





# Modelo neuro-fuzzy para predição das emissões de CO<sub>2</sub> de dosagens de concreto para biodigestores na suinocultura

*Neuro-fuzzy model for the prediction of CO<sub>2</sub> emissions of concrete mixes for biodigestors in swine production systems*

Régis Marciano de Souza   
Ricardo Rodrigues Magalhães   
Alessandro Torres Campos   
Alessandro Vieira Veloso 

## Resumo

**D**ada a importância da suinocultura para o Brasil, é necessário entender o impacto ambiental gerado pelos materiais de construção empregados na produção das instalações rurais, em especial na construção dos biodigestores, visto que essas instalações têm um importante papel na sustentabilidade dos sistemas de produção. Diante da relevância do volume de concreto empregado no processo de construção de biodigestores para manejo e tratamento de resíduos da suinocultura, esta pesquisa avaliou as emissões de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>Eq.) em diferentes cenários de dosagens de concreto. Para isso, um modelo computacional ANFIS (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*) foi desenvolvido para predição e análise das emissões de CO<sub>2</sub>Eq. durante o ciclo de vida dos materiais adotados em concretos convencionais. Os resultados indicam que a escolha adequada da dosagem pode gerar redução nas emissões de CO<sub>2</sub>Eq. da ordem de 31,41% para concretos de 30 MPa a 40 MPa. Isso implica uma proposta promissora para a redução do impacto ambiental na produção de instalações em concreto, o que tem potencial para impulsionar novas pesquisas na área.

**Palavras-chave:** Emissões de dióxido de carbono. Sistema ANFIS. Concreto sustentável. Construções rurais. Instalações para suínos.

## Abstract

*Due to the importance of swine production in Brazil, there is a need to understand the environmental impact generated by the construction materials used in the production of rural facilities, especially in the construction of biodigesters, as these facilities play an important role in the sustainability of production systems. Considering the relevance of the volume of concrete used in the construction of biodigesters for the management and treatment of swine waste, this research study sought to evaluate the emissions of carbon dioxide equivalent (CO<sub>2</sub>Eq.) in different concrete mix scenarios. For that purpose, a computational ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) model was developed to predict and analyse CO<sub>2</sub>Eq. emissions during the life cycle of materials adopted in conventional concrete. The results indicate that the proper choice of dosage can lead to a reduction of 31.41% in CO<sub>2</sub>Eq. emissions, for concrete from 30 to 40 MPa. This represents a promising proposal for reducing the environmental impact of the production of concrete constructions, which has the potential to stimulate further research in this area.*

**Keywords:** Carbon dioxide emissions. ANFIS system. Sustainable concrete. Rural buildings. Swine constructions.

<sup>1</sup>Régis Marciano de Souza  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas  
Pouso Alegre - MG - Brasil

<sup>2</sup>Ricardo Rodrigues Magalhães  
Universidade Federal de Lavras  
Lavras - MG - Brasil

<sup>3</sup>Alessandro Torres Campos  
Universidade Federal de Lavras  
Lavras - MG - Brasil

<sup>4</sup>Alessandro Vieira Veloso  
Universidade Federal de Lavras  
Lavras - MG - Brasil

Recebido em 10/06/21  
Aceito em 20/12/21

## Introdução

No Brasil, como em outros países, o concreto desempenha um importante papel no setor das construções. Por ser o material mais consumido no mundo, pode gerar impactos ambientais consideráveis. Esse tema está presente em estudos que abordam, entre outros, o consumo de energia e emissões de gases poluentes, desenvolvidos com a finalidade de aprimorar seu desempenho e identificar meios que garantam a redução dos impactos ambientais gerados pelo setor da construção civil (SINGH *et al.*, 2011). Ante o exposto, De Souza, Magalhães e Campos (2021) observaram que o quantitativo dos materiais empregados nas dosagens de concreto impacta diretamente no custo energético total para a implantação de construções. Por outro lado, De Wolf, Pomponi e Moncaster (2017) reportaram que, embora o consumo energético e as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) estejam relacionados, não são diretamente equivalentes. Já Huang, Huang e Marcotullio (2019) relataram que, quanto mais energia acumulada na fabricação do material de construção, mais CO<sub>2</sub> está associado ao processo de construção. Su, Ang e Li (2019) corroboram que a energia incorporada e as emissões de gases têm sido amplamente utilizadas para medir, respectivamente, o desempenho geral do consumo de energia e a poluição ambiental do ponto de vista da produção. Assim, de acordo com Penadés-Plà, García-Segura e Yepes (2019), a otimização das emissões de CO<sub>2</sub> ou da energia incorporada tem relação direta com o custo monetário e pode gerar economia.

Asdrubali *et al.* (2020) relataram que a maioria dos países desenvolvidos está lutando para reduzir as emissões de carbono na atmosfera para atender a acordos internacionais. Para Purnell e Black (2012), a transição para uma infraestrutura de baixo carbono requer uma compreensão do carbono incorporado associado ao concreto. Ainda, segundo Purnell e Black (2012), muitos trabalhos subestimam a complexidade da emissão de CO<sub>2</sub> com o impacto na dosagem de concreto.

De acordo com Xiao *et al.* (2018), muitas pesquisas defendem como o uso de agregados reciclados pode ser ambientalmente sustentável devido à redução da necessidade de extração de recursos naturais, de aterros, de aporte de energia e de emissões de gases. No entanto, pouca atenção é dada às investigações dos efeitos da adoção de concreto com agregado reciclado como material estrutural na pegada de carbono de prédios altos em megacidades como Xangai. Os resultados dessa pesquisa indicaram que a adoção do concreto com agregado reciclado como material para construção de arranha-céus, substituindo o concreto com agregado natural, pode resultar em redução significativa na pegada de carbono. Para a estrutura proposta, a redução constatada foi de  $2,175 \times 10^5$  kgCO<sub>2</sub>, o que corresponde a uma redução de 7,93%. Dessa forma, os mesmos pesquisadores relataram que existe a necessidade de se otimizar a redução das emissões de gases na produção de concreto com agregado natural sem impactar na redução da captura de carbono.

Os materiais de construção com as maiores emissões de CO<sub>2</sub> por quilograma são o aço, o concreto armado e o vidro, seguidos por ladrilhos, madeira e concreto (HUANG; HUANG; MARCOTULLIO, 2019). Para Tulevech *et al.* (2018), o concreto é de longe o componente de construção responsável pelos maiores impactos ambientais em massa. Shoaie *et al.* (2020) verificaram que o quantitativo dos componentes empregados no concreto pode influenciar na emissão de CO<sub>2</sub> e na demanda de energia, e que o uso de pó de vidro como material substituto do cimento Portland pode reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> e a demanda de energia das misturas. Atualmente, De Souza, Magalhães e Campos (2021) comprovaram a influência do quantitativo dos componentes na determinação da energia incorporada em dosagens de concreto convencionais de uma edificação. Os resultados obtidos comprovaram a eficiência do modelo ANFIS (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*) para modelagem preditiva do comportamento de dosagens de concreto. Outros autores também encontraram bons resultados em análise de parâmetros ambientais para avaliação da sustentabilidade, entre eles Naji *et al.* (2016), Zhang e Wang (2016), Deb *et al.* (2017), Mousavi-Avval *et al.* (2017), Amasyali e El-Gohary (2018) e Nabavi-Pelesaraei *et al.* (2018).

O concreto também tem um importante papel nas instalações para suinocultura, uma vez que grande parte desse material é utilizada como forma de vedação e piso. Para De Souza, Magalhães e De Andrade (2019), esse é o principal e mais consumido material de construção no mundo, sendo parte desse material empregado em construções rurais. De acordo com o Departamento de Agricultura dos EUA (UNITED..., 2021), o Brasil é o quarto maior produtor de suínos e o quinto maior consumidor de carne suína no mundo, o que demonstra a importância das construções rurais para o agronegócio brasileiro. Segundo Xie, Ni e Su (2017), o emprego da lógica *fuzzy* pode proporcionar uma avaliação eficaz dos parâmetros de qualidade ambiental nas construções para suínos com base em múltiplos fatores. Quan *et al.* (2021) investiram esforços na redução das emissões de amônia e dióxido de carbono em uma construção para suínos. Brunetta *et al.* (2021) verificaram que é possível reduzir o consumo de energia em até 25% utilizando paredes de concreto armado moldadas *in loco* em relação à emissão de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>Eq.). O mesmo estudo ainda constatou que é possível reduzir as emissões em quase 32% utilizando esse mesmo cenário em

sistemas de vedação para residências rurais. Esses resultados consolidam a importância do concreto para as construções rurais e reforçam a necessidade de mais estudos que possam contribuir para o desenvolvimento sustentável no âmbito das construções, incluindo o meio rural.

Nesse contexto, este trabalho propõe o uso do sistema ANFIS como forma alternativa para predição de dosagens de concreto convencional com menor emissão de CO<sub>2</sub>Eq. na construção de um biodigestor para o manejo e tratamento de resíduos da suinocultura. Identificaram-se, para tanto, quais os componentes responsáveis pelas maiores emissões de CO<sub>2</sub>Eq., no intuito de obter as correlações entre as variáveis e interpretar a relação entre dosagens de concretos eficientes em relação à emissão de CO<sub>2</sub>Eq. e o quantitativo dos materiais empregados.

No âmbito mundial não existem trabalhos que correlacionem análise de emissões de CO<sub>2</sub>Eq. e o quantitativo dos materiais empregados na produção de concretos abordando modelagem *neuro-fuzzy*, para um campo de diferentes dosagens, com a finalidade de execução de um sistema de biodigestores, o que indica a originalidade da pesquisa. Este trabalho ainda apresenta contribuições científicas para estudo de concretos sustentáveis, o que vem ao encontro de pesquisas sobre a avaliação do impacto ambiental das construções em concreto (GONG *et al.*, 2012; OLIVEIRA *et al.*, 2014; SANTORO; KRIPKA, 2016; DEB *et al.*, 2017; ALBUQUERQUE; LIRA; SPOSTO, 2018; MATTIOLI *et al.*, 2018; NABAVI-PELESARAEI *et al.*, 2018; SANTOS, 2019; SANTOS; FERRARI, 2019; BARBOZA; STORCH; ALMEIDA FILHO, 2020; BRUNETTA *et al.*, 2021, DE SOUZA; MAGALHAES; CAMPOS, 2021; LEÓN-VELEZ; GUILLÉN-MENA, 2020; QUAN *et al.*, 2021).

## Materiais e métodos

O método de investigação adotado nesta pesquisa foi dividido em três etapas:

- (a) elaboração de um modelo adaptativo *neuro-fuzzy* (ANFIS) para predição das emissões de dióxido de carbono equivalente de diferentes cenários de dosagem, dentro do quantitativo de cada um dos componentes das dosagens;
- (b) utilização de coeficientes de literaturas para emissões de dióxido de carbono equivalente e banco de dados das diferentes dosagens de concreto de De Souza, Magalhães e Campos (2021); e
- (c) avaliação das emissões de dióxido de carbono equivalente para instalação de biodigestores para suinocultura, construção essa avaliada energeticamente por Veloso *et al.* (2018), processo construtivo apresentado na Figura 1 e modelo gráfico representado na Figura 2.

## Características do biodigestor

Os biodigestores avaliados neste trabalho constituíam parte integrante de um sistema de produção de suínos de ciclo completo, localizado no município de Lavras, Minas Gerais, Brasil, tendo como principal função o manejo e tratamento de resíduos de um sistema de produção de suínos. O sistema trabalha com uma produção diária de 54,85 m<sup>3</sup> de biomassa residual. Esses biodigestores foram projetados para um tempo de retenção hidráulica de 30 dias em sistema de operação contínua, conforme relatado por Veloso *et al.* (2018).

A metodologia proposta consiste na avaliação quantitativa das emissões de CO<sub>2</sub>Eq. produzidas das diferentes dosagens de concreto para a implantação da estrutura do sistema de biodigestores. A instalação é destinada ao manejo e tratamento de resíduos produzidos pela suinocultura, composta de dois biodigestores. A parte subterrânea de cada biodigestor possui formato de tronco de pirâmide invertido, tendo a base menor (fundo do biodigestor) dimensões de 27x12 m, a base maior (superior) dimensões de 32x17 m e profundidade de 2,5 m, perfazendo o volume de 1.073,19 m<sup>3</sup>, sendo coberto com geomembranas flexíveis (gasômetros) de policloreto de vinila (PVC), que apresentam 1,0 mm de espessura. Para ancoragem dos gasômetros à construção foi feita uma fundação direta contínua de 0,50 m de profundidade e 0,20 m de largura. Veloso *et al.* (2018) verificaram que esse tipo de instalação apresenta custo energético de 7.622,68 MJ, em 11,83 m<sup>3</sup> de concreto (Figura 2). Por haver relação explícita entre energia incorporada e emissões de CO<sub>2</sub> (HUANG; HUANG; MARCOTULLIO, 2019), buscou-se avaliar essa relação e o impacto nas emissões de CO<sub>2</sub>Eq.

O material em estudo é o concreto convencional, produto da mistura de um aglomerante (cimento Portland), com agregado miúdo (areia), agregado graúdo (brita) e água. Nesta pesquisa, para a avaliação das diferentes possibilidades de dosagens, utilizaram-se dados de corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, preparados no município de Pouso Alegre, Minas Gerais, com água proveniente da rede de abastecimento público, agregados miúdos e graúdos caracterizados de acordo com as normas NBR NM 27

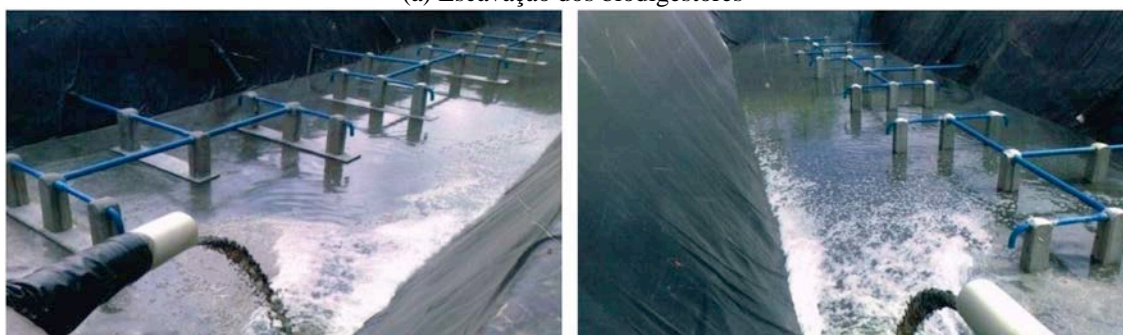
(ABNT, 2001), NBR NM 45 (ABNT, 2006), NBR NM 52 (ABNT, 2009a) e NBR NM 53 (ABNT, 2009b), e cimento Portland do tipo CP II E, classificado e padronizado conforme a norma brasileira NBR 16697 (ABNT, 2018). Ao todo foram moldados 3 corpos de prova para cada uma das 101 dosagens experimentais (exemplares). Adotou-se como referência de cálculo o valor médio de cada exemplar. As dosagens foram moldadas em condições ambientalmente semelhantes, com adensamento manual com 2 camadas e 12 golpes por camada, utilizando processo de cura por imersão em água, conforme estabelecido na norma NBR 5738 (ABNT, 2015a), dados também utilizados por De Souza, Magalhães e Campos (2021).

Os dados de consistência das amostras foram obtidos por meio do ensaio de abatimento de tronco de cone conforme a NBR NM 67 (ABNT, 1998), e a resistência mecânica à compressão dos corpos de prova capeados com neoprene foi obtida após 28 dias de cura por imersão em água, por ensaio de compressão axial utilizando máquina universal eletrônica digital com capacidade 100 t (hidráulica I-3058, da marca Pavitest), procedimentos regulamentados pela norma NBR 5739 (ABNT, 2015b).

Figura 1 - Etapas do processo construtivo dos biodigestores



(a) Escavação dos biodigestores



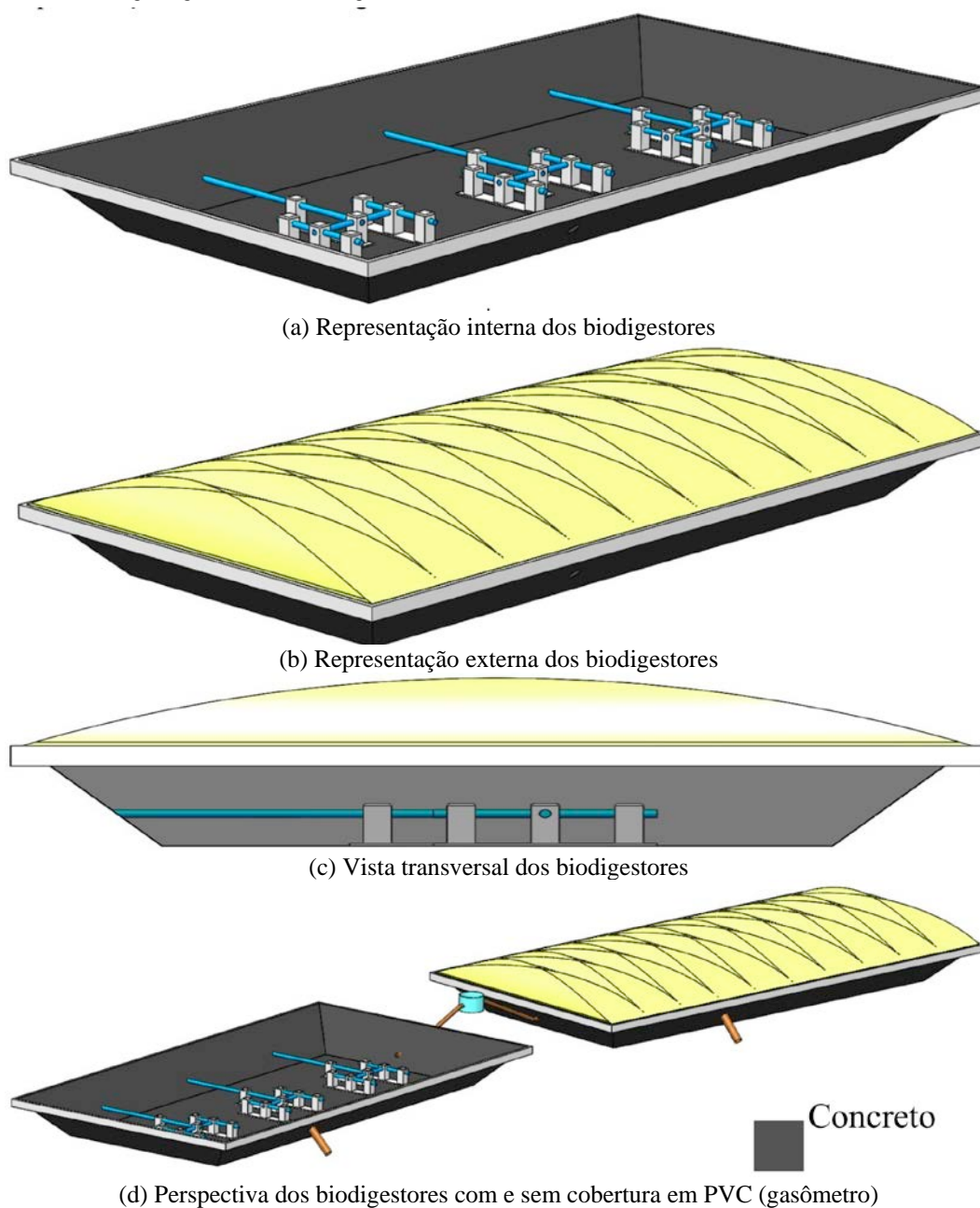
(b) Início das operações de enchimento dos biodigestores



(c) Biodigestores de modelo canadense implantados, com destaque para o gasômetro de PVC



Figura 2 - Modelagem gráfica dos biodigestores



Para uma representatividade do campo das dosagens, diferentes dosagens foram propostas, com uma unidade funcional de volume no Sistema Internacional de Unidades ( $1 \text{ m}^3$  de concreto). Cada um dos componentes constituintes das dosagens foi selecionado de forma a manter a resistência mecânica à compressão dentro de limites compatíveis com o comportamento de concretos convencionais (Tabela 2). No entanto, trabalhou-se com abatimentos na faixa de 0 a 245, o que pode inviabilizar a aplicação de algumas dosagens, conforme prescrevem as normas NBR 14931 (ABNT, 2004) e NBR 8953 (ABNT, 2015c). O domínio desses componentes no campo quantitativo das dosagens foi proposto por De Souza, Magalhães e Campos (2021). As diferentes propostas de dosagens foram avaliadas com relação às emissões de  $\text{CO}_2\text{Eq.}$ , considerando as etapas de extração da matéria-prima, transporte, fabricação, montagem, desmontagem e desconstrução durante o ciclo de vida do concreto, conforme dados contidos na Tabela 3.

Tabela 2 - Domínio dos componentes das dosagens propostas

Cimento Portland (kg/m <sup>3</sup> )	Água (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado graúdo (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado miúdo (kg/m <sup>3</sup> )
[380 – 595]	[155 – 270]	[800 – 1.150]	[180 – 735]

Tabela 3 - Coeficiente de emissões de CO<sub>2</sub>Eq. dos componentes do concreto

Componentes	Emissões de CO <sub>2</sub>	Fonte
Cimento Portland	0,9300 kg de CO <sub>2</sub> Eq./kg	Mithun e Narasimhan (2015)
Agregado graúdo	0,0048 kg de CO <sub>2</sub> Eq./kg	Mithun e Narasimhan (2015)
Agregado miúdo	0,0051 kg de CO <sub>2</sub> Eq./kg	Mithun e Narasimhan (2015)
Água	0,0008 kg de CO <sub>2</sub> Eq./kg	Mithun e Narasimhan (2015)

## Modelo neuro-fuzzy

Um modelo ANFIS foi desenvolvido para predição das emissões de CO<sub>2</sub>Eq. na produção de concretos convencionais. Essa abordagem híbrida apresenta excelente precisão quando comparada com dados experimentais de propriedades mecânica de concreto (SARADAR *et al.*, 2020). Esse sistema híbrido utiliza RNA (*Artificial Neural Networks*) combinado com lógica *fuzzy* baseada no processo de inferência *fuzzy* de Takagi-Sugeno para definição das características do modelo *neuro-fuzzy* (Figura 3). Essa combinação permite conjugar a capacidade de aprendizado das redes neurais com as características do sistema *fuzzy*. A metodologia aplicada utilizou como apoio o software comercial MATLAB, na interface Fuzzy Logic Toolbox, com uso da função ANFIS e do aplicativo iterativo Neuro-Fuzzy Designer. Para alcançar melhores resultados, diferentes configurações de modelos ANFIS foram testadas.

No modelo, foram utilizados 675 parâmetros lineares, 28 parâmetros não lineares e 135 regras. Os valores discretos das variáveis de entrada foram convertidos em valores difusos (*fuzzification*), adotando quatro conjuntos *fuzzy* de entrada com funções de pertinência do tipo gaussiana. Os conjuntos *fuzzy* de entrada – agregado miúdo (kg de CO<sub>2</sub>Eq./m<sup>3</sup>), agregado graúdo (kg de CO<sub>2</sub>Eq./m<sup>3</sup>) e água (kg de CO<sub>2</sub>Eq./m<sup>3</sup>) – foram modelados considerando três funções de pertinência (Figura 3). Para a representação da variável de entrada cimento (kg de CO<sub>2</sub>Eq./m<sup>3</sup>) foram adotadas cinco funções de pertinência (Figura 3).

A metodologia utilizada para modelar o ANFIS foi compatível com as pesquisas de Li, Su e Chu (2011), Boğa, Öztürk e Topçu (2013), Shamshirband *et al.* (2015) e De Souza, Magalhães e Campos (2021). Utilizou-se a média ponderada de todas as saídas, por ser o padrão para os sistemas de inferência de Takagi-Sugeno. O modelo foi desenvolvido considerando os bancos de dados experimentais e de validação disponibilizados por De Souza, Magalhães e Campos (2021), de acordo com os limites da Tabela 2.

Optou-se ainda por avaliar as emissões de CO<sub>2</sub>Eq. da produção do concreto necessário para produção da instalação dos biodigestores, considerando os diferentes cenários de dosagens em intervalos de 10 MPa, avaliando, dessa forma, as dosagens preponderantes (máxima e mínima emissão de CO<sub>2</sub>Eq.), procedimento esse adotado por De Souza, Magalhães e Campos (2021) ao avaliar o impacto ambiental devido à energia incorporada. Os resultados obtidos foram discutidos e apresentados em gráficos de superfície.

## Desempenho estatístico do modelo de predição ANFIS

O desempenho estatístico do modelo híbrido *neuro-fuzzy* adaptativo foi avaliado computacionalmente por meio dos indicadores de desempenho, coeficiente de variação (CV), erro percentual absoluto médio (MAPE), coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) e raiz quadrada do erro médio (RMSE), conforme proposto por De Souza, Magalhães e Campos (2021) (Equações 1 a 4).

$$CV (\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{p,i} - y_{c,i})^2}{n}}{\bar{y}_c} \times 100 \quad \text{Eq. 1}$$

$$MAPE (\%) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_{p,i} - y_{c,i}}{y_{c,i}} \right| \times 100 \quad \text{Eq. 2}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{p,i} - y_{c,i})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{c,i} - \bar{y}_c)^2} \quad \text{Eq. 3}$$

$$RMSE \text{ (kg de CO}_2\text{Eq.)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{p,i} - y_{c,i})^2}{n}} \tag{Eq. 4}$$

Em que:

$y_{p,i}$ : valor previsto das emissões de CO<sub>2</sub>Eq. no instante  $i$  em kg de CO<sub>2</sub>Eq.;

$y_{c,i}$ : valor conhecido das emissões de CO<sub>2</sub>Eq. no instante  $i$  em kg de CO<sub>2</sub>Eq.; e

$\bar{y}_c$ : média dos valores conhecidos das emissões de CO<sub>2</sub>Eq. (em kg) para  $n$  dados.

## Resultados e discussão

### Desempenho do modelo híbrido *neuro-fuzzy*

Os resultados revelaram boa precisão do modelo ANFIS para predição de diferentes cenários de dosagens de concreto, desempenho caracterizado por um CV de 0,0019%, MAPE de 0,0011%, R<sup>2</sup> de 1,0000 e RMSE de 0,0086 kg de CO<sub>2</sub>Eq. (Tabela 4). Na etapa de validação, os resultados foram semelhantes, descritos por CV de 0,3947%, MAPE de 0,1422%, R<sup>2</sup> de 0,9989 e RMSE de 1,7899 kg de CO<sub>2</sub>Eq. (Tabela 4), com divergência relativa média de 0,14%. Sob o viés do parâmetro R<sup>2</sup>, o modelo revelou boa convergência na validação, que pode ser observada no gráfico da Figura 4.

Nesta pesquisa, os resultados foram semelhantes aos obtidos por De Souza, Magalhães e Campos (2021) ao avaliar predições ANFIS para energia incorporada em concretos, resultados equivalentes aos relatados por Amasyali e El-Gohary (2018). Observou-se divergência máxima relativa de 2,39% ao predizer cenário proposto por Hatem *et al.* (2012), dados no intervalo de 400 kg a 450 kg de CO<sub>2</sub> (Figura 4), o que pode ser devido às diferentes características dos concretos adotados nas pesquisas, conforme relatado por De Souza, Magalhães e Campos (2021).

### Emissões de dióxido de carbono equivalente do concreto dos biodigestores

Os dados de emissões de CO<sub>2</sub>Eq. por dosagem foram correlacionados com a ordenação crescente da resistência mecânica à compressão dos diferentes cenários de dosagens experimentais (Figura 5). Observou-se ainda que valores semelhantes de resistência mecânica à compressão podem gerar mudanças abruptas nas emissões de CO<sub>2</sub>Eq. em função do quantitativo dos materiais empregados nas misturas, conforme mostrado na Figura 5.

Figura 3 - Configuração geral do modelo ANFIS

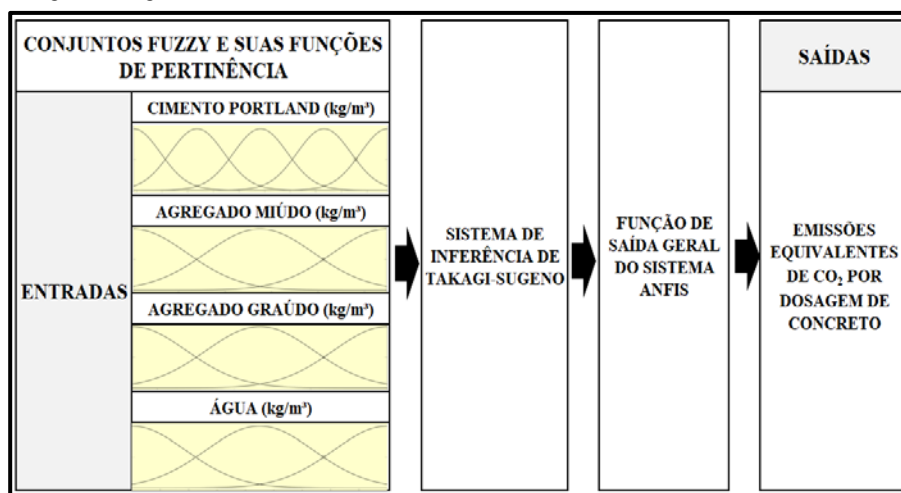


Tabela 4 - Desempenho estatístico do modelo ANFIS

Etapa	CV (%)	MAPE (%)	R <sup>2</sup>	RMSE (kg de CO <sub>2</sub> Eq.)
Treinamento	0,0019	0,0011	1,0000	0,0086
Validação	0,3947	0,1422	0,9989	1,7899

Figura 4 - Dispersão de dados reais e previstos pelo ANFIS

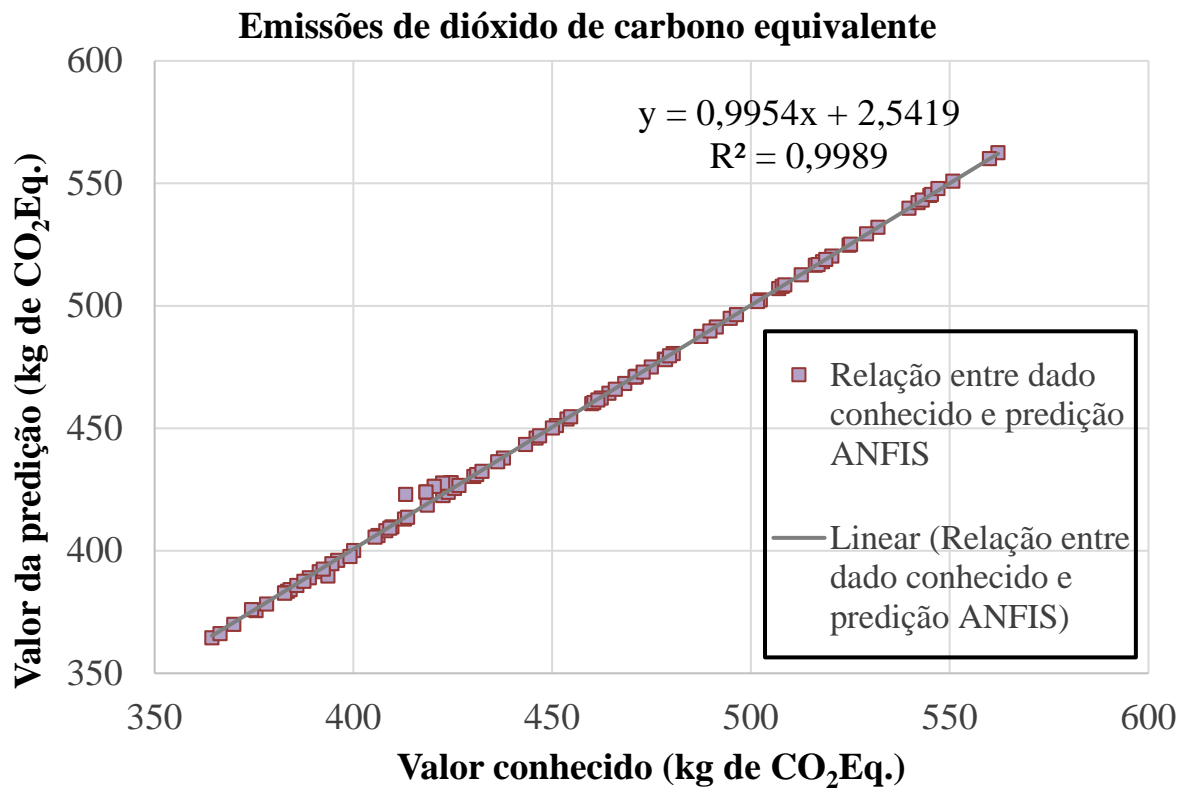
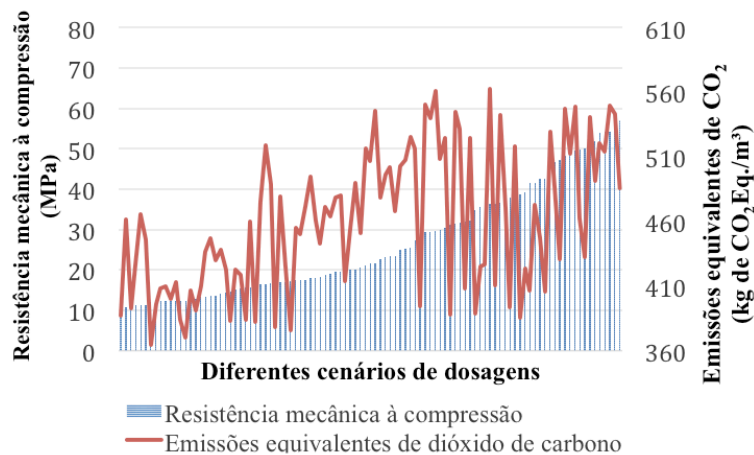


Figura 5 - Relação entre emissões de CO<sub>2</sub>Eq. e a resistência mecânica à compressão dos corpos de provas



Para diferentes faixas de resistência mecânica à compressão, a escolha da dosagem adequada pode gerar redução no impacto ambiental das emissões de CO<sub>2</sub>Eq. Essa redução para a instalação rural dos biodigestores propostos pode chegar a um valor de 31,41% para concretos de 30 MPa a 40 MPa. Para concretos com resistência mecânica à compressão na faixa de 40 MPa a 50 MPa, essa redução foi um pouco menor, em torno de 26,24%, conforme representado na Figura 6. Diante dos resultados obtidos, fica evidente que a escolha adequada da dosagem pode influenciar significativamente na sustentabilidade do processo de produção de instalações rurais em concreto, informação essa ratificada por De Souza, Magalhães e Campos (2021).

Independentemente das faixas de resistência mecânica à compressão estudadas, as reduções nas emissões de CO<sub>2</sub>Eq. são significativas, conforme mostrado na Figura 6. As aplicações dessas dosagens em construções rurais ou civis podem ser estruturais ou não. Concretos com resistência mecânica à compressão entre 10



MPa e 20 MPa devem ser utilizados de acordo com as limitações da norma NBR 8953 (ABNT, 2015c). Ainda, a escolha da dosagem de concreto a ser adotada em biodigestores e, conseqüentemente, da consistência do concreto deve atender aos requisitos de projeto da estrutura e às condições de trabalhabilidade necessárias, conforme recomendado pela norma NBR 14931 (ABNT, 2004). Para Huang, Huang e Marcotullio (2019), existe relação entre as emissões de CO<sub>2</sub>Eq. e a energia incorporada nos materiais, informação essa verificada nesta pesquisa. O cimento Portland é o responsável pelo maior impacto ambiental nas dosagens, assim como relatado por Wang *et al.* (2017) e De Souza, Magalhães e Campos (2021), com valor médio de 98,40% do total das emissões de CO<sub>2</sub>Eq. Observou-se que o agregado graúdo ocupa a segunda posição de destaque, com valor médio de 1,03% das emissões de CO<sub>2</sub>Eq. Identificou-se ainda que o agregado miúdo é responsável por um valor médio de 0,53% do total das emissões de CO<sub>2</sub>Eq. O componente água apontou um percentual médio de 0,04% do total das emissões de CO<sub>2</sub>Eq.

Na Tabela 5 estão apresentadas as dosagens que se destacaram sob o aspecto impacto nas emissões de CO<sub>2</sub>Eq. para distintos intervalos de resistência mecânica à compressão. Observou-se que o quantitativo dos materiais pode influenciar significativamente no impacto ambiental, nas características de resistência mecânica à compressão e no abatimento. Demonstrou-se ainda que a escolha da dosagem adequada pode ser estabelecida considerando diferentes aspectos técnicos e buscando um desenvolvimento mais sustentável.

Figura 6 - Emissões de CO<sub>2</sub>Eq. do concreto dos biodigestores para o sistema de tratamento de resíduos da suinocultura

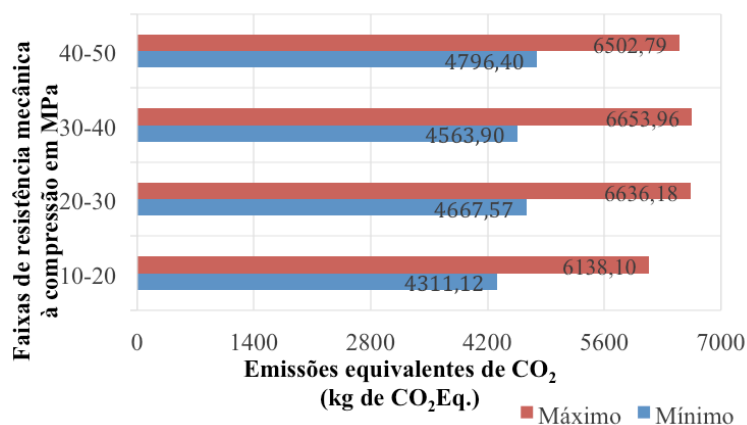
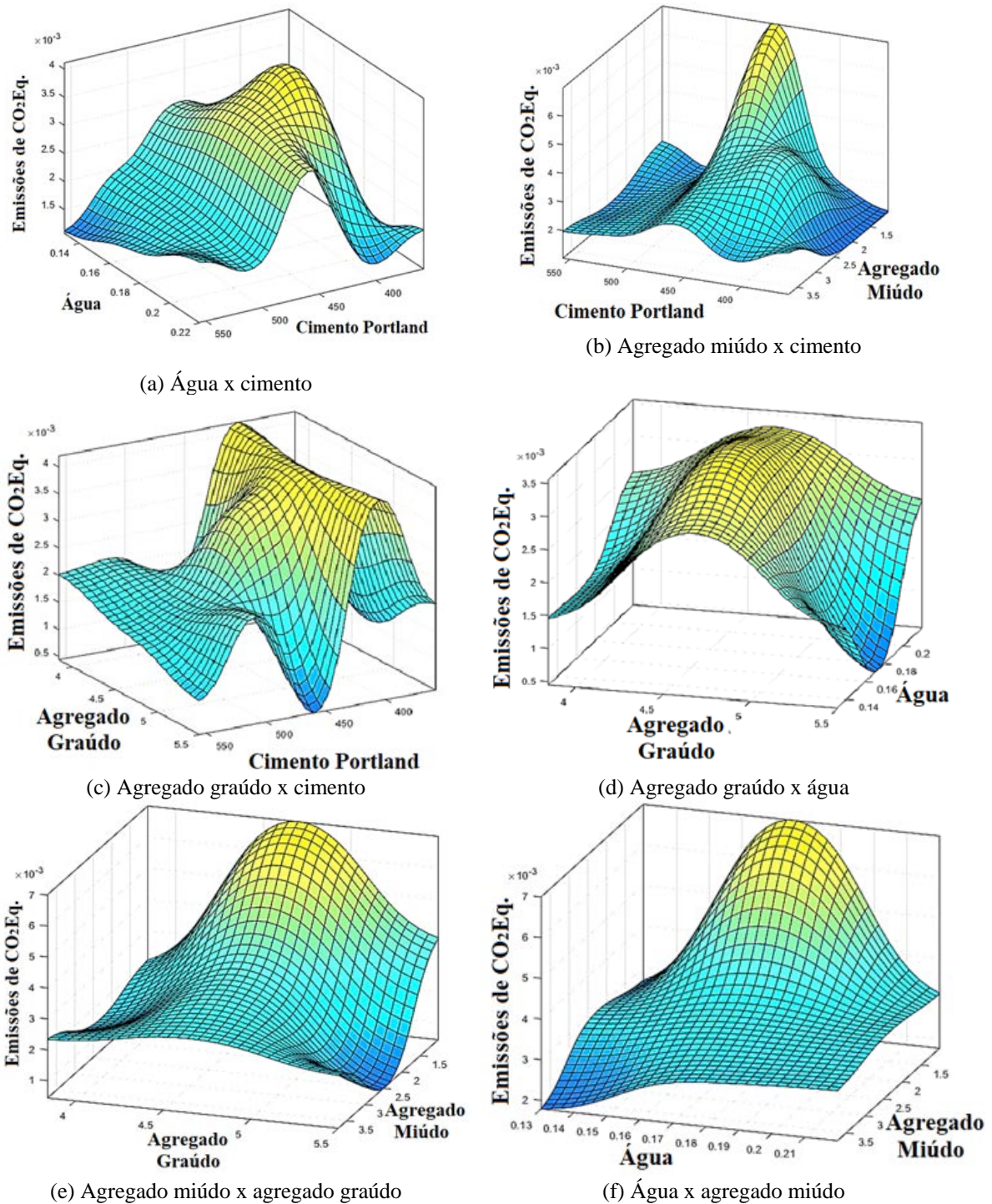


Tabela 5 - Dosagens com maiores efeitos no desempenho ambiental

Unidade funcional 1 m <sup>3</sup> de concreto					Ensaio experimental		Impacto ambiental
Mistura	Cimento Portland (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado miúdo (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado graúdo (kg/m <sup>3</sup> )	Água (kg/m <sup>3</sup> )	Abatimento slump test (mm)	Resistência mecânica à compressão (MPa)	Emissões de carbono (kg de CO <sub>2</sub> Eq./m <sup>3</sup> )
D01	495,00	250,00	850,00	260,00	225	11,17	465,91
D02	384,62	322,60	1.023,39	210,61	215	12,00	364,42
D03	550,00	450,00	1.010,00	270,00	215	16,40	518,86
D04	395,05	600,20	1.031,57	224,44	185	17,10	375,59
D05	415,00	640,00	1.085,00	165,00	0	28,00	394,55
D06	595,00	480,00	1.035,00	245,00	155	29,60	560,96
D07	597,84	420,10	863,20	235,46	145	36,30	562,47
D08	405,66	734,20	965,89	182,68	15	38,60	385,79
D09	430,31	443,30	878,76	178,16	55	41,60	406,81
D10	427,70	722,50	801,49	188,58	15	42,70	405,44
D11	583,27	626,40	812,87	185,70	0	54,30	549,69

Figura 7 - Gráfico de superfície para predição das emissões de CO<sub>2</sub>Eq. de diferentes combinações de misturas de concreto



As interações entre as variáveis de entrada (cimento Portland, agregado miúdo, agregado graúdo e água) e as emissões de CO<sub>2</sub>Eq. (resposta de saída do sistema) estão apresentadas na Figura 7, com as variáveis de entrada e saída em unidades de kg de CO<sub>2</sub>Eq./m<sup>3</sup>. Os gráficos da Figura 7 representam a variação do fenômeno físico de emissões de CO<sub>2</sub>Eq. para diferentes misturas de concreto. Trabalhou-se com gráficos tridimensionais, que expressam as variações das entradas em função da resposta de saída do sistema. Por se tratar de um modelo com quatro entradas (cimento Portland, agregado miúdo, agregado graúdo e água), os gráficos da Figura 7 representam diferentes combinações, considerando duas variáveis de entrada como referência e os pontos médios de seus respectivos intervalos para as variáveis restantes, por ser o padrão adotado em sistemas *fuzzy*. Por exemplo, a Figura 7(a) retrata a variação da emissão de CO<sub>2</sub>Eq. para

dosagens com diferentes misturas de água e cimento, considerando valores médios de emissões de 2,375 kg de CO<sub>2</sub>Eq./m<sup>3</sup> para agregado miúdo e de 4,67 kg de CO<sub>2</sub>Eq./m<sup>3</sup> para agregado graúdo. Para os demais casos, quando necessário, consideraram-se os valores médios de 456,8 kg de CO<sub>2</sub>Eq./m<sup>3</sup> de cimento Portland, de 2,375 kg de CO<sub>2</sub>Eq./m<sup>3</sup> de agregado miúdo, de 4,67 kg de CO<sub>2</sub>Eq./m<sup>3</sup> de agregado graúdo e de 0,175 kg de CO<sub>2</sub>Eq./m<sup>3</sup> do componente água.

## Conclusões

Devido à importância da sustentabilidade nos processos agrícolas, investigou-se o uso de modelagem híbrida ANFIS (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*) para predição do impacto ambiental gerado pelas emissões de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>Eq.) para a produção de concretos convencionais de um sistema de biodigestores da suinocultura.

Os resultados indicam que a metodologia proposta possui bom desempenho sob o viés estatístico coeficiente de variação (CV), erro percentual absoluto médio (MAPE), coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) e raiz quadrada do erro médio (RMSE), podendo ser o aparato necessário para a escolha adequada do quantitativo de materiais necessários para a produção de instalações sustentáveis em concreto, com potencial para ser utilizada na tomada decisão em projetos de engenharia.

Verificou-se que o estudo das emissões de CO<sub>2</sub>Eq. pode ser a ferramenta adequada para avaliar a sustentabilidade ambiental de construções em concreto, sendo o material cimento o preponderante para a poluição do ar.

Conclui-se com este estudo que podem ocorrer variações significativas nas emissões de CO<sub>2</sub>Eq. Essas variações podem ser reduzidas em até 31,41% com a escolha adequada da dosagem a ser utilizada para uma construção convencional de biodigestores em concreto. Ratificou-se ainda que existe uma relação entre as emissões de CO<sub>2</sub>Eq. e a energia incorporada nos materiais de construção da produção de concretos.

## Referências

- ALBUQUERQUE, H. R.; LIRA, J.; SPOSTO, R. M. Emissões de CO<sub>2</sub> de sistemas de revestimento de argamassa: estudo de caso de aplicação de argamassa projetada comparativamente à aplicação convencional. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 4, p. 377-393, out./dez. 2018.
- AMASYALI, K.; EL-GOHARY, N. M. A review of data-driven building energy consumption prediction studies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 1192-1205, 2018.
- ASDRUBALI, F. *et al.* Dynamic life cycle assessment modelling of a NZEB building. **Energy**, v. 191, p. 116489, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14931**: execução de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: cimento Portland: requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos prova de concreto. Rio de Janeiro, 2015a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: concreto: ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2015b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: concreto para fins estruturais: classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 27**: agregados: redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: agregados: determinação da massa unitária e volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: agregado miúdo: determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: agregado graúdo: determinação da massa específica, massa específica unitária e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009b.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.
- BARBOZA, L. da S.; STORCH, I. S.; ALMEIDA FILHO, F. M. de. Concreto autoadensável ecoeficiente com baixo consumo de cimento. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 2, p. 59-71, abr./jun. 2020.
- BOĀA, A. R.; ÖZTÜRK, M.; TOPÇU, İ. B. Using ANN and ANFIS to predict the mechanical and chloride permeability properties of concrete containing GGBFS and CNI. **Composites Part B: Engineering**, v. 45, n. 1, p. 688-696, 2013.
- BRUNETTA, R. F. da S. *et al.* Life cycle energy assessment and carbon dioxide emissions of wall systems for rural houses. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 37-50, jan./mar. 2021.
- DE SOUZA, R. M.; MAGALHÃES, R. R.; CAMPOS, A. T. Modelo neuro-fuzzy para previsão do aporte de energia de diferentes dosagens de concreto em edificações. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 2, p. 295-309, abr./jun. 2021.
- DE SOUZA, R. M.; MAGALHÃES, R. R.; DE ANDRADE, E. T. Comparative study of non-linear simulations of a reinforced concrete slender column using finite element method and p-delta. **Theoretical and Applied Engineering**, v. 3, n. 1, p. 1-11, 2019.
- DE WOLF, C.; POMPONI, F.; MONCASTER, A. Measuring embodied carbon dioxide equivalent of buildings: a review and critique of current industry practice. **Energy and Buildings**, v. 140, p. 68-80, 2017.
- DEB, C. *et al.* A review on time series forecasting techniques for building energy consumption. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 74, p. 902-924, 2017.
- GONG, X. *et al.* Life cycle energy consumption and carbon dioxide emission of residential building designs in Beijing. **Journal of Industrial Ecology**, v. 16, p. 576-587, 2012.
- HATEM, M. *et al.* Design of concrete mixes by systematic steps and ANN. **Journal of Advanced Science and Engineering Research**, v. 2, n. 4, p. 232-251, 2012.
- HUANG, P.-J. J.; HUANG, S.-L. L.; MARCOTULLIO, P. J. Relationships between CO<sub>2</sub> emissions and embodied energy in building construction: a historical analysis of Taipei. **Building and Environment**, v. 155, p. 360-375, apr. 2019.
- LEÓN-VELEZ, A.; GUILLÉN-MENA, V. Energía contenida y emisiones de CO<sub>2</sub> en el proceso de fabricación del cemento en Ecuador. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 3, p. 611-625, 2020.
- LI, K.; SU, H.; CHU, J. Forecasting building energy consumption using neural networks and hybrid neuro-fuzzy system: a comparative study. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 10, p. 2893-2899, 2011.
- MATTIOLI, M. C. *et al.* Demanda energética na construção de galpão para frangos de corte modelo Darkhouse. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 33, n. 3, p. 216-223, 2018.
- MITHUN, B. M.; NARASIMHAN, M. C. Performance of alkali activated slag concrete mixes incorporating copper slag as fine aggregate. **Journal of Cleaner Production**, n. 112, p. 837-844, 2015.
- MOUSAVI-AVVVAL, S. H. *et al.* Combined application of life cycle assessment and adaptive neuro-fuzzy inference system for modeling energy and environmental emissions of oilseed production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 78, p. 807-820, 2017.
- NABAVI-PELESARAEI, A. *et al.* Integration of artificial intelligence methods and life cycle assessment to predict energy output and environmental impacts of paddy production. **Science of the Total Environment**, v. 631/673, p. 1279-1294, 2018.
- NAJI, S. *et al.* Application of adaptive neuro-fuzzy methodology for estimating building energy consumption. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 1520-1528, 2016.
- OLIVEIRA, V. C. H. C. *et al.* Estratégias para a minimização da emissão de CO<sub>2</sub> de concretos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 167-181, out./dez. 2014.
- PENADÉS-PLÀ, V.; GARCÍA-SEGURA, T.; YEPES, V. Accelerated optimization method for low-embodied energy concrete box-girder bridge design. **Engineering Structures**, v. 179, p. 556-565, 2019.
- PURNELL, P.; BLACK, L. Embodied carbon dioxide in concrete: variation with common mix design parameters. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 6, p. 874-877, 2012.

- QUAN, X. *et al.* New horizons in the application of a neglected biomass pyrolysis byproduct: a marked simultaneous decrease in ammonia and carbon dioxide emissions. **Journal of Cleaner Production**, v. 297, p. 126626, 2021.
- SANTORO, J. F.; KRIPKA, M. Determinação das emissões de dióxido de carbono das matérias-primas do concreto produzido na região norte do Rio Grande do Sul. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 2, p. 35-49, abr./jun. 2016.
- SANTOS, A. G.; FERRARI, A. K. Influência do resíduo de PVC como agregado no concreto para peças de pavimentos intertravados. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 3, p. 39-51, jul./set. 2019.
- SANTOS, R. S. Energia incorporada na fase de pré-uso: comparação entre lajes *steel deck* e maciças. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 3, p. 197-205, jul./set. 2019.
- SARADAR, A. *et al.* Prediction of mechanical properties of lightweight basalt fiber reinforced concrete containing silica fume and fly ash: experimental and numerical assessment. **Journal of Building Engineering**, v. 32, p. 101732, 2020.
- SHAMSHIRBAND, S. *et al.* Heat load prediction in district heating systems with adaptive neuro-fuzzy method. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 48, p. 760-767, 2015.
- SHOAEI, P. *et al.* Glass powder as a partial precursor in Portland cement and alkali-activated slag mortar: a comprehensive comparative study. **Construction and Building Materials**, v. 251, p. 118991, 2020.
- SINGH, A. *et al.* Review of life-cycle assessment applications in building construction. **Journal of Architectural Engineering, American Society of Civil Engineers**, v. 17, n. 1, p. 15-23, 2011.
- SU, B.; ANG, B. W.; LI, Y. Structural path and decomposition analysis of aggregate embodied energy and emission intensities. **Energy Economics**, v. 83, p. 345-360, 2019.
- TULEVECH, S. M. *et al.* Life cycle assessment: a multi-scenario case study of a low-energy industrial building in Thailand. **Energy and Buildings**, v. 168, p. 191-200, 2018.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – USDA. **Foreign agricultural service**. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline>. Acesso em: 31 mar. 2021.
- VELOSO, A. V. *et al.* Custo energético de construção de biodigestores para o manejo e tratamento de resíduos da suinocultura. **Energia na Agricultura**, v. 33, n. 4, p. 330-337, 2018.
- WANG, J. *et al.* Life cycle sustainability assessment of fly ash concrete structures. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 1162-1174, 2017.
- XIAO, J. *et al.* A Recycled aggregate concrete high-rise building: structural performance and embodied carbon footprint. **Journal of Cleaner Production**, v. 199, p. 868-881, 2018.
- XIE, Q.; NI, J. Q.; SU, Z. Fuzzy comprehensive evaluation of multiple environmental factors for swine building assessment and control. **Journal of Hazardous Materials**, v. 340, p. 463-471, 2017.
- ZHANG, Z. Y.; WANG, B. Hybrid input-output analysis for life-cycle energy consumption and carbon emissions of China's building sector. **Building and Environment**, v. 104, p. 188-197, 2016.



**Régis Marciano de Souza**

Departamento de Engenharia Civil | Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas | Av. Maria da Conceição Santos, 900, Parque Real, Campus Pouso Alegre | Pouso Alegre - MG - Brasil | CEP 37550-000 | Tel.: (35) 3427-6600 | E-mail: regis.souza@ifsuldeminas.edu.br

**Ricardo Rodrigues Magalhães**

Departamento de Engenharia | Universidade Federal de Lavras | Campus Universitário | Lavras - MG - Brasil | CEP 37200-900 | Tel.: (35) 3829-5234 | E-mail: ricardom@ufla.br

**Alessandro Torres Campos**

Departamento de Engenharia | Universidade Federal de Lavras | Tel.: (35) 3829-1486 | E-mail: campos@ufla.br

**Alessandro Vieira Veloso**

Departamento de Engenharia | Universidade Federal de Lavras | Tel.: (35) 3829-1490 | E-mail: alessandro.veloso@ufla.br

***Ambiente Construído***

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

[www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido](http://www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido)

[www.scielo.br/ac](http://www.scielo.br/ac)

E-mail: [ambienteconstruido@ufrgs.br](mailto:ambienteconstruido@ufrgs.br)



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.