguaçu - PR;

² Valor médio com base no relatório do IPCC [27].

Tabela 5

Coefficients of the model according to: (a) concrete characteristics and environment conditions; (b) exposure conditions [33]

(a)						(b)	
Tipo de cimento	Características do concreto			Condições ambientais		Condições de exposição da estrutura	
	Cimento	f_c	Adição	CO ₂	UR		
	k_c	k_{fc}	k_{ad}	k_{co2}	K_{ur}		
CP I	19,80	1,70	0,24	18,00	1300	Proteção à chuva	kce
CP II E	22,48	1,50	0,32	15,50	1300	Ambiente interno protegido da chuva	1,30
CP II F	21,68	1,50	0,24	18,00	1100	Ambiente externo protegido da chuva	1,00
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	Ambiente externo desprotegido da chuva	0,65

emissões por uso de energia (E_{ene}), por decomposição da matéria prima (descarbonatação) (E_{desc}) e pelo transporte na produção do cimento (E_{trans}), sendo todas as emissões dadas em kgCO₂/t.

$$E_{cim} = E_{ene} + E_{desc} + E_{trans} \quad (\text{kgCO}_2/\text{t}) \quad (3)$$

Para os cálculos de E_{ene} , E_{desc} e E_{trans} utilizou-se a metodologia empregada por Lima [5] em conjunto com os dados de energia coletados do Balanço Energético Nacional [31] apresentados na Tabela 4.

Deve-se ainda ter em conta que os diferentes cimentos Portland comercializados no Brasil (CPI, CP II, CP III, CP IV e CP V) possuem diferentes teores de adições, sendo necessário descontá-las no cálculo das emissões, uma vez que as mesmas são inseridas no final do processo produtivo do cimento, não passando pelo processo produtivo completo [23]. Desta forma, considera-se apenas o teor de clínquer contido em cada tipo de cimento, de acordo com os limites estabelecidos nas normas técnicas correspondentes [24-28].

Na estimativa das emissões decorrentes da produção dos agregados, foram utilizados indicadores encontrados na literatura, sendo usado 5,81 kgCO₂/t para a areia natural, e 15,46 kgCO₂/t para a brita [32]. Já para a estimativa das emissões por transporte do concreto, Lima [5] sugere adotar 8,4 kgCO₂/t.

Assim, conforme Equação 4, somando-se todas as emissões de CO₂ (em kgCO₂/t) referentes à produção do cimento (E_{cim}), da produção de agregados (E_{agr}) e do transporte do concreto ($E_{trans-con}$) é possível estimar as emissões para a produção do concreto (E_{con}), desde que conhecido o traço (proporção de dosagem).

$$E_{con} = E_{cim} + E_{agr} + E_{trans-con} \quad (\text{kgCO}_2/\text{t}) \quad (4)$$

3.3 Etapa 3 – Estimativa da profundidade de carbonatação

Para a estimativa da profundidade de carbonatação faz-se

necessário considerar as condições de exposição da estrutura (definida na etapa 1), assim como, empregar um modelo de comportamento da profundidade de carbonatação ao longo do tempo, para o qual foi utilizado o modelo matemático de Possan [33], apresentado na Equação 5.

$$y = k_c \cdot \left(\frac{20}{f_c}\right)^{k_{fc}} \cdot \left(\frac{t}{20}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \exp \left[\left(\frac{k_{ad} \cdot a_d^3}{40 + f_c} \right) + \left(\frac{k_{CO_2} \cdot CO_2^{\frac{1}{2}}}{60 + f_c} \right) - \left(\frac{k_{ur} \cdot (UR - 0,58)^2}{100 + f_c} \right) \right] \cdot k_{ce} \quad (5)$$

Onde:

y = profundidade de carbonatação média do concreto, em mm;

f_c = resistência característica à compressão axial do concreto, em MPa;

k_c = fator variável referente ao tipo de cimento empregado (Tabela 5.a);

k_{fc} = fator variável referente à resistência à compressão axial do concreto, em função do tipo de cimento utilizado (Tabela 5.a);

t = idade do concreto, em anos;

a_d = teor de adição pozolânica no concreto, em % em relação à massa de cimento;

k_{ad} = fator variável referente às adições pozolânicas do concreto – sílica ativa, metacaulim e cinza de casca de arroz, em função do tipo de cimento utilizado (Tabela 5.a);

UR = umidade relativa média, em $\frac{\%}{100}$;

k_{ur} = fator variável referente à umidade relativa, em função do tipo de cimento utilizado (Tabela 5.a);

CO_2 = teor de CO₂ da atmosfera, em %;

k_{co2} = fator variável referente ao teor de CO₂ do ambiente, em função do tipo de cimento utilizado (Tabela 5.a);

k_{ce} = fator variável referente à exposição à chuva, em função das condições de exposição da estrutura (Tabela 5.b).

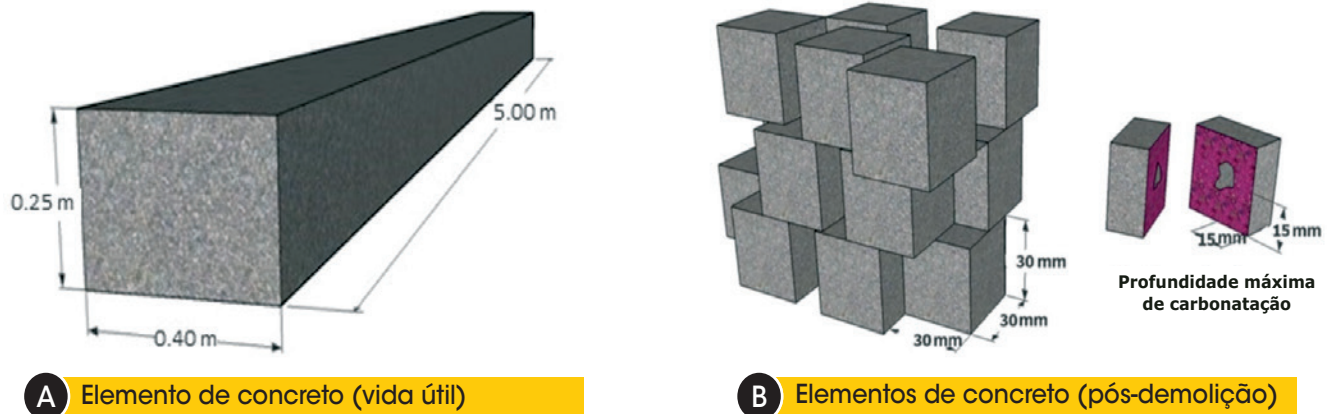


Figura 3
Elementos de concreto durante: (a) vida útil; (b) pós-demolição

O modelo de Possan [33] é utilizado por apresentar bons resultados para a estimativa da profundidade carbonatada (representa 85% dos casos testados) além de exigir dados de entrada de fácil obtenção (resistência à compressão do concreto, tipo de cimento, teor de CO₂ do ambiente de exposição) [34].

3.4 Etapa 4 – Estimativa da captura de CO₂ ao longo da vida útil da estrutura de concreto

Para a estimativa da quantidade de CO₂ capturada durante a vida útil (VU) das estruturas (período de 70 anos), foram conduzidos

cálculos referentes à carbonatação por parte do concreto em um elemento estrutural representado na Figura 3.a para diferentes cenários (conforme Tabelas 1 e 2). Por meio de cálculos estequiométricos, estimou-se a captura de CO₂ devido à carbonatação do concreto pela Equação 6.

$$CO_2 = y \cdot c \cdot CaO \cdot r \cdot A \cdot M \quad (kgCO_2) \quad (6)$$

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) (em kg/m³), “CaO” é a quantidade de óxido de cálcio contido no cimento (em %), “r” é

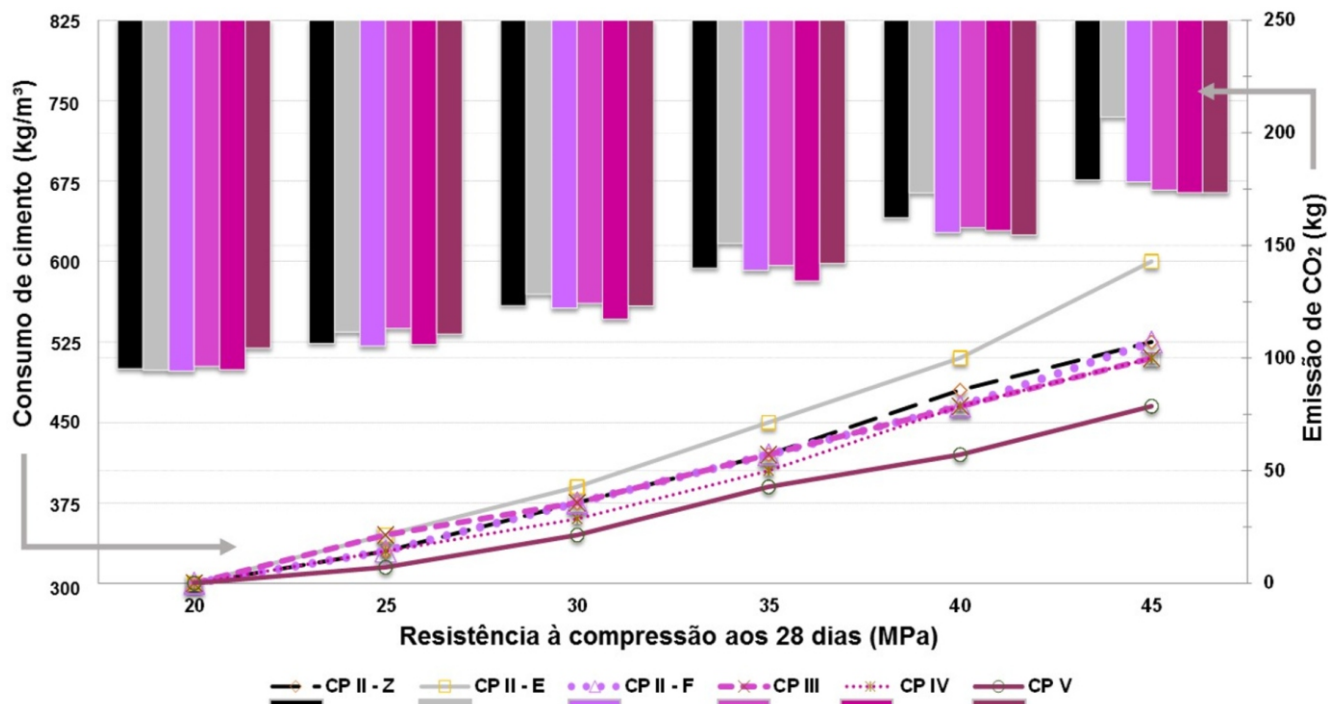


Figura 4
Consumo de cimento e emissões de CO₂ em função da resistência de dosagem e do tipo do aglomerante

a proporção de CaO totalmente carbonatada (em %), “A” é a área superficial do concreto exposta à ação do CO₂ (em m²) e “M” é a fração molar do CO₂/CaO.

3.5 Etapa 5 – Estimativa da captura de CO₂ no período pós-demolição

Para a estimativa da quantidade de CO₂ capturada após a demolição da estrutura, simulou-se que os elementos de concreto foram britados e tiveram suas dimensões reduzidas a de agregados. Para tal, como a carbonatação ocorre da superfície para o interior da estrutura, retirou-se a “capa” de concreto já carbonatada durante a vida útil, transformando o “concreto não carbonatado” em cubos com pequenas dimensões (i.e., paralelepípedos de 30x30x30 mm), conforme representação gráfica da Figura 3.b,

considerando a exposição destes elementos à ação do CO₂ por um determinado período de tempo (30 anos ou até o tempo à qual ocorre a total carbonatação do elemento de concreto). Adotou-se formato cúbico para a simulação dos elementos triturados em função da facilidade proporcionada pela geometria para a descrição dos volumes carbonatados e não carbonatados do período de pós-demolição. Quanto ao comprimento adotado para as arestas do cubo, relata-se que foram analisadas amostras de resíduos de demolição, às quais em média, possuíam 30 mm de dimensão característica.

Assim, para a estimativa da taxa de CO₂ capturado pelo concreto após a demolição, empregaram-se as seguintes subetapas:

- Estimativa da profundidade de carbonatação ao final da vida útil da estrutura (70 anos), conforme Etapa 3;
- Estimativa do volume de concreto carbonatado (Equação 7) e

Tabela 6

Profundidade de carbonatação ao longo do tempo, em função do tipo e consumo de cimento

Tipo de cimento	C ¹ (kg/m ³)	Profundidade de carbonatação (mm)													
		Estrutura (As ² = 6,5 m ²)								Resíduo (pós-demolição) (As ² = 64±1 m ²)					
		5	10	20	30	40	50	60	70	75	80	85	90	95	100
CP II Z	300	10	14,3	20,1	24,6	28,4	31,8	34,9	37,5	10	14,5	*	*	*	*
	400	5,6	7,8	11,2	13,6	15,7	17,6	19,2	20,8	5,6	7,76	9,51	10,9	12,2	13,4
	500	3,9	5,6	7,9	9,7	11,2	12,6	13,7	14,9	3,9	5,42	6,64	7,67	8,57	9,39
	580	3,3	4,7	6,6	8,2	9,3	10,5	11,4	12,5	3,3	4,46	5,47	6,31	7,06	7,74
CP II E	300	10,3	14,6	20,6	25,2	29,1	32,6	35,7	38,6	10,3	14,5	*	*	*	*
	400	5,5	7,8	11,0	13,5	15,5	17,4	19,0	20,6	5,5	7,76	9,51	10,9	12,2	13,4
	500	3,8	5,4	7,7	9,4	10,8	12,1	13,3	14,4	3,8	5,42	6,64	7,67	8,57	9,39
	580	3,2	4,5	6,3	7,7	8,9	10,0	10,9	11,8	3,2	4,46	5,47	6,31	7,06	7,74
CP II F	300	11,0	15,5	21,9	26,8	31,0	34,6	37,9	41,0	11,0	*	*	*	*	*
	400	5,4	7,6	10,8	13,2	15,3	17,1	18,7	20,2	5,4	7,62	9,34	10,7	12,0	13,2
	500	3,6	5,0	7,1	8,7	10,0	11,2	12,3	13,3	3,6	5,02	6,14	7,10	7,93	8,69
	580	2,8	4,0	5,7	7,0	8,1	9,0	9,9	10,7	2,8	4,02	4,93	5,69	6,36	6,97
CP III	300	15,4	21,8	30,9	37,8	43,7	48,8	53,5	57,8	15,4	*	*	*	*	*
	400	7,1	10,1	14,2	17,4	20,1	22,5	24,6	26,6	7,1	10,0	12,3	14,2	*	*
	500	4,0	5,7	8,0	9,8	11,3	12,6	13,9	15,0	4,0	5,65	6,92	7,99	8,94	9,79
	580	2,9	4,2	5,9	7,2	8,3	9,3	10,2	11,0	2,9	4,16	5,10	5,89	6,58	7,21
CP IV	300	11,5	16,2	22,9	28,1	32,5	36,3	39,7	42,9	11,5	*	*	*	*	*
	400	5,6	7,9	11,2	13,8	15,9	17,8	19,5	21,0	5,6	7,94	9,73	11,2	12,5	13,7
	500	3,7	5,3	7,5	9,2	10,6	11,8	12,9	14,0	3,7	5,28	6,47	7,47	8,35	9,15
	580	3,0	4,2	6,0	7,3	8,5	9,5	10,4	11,2	3,0	4,23	5,19	5,99	6,70	7,34
CP V ARI	300	7,3	10,3	14,5	17,8	20,5	23,0	25,2	27,2	7,3	10,2	12,5	14,5	*	*
	400	3,1	4,4	6,3	7,7	8,8	9,9	10,8	11,7	3,1	4,42	5,41	6,25	6,99	7,66
	500	1,9	2,7	3,8	4,6	5,3	6,0	6,5	7,1	1,9	2,67	3,27	3,77	4,22	4,62
	580	1,4	2,0	2,9	3,5	4,0	4,5	5,0	5,4	1,4	2,02	2,47	2,85	3,19	3,50

¹Consumo de cimento; ²As = Área superficial (em m²); *Elemento totalmente carbonatado.

- não carbonatado (Equação 8) durante a vida útil;
- Definição das dimensões aproximadas dos elementos de concreto (paralelepípedos) após a demolição;
 - Cálculo da nova área superficial total dos elementos de concreto após a demolição;
 - Determinação da profundidade de carbonatação no período pós-demolição (aplicação da Equação 5);
 - Cálculo da nova área superficial carbonatada (Equação 9) para determinação da quantidade de CO₂ (kg/m³) capturado no pós-demolição (Equação 6).

$$V_{carb} = y \cdot A_{st} \quad (m^3) \quad (7)$$

$$V_{nc} = V_{ee} - V_{carb} \quad (m^3) \quad (8)$$

$$A_{dem} = A_{par} \cdot \frac{V_{nc}}{V_{part}} \quad (m^2) \quad (9)$$

Onde:

V_{carb} = Volume de concreto carbonatado durante a vida útil (em m³);

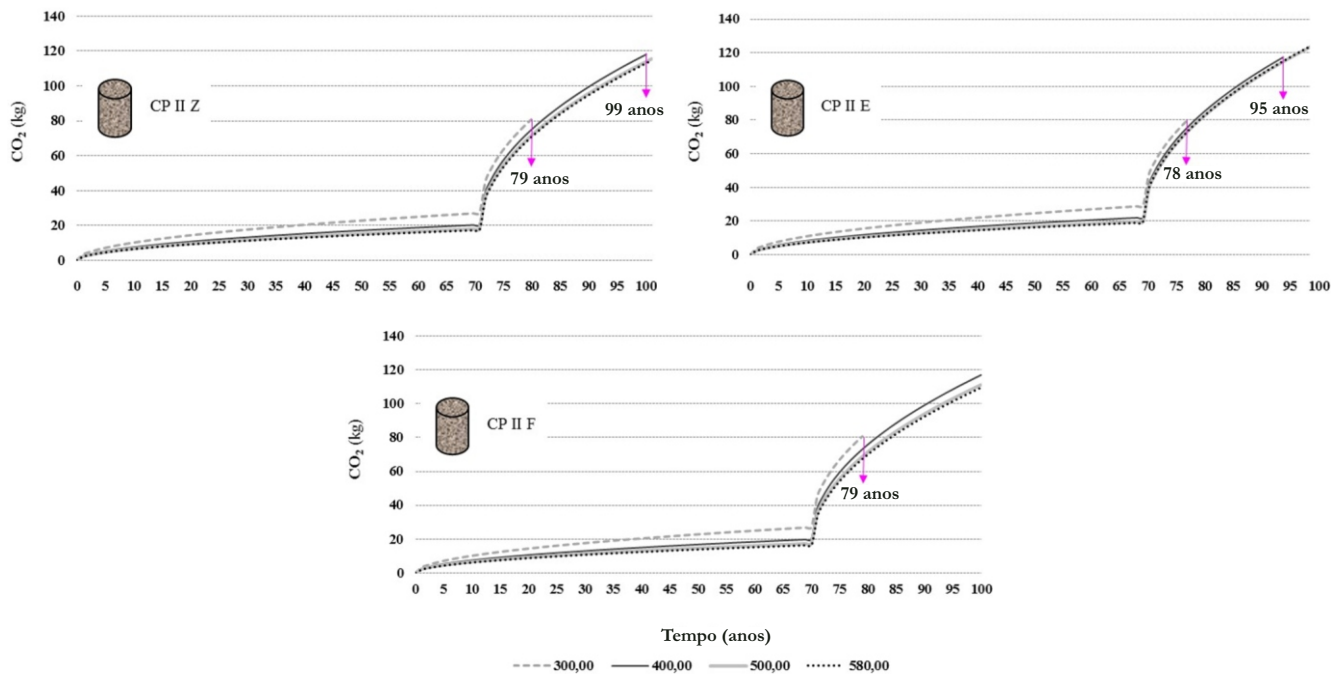


Figura 5

Evolução da captura de CO₂ no tempo para concretos com cimentos compostos (CP II Z, E e F) e com diferentes consumos

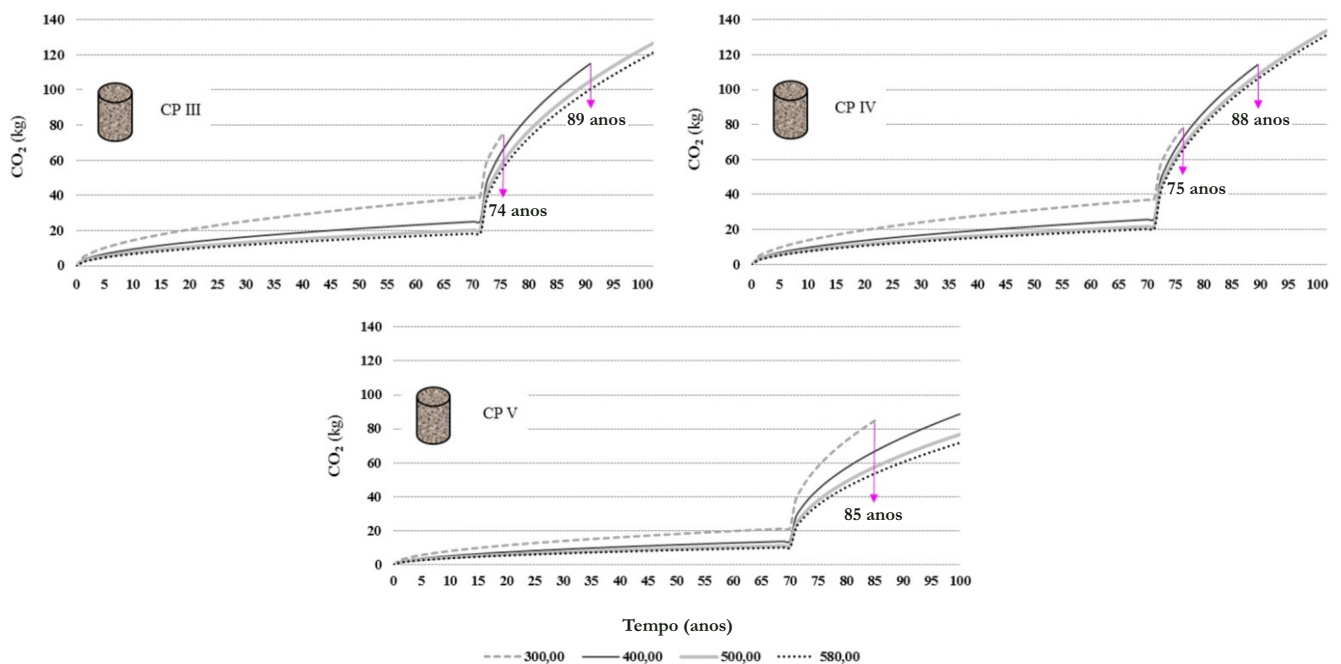


Figura 6

Evolução da captura de CO₂ no tempo para concretos com cimentos CP III, IV e V com diferentes consumos

y = profundidade de carbonatação do concreto no tempo (em m);
 A_{st} = Área superficial total do elemento de concreto que está em contato com a atmosfera na VU (em m²);
 V_{nc} = Volume de concreto que ainda não passou pelo processo de carbonatação (em m³);
 V_{ee} = Volume de concreto total do elemento estrutural na VU (em m³);
 A_{dem} = Área superficial dos elementos de concreto (paralelepípedo) que está em contato com a atmosfera no pós-demolição (em m²);
 A_{par} = Área superficial dos elementos de concreto (paralelepípedos) (em m²);
 V_{part} = Volume do elemento fragmentado de concreto (paralelepípedo) (em m³).

3.6 Etapa 6 – Balanço de CO₂

Para o balanço de CO₂ durante o ciclo de vida (CV) das estruturas de concreto, utilizou-se a Equação 10, onde B_{CO_2} é o balanço de CO₂, E_{con} é a quantidade de CO₂ emitida na produção do concreto (determinada na Etapa 2) e C_{cap} é a quantidade de CO₂ capturada pelo concreto (determinada nas etapas 4 e 5).

$$B_{CO_2} = E_{con} - C_{cap} \quad (kgCO_2) \quad (10)$$

4. Resultados e discussões

Na Figura 4 apresentam-se duas análises realizadas com os diferentes concretos listados nas Tabelas 1 e 2. A primeira (eixo das ordenadas esquerdo) refere-se ao consumo de cimento (kg/m³) necessário para produzir concretos com resistências à compressão de 20, 25, 30, 35, 40 e 45 MPa. A segunda refere-se às emissões de CO₂ (em kg) associadas à produção do concreto (eixo das

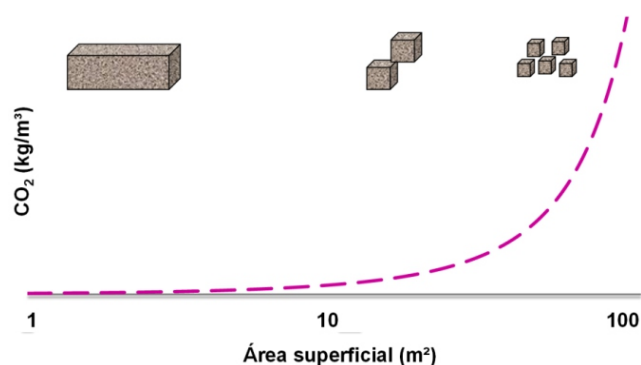


Figura 7

Captura de CO₂ em função da área superficial do elemento de concreto [22]

ordenadas da direita) em função da resistência à compressão. É possível observar que elementos de concreto com resistências mais elevadas necessitam de um maior volume de cimento para sua produção, de acordo como observado por Mehta e Monteiro [3], também, estas liberam um maior volume de CO₂ na atmosfera, comprovando que as emissões crescem gradativamente com o aumento de aglomerante consumido pelo concreto.

Na Tabela 6 apresenta-se a profundidade de carbonatação das estruturas ao longo do tempo para os consumos de 300, 400, 500, e 580 kg/m³ (calculadas pela Equação 4). Observa-se que em alguns casos (todos os concretos com consumo de 300 kg/m³, independentemente do tipo de cimento) no período de pós-demolição, o concreto foi totalmente carbonatado antes de finalizar o período de 30 anos. Tal fato deve-se ao formato e dimensões das partículas de resíduo utilizadas nas simulações, as quais foram assumidas como cúbicas de dimensões iguais a

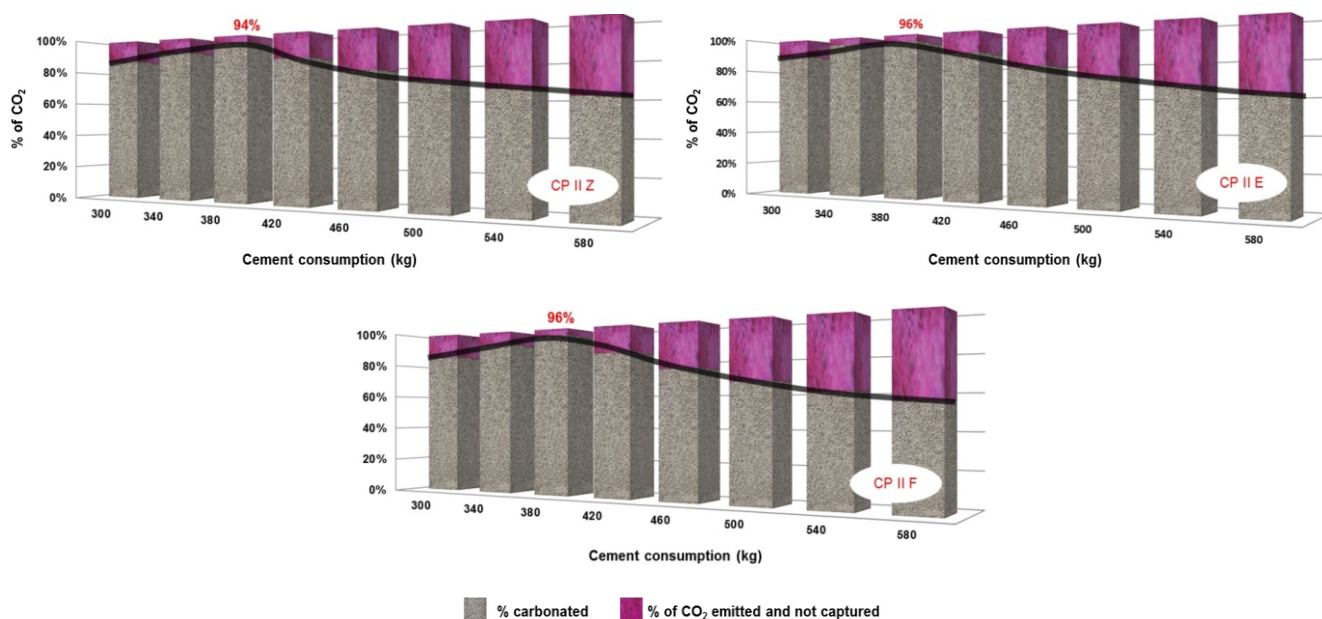


Figure 8

Balanço das emissões de CO₂ para concretos com cimentos CP II Z, E e F

30 mm. Considerando que o CO₂ pode ingressar por todas as faces, a profundidade de carbonatação máxima de cada partícula é de 15 mm (ver detalhe da Figura 3b), a qual é conseguida facilmente em concretos com baixa resistência à compressão e/ou elevadas relações água/cimento.

A elevação do consumo de cimento tem influência direta na resistência à compressão (ver Tabelas 1 e 2) se mantida a mesma relação a/c. O aumento da resistência à compressão do concreto causa uma diminuição da profundidade de carbonatação do material [33, 35], reduzindo a quantidade de carbono absorvida da atmosfera (ver Figuras 5-6). Segundo Kumar e Bhattacharjee [36], devido à influência da relação água/cimento, concretos com resistências mais elevadas apresentam menor porosidade dificultando a entrada de CO₂. Com isso, tem-se, conseqüentemente a redução do potencial de captura de CO₂ devido à carbonatação do concreto, como observado neste estudo.

Nas Figuras 5 e 6 são apresentados os valores de CO₂ (kg) absorvidos da atmosfera pelas estruturas de concreto durante o período de vida útil (0 a 70 anos) e no período pós-demolição (71 a 100 anos) em função do tipo e consumo de cimento. Uma análise mais criteriosa destas Figuras, em paralelo com a Tabela 6, possibilita verificar que para consumos de cimento entre 300 e 400 kg/m³ a frente de carbonatação é maior, resultando em uma maior captura de CO₂.

Nota-se que em concretos com consumo maior que 300 kg/m³ e resistência à compressão superior a 20 MPa, o potencial e a captura de CO₂ devido à carbonatação do concreto na demolição da estrutura (considerando apenas os cinco primeiros anos do período de pós-demolição das estruturas), é em média 60% superior ao do período de vida útil, evidenciando a importância da consideração da demolição da estrutura no balanço das emissões de CO₂. Este resultado é relacionado a maior área superficial de concreto que está exposta a ação do gás carbono (presente na

atmosfera) no período pós-demolição da estrutura (ver Figura 7), gerando assim, um maior sequestro de CO₂ devido à carbonatação, conforme exposto na literatura [19, 22, 37].

Com relação aos balanços das emissões (volume de CO₂ emitido vs. volume de CO₂ capturado, conforme Equação 9) foi possível determinar, para os diferentes tipos de aglomerantes, os consumos aos quais resulta o maior balanço de CO₂ (Figuras 8 e 9).

Para concretos com CP II Z (Figura 8), o consumo de 380 kg/m³ foi o que gerou o melhor balanço de emissões, reabsorvendo cerca de 94% de todo o CO₂ emitido na sua produção. Para concretos com CP II E, CP II F, CP III, CP IV e CP V, os consumos que geraram os melhores balanços para cada tipo de cimento foram: 380, 380, 420, 420 e 300 kg/m³ respectivamente. Observa-se que em média os concretos produzidos com cimentos dos tipos II, III e IV, apresentam consumo ideal (frente ao balanço do CO₂) entre 380 e 420 kg/m³ (Figuras 8 e 9), sugerindo que existe nesse intervalo um ponto ótimo (ponto de otimização) na curva consumo de cimento versus captura de CO₂.

Por fim, para concretos com cimento CP V (Figura 9), o consumo de 300 kg/m³ foi o que conferiu os melhores resultados quanto ao balanço das emissões, garantindo que 86% do CO₂ eliminado na sua produção fossem reabsorvidos da atmosfera durante os 100 anos de análise. Observa-se que o valor máximo de captura de CO₂ por parte do concreto com CP V, foi muito abaixo dos outros quatro tipos de cimentos (entre 94 e 99%), e que o consumo que leva ao melhor balanço é de 300 kg/m³, valor menor que os outros tipos. Estes resultados encontrados são devidos a diferentes fatores, sendo eles: (i) menor teor de adições no cimento (e conseqüentemente, maior teor de clínquer); (ii) maior resistência mecânica e maior resistência à penetração do CO₂ (em função da menor porosidade da matriz do concreto e da disponibilidade de reserva alcalina); (iii) menor consumo de cimento necessário para a produção de concretos com maiores resistências.

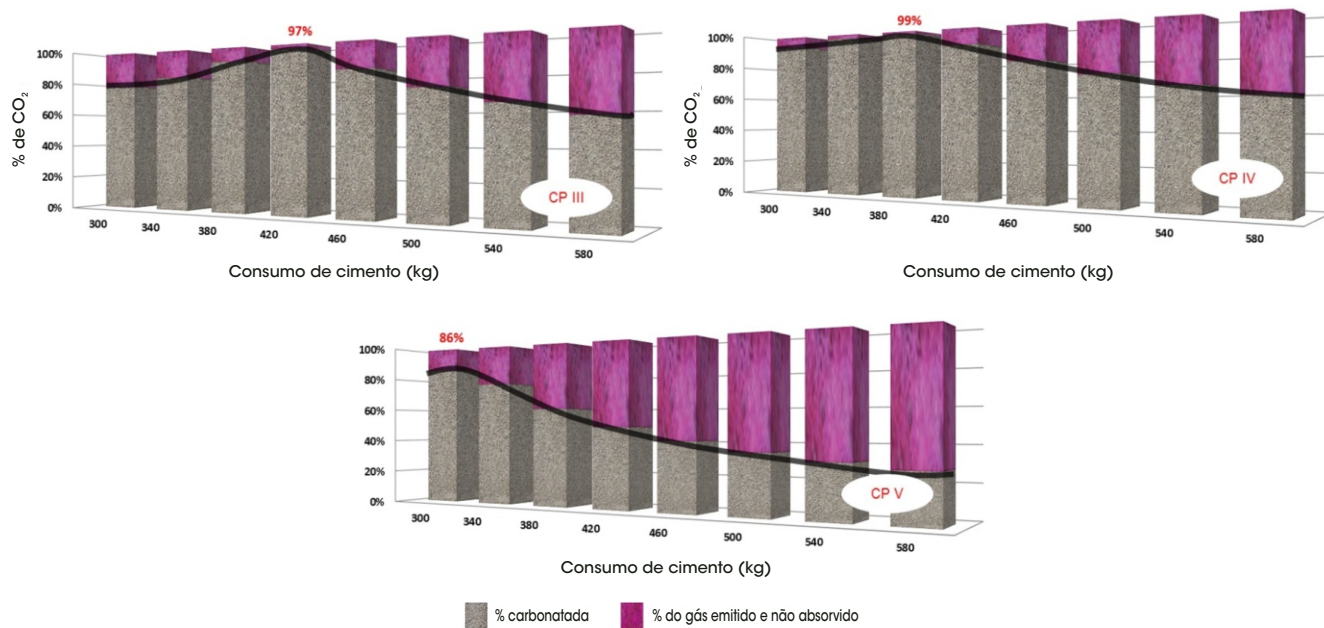


Figure 9
Balanço das emissões de CO₂ para concretos com cimentos CP III, IV e V

5. Conclusões

A captura de CO₂ decorrente da carbonatação do concreto pode ser de relevância para a construção civil, pois conhecendo este processo é possível indicar concretos pelo desempenho: visando à durabilidade, o menor consumo de cimento e o potencial de captura CO₂, podendo no futuro ser considerada como medida compensatória no projeto de estruturas de concreto.

No balanço das emissões, concretos com consumos entre 380 e 420 kg/m³ de cimento foram os que apresentaram melhores desempenhos, capturando mais de 90% do CO₂ emitido na sua produção.

Concretos produzidos com cimentos CP II, CP III e CP IV apresentam, em média, os mesmos intervalos para o ponto ótimo entre consumo de cimento, profundidade de carbonatação e captura de CO₂, e que o balanço das emissões para os diferentes consumos de cimento é em média de 74% (média do gás carbono que é sequestrado novamente da atmosfera pelo concreto, compensando as emissões da sua produção).

Concretos produzidos com cimento CP IV, apresentam em geral os maiores balanços independentemente do consumo de cimento a ser analisado, em média o balanço é de 81%. Os concretos podem ainda ser produzidos com maiores consumos de cimento, possuindo ainda um bom índice de sustentabilidade (referente às emissões de CO₂).

Concretos com CP V apresentam os piores balanços de CO₂, comparado com os demais, reabsorvendo em média 50% CO₂ emitido. O estudo também indicou a existência de um ponto ótimo entre consumo de cimento, profundidade de carbonatação e captura de CO₂, situado entre 380 a 420 kg de cimento por m³ de concreto, o qual conduz a uma profundidade de carbonatação média durante a vida útil compatível com o desempenho de durabilidade (carbonatação menor que o cobrimento da armadura).

6. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Centro de Estudos Avançados em Segurança de Barragens (CEASB), a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu (FPTI) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo fomento à pesquisa, assim como, a Universidade Federal da Integração Latino-Americana pela colaboração.

7. Referências bibliográficas

- [1] ALI, M.; SAIDUR, R.; HOSSAIN, M. A review on emission analysis in cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 2252-2261, 2011. doi: 10.1016/j.rser.2011.02.014.
- [2] SNIC. Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. "Relatório Anual," Rio de Janeiro, 2010.
- [3] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. "Concrete: Microstructure, Properties, and Materials", fourth ed., McGraw-Hill, 2014.
- [4] SNIC. Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. "Relatório anual", Rio de Janeiro, 2013.
- [5] LIMA, J. Avaliação das consequências da produção de concreto no Brasil para as mudanças climáticas, São Paulo: Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, EPUSP, 2010.
- [6] BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), "Relatório de referência. Emissões de Gases de Efeito Estufa nos Processos Industriais. Produtos Minerais. Parte I: Produção de Cimento". Disponível em: www.mcti.gov.br/upd_blob/0228/228962.pdf, Brasília, 2010.
- [7] PADE, C.; GUIMARÃES, M. The CO₂ uptake of concrete in a 100 year perspective. *Cement and Concrete Research*, vol. 47, n° 9, p. 1384-1356, 2007. doi:10.1016/j.cemconres.2007.06.009.
- [8] BAKKER, F. M. Initiation period. In: *Corrosion of steel in concrete*, London: Chapman & Hall, 1988, p. 22-5.
- [9] GENTIL, V. Corrosão, LTC, Rio de Janeiro: Ed. LTC. 3ª Edição, 2006.
- [10] ANDRADE, C. Calculation of diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements. *Cement and Concrete Research*, vol. 23, n° 3, pp. 724-742, 1993.
- [11] HAMADA, M. Concrete carbonation and steel corrosion. *Cement/Concret*, n° 272, pp. 2-18, 1969.
- [12] GALAN, I.; ANDRADE, C.; MORA, P.; SANJUAN, M. Sequestration of CO₂ by concrete carbonation. *Environmental Science & Technol*, vol. 44, n° 8, p. 3181-3186, 2010. doi: 10.1021/es903581d.
- [13] POSSAN, E.; FOGAÇA, J.; PAZUCH, C. Sequestro de CO₂ devido à carbonatação do concreto: potencialidades da barragem de Itaipu. *Revista de estudos ambientais*, vol. 14, n° 2, pp. 28-38, 2012.
- [14] YANG, K.; SEO, E.; TAE, S. Carbonation and CO₂ uptake of concrete. *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 46, pp. 43-52, 2014. doi:10.1016/j.eiar.2014.01.004.
- [15] HARBERT, G.; ROUSSEL, N. Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives. *Cement & Concrete Composites*, vol. 31, pp. 397-402, 2009. doi:10.1016/j.cemconcomp.2009.04.001.
- [16] GAJDA, J.; MILLER, F. Concrete as a Sink for Atmospheric Carbon Dioxide: a Literature review and estimation of CO₂ absorption by Portland Cement Concrete. *PCA. R&D Serial no. 2255*, Chicago, 2000.
- [17] PADE, C. The CO₂ uptake of concrete in the perspective of life cycle inventory. In: *International Symposium on Sustainability in the Cement and Concrete Industry*, Norway, 2007.
- [18] GAJDA, J. Absorption of Atmospheric Carbon Dioxide by Portland Cement. *PCA, Serial no. 2255*, Chicago, 2001.
- [19] LEE, S.; PARK, W.; LEE, H. Lifecycle CO₂ assessment method for concrete using CO₂ balance and suggestion to decrease LCCO₂ of concrete in South-Korean apartment. *Energy Build*, vol. 58, p. 93-102, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.11.034>.
- [20] JACBSEN, S.; JAHREN, P. Binding of CO₂ by Carbonation of Norwegian OPC Concrete. In: *CANMET/ACI International Conference on Sustainability and Concrete Technology*, Lyon, 2002.
- [21] HASELBACH, L.; THOMAS, A. Carbon sequestration in concrete sidewalk samples. *Construction and Building Materials*, 2014.

- [22] FELIX, E.; POSSAN, E. Sequestro de CO₂ em estruturas de concreto em uma perspectiva de 100 anos. In: 56º Congresso Brasileiro do Concreto, Natal, 2014.
- [23] FELIX, E.; POSSAN, E.; THOMAZ, W. Metodologia para estimativa da captura de CO₂ devido à carbonatação do concreto. In: Estudos ambientais, vol. 4, C. Poletto, Ed., Interciência Ltda, 2017.
- [24] PAULETTI, C.; POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C. C. Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil. Ambiente construído, vol. 7, pp. 7-20, 2007.
- [25] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Cimento Portland composto - NBR 11578, Rio de Janeiro, 2001. Versão Corrigida:1997.
- [26] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Cimento Portland de alto forno - NBR 5735 EB208, Rio de Janeiro, 1991.
- [27] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Cimento Portland Pozolânico - NBR 5736, Rio de Janeiro, 1991.
- [28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Cimento Portland de alta resistência inicial - NBR 5733 EB2, Rio de Janeiro, 1991.
- [29] IPCC. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006. <http://www.ipcc.ch>.
- [30] CSI: Cement Sustainability Initiative. WBCSD: World Business Council for Sustainable Development, 2011. [Online]. Available: http://www.wbcscement.org/pdf/tf1_CO2%20protocol%20v3.pdf. [Acesso em 14 4 2016].
- [31] BRASIL. Ministério das Minas e Energia (MME). Balanço Energético Nacional 2012: Ano base 2011. Empresa de Pesquisa Energética - EPE, Rio de Janeiro, 2012.
- [32] MARCOS, M. Análise da emissão de CO₂ em edificações através de uma ferramenta CAD-BIM. In: SIGraDi 2009 SP – From Modern to Digital: The Challenges of a Transition, São Paulo, 2009.
- [33] POSSAN, E. Modelagem da carbonatação e previsão da vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano, Porto Alegre: Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, 2010.
- [34] DAL MOLIN, D. C. C.; MASUEIRO, A. B.; ANDRADE, J. J. O.; POSSAN, E.; MASUEIRO, J. R.; MENNUCCI, M. M. Contribuição à Previsão da Vida Útil de Estruturas de Concreto. In: Claudio de Souza Kazmierczak, Márcio Minto Fabrício. (Org.). Avaliação de Desempenho de Tecnologias Construtivas Inovadoras: Materiais e Sustentabilidade. 1ed.: Editora Scienza, v., p. 223-270, 2016.
- [35] PAULETTI, C. Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição, Porto Alegre: Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, 2009
- [36] KUMAR, R.; BHATTACHARJEE, B. Porosity, pore size distribution and in situ strength of concrete. Cement and Concrete Research, vol. 33, p. 155–164, 2003.
- [37] POSSAN, E.; FELIX, E.; THOMAZ, W. CO₂ uptake by carbonation of concrete during life cycle of building structures. Journal of Building Pathology and Rehabilitation, 2016. doi:10.1007/s41024-016-0010-9.