

## SEQUESTRO DE CO<sub>2</sub> DEVIDO À CARBONATAÇÃO DO CONCRETO: POTENCIALIDADES DA BARRAGEM DE ITAIPU

Edna Possan<sup>1</sup>, Josias Cristiano Fogaça<sup>2</sup> e Catiussa Maiara Pazuch<sup>3</sup>

**Resumo:** O processo produtivo do cimento, principal componente da mistura para construção de estruturas de concreto, é responsável por cerca de 7% do CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) emitido na atmosfera, contribuindo significativamente para o aquecimento global. Todavia, ao cimento utilizado na produção destes concretos, são adicionados materiais suplementares, como a cinza volante, face à importância técnica na redução do calor de hidratação, o que também apresenta importância ambiental, uma vez que a cinza volante é um rejeito de usinas termoeletricas e quando incorporadas ao cimento reduzem o passivo ambiental desta fonte de geração de energia. Ainda, durante o ciclo de vida, o concreto, empregado na construção de barragens e outras estruturas de concreto, pode capturar CO<sub>2</sub> por meio da carbonatação, compensando em partes o impacto de sua produção. Face o exposto, a presente pesquisa objetiva apresentar os resultados do estudo da potencialidade de captura de CO<sub>2</sub> pela barragem de Itaipu Binacional devido à carbonatação do concreto. Os resultados preliminares mostram que há carbonatação em toda extensão da barragem de concreto indicando a potencialidade de captura de CO<sub>2</sub>. Como a carbonatação do concreto é um processo reverso ao da produção do cimento, se comprovada sua eficácia na captura de CO<sub>2</sub>, poderá ser futuramente considerada uma medida compensatória no projeto de edificações.

**Palavras-chave:** Captura de CO<sub>2</sub>. Efeito estufa. Medida compensatória. Carbonatação do concreto.

### 1 Introdução

A Indústria da Construção (IC), além de ser uma grande consumidora de recursos naturais, também tem grande responsabilidade no aquecimento global, uma vez que, a indústria cimenteira sozinha é responsável por cerca de 5 a 8% das emissões globais de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) da atmosfera (MEHTA, 2001; ALI, SAIDUR, HOSSAIN, 2011). Metade destas emissões é originada pela queima de combustíveis fósseis para a fabricação do clínquer. O restante advém do próprio processo produtivo do clínquer, devido à descarbonatação (reações de calcinação) do calcário (CaCO<sub>3</sub>), principal matéria-prima na produção do cimento. Neste processo o CaCO<sub>3</sub> é calcinado produzindo o óxido de cálcio (CaO) e como subproduto o CO<sub>2</sub>. Depois de produzido, o CaO reage com a sílica (SiO<sub>2</sub>), a alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e o óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) formando o clínquer, ao qual na moagem é realizada a adição de gesso para a fabricação do cimento Portland.

Segundo o relatório anual de 2010 do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2011) 90% das emissões de

CO<sub>2</sub> da indústria cimenteira são derivadas do processo de produção do clínquer, tanto pela descarbonatação quanto pela queima de combustíveis fósseis para a geração de energia. Os outros 10% resultam do transporte da matéria-prima e das emissões pelo consumo de energia elétrica na fábrica.

Esse tema tem merecido destaque crescente, levando a indústria cimenteira a promover melhorias no processo produtivo para redução destas emissões. O Brasil é dos países que menos emite CO<sub>2</sub> por tonelada de cimento produzido, pois as plantas industriais aqui instaladas usam o processo de produção a seco, o qual reduz significativamente a demanda de combustível para a produção do clínquer, sendo referência mundial na produção de cimento com baixa emissão de CO<sub>2</sub>.

Segundo o Inventário Nacional dos Gases do Efeito Estufa do Ministério da Ciência e Tecnologia (BRASIL, 2010), em 2010, as emissões da indústria Nacional foram de 1,4%, sendo que para cada tonelada de cimento produzido são emitidos menos de 600 kg de CO<sub>2</sub>, valor bem inferior à média mundial que é de 900 kg CO<sub>2</sub>/tonelada. Isso se deve ao fato de a

<sup>1</sup> E-mail: epossan@gmail.com; edna.possan@unila.edu.br  
Universidade da Integração Latino Americana – Unila. Engenharia Civil de Infraestruturas - Bloco 6, Espaço 1, Sala 5. Avenida Tancredo Neves, 6731 – Foz do Iguaçu, PR CEP 85884-000. Fone: + 55 (45) 3576-7307 Fax: +55 (45) 3576 7306

<sup>2</sup> E-mail: josiascristiano@hotmail.com

<sup>3</sup> E-mail: cati.maiara@gmail.com

indústria cimenteira brasileira ter aderido em 2002 à Iniciativa para a Sustentabilidade do Cimento (CSI – *Cement Sustainability Initiative*, 2005), que visa à redução das emissões do setor por meio de alterações, sobretudo, na tecnologia de produção deste material. De acordo com o relatório do SNIC (2011) as principais ações brasileiras são baseadas na eficiência energética e no processo de produção do clínquer que é feito a seco. O processo adotado em outros países é por via úmida o que demanda maior quantidade de energia, emitindo conseqüentemente, maiores volumes de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Além disso, o setor cimenteiro nacional produz cimentos com adições (como escória, pozolana e filler) que em geral, são subprodutos de outras indústrias, o que reduz o volume de clínquer necessário para a produção de uma tonelada de cimento, contribuindo para a não emissão de gases do efeito estufa.

### 1.1 Emissões mundiais de CO<sub>2</sub>

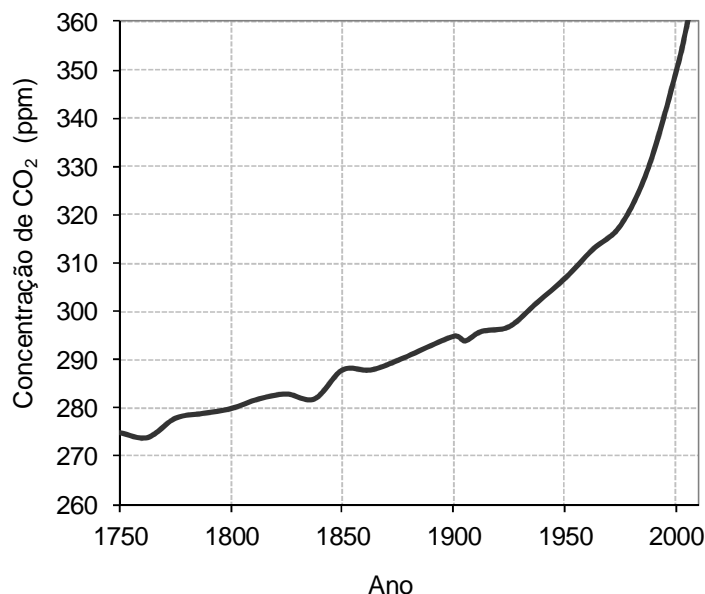
De acordo com o relatório do IPCC (2007) a indústria mundial representa 19,4% das emissões de gases do efeito estufa, que advém, em sua maioria, de países desenvolvidos cuja principal fonte de emissões de CO<sub>2</sub> é o uso energético de combustíveis fósseis. Outras fontes de emissão importantes nesses países são os processos industriais como o da produção de cimento (PNMC, 2008), responsável por uma

parcela significativa do CO<sub>2</sub> emitido na atmosfera (ALI, SAIDUR, HOSSAIN, 2011).

Os cenários projetados pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* – IPCC (2007) apontam que em 2100 a concentração de CO<sub>2</sub> poderá alcançar os patamares de 535 a 985 ppm (0,0535 a 0,0985%), correspondendo a um aumento de 41 a 158% em relação aos níveis atuais. Destaca-se que a concentração global de CO<sub>2</sub> na atmosfera é crescente, acentuando-se a partir de 1950 (ver Figura 1).

As emissões de CO<sub>2</sub>, segundo o *Carbon Dioxide Information Analysis Center* – CDIAC (2007), oriundas da produção de cimento (377 milhões de toneladas de carbono em 2007) tiveram um aumento significativo desde meados dos anos 70 quando praticamente duplicaram. Agora representam 4,5% das emissões globais de CO<sub>2</sub> provenientes da queima de combustíveis fósseis e produção de cimento, sendo que para cada tonelada de clínquer é gerado, aproximadamente, segundo Mehta (2009), uma tonelada de CO<sub>2</sub>. No Brasil foram emitidos em 2007 pela produção de cimento um total de 6,311 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>. Os Estados Unidos da América emitiram 13,172 milhões de toneladas no mesmo período e a China, o maior emissor, 184,160 milhões de toneladas (CDIAC, 2007), sendo a China responsável pela metade do cimento produzido mundialmente, enquanto que a Índia e os EUA são responsáveis por 6% e 3%, respectivamente (SNIC, 2011).

Figura 1 - Concentração global de CO<sub>2</sub> na atmosfera no decorrer dos anos



Fonte: Yoon, Çopuroğlu e Park (2007).

Porém, comparado a outros materiais de construção, o concreto é compatível com o meio ambiente, pois possui a capacidade de ser reciclável ou reciclado (LOVATO et al., 2011), durável (MEHTA, 2001; NEVILLE, 1997), incorporar rejeitos (MEHTA, 2001; LOVATO et al., 2011), confinar materiais perigosos e ainda capturar/reter/sequestrar CO<sub>2</sub> (GAJDA; MILLER, 2000; GAJDA, 2001; PADE, GUIMARÃES, 2007; GALAN et al., 2010).

### 1.2 Captura de CO<sub>2</sub>

Gajda e Miller (2000), Pade e Guimarães (2007), Naik e Kumar (2010), Galan et al. (2010), entre outros autores, têm discutido atualmente que o concreto tem a potencialidade de capturar CO<sub>2</sub> da atmosfera por um processo denominado carbonatação, que é um fenômeno físico-químico resultante das reações de gases ácidos (principalmente o CO<sub>2</sub>) do ambiente com os produtos alcalinos do concreto. Essa alcalinidade é conferida principalmente pela presença do hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>), dissolvidos ou precipitados no concreto endurecido, que reage com o CO<sub>2</sub> formando o carbonato de cálcio e água (Ca(OH)<sub>2</sub> + CO<sub>2</sub> → CaCO<sub>3</sub> + H<sub>2</sub>O). Um dos resultados desta reação é a redução do pH do concreto de 12,5 para um valor igual ou inferior a 9 (BAKKER, 1988), deixando a armadura suscetível à corrosão. Outro resultado é a captura do CO<sub>2</sub> da atmosfera, uma vez que o CO<sub>2</sub> que ingressa através do concreto por difusão é aprisionado pelo (Ca(OH)<sub>2</sub>), gerando o (CaCO<sub>3</sub>), em um processo inverso ao da produção do cimento (CaCO<sub>3</sub> → CaO + CO<sub>2</sub>). Vale citar que as reações de carbonatação ocorrem durante toda a vida útil da estrutura ou elemento de concreto, e continuam ocorrendo, segundo Pade e Guimarães (2007), após a demolição da mesma.

Segundo Naik e Kumar (2010), cerca de 19% do dióxido de carbono produzido durante a fabricação de cimento é reabsorvido pelo concreto durante o seu ciclo de vida através deste processo. Entretanto há divergência na literatura em relação à potencialidade do sequestro/captura de CO<sub>2</sub> devido à carbonatação do concreto. Em estudo desenvolvido na Noruega, Jacobsen e Jahren (2002) estimaram que 16% do CO<sub>2</sub> emitido na produção do cimento é reabsorvido pelo concreto devido à carbonatação durante sua vida útil, enquanto

Gajda (2001) relata que 7,6% do CO<sub>2</sub> emitido pode ser absorvido. Já Pade e Guimarães (2007) 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<sub>2</sub> emitido na produção do cimento. Caso a demolição da estrutura não seja considerada, esse valor é reduzido para 24%. Em estudo experimental realizado com diversos tipos de concreto Galan et al. (2010), destacam que a absorção de CO<sub>2</sub> devido à carbonatação foi inferior a 50% por mol de CaO.

Estas divergências encontradas na literatura sobrevêm dos diversos fatores que influenciam o fenômeno de carbonatação do concreto (como resistência do material, ambiente de exposição da estrutura, quantidade de cimento utilizada para produção do concreto, idade da estrutura, entre outros), assim como, são dependentes da metodologia empregada pelos pesquisadores.

### 1.3 Captura de CO<sub>2</sub> na barragem de Itaipu

Construída para reter o curso do rio Paraná, a barragem da Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional é um dos maiores projetos de engenharia do mundo, possuindo uma extensão de 7919 metros, divididos em barragem de concreto, de enrocamento e de terra, com altura máxima de 196 metros. A barragem de concreto se divide em barragem lateral direita (BLD), barragem principal e blocos de ligação e estrutura de desvio. Para sua construção foram consumidos 12,7 milhões de metros cúbicos de concreto, sendo que em um único dia, o volume de concreto lançado chegou a 15 mil m<sup>3</sup> e, em um mês, a 340 mil m<sup>3</sup> (ITAIPIU, 2009). Para tanto, consumiram-se elevados volumes de concreto, cuja produção demandou agregados (rochas e areias), cimento, adições, aditivos e água, conforme os quantitativos apresentados na Tabela 1.

Conforme dados da Tabela 1, verifica-se que a Itaipu, uma das maiores obras de engenharia do mundo, consumiu um grande volume de matéria-prima, sobretudo de concreto, na sua construção. Por motivos técnico-econômicos, foram empregados concretos com elevado teor de adições pozolânicas, como a cinza volante a escória de alto forno. Do ponto de vista técnico as adições diminuem o calor de hidratação do concreto controlando a

fissuração devido à retração por secagem. Do ponto de vista econômico, reduzem os custos do mesmo, pois as adições são muito mais baratas que o cimento. Soma-se a estes fatores a importância ambiental desta prática, visto que as adições pozolânicas são rejeitos industriais, produzidas em grandes

volumes, e se não incorporadas ao concreto causariam sérios problemas ao meio ambiente. Outro fator importante, é que com o uso de adições reduz-se o consumo de cimento, e indiretamente as emissões de CO<sub>2</sub> decorrentes da não produção deste material.

**Tabela 1 - Quantidade de materiais utilizados na produção do concreto da barragem de Itaipu.**

Tipo de material	Quantidade
Rocha saudável para produção de agregados	8,3 x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
Areia natural dragada	1,7 x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
Cimento	2,1 x 10 <sup>6</sup> t
Cinzas finas (material pozolânico)	0,3 x 10 <sup>6</sup> t
Aditivos	3,4 x 10 <sup>6</sup> kg
Aço	481.074 t
<b>Total de concreto produzido</b>	<b>12,7 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup></b>

Fonte: ITAIPU (2009)

Além disso, o concreto empregado na construção de Itaipu pode, ao longo do ciclo de vida da barragem, capturar CO<sub>2</sub> em um processo denominado carbonatação, fazendo uma compensação das emissões oriundas da produção do cimento utilizado na sua construção. Deste modo, estudos que visam estimar estas quantidades podem oferecer parâmetros ambientais e de sustentabilidade, atuando como uma medida compensatória para o sequestro de CO<sub>2</sub>, justificando o desenvolvimento deste estudo.

Destaca-se que o grande desafio para os engenheiros do século 21 é encontrar formas de capturar e armazenar seguramente o CO<sub>2</sub> emitido. Neste sentido, a adoção de novas tecnologias, o desenvolvimento e melhoria de novos materiais e processos e o desenvolvimento de pesquisas orientadas a minimizar os efeitos das mudanças climáticas, em especial reduzir a emissão ou capturar CO<sub>2</sub>, contribuem para o desenvolvimento sustentável. Assim, um campo ainda bastante amplo para pesquisa, visando o controle na emissão e a redução da concentração de poluentes no meio ambiente, é o das tecnologias e estratégias que consideram o sequestro ou captura do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), cujo tema é objeto desta pesquisa, que visa verificar a potencialidade de captura de CO<sub>2</sub> devido à carbonatação do concreto da barragem da Usina Hidrelétrica de Itaipu (UHE).

No Brasil não há relatos até o

momento de estudos nesta área, sendo o presente trabalho pioneiro.

## 2 Metodologia

Neste estudo são apresentados os resultados de 93 testemunhos de concreto, de 75 mm de diâmetro, extraídos em vários pontos da barragem e do vertedouro da UHI (ver Figura 2). Devido à dimensão da mesma, os testemunhos extraídos foram escolhidos de forma estratégica, por meio de um projeto de experimentos, a fim de se obter uma amostra estatisticamente representativa de toda a extensão da barragem, conforme apresentado na Tabela 2.

A maioria dos testemunhos foi extraída dos denominados blocos chaves (blocos instrumentados da barragem), pois estes possuem dados históricos de instrumentação e auscultação da barragem que poderão ser utilizados para dar suporte à pesquisa.

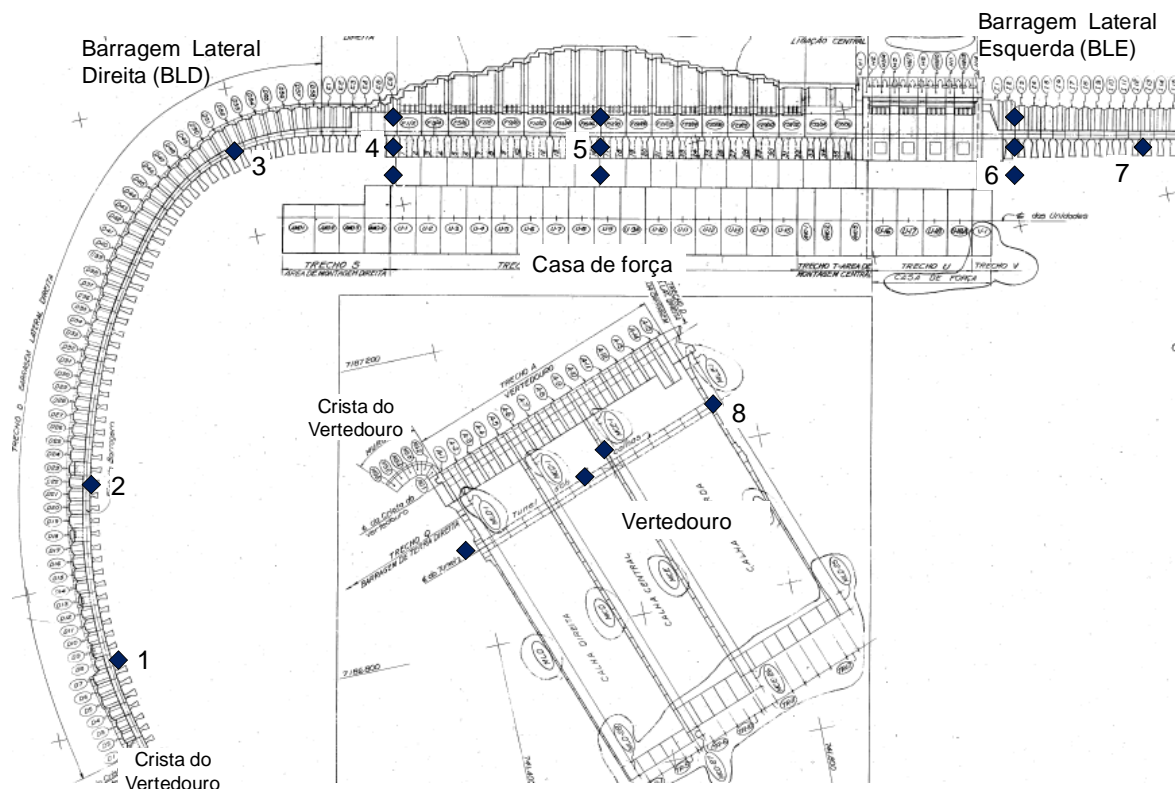
A extração dos testemunhos foi possível devido à parceria entre o Centro de Estudos Avançados em Segurança de Barragens do Parque Tecnológico de Itaipu (CEASB/PTI) e o Laboratório de Tecnologia do Concreto da Itaipu Binacional (LTCl/IB). O LTCl disponibilizou a equipe técnica e os equipamentos utilizados no trabalho de campo (extratora de testemunhos, brocas etc.).

Em relação à nomenclatura adotada, destaca-se que neste trabalho mantiveram-se às adotadas pela Usina Hidrelétrica de Itaipu, na qual as cotas são referenciadas em relação ao nível do mar.

A fim de verificar a influência do ambiente de exposição da estrutura sobre a carbonatação de concreto, definiu-se no projeto de experimentos a realização da

extração de testemunhos em ambientes internos (INT) e ambientes externos protegidos (EP) e desprotegidos (ED) da chuva, nos pontos de estudo onde esses ambientes fossem identificados. Face às características da estrutura, em diversos pontos da barragem não foi possível identificar os três ambientes de exposição.

**Figura 2 - Demarcação dos pontos de extração de testemunhos na barragem de concreto da Usina Hidrelétrica de Itaipu.**



Fonte: ITAIPU BINACIONAL (2011)

Haja vista a influência na carbonatação, realizou-se a medição da temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), umidade relativa (%) e concentração de  $\text{CO}_2$  (ppm) com um aparelho específico (Figura 3a) nos locais de extração dos testemunhos (Figuras 3b e 3c). A determinação da profundidade carbonatada dos testemunhos extraídos (Figuras 3d e 3e) foi realizada com o auxílio de um paquímetro, utilizando um indicador químico de pH (1% de fenolftaleína dissolvida em 70% de álcool etílico e 30% de água), segundo prescrições da RILEM – CPC 18 (1988). O procedimento consiste em aspergir essa solução sobre o concreto recém extraído e limpo. Devido à redução do pH na reação química entre o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e o  $\text{CO}_2$ , na região onde o concreto não altera sua cor, constata-se a presença de

carbonatação (Figura 3f). Já nos locais de coloração rosa-carmin, o concreto ainda não foi carbonatado. Para cada testemunho foram realizadas quatro medições da profundidade carbonatada em pontos equidistantes. A profundidade carbonatada das amostras foi considerada como sendo a média ponderada das quatro leituras.

Destaca-se que neste estudo são apresentados os resultados preliminares da pesquisa, ou seja, os resultados da potencialidade de captura de  $\text{CO}_2$  devido à carbonatação do concreto, visto que o projeto encontra-se em andamento. Os quantitativos de  $\text{CO}_2$  capturado pelo concreto carbonatado serão conduzidos somente após a modelagem matemática da carbonatação e a determinação da área superficial da barragem de concreto.

Figura 3 - a) medição do CO<sub>2</sub>; b e c) extração dos testemunhos; d) testemunhos extraídos e identificados; e) ponto de extração; e) medição da carbonatação.



Tabela 2 - Projeto de experimentos para a extração dos testemunhos.  
(Continua)

n°	Referência		Ambiente de exposição	Quantidade de amostras extraídas
	Nível do mar	Barragem		
1	Cota 190	D 7	ED	6
		D 8	EP	3
	Cota 195	D 7	ED	3
2	Cota 184	D 22	ED	10
			EP	5
3	Cota 162	D 54	ED	5
			EP	6

Tabela 3 - Projeto de experimentos para a extração dos testemunhos.  
(Conclusão)

Referência			Ambiente de exposição	Quantidade de amostras extraídas
nº	Nível do mar	Barragem		
4	Cota 144	E 6 - galeria	INT	3
		E 6 - face	ED	2
		E 6	EP	3
5	Cota 144	F 20 - galeria	INT	3
		F 20 - face	ED	2
		F 20	EP	6
6	Cota 144	I 1 - galeria	INT	2
		I 1 - face	EP	2
		I 1	EP	3
7	Cota 164	I 10	ED	3
			EP	12
8	Vertedouro	BLD	ED	3
		Centro	EP	3
		BLE	ED	3
		Galeria	INT	3

Onde: INT: Ambiente Interno; EP: Ambiente Externo Protegido; ED: Ambiente Externo Desprotegido

### 3 Resultados e discussão

Com a finalização do trabalho de campo (extração de testemunhos e medição das profundidades carbonatadas) pode-se afirmar que existe carbonatação do concreto na barragem de Itaipu, indicando que a mesma apresenta um grande potencial de captura de CO<sub>2</sub>, justificando a continuidade do projeto.

Para este estudo, as profundidades de carbonatação dos 93 testemunhos extraídos da barragem de concreto e as medições das condições ambientais nos respectivos pontos de extração foram tabuladas em planilhas do Excel®, sendo os resultados discutidos em relação ao ambiente de exposição da estrutura e à cota da barragem, conforme apresentado na Tabela 3. Para os concretos estudados, as profundidades de carbonatação mínima, máxima e média encontradas, respectivamente, foram de aproximadamente zero, 71 mm de 43 mm. Em alguns pontos da barragem observaram-se profundidades carbonatadas superiores a 80 mm. Essas diferenças sobrevivem de diversos fatores, especialmente da porosidade do concreto (expressa de maneira indireta pela resistência à compressão) e das condições ambientais (umidade e teor de CO<sub>2</sub>) as quais a estrutura está exposta.

O teor médio de CO<sub>2</sub> nos pontos de

extração dos testemunhos e a profundidade de carbonatação média dos concretos extraídos são apresentados na Figura 4. Nota-se que o teor de CO<sub>2</sub> do ambiente nos pontos de coleta de dados fica compreendido entre 250 a 370 ppm, com média em torno de 320 ppm, valor que se aproxima da média mundial e é suficiente para carbonatar o concreto.

Destaca-se que a umidade ambiental é um dos mais importantes fatores que afetam a carbonatação do concreto, uma vez que ingresso do CO<sub>2</sub> através do mesmo é função do teor de umidade nos poros do material. Neste estudo constatou-se que a umidade relativa na região de extração dos testemunhos está compreendida entre 40 e 80 % (ver Figura 5), sendo propícia para a carbonatação do concreto, pois nas medições de campo realizadas obteve-se um valor médio de 61%, o qual se encaixa nos limites citados pela literatura (BAKKER, 1988; Neville, 1997) que enfatiza que a reação de carbonatação ocorre com mais intensidade em ambientes com umidade entre 50 e 80%.

Como a difusão do gás carbônico através dos poros do concreto segue os princípios da primeira lei de Fick, sua difusão pelos poros deste material se dá na razão direta do gradiente de concentração. Logo, quanto maior a concentração deste gás e menor a resistência à compressão do

concreto, maior a profundidade de carbonatação. Tal fato foi constatado nos ensaios de campo, uma vez que em concretos de resistência à compressão de aproximadamente 18 MPa a profundidade de carbonatação verificada foi de 75 mm. Já em concreto de maior resistência (35 MPa) a profundidade máxima verificada foi de 30 mm. Destaca-se que os valores da resistência à compressão do concreto foram obtidos com base nos documentos, sobretudo os relatórios de concretagem, do Acervo Técnico da Itaipu

Binacional (ITAIPU BINACIONAL, 2011).

No que se refere à profundidade de carbonatação do concreto e à influência do ambiente de exposição da estrutura, os resultados deste estudo vêm ao encontro do relatado na literatura (BAKKER, 1988). A profundidade de carbonatação tende a ser maior em ambientes internos (INT), seguido de ambientes externos protegidos da chuva (EP) e ambientes externos desprotegidos da chuva (ED), conforme apresentado na Figura 6.

**Tabela 4 - Profundidade de carbonatação média do concreto e condições ambientais dos locais de extração dos testemunhos**

Referência			Ambiente de exposição	Quant. amostras extraídas	Condições Ambientais			Carbonatação média (mm)
nº	Nível do mar	Barragem			UR (%)	T (°C)	CO <sub>2</sub> (ppm)	
1	Cota 190	D 7	ED	6	73,0	19,4	339	50,3
		D 8	EP	3	43,8	25,6	285	16,4
	Cota 195	D 7	ED	3	73,1	19,5	339	70,6
			EP	3	43,8	25,6	286	68,3
2	Cota 184	D 22	ED	10	72,7	20,8	346	42,3
			EP	5	45,7	24,1	293	51,2
3	Cota 162	D 54	ED	5	55,2	21,7	286	29,2
			EP	6	61,1	23,0	305	26,1
4	Cota 144	E 6 - gal	INT	3	55,0	14,0	300	46,9
		E 6 - face	ED	2	56,0	23,0	295	34,0
		E 6	EP	3	64,4	9,6	307	38,1
5	Cota 144	F 20 - gal.	INT	3	43,5	16,9	290	16,4
		F 20 - face	ED	2	60,7	22,8	297	36,8
		F 20	EP	6	68,1	8,8	325	41,0
6	Cota 144	I 1 - gal	IN	2	55,5	10,6	283	36,0
		I 1 - face	ED	2	63,7	22,3	268	23,7
		I 1	EP	2	70,1	10,5	316	36,3
7	Cota 164	I 10	ED	3	53,4	31,5	285	25,6
			EP	12	54,5	30,1	284	40,5
8	Vertedouro	BLD	ED	3	51,3	34,0	281	2,5
		Centro	EP	3	80,0	36,1	339	14,5
		BLE	ED	3	45,5	32,7	281	22,5
		Galeria	INT	3	81,3	28,4	700	35,2

Onde:

INT: Ambiente Interno

EP: Ambiente Externo Protegido

ED: Ambiente Externo Desprotegido

Gal: Galeria

BLD: Barragem Lateral Direita

BLD: Barragem Lateral Esquerda

Nota-se que a carbonatação do concreto é 35,3% superior em ambiente interno que em ambiente externo desprotegido da chuva e 23,6% mais elevada que em ambiente externo protegido. Tal fato é atribuído à umidade ambiental e à umidade interna do concreto, pois em ambientes internos ou protegidos da chuva o concreto mantém sua umidade constante,

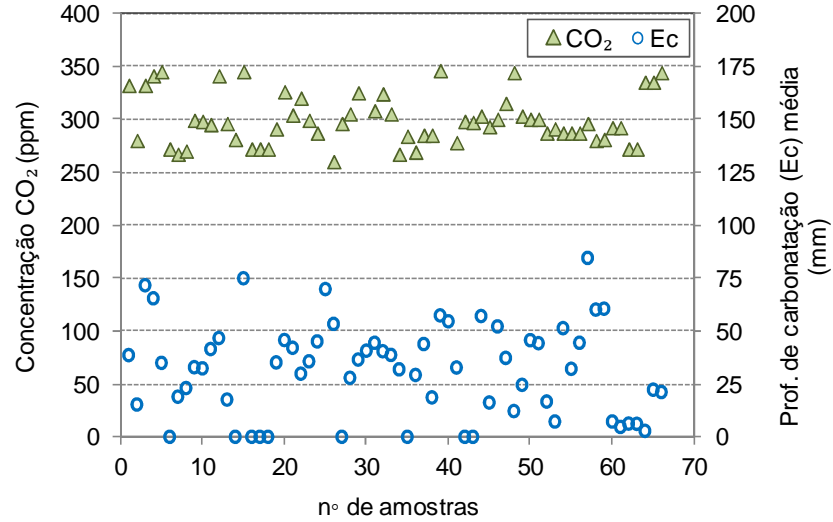
em equilíbrio com o ambiente, facilitando o ingresso do CO<sub>2</sub> para o interior do concreto e, conseqüentemente, a carbonatação do mesmo, face às condições de umidade satisfatórias, conforme apresentado na Figura 5. Isso tem influência direta no sequestro de CO<sub>2</sub>, pois quanto maior o ingresso deste gás para o interior do concreto, maior o potencial de captura



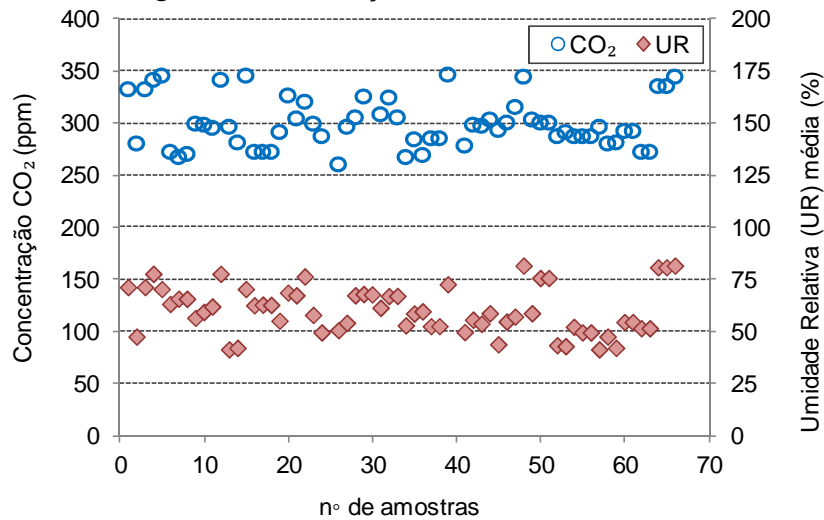
devido à carbonatação, o que torna o teor de umidade do concreto um parâmetro chave

para a captura de CO<sub>2</sub> por carbonatação natural.

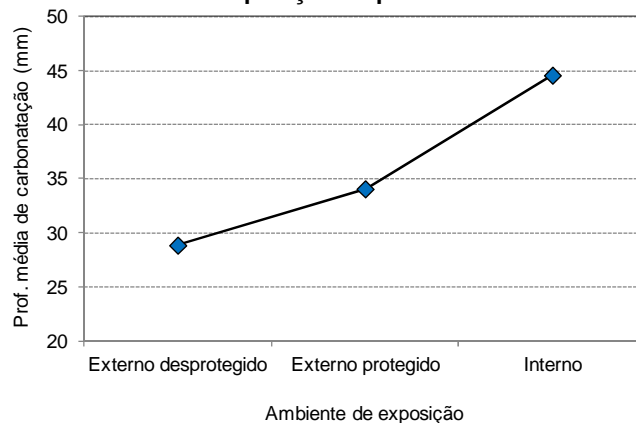
**Figura 4 - Profundidade de carbonatação do concreto x concentração de CO<sub>2</sub>**



**Figura 5 - Concentração de CO<sub>2</sub> x umidade relativa**



**Figura 6 - Influência do ambiente de exposição na profundidade de carbonatação do concreto**



#### 4 Conclusões

- Constatou-se que há carbonatação do concreto, logo houve captura de CO<sub>2</sub>, indicando a potencialidade de captura desse gás pelo concreto da barragem de Itaipu Binacional. Como o processo produtivo do cimento é um grande emissor de gases do efeito estufa, o processo reverso da carbonatação do concreto poderá ser considerado no futuro como uma medida compensatória, contribuindo para a sustentabilidade das estruturas em concreto.

- Nos 93 testemunhos de concreto extraídos, as profundidades de carbonatação mínima, máxima e média encontradas foram de aproximadamente zero, 71 mm de 43 mm,

respectivamente, as quais são dependentes da resistência do concreto e do ambiente de exposição da estrutura.

- Os estudos preliminares confirmam a influência do ambiente de exposição e da umidade do concreto na profundidade de carbonatação relatada na literatura. Verificou-se a influência da proteção à chuva onde a carbonatação é maior para ambientes internos, seguido dos ambientes externos protegidos da chuva e externos desprotegidos, sendo este um parâmetro de elevada influência na captura de CO<sub>2</sub> devido à carbonatação do concreto.

---

#### 5 Sequestration of CO<sub>2</sub> due to Concrete Carbonation: Potentiality of Itaipu Dam

**Abstract:** *The production process of cement, the main component of mixture to build concrete structures, is responsible for about 7% of CO<sub>2</sub> (carbon dioxide) released into the atmosphere, significantly contributing to global warming through the green house effect. However, supplementary materials are added in the concrete production process, such as fly ash, due to the technical importance to reduce the heat of hydration, which also presents environmental importance, once it is a waste material of thermoelectric power plants and when incorporated into the cement, reduces the environmental burden of this source of power generation. Also, during the life cycle, the concrete that is employed in the construction of dams and other concrete structures may capture CO<sub>2</sub>, through carbonation, minimizing the impacts on its production. Thus, this paper aims to show preliminary results of a study of CO<sub>2</sub> sequestration potentiality by the concrete dam of Binational Itaipu due to the concrete carbonation. The preliminaries results show that there is carbonation in whole extension of the concrete dam indicating potential for CO<sub>2</sub> sequestration. Once the concrete carbonation is a reverse process to cement production, if confirmed its CO<sub>2</sub> sequestration efficiency, it might be considered in the future as a compensatory measure for the design of buildings.*

**Key-words:** CO<sub>2</sub> uptake. Greenhouse effect. Compensatory measure. Concrete carbonation.

---

#### 6 Referências

ALI, M.B., SAIDUR, R., HOSSAIN, M.S. A review on emission analysis in cement industries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 15 (4), p. 2252-2261, 2011.

BAKKER, R.F.M. **Initiation period:** Corrosion of steel in concrete. London: Chapman and Hall, 1988.

BRASIL - Ministério da Ciência e Tecnologia. Coordenação Geral de Mudanças Globais de Clima, 2010. Segunda comunicação Nacional do Brasil à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Brasília: MCT. 154p. Disponível em: <[http://www.mct.gov.br/upd\\_blob/0219/219293.pdf](http://www.mct.gov.br/upd_blob/0219/219293.pdf)>. Acesso em: 15 abr. 2012.

CDIAC - CARBON DIOXIDE INFORMATION ANALYSIS CENTER. National Cement Production

Estimates: 1950 – 2007, 2007. Disponível em: <<http://cdiac.ornl.gov/>>. Acesso em: 20 jul. 2011.

CSI - CEMENT SUSTAINABILITY INITIATIVE. World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), 2005. Disponível em: <<http://www.wbcscement.org>>. Acesso em: 2 jan. 2012.

GAJDA, J. **Absorption of Atmospheric Carbon Dioxide by Portland Cement.** PCA, Chicago, Serial no. 2255, 2001.

GAJDA, J., MILLER, F.M. **Concrete as a Sink for Atmospheric Carbon Dioxide:** a Literature review and estimation of CO<sub>2</sub> absorption by Portland Cement Concrete. PCA, Chicago, R&D Serial no. 2255, 2000.

GALAN, I. et al. Sequestration of CO<sub>2</sub> by concrete carbonation. **Environmental Science &**

Technology, p. 3181–3186, 2010.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate change 2007: the physical science basis - Summary for policymakers". Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, 2007.

ITAIPU BINACIONAL. Acervo Técnico da Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional. Consulta em julho 2011.

ITAIPU: Usina Hidroelétrica – projeto, aspectos de engenharia. Realização da diretoria técnica da Itaipu Binacional; Coordenação geral da superintendência de energia de Itaipu Binacional; Apoio da assessoria de comunicação social; Execução gráfica de TAB Marketing Editorial, Foz do Iguaçu: Itaipu Binacional, 2009.

JACOBSEN, S., JAHREN, P. **Binding of CO<sub>2</sub> by Carbonation of Norwegian OPC Concrete**. CANMET/ACI International Conference on Sustainability and Concrete Technology, Lyon, 2002.

LOVATO, P.S. et al. Modeling of mechanical properties and durability of recycled aggregate concretes. **Constructions and building Materials**, n. 26, p. 437-447, 2011.

MEHTA, P.K. Reducing the environmental impact of concrete. Concrete can be durable and environmentally friendly. **Concrete international**, p.61-66, 2001.

MEHTA P.K. **Society, sustainability, and the global concrete industry**. Palestra ministrada no 51° Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACOM, Curitiba, Brasil, 2009.

NAIK, T.R., KUMAR, R. **Global warming and cement-based materials**. UWM Center for By-Products Utilization. This first edition is being published at the Second International Conference on Sustainable Constructions Materials and

Technologies, Ancona, Italy, June 2010.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do Concreto**. Tradução: Salvador E. Giannusso. Pini: 1997, 828p.

PADE, C., GUIMARAES, M. The CO<sub>2</sub> uptake of concrete in a 100 year perspective. **Cemente and Concrete Research**, p.1384–1356, 2007.

PNMC - PLANO NACIONAL SOBRE MUDANÇA DO CLIMA. Governo Federal comitê interministerial sobre mudança do clima. Decreto nº 6.263 de 21 de novembro de 2007. Dezembro, 2008.

RILEM – REUNION INTERNATIONALE DE LABORATOIRES D'ESSAIS ET MATERIAUX. "CPC-18: **Measurement of hardened concrete carbonation depth**". (RILEM Recommendations CPC-18). Materials and Structures, p. 453-455, 1988.

SNIC - SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. Relatório Anual, 2010. Rio de Janeiro, SNIC; 2011.

YOON, In-S.; ÇOPUROĞLU, O.; PARK, Ki-B. Effect of global climatic change on carbonation progress of concrete. **Atmospheric Environment**, v 41, n 34, p.7274-7285, 2007.

## 7 Agradecimentos

Ao CEASB/PTI - Centro de Estudos Avançado em Segurança de Barragens do Parque Tecnológico de Itaipu, em especial à Alexandra da Silva e à equipe do Laboratório de Tecnologia do Concreto de Itaipu – LTCl, sobretudo aos engenheiros Carlos Leonardi, Étore de Faria, Fábio Willrich e Joelcio Mancino e aos técnicos João Menezes, Nilo Bernardi, Claudinei Dias e João Bernardino, pelo fomento e apoio ao projeto.