

# Modelagem *neuro-fuzzy* para determinação da profundidade de carbonatação em concretos baseada no modelo de Hamada

1<sup>st</sup> Régis Marciano de Souza  
Departamento de Engenharia Civil  
Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia do Sul de Minas (IFSULDEMINAS)  
Pouso Alegre -MG, Brasil  
e-mail: regis.souza@ifsuldeminas.edu.br

2<sup>nd</sup> Rodolpho Vilela Alves Neves  
Departamento de Engenharia Elétrica  
Universidade Federal de Viçosa (UFV)  
Viçosa -MG, Brasil  
e-mail: rodolpho.neves@ufv.br

**Resumo** — As estruturas em concreto armado podem ter sua durabilidade afetada por reações químicas com agentes externos no ambiente. A carbonatação causada pelo agente dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) em estruturas pode ser significativa para o entendimento da durabilidade de estruturas em concreto armado. Este trabalho apresenta uma aplicação da lógica *fuzzy* para modelagem da frente de carbonatação em estruturas de concreto armado. Tal abordagem é devida ao fato que existe a necessidade de um método capaz de expressar de uma maneira sistemática, computacionalmente, os modelos de previsão de vida útil em estruturas de concreto armado, com um número mínimo de variáveis para o processo matemático proposto por Hamada. Por meio da elaboração de um banco de dados de simulações a partir do modelo Hamada, um modelo computacional utilizando ANFIS (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*) foi ajustado. Cenários comparativos com o modelo Hamada foram simulados e o coeficiente R<sup>2</sup> obtido nestas comparações mostra que o modelo utilizando ANFIS fornece respostas muito próximas ao modelo original. Portanto, o modelo baseado em ANFIS é capaz de calcular a carbonatação em concretos, baseado no parâmetro R e na relação água/cimento, com valores próximos aos calculados pelo modelo de Hamada.

**Palavras-chave**—ANFIS, concreto armado, Takagi-Sugeno, Carbonatação do concreto.

## I. INTRODUÇÃO

As estruturas em concreto armado essencialmente são dimensionadas para atender as condições de resistência, durabilidade e desempenho em serviço. Algumas estruturas embora sejam bem projetadas e executadas, acabam por se degradar pelo fato de não possuírem defesas suficientes para proteger a estrutura da agressividade do ambiente.

Dentre esses mecanismos, o processo de carbonatação, causado pela presença do dióxido de carbono no ambiente construído, é um dos principais mecanismos que pode levar as armaduras das estruturas em concreto armado ao processo de corrosão, trazendo prejuízos econômicos devido à necessidade de um programa de manutenção preventiva e as aplicações de técnicas corretivas.

Para Cafange (2011), a carbonatação do concreto é um fenômeno natural até hoje compreendido como resultante da penetração da dissolução de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) pela sua rede interna de poros e que reage com substâncias alcalinas existentes na água dos poros, crescendo em espessura de reação até atingir as armaduras proporcionando a sua despassivação.

Segundo Levy (2001), vem aumentando o campo de estudo a respeito da durabilidade do concreto, isto se dá pelo aumento evidente de problemas de deterioração precoce em construções, pelas necessidades competitivas do mercado e por um vínculo da área com a ecologia, ou seja, a conservação de recursos naturais por meio de materiais construtivos longevos.

Inúmeros autores pesquisaram e desenvolveram modelos para previsão do processo de carbonatação em estruturas de concreto armado, modelos estes que podem apresentar limitações no cálculo da vida útil das estruturas em concreto armado, tais como a microestrutura e o alcance da zona de carbonatação parcial, conforme relato por Shen *et al.* (2017). Aproximadamente 30 modelos matemáticos foram apresentados nos trabalhos de Carmona (2005), Pauletti (2009), Possan (2010) e Pacheco (2016).

Atualmente os sistemas inteligentes, em especial os sistemas *fuzzy*, vêm alcançando espaço e aplicações diversas na área de engenharia, informação ratificada por Li *et al.* (2011), Al-Ghandoor (2013), Shamsirband *et al.* (2015) e Nabavi-Pelesaraei *et al.* (2018). Existem muitos procedimentos inferenciais na lógica *fuzzy*, a saber, Mamdani e o Takagi-Sugeno-Kang (SINGH, 2012). Adotou-se nesta pesquisa o procedimento de inferência proposto por Takagi-Sugeno-Kang, por ter uma maior capacidade de manuseio das relações não-lineares dos parâmetros de entrada e saída, quando comparado com o processo de Mamdani (NABAVI-PELESARAEI, 2018).

Ainda, para Rezende (2003), pouco a pouco, vem ocorrendo relatos de sucessos em aplicações da lógica *fuzzy*, isso é comprovado por uma continuidade e quantidade de publicações que reportam os avanços de aplicações baseadas em sistemas de inferência *fuzzy* nas engenharias e áreas afins. A modelagem *fuzzy* é uma técnica com aplicações de previsão em diversos ramos das engenharias, vale destacar as pesquisas recentes com aplicações do processo de inferência de Takagi-Sugeno-Kang no estudo propriedades do concreto (JALAL, 2020; MEESARAGANDA, 2020).

Cabe avaliar, se essa modelagem *neuro fuzzy* pode ser usada com segurança na predição da profundidade de carbonatação e como apoio para tomada de decisão em projetos de estruturas duráveis em concreto armado, baseado na habilidade de tomada de decisão do modelo de Hamada (1969). Cho *et al.* (2016) alcançou bons resultados ao utilizar *neuro-fuzzy* para predição da profundidade de carbonatação considerando variáveis obtidas em ensaios experimentais em campo e a presença da concentração de cloreto. Este trabalho propõe o uso de um modelo híbrido *neuro fuzzy*, para predição com segurança da profundidade de carbonatação em estruturas de concreto armado, sem a necessidade de experimento em campo para identificar as variáveis significativas no processo, com o intuito de avaliar a contribuição efetiva do dióxido de carbono para a profundidade de carbonatação em estruturas de concreto armado. Para alcançar este objetivo, um banco de dados foi desenvolvido para diferentes combinações de dosagens, considerando o universo de discurso das variáveis (tipo de cimento, tipo de agregados e presença de aditivo químico).

Posteriormente, a definição do universo de discurso, foram realizadas modelagens matemáticas para determinação da

profundidade de carbonatação, de cada um dos cenários, pelo modelo proposto por Hamada (1969), modelo esse que apresenta facilidade de aplicação e considera as variáveis tempo, relação água/cimento, tipo de cimento, tipo de agregado e a superfície do material (PACHECO, 2016).

Tal abordagem é devida ao fato que existe a necessidade de um método capaz de expressar de uma maneira sistemática, computacionalmente, os modelos de predição da profundidade de carbonatação em estruturas de concreto (FELIX, 2017), com um número mínimo de variáveis para o processo matemático proposto por Hamada (1969). É importante salientar a contribuição deste trabalho para a avaliação da durabilidade, com número estritamente necessário de variáveis de entrada para predição computacional da vida útil, gerando com isso uma redução quantitativa dos processos matemáticos na utilização do modelo Hamada (1969), funcionando como apoio na tomada de decisão em projetos de estruturas em concreto armado com menor custo computacional.

## II. MODELAGEM FUZZY

A lógica *fuzzy* é uma técnica de modelar de forma aproximada o raciocínio humano, imitando a habilidade de tomar decisões racionais, para um ambiente de incertezas. Para Oliveira *et al.* (2007), a lógica *fuzzy* foi concebida por L. A. Zadeh com o objetivo de fornecer um ferramental matemático para o tratamento de informações de caráter impreciso, ou vago, e tem por finalidade o estudo dos princípios formais do raciocínio aproximado, mesmo sendo construída com base em conceitos da lógica clássica.

Para Shaw e Simões (2007), a modelagem de situações reais é necessária por poder ser objeto de utilização em ensaios e experimentos de uma forma mais fácil, e com menores custos, do que a utilização dos sistemas reais. Destacam-se enfoques de modelagem em métodos experimentais, matemáticos (ou analíticos) e métodos heurísticos.

Segundo Mendel (1995), a lógica *fuzzy* é uma técnica que fornece um mecanismo que é capaz de manipular informações imprecisas. Certos conceitos presentes no dia a dia não são precisos, sendo mais comum se expressar em elementos qualitativos (expressões linguísticas) ao invés de quantitativos (GOMIDE; GUDWIN, 1994). Para Rezende (2003), uma variável linguística é definida como uma entidade utilizada para representar de modo impreciso e, portanto, linguístico, um conceito ou uma variável de um dado problema.

A forma de utilização das variáveis linguísticas depende basicamente da definição das propriedades sintáticas e semânticas que vão reger o comportamento do sistema de conhecimento *fuzzy* (REZENDE, 2003). De acordo com Nicoletti e Camargo (2013), conjuntos *fuzzy* são usadas para modelar informações vagas. De maneira simplista, a noção de conjuntos *fuzzy* pode ser abordada como uma generalização da noção clássica de conjunto (referenciado como conjunto *crisp*), que objetiva representar conjuntos cujas fronteiras não estão claras.

Shaw e Simões (2007) afirmam que as funções de pertinência representam os aspectos fundamentais de todas as ações teóricas e práticas de sistemas *fuzzy*, uma função de pertinência é uma função numérica gráfica ou tabulada que atribui valores de pertinência *fuzzy* para valores discretos de uma variável, em seu universo de discurso. Cada conjunto

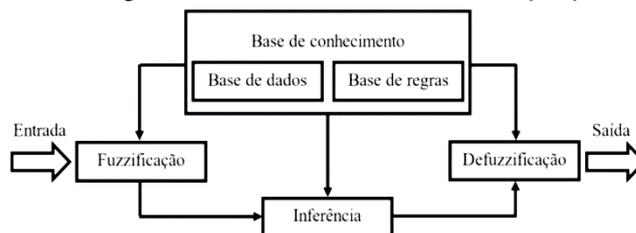
*fuzzy* é caracterizado pela função de pertinência, geralmente são representadas por  $\mu_A(x)$ .

Ainda, segundo Shaw e Simões (2007), a função de pertinência  $\mu_A(x)$  tem todos os valores dentro do intervalo  $[0, 1]$ , significa que um elemento pode ser membro parcialmente de um conjunto, indicando por um valor fracionário dentro do intervalo numérico. Essas funções podem ser triangulares, trapezoidais e/ou gaussianas.

O sistema *fuzzy* é composto de três dos seguintes blocos funcionais: interface de fuzzificação; base de conhecimento; lógica de tomada de decisões e interface de defuzzificação, conforme Figura 1. Para Shaw e Simões (2007), essa estrutura de controlador representa a transformação que ocorre do domínio do mundo real, que usa números reais, para o domínio *fuzzy*, que usa números *fuzzy*. Nessa transformação um conjunto de inferências *fuzzy* é usado para as tomadas de decisões, e por fim há uma transformação inversa do domínio *fuzzy* do mundo real, para que ocorra o acoplamento entre a saída do algoritmo *fuzzy* e as variáveis de atuação.

Segundo Tourino (2000), a fuzzificação é o mapeamento do domínio de valores numéricos reais (como por exemplo, os valores obtidos de um sensor) para valores *fuzzy*, definidos pelas funções de pertinência. Para Oliveira *et al.* (2007), a fuzzificação é usada para transformar conjuntos ordinários (*crisp sets*) em conjuntos *fuzzy*, em que essas transformações são realizadas por meio de funções de pertinência associadas aos elementos originais.

Figura 1 – Blocos funcionais do sistema *fuzzy*.



Fonte: Ramos Filho e De Alencar (2017).

O processamento de entrada (fuzzificação) é a etapa da lógica na qual as entradas do sistema são modeladas em seus respectivos domínios, com as funções de pertinência formuladas para cada conjunto *fuzzy* envolvido no processo (SILVA, 2011). De acordo com Oliveira *et al.* (2007), em geral os sistemas de inferência *fuzzy* são baseados em regras do tipo “se...então” e apresentam as seguintes fases: Fuzzificação das entradas e definição das saídas; Elaboração das regras *fuzzy*; Cálculo dos antecedentes cujos conectivos podem ser, por exemplo, “and” ou “or”; Cálculo das implicações de cada uma das regras cujos operadores podem ser, por exemplo, “mínimo” ou “produto”; Agregação dos consequentes cujos operadores podem ser, por exemplo, “máximo” ou “soma limitada”; Defuzzificação da saída usando, por exemplo, o centroide ou a média dos máximos.

Ainda para Oliveira *et al.* (2007), o processo de inferência pode ser definido como o processo pelo qual se obtêm as saídas do sistema, pela avaliação dos níveis de compatibilidade das entradas com os antecedentes das regras, ativando os consequentes. Existem muitos procedimentos inferenciais na lógica *fuzzy*, porém os mais utilizados são o Mamdani e o Takagi-Sugeno-Kang (MENDEL, 2001). Tem-se então um conjunto *fuzzy* que é transformando em um número real, por um processo de defuzzificação.

Para Shaw e Simões (2007), na desfuzzificação, o valor da variável linguística de saída inferida pelas regras *fuzzy* será traduzido num valor discreto. Um Sistema Baseado em Regras *fuzzy* (SBRF) é aquele que utiliza a lógica *fuzzy* para produzir saídas (respostas) de acordo com cada entrada *fuzzy* (problema) (BELLUCCI, 2009).

De acordo com Oliveira *et al.* (2007), a desfuzzificação é tipicamente usada para associar valores numéricos a conjuntos *fuzzy* – tratando-se de uma espécie de síntese do conjunto *fuzzy* por meio de um único valor real. Ou seja, conceitua-se desfuzzificação como o processo de transformar um conjunto *fuzzy* em um elemento do universo de discurso (em geral, um número real ou *crisp*), processo esse inverso da fuzzificação.

Para selecionar o método apropriado de desfuzzificação, pode-se utilizar um enfoque baseado no centroide ou nos valores máximos que ocorrem na função de pertinência resultante, os mais utilizados são: centro de gravidade, média de máximos e centro dos máximos (SHAW e SIMÕES, 2007). Para Oliveira *et al.* (2007), entre as técnicas utilizadas para desfuzzificação, a mais utilizada é a do centroide. No método do centroide utiliza-se a soma (ou integral) dos valores de pertinência multiplicados pelos valores das variáveis, dividindo esse valor final pela área total do conjunto (*fuzzy*) a ser desfuzzificado.

No método da média dos máximos utiliza-se a média dos valores máximos de pertinência do conjunto desfuzzificado, e no método do menor dos máximos utiliza-se o menor valor de pertinência dentre os valores máximos de pertinência do conjunto desfuzzificado e o método do maior valor dos máximos utiliza o maior valor de pertinência entre os valores de pertinência do conjunto *fuzzy* a ser desfuzzificado (OLIVEIRA *et al.*, 2007).

### III. ESTRUTURAS EM CONCRETO ARMADO

O concreto armado é um material estrutural muito utilizado na construção civil, uma combinação perfeita entre as armaduras e o concreto. Segundo a norma NBR-6118 (ABNT, 2014), os elementos de concreto armado são aqueles cujo comportamento estrutural depende da aderência entre concreto e a armadura.

Para melhorar a resistência do concreto, procurou-se adicionar ao mesmo, materiais mais resistentes à tração. A utilização de barras de aço somada ao concreto só é possível devido a alguns fatores, como: trabalho em conjunto do concreto e aço, assegurado pela aderência dos materiais, coeficientes de dilatação térmica serem praticamente iguais e o concreto protege de oxidação o aço, garantindo a durabilidade da estrutura (ANDRADE, 1997).

Em média, o concreto resiste à compressão dez vezes mais que à tração, onde que desta maneira uma ideia surgiu: por que não usar em uma estrutura uma mistura de material bom para compressão na parte comprimida e um bom para tração na parte tracionada, e assim estabeleceu-se a ideia do concreto armado (BOTELHO; MARCHETTI, 2015). O concreto armado é amplamente empregado há mais de um século na construção civil, onde a utilização de armaduras de aço nas zonas tracionadas, em razão da baixa resistência à tração do concreto, permite a concepção de estruturas para os mais variados empregos, sendo um dos papéis do concreto o de fornecer à armadura um ambiente protetor (OLLIVIER; VICHOT, 2014).

Para De Souza *et al.* (2019), no Brasil, como em muitos outros países, o concreto desempenha um papel importante na construção, sendo o principal material de construção no mundo. De acordo com Helene e Andrade (2010), o concreto de cimento Portland é o material de construção mais consumido no Brasil. Para Mehta e Monteiro (2014), são três as razões principais pelo intenso consumo de concreto: a primeira reporta-se a excelente resistência do concreto a água, muito superior a outros materiais como a madeira; a segunda razão refere-se a facilidade de execução de elementos estruturais de concreto serem realizados de diferentes formas e tamanhos, devido a consistência plástica do material no estado fresco; a terceira refere-se ao baixo custo e rápida disponibilidade do material. Para Mehta e Monteiro (2014), é necessário a incorporação do responsável pelo projeto, em avaliar a durabilidade do material empregado tanto como sua resistência ou outra propriedade.

Para Ollivier e Vichot (2014), as edificações são dimensionadas de acordo com uma vida útil específica, onde se leva em consideração o ambiente em que estão submetidas. Para isso, o projetista deve adotar regras de dimensionamento em cima do conhecimento dos mecanismos de degradação do concreto e o engenheiro deve dispor de soluções que permitam que a edificação resista às imposições do ambiente, aos métodos de lançamento e de cura e às fórmulas de projeto levando em conta as possíveis degradações, mantendo a segurança. A maioria dos problemas relacionados ao desgaste do concreto se deve à ação da água, ocorrendo fenômenos físico-químicos em decorrência do transporte de íons agressivos causando a degradação do material, sendo controlado apenas pela permeabilidade do concreto (LEVY, 2001).

De acordo com a norma NBR-15575 (ABNT, 2013), vida útil (VU) é o desempenho efetivo da estrutura que, obviamente, depende também da operação e manutenção corretas. E vida útil de projeto (VUP) é o valor justificado da estimativa da vida útil, baseado em um modelo de previsão, que deve constar em projeto, conforme NBR-15575 (ABNT, 2013). De acordo com Machado e Mendes (2014), a durabilidade depende da qualidade do material quanto ao meio em que está incluso. A falta de durabilidade pode ser ocasionada pela ação de agentes externos ou internos ao concreto, o que pode afetar o desempenho da construção.

Para a NBR-6118 (ABNT, 2014), desempenho em serviço consiste na capacidade da estrutura em manter-se em condições plenas de utilização durante sua vida útil, não podendo apresentar danos que comprometam em parte ou totalmente o uso para o qual foi projetada. Para a norma NBR-6118 (ABNT, 2014), o risco de deterioração de uma estrutura depende da classe de agressividade do ambiente, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Classes de agressividade ambiental.

Concreto <sup>a</sup>	Tipo <sup>b,c</sup>	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40

a)O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.

b)CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.

c)CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: NBR-6118 (ABNT, 2014).

Segundo Ribeiro *et al.* (2014), os problemas associados à durabilidade tendem a se acentuar nos próximos anos, visto que grande parte das edificações das principais metrópoles brasileiras foram construídas nas décadas de 1970 e 1980, ou seja, as estruturas estão completando entre 30 e 40 anos de vida, idade em que os gastos com manutenção e reparos tornam-se mais constantes. A norma NBR-6118 (ABNT, 2014) ainda retrata uma correlação entre a classe de agressividade ambiental com a máxima relação de água/cimento e com a classe do concreto, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e a qualidade do concreto.

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural Submersa	Insignificante
II	Moderada	Urbana <sup>a,b</sup> Marinha <sup>a</sup>	Pequeno
III	Forte	Industrial <sup>a,b</sup>	Grande
IV	Muito Forte	Industrial <sup>a,c</sup> Respingos de maré	Elevado

a) Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

b) Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

c) Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: NBR-6118 (ABNT, 2014).

A segurança das estruturas atualmente possui grande relevância no dimensionamento e na construção de obras civis. Este fator está associado a desenvolver uma estrutura que atenda a requisitos mínimos de segurança, aspecto esse relacionado ao desempenho e durabilidade. Segundo Oliveira e Moreno Júnior (2007), uma estrutura deve cumprir os requisitos mínimos de segurança, funcionalidade e aspecto estético que lhe sejam exigidos em função das ações e influências ambientais que venham a atuar sobre a mesma durante sua vida útil.

Ribeiro *et al.* (2014) faz uma relação de durabilidade e vida útil que permite diferenciar e associar os dois conceitos simultaneamente, dizendo que as estruturas de concreto armado, considerando os fatores ambientais e sendo utilizadas conforme preconizadas em projeto, devem ser projetadas e construídas a fim de garantir a segurança e estabilidade ao longo do período referente à sua vida útil.

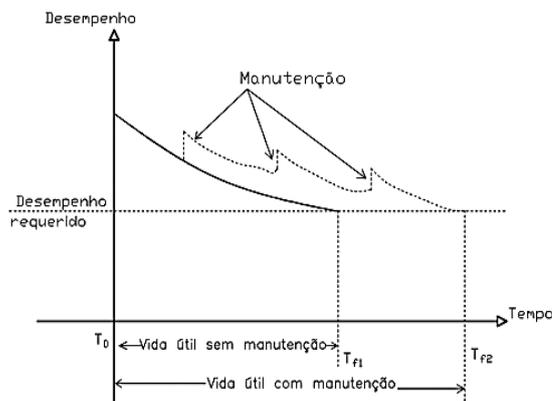
Uma maneira de garantir a durabilidade da estrutura ao longo da vida útil, para a qual foi projetada, é fazendo as devidas manutenções periódicas, atuando como prevenção e reparação da estrutura, podendo até mesmo estender sua vida útil, como se pode observar na Figura 2.

A manutenção preventiva é geralmente direcionada para as regiões da estrutura que estão em contato com água ou fluidos agressivos, para limpeza da estrutura, aplicação de revestimento protetor entre outras atividades, podendo tornar desnecessária a manutenção corretiva, reduzindo significativamente os custos (GENTIL, 2014).

As medidas que visam durabilidade das estruturas de concreto armado estão associadas à questão econômica, expresso pela Lei de SITTER, onde o crescimento dos custos consiste em uma progressão geométrica de razão 5 abrangendo as fases de projeto, execução, manutenção preventiva e manutenção corretiva (HELENE, 1993). Para

Valin Junior *et al.* (2017), a segurança de uma obra, geralmente associa-se a estrutura, que comumente no Brasil está relacionado a sistemas construtivos que utilizam o concreto armado, onde a resistência à compressão axial do concreto é uma das principais propriedades quando o assunto é estruturas de concreto. Uma dificuldade encontrada por engenheiros na área de estruturas de concreto armado é garantir que todas as especificações de projeto sejam asseguradas na execução da obra.

Figura 2 - Desempenho das estruturas ao longo do tempo.



Fonte: NBR15575 (ABNT, 2013).

Como o concreto é o elemento estrutural mais utilizado no mundo, esse fato conduz à inevitabilidade de utilizar ferramentas de controle e análise de seu estado de conservação, algo que ocasiona uma preocupação crescente sobre o estado de deterioração e segurança das estruturas (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

O acompanhamento constante das estruturas é um procedimento necessário, uma vez que a percepção preventiva de problemas nos elementos estruturais permite a utilização de métodos simples e econômicos para avaliação e reparo, aumentando, portanto, a vida útil e segurança da estrutura. Para tais fins, os métodos de ensaios não destrutivos (END) tornam-se uma estratégia de investigação bastante atraente e viável (LORENZI *et al.*, 2016).

Segundo Sato e Agopyan (2000), a durabilidade da estrutura em concreto armado é altamente afetada pela porosidade do concreto, pois agentes causadores de corrosão de armaduras, como o gás carbônico e íons cloreto, penetrarão na estrutura com maior ou menor facilidade, dependendo da morfologia, dimensões e quantidade dos poros. Os autores ainda ressaltam que o teor de umidade influi ainda na resistividade elétrica do concreto que, por sua vez, influi na velocidade de corrosão das armaduras. De acordo com Montenor *et al.* (2002), a carbonatação pode ser dividida em quatro etapas: difusão do CO<sub>2</sub> para o interior do concreto; o CO<sub>2</sub> dissolvido na solução dos poros do concreto reage com hidróxido de cálcio; reação com silicatos e aluminatos e produção de carbonato de cálcio e água.

As armaduras inseridas nas estruturas de concreto, inicialmente estão protegidas por uma camada de óxido passivo contra corrosão, proteção esta, proporcionada pelo concreto de cobrimento, gerando um obstáculo ao contato de agentes externos à estrutura e pela proteção química devido à alta alcalinidade da solução intersticial do concreto. A perda ou ruptura desta proteção, ainda que localizada, pode desencadear o processo de deterioração (HELENE, 1993).

O fenômeno da carbonatação ocorre segundo vários fatores, sendo diretamente dependente da concentração de CO<sub>2</sub> no ambiente, do percentual de umidade relativa do ar, temperatura e dos condicionantes intrínsecos do concreto como o tipo de cimento as adições, os agregados e a cura. Para Castellote *et al.* (2009), a composição da mistura e sua estrutura de poros são um desses fatores. Para Mehta e Monteiro (2014), a permeabilidade também é um desses fatores intrínsecos que podem contribuir para o fenômeno da carbonatação. Para Souza *et al.* (1998), quanto maior for a concentração de CO<sub>2</sub> presente, menor será o pH, ou, por outro lado, mais espessa será a camada de concreto carbonatada.

De acordo com Helene (1993), o concreto possui poros capilares, e quando não estão submersos, estão parcialmente preenchidos por água. O gás carbônico terá então que difundir-se no concreto atravessando os poros com ar e com água. Para Souza *et al.* (1998), se o concreto estiver totalmente saturado, não poderá ficar carbonatado, posto que a difusão em CO<sub>2</sub> só é possível através dos poros do concreto. Em geral, considera-se que se houver 0,5% a 1% (em volume) de água nos poros do concreto, a carbonatação já não é possível.

Cascudo e Carasek (2014) analisaram a influência da umidade relativa do ar sobre a carbonatação da seguinte forma: em situação de aumento da umidade relativa, o preenchimento dos poros com água também aumenta, o que dificulta a difusão do gás CO<sub>2</sub>; no entanto, em situações de umidade relativa muito baixa, a falta de água nos poros torna lenta a difusão do CO<sub>2</sub>, restringindo também a carbonatação. A carbonatação é máxima quando a umidade relativa apresenta um valor intermediário (entre 40% e 60%) e a relação água/cimento é na média de 0,6.

Com relação à concentração de CO<sub>2</sub>, em zonas pouco povoadas e/ou rurais fica é aproximadamente 0,03% de volume e em ambientes como em laboratório não ventilado esse teor pode ser maior que 0,1%. Porém, estruturas localizadas em ambientes mais agressivos, como por exemplo, em grandes centros urbanos, essa concentração pode variar entre 0,3 e 1% (NEVILLE, 2016).

Para Helene (1993), os valores para concentração de CO<sub>2</sub> podem variar de 0,03 até 0,05% em atmosferas rurais e de 0,1 até 0,2% e, em locais de tráfego pesado e em ambientes de atmosfera viciada (como garagens), este índice pode atingir até 1,8%. Segundo Pauletti *et al.* (2007), a umidade relativa afeta a carbonatação, sendo em condições de baixa umidade, inferior a 50% a carbonatação menor, porque não haverá água para dissolver o CO<sub>2</sub> e em condições de saturação de água nos poros, a carbonatação será menor porque a difusão de CO<sub>2</sub>, será muito pequena. De forma geral, pesquisadores indicam valores de umidades entre 50 e 85%.

Segundo Vagheti (2005), a umidade presente nas estruturas de concreto é essencial. Para Helene (1993), a corrosão das armaduras de aço em presença de umidade pode ser considerada um processo do tipo corrosão eletroquímica, então, além do transporte de íons cátodo e ânodo e de dissolver o oxigênio a umidade age na resistividade elétrica do material, facilitando ou retardando as reações de corrosão. De acordo com Papadakis *et al.* (1991), a temperatura pouco influencia no processo de carbonatação. Para Neville (2016), pequenas variações de temperatura pouco influenciam na profundidade de carbonatação. Helene (1993) ainda assegura de que a velocidade de carbonatação é pouco visível para temperaturas entre 25 e 30°C.

Segundo Cafange (2011), o tipo de cimento pode interferir na velocidade de penetração do CO<sub>2</sub>. Conforme Cadore (2008), com relação à composição, tipos e teores de cimento, pode-se dizer que este fator relaciona diretamente com a porosidade e distribuição dos poros, sendo então a composição química e a porosidade o que disponibiliza os produtos para a reação de carbonatação. Segundo Helene (1993), as adições reduzem a porosidade, permeabilidade e aumentam a resistência à compressão, entretanto aumentam a profundidade de carbonatação.

Pauletti (2004), observou que concretos que possuem adições tendem a carbonatar mais do que os concretos confeccionados com cimentos comuns. Vagheti (2005), ratificou que adições minerais influenciam no teor de hidróxido de cálcio formado, uma vez que esta adição, por consequência alteram a alcalinidade do concreto.

Souza *et al.* (1998) afirmaram que, o controle de qualidade e os atestados de proveniência dos aditivos são elementos indispensáveis para a produção de um concreto de qualidade. Segundo Papadakis *et al.* (1991), a presença do agregado não afeta consideravelmente o valor da difusão efetiva, a presença da interface pasta-agregado parece compensar “a falta de porosidade do agregado natural”.

Vagheti (2005) ressalta a importância de não haver agregado contaminado, se um agregado apresentar cloreto eles podem agir de forma localizada nas armaduras, formando pequenas cavidades com a consequente perda da seção da mesma. De acordo com Mehta e Monteiro (2014), as características relevantes do agregado para a composição do concreto são resultantes tanto da composição mineralógica da rocha matriz, quanto das condições a que ela foi exposta e do tipo de equipamento utilizado para a produção do agregado.

Segundo Pauletti (2007), a cura interfere na microestrutura do concreto, e se não houver um processo de cura adequado pode influenciar o avanço da frente de carbonatação do concreto. Helene (1993) ainda reforça que a profundidade carbonatada poderá ser menor sempre que a cura úmida for mantida por períodos mais longos e será sempre maior quando a cura for inferior a cinco dias havendo ventos e a temperatura for superior a 30°C.

Segundo Ribeiro (2014), a permeabilidade pode ser definida como o fluxo de um fluido gerado por um gradiente de pressão, sendo caracterizada pela facilidade com que um fluido se desloca de um sólido poroso estando sob uma diferença de pressão.

De acordo com Cascudo e Helene (2001), quanto menor a relação água/cimento, menor será a porosidade, índice de vazios e, conseqüentemente, a permeabilidade. Assim, referindo-se à corrosão isso implicará a maior resistividade do concreto. Mehta e Monteiro (2014), reafirma o fato de que quando a relação água/cimento é alta e o grau de hidratação é baixo, a pasta de cimento terá, por consequência, uma porosidade baixa.

Dentre os modelos matemáticos, para o processo de carbonatação, apresentados pelos pesquisadores, vale destacar o modelo de Hamada (1969) que, segundo Pacheco (2016), é um modelo que apresenta facilidade de aplicação e leva em consideração as variáveis tempo, relação água/cimento, tipo de cimento, tipo de agregado e a superfície (uso ou não de aditivos químicos), conforme Eq. (1), Eq. (2) e Eq. (3),

$$p = \frac{R}{\sqrt{k}} \times \sqrt{t} \quad (1)$$

$$k = \frac{0,3 \times (1,15 + 3 \times a/c)}{(a/c - 0,25)^2} \quad (2)$$

$$R = ra \times rc \times rs \quad (3)$$

em que,  $t$  é o tempo de exposição em anos,  $p$  é a profundidade de carbonatação em centímetros,  $k$  é um coeficiente em função da relação água cimento  $a/c$  (2), e  $R$  é um parâmetro que depende dos parâmetros  $ra$ ,  $rc$ , e  $rs$ , presentes na Tabela 3.

Tabela 3 – Coeficientes para o Modelo de Hamada.

Tipo de cimento	Cimento Portland		Cimento Portland com escória de alto forno		Cimento Portland pozolânico	Cimento Portland com 20% de cinza volante
	Comum	Alta resistência inicial	Escória 30-40%	Escória 60%		
$(rc)$	1	0,6	1,4	2,2	1,7	1,9
Tipo de agregado	Areia de rio		Areia de rio, brita de pedra-pomes		Areia e brita de pedra-pomes	Cinza (fina, grossa)
	1		1,2		2,9	3,3
Superfície agente ativo	Normal (sem aditivo)		Incorporador de ar		Redutor de água (plastificante)	
$(rs)$	1		0,6		0,4	

Fonte: Adaptado de Hamada (1969).

#### IV. MATERIAIS E MÉTODOS

Para realização da pesquisa, realizou-se primeiramente a elaboração de um banco de dados de simulações usando o modelo de Hamada. Posteriormente, elaborou-se o modelo *fuzzy* de previsão de profundidade de carbonatação de estruturas em concreto armado.

A pesquisa foi realizada no Departamento de Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas – Campus Pouso Alegre – MG (IFSULDEMINAS) em parceria com a Universidade Federal de Viçosa - UFV. A pesquisa foi classificada como teórica, exploratória, qualitativa e computacionalmente experimental, com hipóteses experimentais previamente definidas (GIL, 2007).

##### A. Banco de dados baseado em Hamada

Os cenários simulados foram classificados segundo a classe de agressividade conforme prescreve a norma NBR-6118 (ABNT, 2014). Adotou-se a relação água/cimento mínima para cada cenário em função da classe de agressividade da NBR-6118 (Tabela 1).

Para a elaboração do banco de dados foram considerados os tipos de agregados, a presença de aditivos e os tipos de cimentos, conforme Tabela 3. Nesta pesquisa considerou-se o tempo de exposição de 50 anos para diferentes cenários propostos.

Os dados dos diferentes cenários propostos, foram simulados numericamente utilizando o modelo de Hamada (1969). Por meio das simulações numéricas de previsão (Modelo Hamada) foram obtidos os valores dos coeficientes “ $k$ ” e a previsão da profundidade de carbonatação, conforme mostrado no Quadro 1 (Anexo).

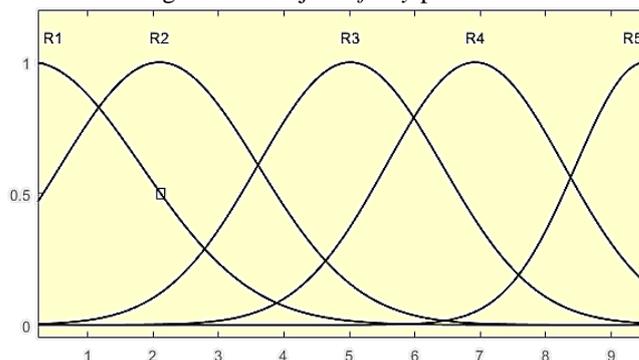
##### B. Modelagem neuro fuzzy

Posteriormente ao desenvolvimento do banco de dados para diferentes cenários, esses dados foram utilizados para o desenvolvimento de um modelo híbrido ANFIS (*Adaptive*

*neuro-fuzzy inference system*) para predição da profundidade de carbonatação em estruturas de concreto armado. Este modelo é baseado na fuzzificação das variáveis de entrada: parâmetro R ( $R$ ), relação água/cimento ( $AC$ ).

Foi levada em consideração a Eq. (1) do Modelo Hamada, para definir as variáveis de entrada do modelo. O sistema híbrido proposto ainda utiliza de RNA (*Artificial Neural Networks*) combinado com lógica *fuzzy* baseada no processo de inferência *fuzzy* de Takagi – Sugeno, para definição das características do modelo ANFIS, procedimento também adotado por Jalal *et al.* (2020) e Meesaraganda *et al.* (2020). O modelo foi treinado baseado no banco de dados composto por 192 cenários (Quadro 1 – Anexo).

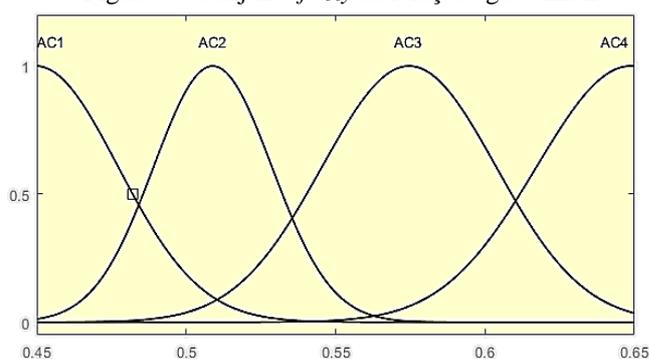
Figura 3 – Conjunto *fuzzy* parâmetro R



Fonte: Elaborado pelos autores.

Os dados experimentais da variável de entrada parâmetro R foram representados em um conjunto *fuzzy*, com universo de discurso de 0,24 a 9,57, divididos em cinco funções de pertinência (R1, R2, R3, R4 e R5), gaussianas, representadas na Figura 3. A variável de entrada água/cimento foi representada por meio de um conjunto *fuzzy*, com universo de discurso de 0,45 a 0,65, divididos em quatro funções de pertinência (AC1, AC2, AC3 e AC4), gaussianas, conforme Figura 4.

Figura 4 - Conjunto *fuzzy* da relação água/cimento



Fonte: Elaborado pelos autores.

Ambos os conjuntos *fuzzy* das entradas (Figuras 3 e 4) foram definidos e ajustados para alcançar uma compatibilidade com as simulações do banco de dados (Quadro 1), utilizando de RNA na etapa de treinamento, reduzindo assim os erros presentes na modelagem. Ainda, diferentes possibilidades de conjuntos *fuzzy* foram testadas, considerando diferentes tipos e quantidades de funções de pertinência por conjunto *fuzzy*.

Ao se combinarem todas as possíveis entradas e possíveis saídas, o modelo híbrido proposto utilizou de um conjunto de 20 regras, conforme Quadro 2. Foi adotado a média ponderada

de todas as saídas de regra, por ser o padrão para os sistemas de inferência de Takagi Sugeno.

Quadro 2 – Sistema de regras

Nº DA REGRA	REGRAS	PARÂMETROS
1	SE R é R1 E AC é AC1, ENTÃO P é P01 = f(R, AC)	P01 = -2,160
2	SE R é R1 E AC é AC2, ENTÃO P é P02 = f(R, AC)	P02 = -1,642
3	SE R é R1 E AC é AC3, ENTÃO P é P03 = f(R, AC)	P03 = -3,289
4	SE R é R1 E AC é AC4, ENTÃO P é P04 = f(R, AC)	P04 = -3,890
5	SE R é R2 E AC é AC1, ENTÃO P é P05 = f(R, AC)	P05 = 5,838
6	SE R é R2 E AC é AC2, ENTÃO P é P06 = f(R, AC)	P06 = 4,426
7	SE R é R2 E AC é AC3, ENTÃO P é P07 = f(R, AC)	P07 = 8,878
8	SE R é R2 E AC é AC4, ENTÃO P é P08 = f(R, AC)	P08 = 10,510
9	SE R é R3 E AC é AC1, ENTÃO P é P09 = f(R, AC)	P09 = 6,999
10	SE R é R3 E AC é AC2, ENTÃO P é P10 = f(R, AC)	P10 = 4,918
11	SE R é R3 E AC é AC3, ENTÃO P é P11 = f(R, AC)	P11 = 10,640
12	SE R é R3 E AC é AC4, ENTÃO P é P12 = f(R, AC)	P12 = 12,590
13	SE R é R4 E AC é AC1, ENTÃO P é P13 = f(R, AC)	P13 = 12,800
14	SE R é R4 E AC é AC2, ENTÃO P é P14 = f(R, AC)	P14 = 10,120
15	SE R é R4 E AC é AC3, ENTÃO P é P15 = f(R, AC)	P15 = 19,460
16	SE R é R4 E AC é AC4, ENTÃO P é P16 = f(R, AC)	P16 = 23,070
17	SE R é R5 E AC é AC1, ENTÃO P é P17 = f(R, AC)	P17 = 16,840
18	SE R é R5 E AC é AC2, ENTÃO P é P18 = f(R, AC)	P18 = 5,137
19	SE R é R5 E AC é AC3, ENTÃO P é P19 = f(R, AC)	P19 = 25,660
20	SE R é R5 E AC é AC4, ENTÃO P é P20 = f(R, AC)	P20 = 30,060

Fonte: Elaborado pelos autores

A calibração do modelo preditivo de profundidade de carbonatação de concreto foi avaliada por meio do coeficiente de variação (CV), do erro percentual absoluto médio (MAPE), da raiz quadrada do erro médio (RMSE) e do coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), conforme Eq. (4), Eq. (5), Eq. (6) e Eq. (7), respectivamente.

$$CV(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{predict,i} - y_{data,i})^2}{n}} \times 100 \quad (4)$$

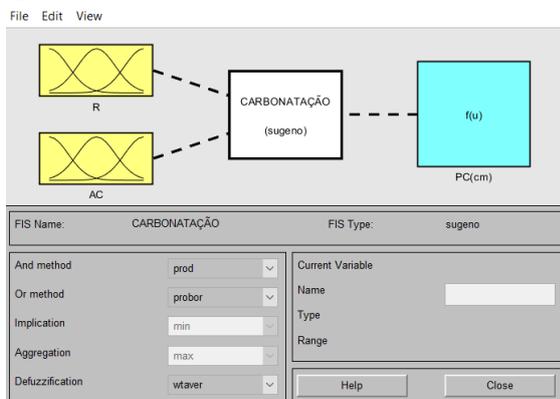
$$MAPE(\%) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_{predict,i} - y_{data,i}}{y_{data,i}} \right| \times 100 \quad (5)$$

$$RMSE(MJ) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{predict,i} - y_{data,i})^2}{n}} \quad (6)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{predict,i} - y_{data,i})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{data,i} - \bar{y}_{data})^2} \quad (7)$$

em que:  $y_{predict,i}$  é o valor previsto da profundidade de carbonatação no instante  $i$ ;  $y_{data,i}$  é o valor conhecido da profundidade de carbonatação no instante  $i$ ; e,  $\bar{y}_{data}$  é a média dos valores conhecidos da profundidade de carbonatação do banco de dados, para  $n$  dados.

Figura 5 – Sistema fuzzy logic Toolbox do MATLAB®.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Para facilitar a elaboração do modelo fuzzy, foi utilizado o fuzzy logic Toolbox do MATLAB®, visto que por intermédio da interface gráfica do programa, não é necessária a programação por linhas de código (AMENDOLA; SOUZA; BARROS, 2005), conforme Figura 5.

## V. RESULTADOS

Neste item apresentou-se os resultados da modelagem fuzzy dos cenários propostos de previsão da frente de carbonatação, com a comparação dos resultados em relação ao banco de dados. O resultado da modelagem fuzzy é apresentado no Quadro 3.

Quadro 3 – Desempenho estatístico do modelo ANFIS.

ANFIS	CV (%)	MAPE (%)	RMSE (cm)	R <sup>2</sup>
	0,2121	0,4115	0,0011038	0,9999

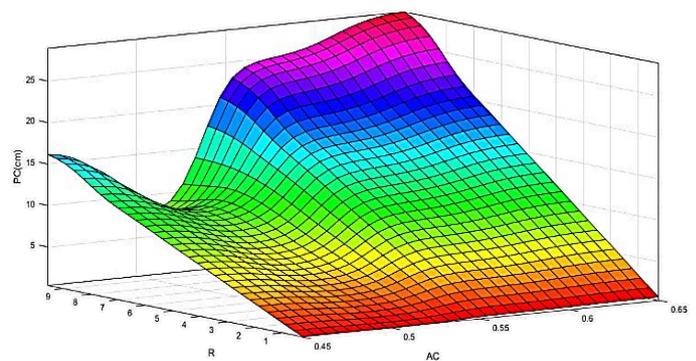
Fonte: Elaborado pelos autores.

Observa-se o maior erro absoluto de 0,03 cm, o que é um resultado compatível quando se compara diferentes modelos de previsão de profundidade de carbonatação. Carmona (2005) comparou diferentes modelos e obteve resultados com diferenças superiores ao obtido nesse trabalho.

O erro relativo do modelo de predição teve um valor médio de 0,41%, resultado esse equivalente a um erro absoluto médio de 0,02 cm, comprovando a eficiência do método, por intermédio de uma boa convergência do modelo para o banco de dados, no domínio de análise. Observou-se que o erro absoluto ficou abaixo de 0,03 cm, o que para a prática de análise de construções em concreto armado, pode ser considerado como um resultado satisfatório para tomada de decisão em obras da construção civil.

Os resultados podem ser verificados no modelo numérico de previsão fuzzy da frente de carbonatação (PC), em função dos valores de AC e R, conforme representado na Figura 6.

Figura 6 – Modelo híbrido de predição ANFIS.



Fonte: Elaborado pelos autores.

## VI. CONCLUSÕES

Um dos parâmetros de projeto de estruturas em concreto armado duráveis é a profundidade da frente de carbonatação. Verificou-se que a durabilidade das estruturas em concreto pode ser afetada pela ação dos agentes externos, dentre esses agentes, vale destacar o dióxido de carbono que pode gerar a carbonatação das estruturas de concreto armado, dependendo das propriedades dos materiais e do ambiente de agressividade. Ratificou-se que existe uma relação intrínseca entre a corrosão das armaduras e o agente externo dióxido de carbono, para o

estudo dessa relação muitos modelos foram encontrados na literatura.

O modelo baseado em lógica *fuzzy* proposto nesta pesquisa, com o intuito de modelar de forma aproximada o cenário proposto, usando o sistema de inferência de Takagi-Sugeno, imitando a habilidade de tomar decisões baseadas no modelo de Hamada, para um ambiente de incertezas, alcançou bons resultados na modelagem *fuzzy*. O sistema de inferência *fuzzy* mostrou ser uma técnica adequada para a predição da frente de carbonatação de estruturas em concreto na idade de 50 anos, com resultados convergentes com o banco de dados proposto, utilizando apenas de dois parâmetros de entrada para tomada de decisão.

Para o domínio dos conjuntos *fuzzy* elaborados, o modelo *fuzzy* demonstrou ser uma ferramenta que pode ser útil na tomada de decisão em projetos de estruturas duráveis, com resultados semelhantes a formulação matemática proposta por Hamada, alcançando assim o objetivo deste trabalho. Observou-se que a modelagem *fuzzy* pode ser ferramental eficiente para estudo de outros modelos matemáticos semelhantes de previsão de frente de carbonatação.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas (IFSULDEMINAS), pelo apoio a esta pesquisa.

#### REFERÊNCIAS

ABD EL AAL, A., MASOUD, A. A. Geotechnical Mapping of Najran Soils for Safe Urban Expansion, Najran Region, Saudi Arabia. *Geotechnical and Geological Engineering*, v. 36, n. 4, 2003–2020, 2018.

AL-GHANDOOR, A. An approach to energy savings and improved environmental impact through restructuring Jordan's transport sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 31–42, 2013.

ALMEIDA, S. M. Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto de cimento Portland através de ensaios de compressão simples e de frequência ressonante. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2012.

AMENDOLA, M.; SOUZA, A. d.; BARROS, L. C. Manual do uso da teoria dos conjuntos *fuzzy* no matlab 6.5. FEAGRI & IMECC/UNICAMP, p. 1–44, 2005.

ANDRADE, J. J. de O. Durabilidade das Estruturas de Concreto Armado: Análise das manifestações patológicas nas Estruturas no Estado de Pernambuco. 151 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575: Desempenho de edificações habitacionais. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

BELLUCCI, D. P. Sistemas baseados em regras *fuzzy* e aplicações. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do ABC, 2009.

BOTELHO, M. H. C.; MARCHETTI, O. Concreto armado eu te amo. 8. ed. São Paulo: Blucher, 2015.

CADORE, William Widmar *et al.* Estudo da carbonatação da camada de cobertura de protótipos de concreto com altos teores de adições minerais e cal hidratada. 2008. 149p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

CAFANGE, Daniele Maria Pilla Junqueira. Estudo de métodos e medidas auxiliares para o controle da resistência à carbonatação de concretos estruturais de cimento Portland. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

CARMONA, Thomas Garcia. Modelos de previsão da despassivação das armaduras em estruturas de concreto sujeitas à carbonatação. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

CASTELLOTE, M. *et al.* Chemical Changes and Phase Analysis of OPC Pastes Carbonated at Different CO<sub>2</sub> Concentrations. *Materials and Structures*, v. 42, n. 4, p. 515-525, 2009.

CHO, Hae-Chang *et al.* Estimation of concrete carbonation depth considering multiple influencing factors on the deterioration of durability for reinforced concrete structures. *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2016.

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.

FELIX, E. F.; CARRAZEDO, R.; POSSAN, E. Parametric analysis of carbonation process in reinforced concrete structures through Artificial Neural Networks. *Revista ALCONPAT*, v. 7, n. 3, 302-316, 2017.

GENTIL, V.; Corrosão, 6ª ed., LTC: Rio de Janeiro, 2014.

GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2007.

GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R. Modelagem, controle, sistemas e lógica *fuzzy*. *SBA controle & Automação*, v. 4, n. 3, p. 97–115, 1994.

HAMADA, H. Neutralization (Carbonation) of Concrete and Corrosion of Reinforcing Steel. *Proc. 5th Internatl. Sym. Chem. Cem, Tokyo, Japan*, v. 3, p. 343-369, 1969.

HELENE, P.; ANDRADE, T. Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. In: ISAIA, G. (Ed.). *Concreto de cimento portland*. São Paulo: IBRACON, 2010. v. 2, cap. 29, p. 945–984.

HELENE, P.R.L. Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado. 1993. 231p. Tese (Livre Docente), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Civil.

JALAL, M., GRASLEY, Z., NASSIR, N., & JALAL, H. Strength and dynamic elasticity modulus of rubberized concrete designed with ANFIS modeling and ultrasonic technique. *Construction and Building Materials*, v. 240, 117920, 2020.

LEVY, S. M.; Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria. São Paulo, 2001. p.199. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. USP.

LI, K., SU, H., CHU, J. Forecasting building energy consumption using neural networks and hybrid neuro-fuzzy system: A comparative study. *Energy and Buildings*, 43(10), 2893–2899, 2011.

LORENZI, A., REGINATO, L. A., LORENZI, L. S., SILVA FILHO, L. C. P. Emprego de ensaios não destrutivos para inspeção de estruturas de concreto. *Revista de Engenharia Civil IMED*, v. 3, n. 1, p. 3-13, 2016.

MACHADO, A. X.; MENDES, L. C. Durabilidade e vida útil de estruturas de contenção de encosta situadas na cidade do Rio de Janeiro. In: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS, 7., 2014, Rio de Janeiro. *Anais do VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas*. Rio de Janeiro: Abep, 2014. p. 1 - 10.

MEESARAGANDA, L. P.; SARKAR, N.; TARAFDER, N. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System for Predicting Strength of High-Performance Concrete. In: *Soft Computing for Problem Solving*. Springer, Singapore, p. 119-134, 2020.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais*. 3.ed. Editora: Ibracon (Instituto Brasileiro do Concreto) - São Paulo, 2014.

MENDEL, J. M. *Fuzzy logic systems for engineering: a tutorial*. *Proceedings of the IEEE*, v. 83, n. 3, p. 345-377, 1995.

MONTEMOR, M. F.; SIMÕES, A.M.P.; FERREIRA, M.G.S. Corrosion behavior of rebars in fly ash mortar exposed to carbon dioxide and chlorides. *Cement and Concrete Composites*, v. 24, n. 1, 2002.

NABAVI-PELESARAEI, A., RAFIEE, S., MOHTASEBI, S.S., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Chau, K. Integration of artificial intelligence methods and life cycle assessment to predict energy output and environmental impacts of paddy production. *Science of the Total Environment*. 631– 673, 1279–1294, 2018.

NEVILLE, A.M. *Propriedades do Concreto*. 5ª Edição. São Paulo: Editora Bookman, 2016.

NICOLETTI, M. C.; CAMARGO, H. A. *Fundamentos da teoria de conjuntos fuzzy*. São Carlos: EdUFSCar, 2013.

OLIVEIRA, C. R. de; MORENO JUNIOR, A L. Considerações sobre prova de carga em estruturas de concreto. *Rem - Revista Escola de Minas, Ouro Preto*, p.26-36, 2007.

Quadro 1 – Banco de dados baseado em Hamada

CENÁRIOS	rc	ra	rs	R	RELAÇÃO AC	TEMPO DE EXPOSIÇÃO (anos)	K	PROFUNDIDADE DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO (cm)
								Modelo de Hamada
1	1,70	1,00	1,00	1,70	0,65	50	5,81	4,99
2	1,70	1,00	0,60	1,02	0,60	50	7,22	2,68
3	1,40	1,00	0,40	0,56	0,55	50	9,33	1,30
4	1,00	1,20	1,00	1,20	0,45	50	18,75	1,96
5	1,00	1,20	1,00	1,20	0,65	50	5,81	3,52
6	1,00	2,90	0,40	1,16	0,60	50	7,22	3,05
7	1,00	3,30	1,00	3,30	0,55	50	9,33	7,64
8	2,20	1,20	0,40	1,06	0,45	50	18,75	1,72
9	1,00	2,90	0,40	1,16	0,65	50	5,81	3,40
10	1,00	2,90	1,00	2,90	0,60	50	7,22	7,63
11	1,00	2,90	0,60	1,74	0,55	50	9,33	4,03
12	1,00	2,90	0,40	1,16	0,45	50	18,75	1,89
13	1,00	3,30	1,00	3,30	0,65	50	5,81	9,68
14	1,00	3,30	0,60	1,98	0,60	50	7,22	5,21
15	1,00	3,30	0,40	1,32	0,55	50	9,33	3,06
16	1,00	3,30	1,00	3,30	0,45	50	18,75	5,39
17	0,60	2,90	0,60	1,04	0,65	50	5,81	3,06
18	0,60	1,20	0,40	0,29	0,60	50	7,22	0,76
19	0,60	1,20	0,40	0,29	0,55	50	9,33	0,67
20	1,00	1,00	0,40	0,40	0,45	50	18,75	0,65
21	0,60	1,20	0,40	0,29	0,65	50	5,81	0,84
22	0,60	1,20	1,00	0,72	0,60	50	7,22	1,89
23	0,60	1,20	0,60	0,43	0,55	50	9,33	1,00
24	0,60	1,20	0,40	0,29	0,45	50	18,75	0,47
25	0,60	2,90	1,00	1,74	0,65	50	5,81	5,10
26	0,60	2,90	0,60	1,04	0,60	50	7,22	2,75
27	0,60	2,90	0,40	0,70	0,55	50	9,33	1,61
28	0,60	2,90	1,00	1,74	0,45	50	18,75	2,84
29	0,60	3,30	0,60	1,19	0,65	50	5,81	3,48
30	0,60	3,30	0,40	0,79	0,60	50	7,22	2,08
31	0,60	3,30	1,00	1,98	0,55	50	9,33	4,58
32	0,60	3,30	0,60	1,19	0,45	50	18,75	1,94
33	1,40	1,00	0,40	0,56	0,65	50	5,81	1,64
34	1,40	1,00	1,00	1,40	0,60	50	7,22	3,68
35	1,40	1,00	0,60	0,84	0,55	50	9,33	1,94
36	1,40	1,00	0,40	0,56	0,45	50	18,75	0,91
37	2,20	1,20	1,00	2,64	0,65	50	5,81	7,74
38	1,70	1,20	0,60	1,22	0,60	50	7,22	3,22
39	1,70	1,20	0,40	0,82	0,55	50	9,33	1,89
40	1,70	1,20	1,00	2,04	0,45	50	18,75	3,33
41	1,40	2,90	0,60	2,44	0,65	50	5,81	7,14
42	1,40	2,90	0,40	1,62	0,60	50	7,22	4,27
43	1,40	2,90	1,00	4,06	0,55	50	9,33	9,40
44	1,40	2,90	0,60	2,44	0,45	50	18,75	3,98
45	1,40	3,30	0,40	1,85	0,65	50	5,81	5,42
46	1,40	3,30	1,00	4,62	0,60	50	7,22	12,15
47	1,40	3,30	0,60	2,77	0,55	50	9,33	6,42
48	1,40	3,30	0,40	1,85	0,45	50	18,75	3,02
49	2,20	1,00	1,00	2,20	0,65	50	5,81	6,45
50	2,20	1,00	0,60	1,32	0,60	50	7,22	3,47
51	2,20	1,00	0,40	0,88	0,55	50	9,33	2,04
52	2,20	1,00	1,00	2,20	0,45	50	18,75	3,59
53	2,20	1,20	0,60	1,58	0,65	50	5,81	4,65
54	2,20	1,20	0,40	1,06	0,60	50	7,22	2,78
55	2,20	1,20	1,00	2,64	0,55	50	9,33	6,11
56	2,20	1,20	0,60	1,58	0,45	50	18,75	2,59
57	2,20	2,90	0,40	2,55	0,65	50	5,81	7,48
58	2,20	2,90	1,00	6,38	0,60	50	7,22	16,78
59	2,20	2,90	0,60	3,83	0,55	50	9,33	8,86
60	2,20	2,90	0,40	2,55	0,45	50	18,75	4,17
61	1,40	3,30	1,00	4,62	0,65	50	5,81	13,55
62	2,20	2,90	0,60	3,83	0,60	50	7,22	10,07
63	2,20	2,90	0,40	2,55	0,55	50	9,33	5,91
64	2,20	2,90	1,00	6,38	0,45	50	18,75	10,42
65	1,70	1,00	0,60	1,02	0,65	50	5,81	2,99
66	1,70	1,00	0,40	0,68	0,60	50	7,22	1,79
67	1,70	1,00	1,00	1,70	0,55	50	9,33	3,93
68	1,70	1,00	0,60	1,02	0,45	50	18,75	1,67
69	1,70	1,20	0,40	0,82	0,65	50	5,81	2,39
70	1,70	1,20	1,00	2,04	0,60	50	7,22	5,37
71	1,70	1,20	0,60	1,22	0,55	50	9,33	2,83
72	1,70	1,20	0,40	0,82	0,45	50	18,75	1,33
73	1,40	2,90	1,00	4,06	0,65	50	5,81	11,91
74	1,00	2,90	0,60	1,74	0,60	50	7,22	4,58
75	1,70	3,30	0,40	2,24	0,55	50	9,33	5,19
76	1,70	1,00	1,00	1,70	0,45	50	18,75	2,78
77	1,70	3,30	0,60	3,37	0,65	50	5,81	9,87
78	1,70	3,30	0,40	2,24	0,60	50	7,22	5,90
79	1,70	3,30	1,00	5,61	0,55	50	9,33	12,98
80	1,70	3,30	0,60	3,37	0,45	50	18,75	5,50

OLIVEIRA, H., CALDEIRA, A., MACHADO, M. A., SOUZA, R., TANSCHKEIT, R. Inteligência Computacional aplicada a administração, economia e engenharia em Matlab. Rio de Janeiro, Thompson, 2007.

OLLIVIER, J.; VICHOT, A. Durabilidade do Concreto. São Paulo: Ibracon, 2014.

PACHECO, Fernanda. Investigação da relação entre os parâmetros de projeto das estruturas de concreto armado visando à durabilidade. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UNISINOS, São Leopoldo, 2016.

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation. ACI Materials Journal, v. 88, n. 4, p. 363-373, 1991.

PAULETTI, C. Análise Comparativa de Procedimentos para Ensaios Acelerados de Carbonatação. 176 f. 2004. Porto Alegre. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

PAULETTI, Cristiane. Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

PAULETTI, Cristiane; POSSAN, Edna; DAL MOLIN, Denise Carpena Coitinho. Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil. Ambiente construído: revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Porto Alegre. vol. 7, n. 4, p. 7-20, 2007.

POSSAN, Edna. Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano. 2010. 263 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

RAMOS FILHO, H. M.; DE ALENCAR, R. J. Identificação de correntes de inrush em transformadores de potência por meio da rede *neurofuzzy*. XIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2017.

REZENDE, S. O. Sistemas Inteligentes: Fundamentos e Aplicações. Barueri, SP: Editora Manole LTDA, 2003.

RIBEIRO, D. V.; SALES, A.; SOUZA, C. A. C.; ALMEIDA, F. C. R.; CUNHA, M. P. T.; LOURENÇO, M. Z.; HELENE, P. Corrosão em estruturas de concreto armado: Teoria, controle e métodos de análise. 1. ed. Rio de Janeiro, Elsevier Brasil, 2014.

SATO, N. M. N.; AGOPYAN, V. Influência da porosidade no transporte de água em concretos. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8., 2000, Salvador. Anais...Salvador: ANTAC, 2000. p. 1084 - 1091.

SHAMSHIRBAND, S., PETKOVIĆ, D., ENAYATIFAR, R., HANAN ABDULLAH, A., MARKOVIĆ, D., LEE, M., AHMAD, R. Heat load prediction in district heating systems with adaptive neuro-fuzzy method. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 48, 760–767, 2015.

SHEN, Q., PAN, G., ZHAN, H. Effect of Interfacial Transition Zone on the Carbonation of Cement-Based Materials. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 29, n. 7, 04017020, 2017.

SILVA, F. F. B. Desvendando a lógica *fuzzy*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, 2011.

SIMOES, M. G.; SHAW, I. S. Controle e modelagem *fuzzy*. São Paulo, SP: Editora Edgard Blucher - FAPESP, 2007.

Singh, R., Kainthola, A., Singh, T. Estimation of elastic constant of rocks using the ANFIS approach. Appl. Soft Comput. 12, 40–45, 2012.

TOURINO, S. R. G.; Guiagem do Robô Móvel XR4000 para Inspeção via Internet de Tubulações Industriais Soldadas. Relatório de Projeto de Graduação. Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília. Brasília, 2000. Disponível em: <http://www.graco.unb.br>. Acessado em: 17 ago, 2004.

VAGHETTI, Marcos Alberto Oss. Estudo da corrosão do aço, induzida por carbonatação, em concretos com adições minerais. 2005. 264p. Tese (Doutorado em Engenharia), Escola de Engenharia da UFRGS, Departamento de Metalurgia, Porto Alegre, 2005.

VALIN JUNIOR, M. de O, Almeida, E. S., DA SILVA, P. P., DOS SANTOS SANTIAGO, R. Aplicação de Ensaios Não Destrutivos de Concreto Para Avaliação Estrutural da Fundação de Torre de Linha de Transmissão. E&S Engineering and Science, v. 6, n. 2, p. 46-59, 2017.

81	1,90	1,00	0,40	0,76	0,65	50	5,81	2,23
82	1,90	1,00	1,00	1,90	0,60	50	7,22	5,00
83	1,90	1,00	0,60	1,14	0,55	50	9,33	2,64
84	1,90	1,00	0,40	0,76	0,45	50	18,75	1,24
85	1,90	1,20	1,00	2,28	0,65	50	5,81	6,69
86	1,90	1,20	0,60	1,37	0,60	50	7,22	3,60
87	1,90	1,20	0,40	0,91	0,55	50	9,33	2,11
88	1,90	1,20	1,00	2,28	0,45	50	18,75	3,72
89	1,90	1,20	0,60	1,37	0,65	50	5,81	4,01
90	2,20	2,90	0,40	2,55	0,60	50	7,22	6,71
91	3,30	2,90	1,00	9,57	0,55	50	9,33	22,15
92	0,60	2,90	0,60	1,04	0,45	50	18,75	1,70
93	0,60	3,30	0,40	0,79	0,65	50	5,81	2,32
94	1,70	3,30	1,00	5,61	0,60	50	7,22	14,76
95	1,70	3,30	0,60	3,37	0,55	50	9,33	7,79
96	1,90	2,90	0,40	2,20	0,45	50	18,75	3,60
97	2,20	2,90	1,00	6,38	0,65	50	5,81	18,71
98	2,20	1,20	0,60	1,58	0,60	50	7,22	4,17
99	1,40	3,30	0,40	1,85	0,55	50	9,33	4,28
100	1,70	3,30	1,00	5,61	0,45	50	18,75	9,16
101	2,20	3,30	0,60	4,36	0,65	50	5,81	12,78
102	2,20	3,30	0,40	2,90	0,60	50	7,22	7,64
103	2,20	3,30	1,00	7,26	0,55	50	9,33	16,80
104	2,20	3,30	0,60	4,36	0,45	50	18,75	7,11
105	2,20	3,30	0,40	2,90	0,65	50	5,81	8,52
106	2,20	3,30	1,00	7,26	0,60	50	7,22	19,10
107	2,20	3,30	0,60	4,36	0,55	50	9,33	10,08
108	2,20	3,30	0,40	2,90	0,45	50	18,75	4,74
109	2,20	3,30	1,00	7,26	0,65	50	5,81	21,29
110	2,20	3,30	0,60	4,36	0,60	50	7,22	11,46
111	2,20	3,30	0,40	2,90	0,55	50	9,33	6,72
112	2,20	3,30	1,00	7,26	0,45	50	18,75	11,86
113	1,90	3,30	0,60	3,76	0,65	50	5,81	11,03
114	1,90	3,30	0,40	2,51	0,60	50	7,22	6,60
115	1,90	3,30	1,00	6,27	0,55	50	9,33	14,51
116	1,90	3,30	0,60	3,76	0,45	50	18,75	6,14
117	1,90	3,30	0,40	2,51	0,65	50	5,81	7,36
118	1,90	3,30	1,00	6,27	0,60	50	7,22	16,49
119	1,90	3,30	0,60	3,76	0,55	50	9,33	8,71
120	1,90	3,30	0,40	2,51	0,45	50	18,75	4,10
121	1,90	2,90	1,00	5,51	0,65	50	5,81	16,16
122	1,90	2,90	0,60	3,31	0,60	50	7,22	8,70
123	1,90	2,90	0,40	2,20	0,55	50	9,33	5,10
124	1,90	2,90	1,00	5,51	0,45	50	18,75	9,00
125	1,90	2,90	0,60	3,31	0,65	50	5,81	9,70
126	1,90	2,90	0,40	2,20	0,60	50	7,22	5,80
127	1,90	2,90	1,00	5,51	0,55	50	9,33	12,75
128	1,90	2,90	0,60	3,31	0,45	50	18,75	5,40
129	1,70	3,30	0,40	2,24	0,65	50	5,81	6,58
130	1,40	2,90	1,00	4,06	0,60	50	7,22	10,68
131	1,40	2,90	0,40	1,62	0,55	50	9,33	3,76
132	1,40	2,90	0,40	1,62	0,45	50	18,75	2,65
133	1,70	2,90	1,00	4,93	0,65	50	5,81	14,46
134	1,70	2,90	0,60	2,96	0,60	50	7,22	7,78
135	1,70	2,90	0,40	1,97	0,55	50	9,33	4,56
136	1,70	2,90	1,00	4,93	0,45	50	18,75	8,05
137	1,70	2,90	0,60	2,96	0,65	50	5,81	8,68
138	1,70	2,90	0,40	1,97	0,60	50	7,22	5,19
139	1,70	2,90	1,00	4,93	0,55	50	9,33	11,41
140	1,70	2,90	0,60	2,96	0,45	50	18,75	4,83
141	1,70	2,90	0,40	1,97	0,65	50	5,81	5,78
142	1,70	2,90	1,00	4,93	0,60	50	7,22	12,97
143	1,70	2,90	0,60	2,96	0,55	50	9,33	6,85
144	1,70	2,90	0,40	1,97	0,45	50	18,75	3,22
145	1,70	1,20	1,00	2,04	0,65	50	5,81	5,98

146	3,30	1,20	0,60	2,38	0,60	50	7,22	6,25
147	1,00	1,20	0,40	0,48	0,55	50	9,33	1,11
148	2,20	1,20	1,00	2,64	0,45	50	18,75	4,31
149	1,40	1,20	0,60	1,01	0,65	50	5,81	2,96
150	1,40	1,20	0,40	0,67	0,60	50	7,22	1,77
151	1,40	1,20	1,00	1,68	0,55	50	9,33	3,89
152	1,40	1,20	0,60	1,01	0,45	50	18,75	1,65
153	1,40	1,20	0,40	0,67	0,65	50	5,81	1,97
154	1,40	1,20	1,00	1,68	0,60	50	7,22	4,42
155	1,40	1,20	0,60	1,01	0,55	50	9,33	2,33
156	1,40	1,20	0,40	0,67	0,45	50	18,75	1,10
157	1,40	1,20	1,00	1,68	0,65	50	5,81	4,93
158	1,40	1,20	0,60	1,01	0,60	50	7,22	2,65
159	1,40	1,20	0,40	0,67	0,55	50	9,33	1,56
160	1,40	1,20	1,00	1,68	0,45	50	18,75	2,74
161	1,00	1,20	0,60	0,72	0,65	50	5,81	2,11
162	1,00	1,20	0,40	0,48	0,60	50	7,22	1,26
163	1,00	1,20	1,00	1,20	0,55	50	9,33	2,78
164	1,00	1,20	0,60	0,72	0,45	50	18,75	1,18
165	1,00	1,20	0,40	0,48	0,65	50	5,81	1,41
166	1,00	1,20	1,00	1,20	0,60	50	7,22	3,16
167	1,00	1,20	0,60	0,72	0,55	50	9,33	1,67
168	1,00	1,20	0,40	0,48	0,45	50	18,75	0,78
169	1,00	1,00	1,00	1,00	0,65	50	5,81	2,93
170	1,40	1,00	0,60	0,84	0,60	50	7,22	2,21
171	1,00	1,00	0,40	0,40	0,55	50	9,33	0,93
172	1,00	1,00	1,00	1,00	0,45	50	18,75	1,63
173	2,20	1,00	0,60	1,32	0,65	50	5,81	3,87
174	1,00	1,00	0,40	0,40	0,60	50	7,22	1,05
175	1,00	1,00	1,00	1,00	0,55	50	9,33	2,31
176	1,40	1,00	0,60	0,84	0,45	50	18,75	1,37
177	2,20	1,00	0,40	0,88	0,65	50	5,81	2,58
178	1,70	1,00	1,00	1,70	0,60	50	7,22	4,47
179	0,60	2,90	0,60	1,04	0,55	50	9,33	2,42
180	0,60	3,30	0,40	0,79	0,45	50	18,75	1,29
181	0,60	1,00	1,00	0,60	0,65	50	5,81	1,76
182	0,60	1,00	0,60	0,36	0,60	50	7,22	0,95
183	0,60	1,00	0,40	0,24	0,55	50	9,33	0,56
184	0,60	1,00	1,00	0,60	0,45	50	18,75	0,98
185	0,60	1,00	0,60	0,36	0,65	50	5,81	1,06
186	0,60	1,00	0,40	0,24	0,60	50	7,22	0,63
187	0,60	1,00	1,00	0,60	0,55	50	9,33	1,39
188	0,60	1,00	0,60	0,36	0,45	50	18,75	0,59
189	0,60	1,00	0,40	0,24	0,65	50	5,81	0,70
190	0,60	1,00	1,00	0,60	0,60	50	7,22	1,58
191	0,60	1,00	0,60	0,36	0,55	50	9,33	0,83
192	0,60	1,00	0,40	0,24	0,45	50	18,75	0,39

Fonte: Elaborado pelos autores.