



SEI-SICITE 2021

Pesquisa e Extensão para um mundo em transformação

XI Seminário de Extensão e Inovação  
XXVI Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica  
08 a 12 de Novembro - Guarapuava/PR



# Um Dispositivo para Monitoramento da Concentração de CO<sub>2</sub> em uma Câmara de Carbonatação Acelerada

*A Sensor for Monitoring the CO<sub>2</sub> Concentration in an Accelerated Carbonation Chamber*

Iuri Schmoeller<sup>\*</sup>, Fabio Alexandre Spanhol<sup>†</sup>, Henrique Higor Fraporti Liska<sup>‡</sup>,  
Edson Tavares de Camargo<sup>§</sup>, Carlos Eduardo Tino Balestra<sup>¶</sup>

## RESUMO

Este trabalho apresenta um dispositivo para monitorar a concentração de CO<sub>2</sub> em uma câmara de carbonatação acelerada construída para análises de durabilidade e vida útil de estruturas de concreto. Sob pressão interna controlada em tais câmaras são acondicionados corpos de prova de concreto sendo injetado CO<sub>2</sub> em períodos compreendidos entre 24 e 72 horas. Após esse período os corpos são retirados, fragmentados e analisados quanto a infiltração do CO<sub>2</sub> no corpo. Durante o experimento é necessário acompanhar a pressão, a concentração de CO<sub>2</sub> e outros parâmetros para garantir a precisão dos ensaios. Foi criado um protótipo de dispositivo eletrônico baseado em sensores de baixo custo capaz de monitorar a concentração de CO<sub>2</sub>, umidade relativa e temperatura no interior de uma câmara de carbonatação, enviando os dados para um servidor na nuvem através de uma rede LoRaWAN. Pela Internet o pesquisador pode acompanhar em tempo real as leituras dos sensores em uma apresentação gráfica. O protótipo criado demonstrou-se funcional e atendeu os objetivos esperados.

**Palavras-chave:** Câmara de carbonatação. Sensores de baixo custo. Arduino. LoRaWAN.

## ABSTRACT

This work presents a device to monitor the CO<sub>2</sub> concentration in an accelerated carbonation chamber built for durability and service life analysis of concrete structures. Concrete cylinders are put, under controlled internal pressure, in these chambers. After that, the CO<sub>2</sub> is injected in periods between 24 and 72 hours. After this period, the cylinders are removed, fragmented, and analyzed for CO<sub>2</sub> infiltration into them. During the experiment, it is necessary to monitor the pressure, the concentration of CO<sub>2</sub>, and other parameters to ensure the accuracy of the tests. A prototype of an electronic device based on low-cost sensors was created, capable of monitoring the concentration of CO<sub>2</sub>, relative humidity, and temperature inside a carbonation chamber, sending the data to a server in the cloud through a LoRaWAN network. Through the Internet, the researcher can follow the sensor readings in real-time in a graphical presentation. The prototype created was functional and met the expected objectives.

**Keywords:** Carbonation chamber. Low-cost sensors. Arduino. LoRaWAN.

\* Engenharia de Computação, UTFPR-Toledo; schmoeller@alunos.utfpr.edu.br.

† Tecnologia em Sistemas para Internet, UTFPR-Toledo; faspanhol@utfpr.edu.br; <https://orcid.org/0000-0002-9603-8067>.

‡ Engenharia Eletrônica, UTFPR-Toledo; liska@alunos.utfpr.edu.br.

§ Tecnologia em Sistemas para Internet, UTFPR-Toledo; edson@utfpr.edu.br; <https://orcid.org/0000-0002-6520-9142>.

¶ Engenharia Civil, UTFPR-Toledo; carlosbalestra@utfpr.edu.br; <https://orcid.org/0000-0001-7624-7921>.



## 1 INTRODUÇÃO

Em um contexto urbano a degradação de obras executadas em concreto armado envolve aportes financeiros significativos para sua reabilitação. Neste ponto, a corrosão das armaduras, devido à ação do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), é apontada como uma das principais causas relacionadas à degradação destas estruturas, incorrendo em sérios riscos à segurança estrutural com a possibilidade de colapso. Neste ponto, a corrosão leva a uma redução da seção transversal das barras e a uma perda de aderência no sistema aço-concreto, prejudicando a transferência solidária de esforços entre o aço e concreto (BALESTRA; LIMA; MEDEIROS-JUNIOR, 2016; MAZER; LIMA; MEDEIROS-JUNIOR, 2018). A carbonatação do concreto é um processo no qual o hidróxido de cálcio (CH) resultante das reações de hidratação do cimento, reage com o  $\text{CO}_2$  que penetra através dos poros do concreto levando a formação de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), conseqüentemente, uma redução do pH do meio é observada (WERLE; KAZMIERCZAK; KULAKOWSKI, 2011). Além disso, acerca da penetração do  $\text{CO}_2$  no concreto, CEB FIB 183 (COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON (CEB), 1992) já ressaltava que o grau de saturação dos poros do concreto na penetração por difusão do  $\text{CO}_2$  tem um papel importante.

Uma das linhas de pesquisa acerca da durabilidade e vida útil de estruturas de concreto busca concretos mais resistentes à penetração do  $\text{CO}_2$ . Para tanto, ensaios acelerados são desenvolvidos em laboratório por meio de câmaras de carbonatação do concreto (Fig. 1a). Neste caso, corpos de prova de concreto (em geral cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de comprimento) com grau de saturação dos poros entre 50-60% são colocados no interior da câmara de carbonatação, sendo o  $\text{CO}_2$  injetado no interior da câmara, onde uma pressão de 20 Psi é aplicada sobre os mesmos por períodos variáveis entre 24 a 72 horas. Após retirados os corpos de prova são fragmentados em duas partes, sendo então pulverizada uma solução de fenolftaleína (1% de fenolftaleína em álcool 70) na superfície recém fraturada para a verificação da alcalinidade (CPC, 1988). Se uma coloração rosa carmim for observada indicará pH do meio acima de 12, ao passo que o incolor denota pH inferior a 9, sendo sua espessura medida (frente de carbonatação). Um exemplo de corpo de prova já fragmentado e pulverizado com solução de fenolftaleína pode ser visto na Fig. 1b.

Na UTFPR-Toledo uma câmara para ensaios acelerados foi construída. Entretanto, observou-se a necessidade de monitorar, além da pressão, a concentração de  $\text{CO}_2$  no interior da câmara de carbonatação durante os ensaios para melhorar a precisão. É possível automatizar o processo de monitoramento das variáveis de interesse durante os ensaios? O presente trabalho apresenta o processo de desenvolvimento de um circuito protótipo para o monitoramento da concentração de  $\text{CO}_2$ , umidade relativa e temperatura no interior da câmara durante os ensaios acelerados. Com isso, espera-se aumentar o número de variáveis monitoradas através do ensaio acelerado, permitindo análises mais precisas a respeito dos ensaios de carbonatação acelerada.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Sensores

Foram utilizados dois sensores de baixo custo: MG-811 e DHT22. O sensor MG-811 para medir a concentração de  $\text{CO}_2$  no ar em ppm (partes por milhão). É constituído por um polímero sólido, eletrodo de trabalho, eletrodo de referência, membrana permeável a gases e contra eletrodo (STETTER; LI, 2008). Um contra eletrodo é um eletrodo secundário que permite, juntamente com o eletrodo de trabalho, a medição de corrente que ocorre num dado processo químico. Neste caso, é utilizado na detecção de uma determinada quantidade de

Figura 1



(a) Câmara de carbonatação do concreto.



(b) Corpo de prova aplicada solução de fenolftaleína.

Fonte – Autoria própria (2021).

gás no ar, ou seja, à medida que um gás se difunde na célula, determinados gases são reduzidos no cátodo e oxidados no ânodo e é produzida uma diferença de tensão potencial (SOARES, 2018). A corrente elétrica gerada pela reação química é proporcional ao nível de concentração do gás reagente, o que caracteriza o sensor como amperométrico (STETTER; LI, 2008). Porém, como o sensor envia um sinal de tensão para o microcontrolador, a variável a ser utilizada para calibração será a própria ddp retornada pelo sensor. O sensor DHT22 permite medir a temperatura em graus celsius e a porcentagem de umidade no ar. O primeiro componente do sensor é um termistor NTC (*Negative Temperature Coefficient*), geralmente de cerâmica ou polímero, tem uma resistência interna que varia consoante a temperatura do ar ambiente. A resistência decresce quando a temperatura aumenta. O segundo componente mede a umidade, é constituído por dois eletrodos que seguram uma placa de absorção de umidade no meio e quando existem alterações de umidade neste substrato, existem variações na condutividade, isto é, a resistência entre os dois eletrodos muda (SOARES, 2018). Esta mudança é medida e processada por um circuito integrado que a transmite a um microcontrolador para ser interpretada (ADAFRUIT INDUSTRIES, 2021).

## 2.2 Circuito Controlador

Para controlar os sensores foi utilizada uma placa Arduino com módulos de comunicação sem fio e armazenamento local acoplados. Arduino é uma placa microcontroladora, que juntamente com a sua plataforma de desenvolvimento Arduino IDE, possibilita a prototipação rápida de projetos eletrônicos. É especialmente adequado para desenvolver protótipos de sensores de baixo custo, inclusive a maioria desse tipo de sensor é projetada para uso com o Arduino e seus derivados. Considerando os requisitos do projeto e o custo-benefício ofertado foi selecionado o Arduino Uno. O componente principal dessa placa é o microcontrolador Atmel ATmega328, um microcontrolador RISC de 8 bits, 16 MHz. A placa é alimentada com 5 V, conta com 32 KB de

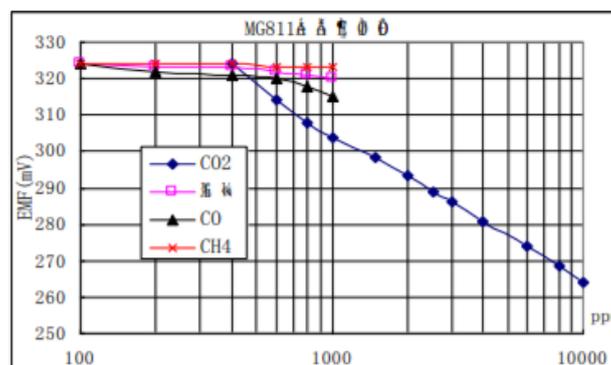
memória *flash* e oferece 14 pinos digitais de entrada/saída e 6 pinos analógicos. O módulo transceptor RFM95W conectado a placa Arduino torna possível a comunicação bidirecional pelo rádio LoRa (tecnologia de transmissão de dados sem fio) (LORA ALLIANCE, 2015). O transceptor faz a sua comunicação com o microcontrolador pelo protocolo SPI (*Serial Peripheral Interface*), o qual torna possível que a placa forneça os dados a serem transmitidos pelo transceptor. Para armazenar localmente as leituras foi utilizado um módulo cartão microSD, também controlado por SPI, permitindo endereçar arquivos no cartão para leitura/escrita.

Alternativamente foram feitos testes com a placa microcontroladora Heltec Wifi LoRa32 v2 que possui as mesmas funcionalidades do Arduino, mas contando com capacidade de processamento e memória maiores. Também possui tela LED e uma antena transceptora embutida para comunicação Wi-Fi, LoRa e Bluetooth. É desenvolvida especialmente para o uso da tecnologia LoRa, atuando na faixa 868 - 915 mHz que é a licenciada no Brasil.

### 2.3 Metodologia

Primeiramente consultou-se a documentação oficial (*datasheets*) dos sensores para determinar os aspectos de funcionamento que diferem entre fabricantes ou mesmo modelos do mesmo fabricante. Os dois sensores selecionados no projeto utilizam procedimentos distintos para a devida calibração. Esse procedimento deve ser considerado na programação. O DHT22 já tem a sua própria biblioteca disponibilizada pelo fabricante, portanto não se faz necessária uma calibração específica, apenas o estudo dessa biblioteca já garante a medição correta. Por outro lado, o fabricante do MG-811 não oferece nenhuma biblioteca. Portanto, nesse caso é necessária uma análise do gráfico de tensão retornada pelo sensor em mV pela quantidade de CO<sub>2</sub> no ar em partes por milhão. O gráfico na Fig. 2 apenas demonstra o comportamento do sensor, pois os valores da tensão de retorno podem variar de acordo com cada sensor, dependendo de seu desgaste e outras variáveis possíveis. A tensão de retorno do sensor quando estiver em ar limpo (em torno de 400 ppm) está na faixa 400 – 600 mV e será definida como tensão inicial ( $v_0$ ).

Figura 2 – Tensão de saída (mV) x Concentração (ppm)



Fonte – (WINSSEN ELECTRONICS, 2021)

A tensão de saída  $v_s$  irá diminuir na medida em que a concentração de CO<sub>2</sub> aumenta. Quando a concentração ultrapassa o valor de 400 ppm, a tensão de saída é linear ao logaritmo comum da quantidade de CO<sub>2</sub> no ar, seguindo a Eq. (1), onde  $\Delta v_s$  é a diferença entre a tensão de saída quando a concentração é de 400 ppm para a de 10000 ppm, e  $c_{CO_2}$  é a concentração do gás no momento (SANDBOX ELECTRONICS, 2021). Assim, para a

correta calibração do sensor faz-se necessária a medição de  $v_0$  e  $\Delta v_s$ .

$$v_s = \frac{v_0 + \Delta v_s}{(\log(400) - \log(10000)) * (\log(c\text{CO}_2) - \log(400))} \quad (1)$$

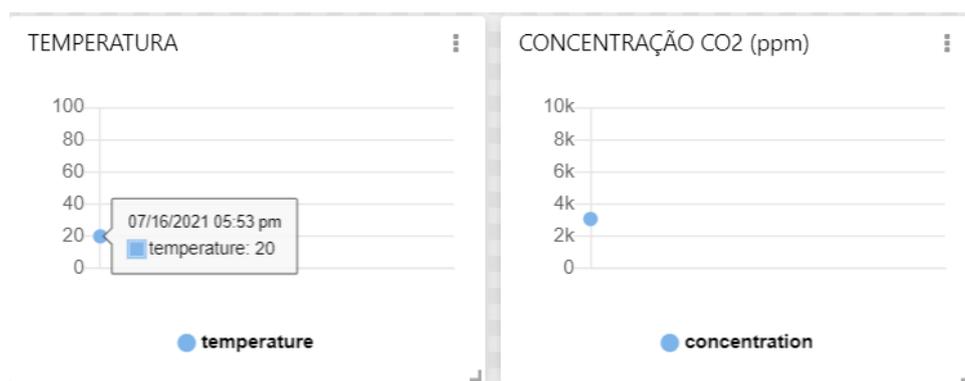
Os dados obtidos pelos sensores no interior da câmara de carbonatação foram transmitidos pelo rádio LoRa para um servidor na nuvem. Através do protocolo LoRaWAN, o *gateway* integrado na placa controladora envia os dados sensoreados para o servidor da The Things Network (TTN) (TTN, 2021).

### 3 RESULTADOS

A transmissão por rádio LoRa começa com a obtenção dos dados pelos sensores, que em seguida são enviados, pelo módulo transceptor RFM95W, para o gateway e conseqüentemente para a Internet por meio de um modem Wi-Fi conectado ao mesmo. Para enfim chegar ao website da plataforma *TheThingNetwork*, onde os dados são traduzidos novamente para a sua forma original, tornando possível o acesso às informações de qualquer a partir de qualquer local com acesso a Internet, além da possibilidade da realização de integrações com outras plataformas para uma melhor visualização e utilização de todos os dados obtidos.

Até o momento o principal resultado foi o sensoriamento e envio bem sucedido para o servidor TTN, além da integração com a plataforma TagoIO (TAGOIO, 2021), tornando possível o armazenamento e a apresentação gráfica dos dados em tempo real, por mais que os dados relativos a concentração de  $\text{CO}_2$  não sejam acurados como deveriam, visto que uma calibração ainda não foi realizada. Um exemplo dessa apresentação acessível ao pesquisador pode ser vista na Fig. 3, apresentado as leituras de temperatura e umidade na data de 26/07/2021. Assim, tornando possível a conclusão de que o modelo com o protocolo LoRaWAN trouxe com êxito o seu objetivo de enviar os dados para a nuvem, e conseqüentemente integra-los com a plataforma e garantir a sua melhor visualização.

Figura 3 – Acompanhamento em tempo real das medições.



Fonte – Autoria própria(2021)

### 4 CONCLUSÕES

Apesar das dificuldades geradas pelo isolamento social e demais medidas sanitárias impostas pela pandemia de COVID-19 conseguiu-se obter um protótipo funcional. Ainda são necessários experimentos controlados de



calibração do sensor MG-811. Contudo de forma geral foi demonstrada a viabilidade prática do conceito do sensoriamento remoto, oferecendo uma ferramenta para o pesquisador monitorar diretamente na Internet e em tempo real o andamento dos seus ensaios com a câmara de carbonatação. Finalmente, está sendo elaborada uma placa de circuito impresso apropriada e também está em execução o estudo de dimensionamento de consumo energético para alimentar o circuito por baterias evitando alimentação externa.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação (DIRPPG) do campus Toledo pelo apoio financeiro através do pagamento de bolsas do Programa de Bolsas de Auxílio ao Pesquisador de Toledo (PROBIC-TD), Edital 06/2020 - DIRPPG-TD.

## REFERÊNCIAS

- ADAFRUIT INDUSTRIES. **DHT22 and AM2302 Sensors**. 2021. Disponível em: [🔗](#). Acesso em: 06 set/2021.
- BALESTRA, C.E.T.; LIMA, M.G.; MEDEIROS-JUNIOR, R.A. Corrosion degree effect on nominal and effective strengths of reinforcement naturally corroded. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, 10 2016. DOI: [10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001599](#).
- COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON (CEB). **Durable concrete structures**: Bulletin D' Information N° 183. Lausanne: Telford Services, 1992.
- CPC. CPC-18 Measurement of hardened concrete carbonation depth. **Materials and Structures**, n. 21, p. 453–455, 1988. DOI: [10.1007/BF02472327](#).
- LORA ALLIANCE. **What is LoRaWAN?** 2015. Disponível em: [🔗](#). Acesso em: 7 set/2021.
- MAZER, W.; LIMA, M.G.; MEDEIROS-JUNIOR, R.A. Fuzzy logic for estimating chloride diffusion in concrete. In: PROCEEDINGS of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings. [S.l.: s.n.], 2018. v. 171, p. 542–551. DOI: [10.1680/jstbu.16.00153](#).
- SANDBOX ELECTRONICS. **MG-811 CO2 Sensor Module**. 2021. Disponível em: [🔗](#). Acesso em: 08 set/2021.
- SOARES, Angelo Roldão. **Desenvolvimento e teste de um protótipo móvel com sensores low cost**. 2018. Tese (Doutorado).
- STETTER, Joseph R; LI, Jing. Amperometric gas sensors a review. **Chemical reviews**, ACS Publications, v. 108, n. 2, p. 352–366, 2008.
- TAGOIO. **HomePage**. 2021. Disponível em: [🔗](#). Acesso em: 4 set/2021.
- TTN. **The Things Network**. 2021. Disponível em: [🔗](#). Acesso em: 7 set/2021.
- WERLE, A. P.; KAZMIERCZAK, C. de S.; KULAKOWSKI, M. P. Carbonatação em concretos com agregados reciclados de concreto. **Ambiente Construído**, v. 11, n. 2, p. 213–228, 2011. DOI: [10.1590/S1678-86212011000200015](#).
- WINSEN ELECTRONICS. **MG811 CO2 Sensor**. 2021. Disponível em: [🔗](#). Acesso em: 12 ago/2021.