

Ana Carolina Virmond Portela Giovannetti

**METODOLOGIA PARA COMPARAR O ESTADO DE  
CONSERVAÇÃO DE PONTES BASEADA NA NBR9452/2016 E  
UTILIZANDO SISTEMA *FUZZY***

Tese submetido(a) ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de doutora em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Ph.D. Roberto Caldas de Andrade Pinto.

Florianópolis  
2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária  
da UFSC.

Giovannetti, Ana Carolina Virmond Portela

Metodologia para Comparar o Estado de Conservação de Pontes Baseada na NBR9452/2016 e Utilizando Sistema *Fuzzy* / Ana Carolina Virmond Portela Giovannetti ; orientador, Roberto Caldas de Andrade Pinto. 2019.

178 p.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2019.

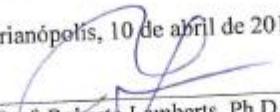
Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Obras de Arte Especiais. 3. Pontes.. 4. Avaliação 5. Sistema *Fuzz*. I. Pinto, Roberto Caldas de Andrade. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos. III. Título.

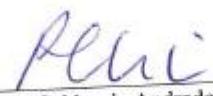
**ANA CAROLINA VIRMOND PORTELA GIOVANNETTI**  
**METODOLOGIA PARA COMPARAR O ESTADO DE CONSERVAÇÃO DE**  
**PONTES BASEADA NA NBR9452/2016 E UTILIZANDO SISTEMA FUZZY**

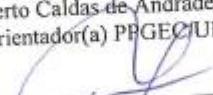
Esta tese foi julgada adequada para obtenção do título de  
Doutora em Engenharia Civil, e aprovada em sua forma final pelo  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFSC.

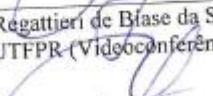
Florianópolis, 10 de abril de 2019.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Roberto Lamberts, Ph.D.  
Coordenador *pro tempore* PPGEC/UFSC

**Banca Examinadora:**

  
\_\_\_\_\_  
Prof.º Roberto Caldas de Andrade Pinto, Ph.D.  
Orientador(a) PPGEC/UFSC

  
\_\_\_\_\_  
Prof.ª Myriam Regattieri de Biase da Silva Delgado, Dr.ª  
UTFPR (Videoconferência)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Moacir Kripka, Dr.  
UPF (Videoconferência)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Ivó José Palaratz, Ph.D.  
Consultor

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Rafael Holdorf Lopez, Dr.  
UFSC

  
\_\_\_\_\_  
Prof.ª Angela do Valle, Dr.ª  
UFSC





Este trabalho é dedicado a Deus e aos meus queridos pais.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por permitir, me dar forças e me guiar nesta jornada.

Aos meus pais e irmão que sempre me incentivaram e apoiaram.

À Universidade Federal de Santa Catarina, seu corpo docente e administração pela oportunidade e auxílio ao longo destes anos.

Ao meu orientador e aos professores da banca pelas observações e correções.

Aqueles que atenciosamente responderam aos questionários e forneceram informações para os mesmos.

Aos amigos e colegas que pacientemente estiveram ao meu lado e me ajudaram.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, portanto agradeço a CAPES por este apoio.



Engenheiro é aquele que planeja, projeta e  
executa sonhos.  
(Ana Carolina V. P. Giovannetti).



## RESUMO

As Obras de Arte Especiais (OAEs) são parte importante da malha rodoviária de um país, portanto a garantia de sua segurança exige uma posição de destaque. Sendo que, existem diversas OAEs no território nacional, há a necessidade de, além de inspecioná-las e classificá-las, priorizar aquelas com maior urgência de intervenção. Com o intuito de realizar estas duas primeiras etapas, foi desenvolvida a NBR9452/2016, no entanto, a terceira etapa ainda precisa ser aprimorada. Neste contexto, surge esta tese, a qual desenvolveu uma metodologia que pode comparar, diretamente, as OAEs avaliadas segundo os três critérios da NBR9452/2016, estrutural, funcional e durabilidade. Desta maneira, foi desenvolvida uma metodologia, que considera a forma de raciocínio do ser humano, para gerar uma única nota capaz de comparar as diferentes obras e priorizá-las. Para este fim, utilizou-se de sistemas *fuzzy* e de avaliações (por meio de fotografias e descrições) realizadas por 30 profissionais experientes neste campo de atuação. Com este estudo, foi possível compreender o raciocínio utilizado pelo inspetor na avaliação de uma OAE, ao considerar os três critérios da NBR9452/2016 para priorização das obras. Desta maneira obteve-se um sistema que apresentou uma priorização das obras bem próxima a obtida pelos especialistas.

**Palavras-chave:** Obras de Arte Especiais. Pontes. Avaliação. Sistema *Fuzzy*.



## ABSTRACT

Bridges are an important part of a country's road network, so ensuring its safety should be a priority. Since there are several bridges in the national territory, besides inspecting and classifying them, there is a need to prioritize those with greater urgency of intervention. In order to perform these two steps, the NBR9452/2016 was developed, however, the prioritization still needs to be improved. As a result, this research develops a methodology that can directly compare the evaluations done according to this standard, which makes use of three criteria, structural, functional and durability. Thus, it was developed a methodology, which takes into consideration the form of human's reasoning, to generate a single note capable of ranking the different bridges. For this purpose, it made use of the *fuzzy* system and evaluations (done through photographs and descriptions) performed by 30 experienced professionals in this field. With this study, it was possible to understand the logic used by the inspector in the evaluation of a bridge, when considering the three criteria of NBR9452 / 2016 to prioritize these constructions. In doing so, a ranking system was obtained, which presented results very close to those obtained through the questionnaires.

**Keywords:** Bridges. Evaluation. *Fuzzy* system.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 - Custos da inspeção visual.....	31
Figura 2-2 - Principais defeitos encontrados em OAEs no Paraná.....	44
Figura 2-3 - Principais problemas detectados em pontes em oito rodovias brasileiras. ....	44
Figura 2-4 - Principais manifestações patológicas em OAEs no estado de Pernambuco.....	45
Figura 2-5 - Principais defeitos em OAEs no estado de Pernambuco...	46
Figura 2-6 – Infiltração (lixiviação). ....	47
Figura 2-7 - Eflorescência .....	47
Figura 2-8 - Deslocamento do concreto.....	47
Figura 2-9 - Exposição da armadura. ....	48
Figura 2-10 - Defeito na junta de dilatação.....	48
Figura 2-11 - Estado de conservação de OAEs brasileiras.....	49
Figura 2-12 - Estado de conservação de OAEs de acordo com a metodologia da NBR 9452 (2016). ....	50
Figura 3-1 – Esquema sobre ignorância em informações.....	53
Figura 3-2 - Estrutura do Sistema de Inferência <i>Fuzzy</i> . ....	57
Figura 3-3 - Função Triangular. ....	58
Figura 3-4 - Função Trapezoidal.....	58
Figura 3-5 - Função Gaussiana.....	58
Figura 3-6 - Função de pertinência A dos números próximos de 2.....	60
Figura 3-7 - Função de pertinência B dos números próximos de 2.....	60
Figura 3-8 - Função de pertinência C dos números próximos de 2.....	61
Figura 3-9 - Defuzzificação pela média dos máximos. ....	63
Figura 3-10 - Defuzzificação pelo centro de gravidade. ....	63
Figura 3-11 - $A=B$ .....	65
Figura 3-12 - $B \subset A$ .....	65
Figura 3-13 - $A \cup B$ . ....	66
Figura 3-14 - $A \cap B$ . ....	66
Figura 3-15 - $A^{-1}$ .....	67
Figura 3-16 - Função de pertinência para a quantidade de dinheiro.....	68
Figura 3-17 - Função de pertinência para o número de pessoas envolvidas. ....	68
Figura 3-18 - Regra 1. ....	69
Figura 3-19 - Regra 2. ....	70
Figura 3-20 - Regra 3. ....	70
Figura 3-21 - Defuzzificação.....	71
Figura 3-22 - Função de pertinência para as consequências. ....	73
Figura 3-23 - Função de pertinência da probabilidade de falha. ....	74

Figura 3-24 - Função de pertinência para a importância dos critérios. .	75
Figura 3-25 - Função de pertinência de deslocamento. ....	76
Figura 3-26 - Função de pertinência de fissuras. ....	76
Figura 3-27 - Função de pertinência de delaminação. ....	77
Figura 3-28 - Função de pertinência e teste com martelo. ....	77
Figura 3-29 - Função de pertinência da probabilidade de corrosão. ....	77
Figura 3-30 - Função de pertinência da probabilidade de corrosão. ....	78
Figura 3-31 - Histograma de corrosão e fissuras.....	80
Figura 3-32 - Funções de pertinência para corrosão e fissuras. ....	81
Figura 3-33 - Funções de pertinência para abertura de fissuras. ....	83
Figura 4-1 - Processo de definição do sistema <i>fuzzy</i> . ....	87
Figura 4-2 - Funções de pertinência dos critérios de entrada.....	88
Figura 4-3 - Sistema <i>fuzzy</i> criado inicialmente. ....	89
Figura 4-4 - Ativação das regras simuladas. ....	91
Figura 4-5 - Classificação dos profissionais que responderam as avaliações simuladas. ....	92
Figura 4-6 - Problema gerado pela defuzzificação.....	98
Figura 4-7 -Resultado da inferência com as regras com pesos iguais...	98
Figura 4-8 - Resultado da inferência com as regras com pesos diferentes .....	98
Figura 4-9 - Funções de Pertinência da saída do sistema.....	99
Figura 5-1 - Ativação de oito regras. ....	107
Figura 5-2 - OAE 23. ....	109
Figura 5-3 - Classificação dos inspetores que responderam aos questionários reais.....	110
Figura 5-4 - Gráfico das médias das avaliações por obra. ....	114
Figura 5-5 - Grupos de proximidades de notas. ....	119
Figura 5-6 - Variação na priorização. ....	126
Figura 5-7 - Variação considerando a NGS ou a menor nota. ....	127

## LISTA DE QUADROS

Quadro 4-1 - Parte "se" das regras. ....	90
Quadro 5-1 - Regras ativadas pelas médias por obra. ....	116



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 - Frequência dos diferentes tipos de inspeção.....	33
Tabela 2-2 - Classificação dos Inspetores .....	34
Tabela 2-3 - Classificação segundo o DNIT. ....	36
Tabela 2-4 - Classificação de pontes de acordo com NBR 9452 (2016). .....	38
Tabela 2-5 - Sistema de classificação utilizado na Eslovênia .....	41
Tabela 3-1 - Média dos coeficientes de importância.....	72
Tabela 3-2 - Estado e condição dos danos.....	79
Tabela 3-3 - Classificação e descrição dos danos. ....	79
Tabela 3-4 - Exemplo de questão. ....	81
Tabela 4-1 - Variáveis das funções de pertinência de entrada .....	89
Tabela 4-2 - Média das avaliações simuladas e respectivos desvios padrões. ....	93
Tabela 4-3 - Diferenças máximas e médias para os casos de 1A à 1C..	95
Tabela 4-4 - Valores finais das funções de pertinência da saída do sistema. .....	99
Tabela 4-5 - Exemplo de regras ativadas para cada entrada.....	100
Tabela 4-6 - Regras finais. ....	100
Tabela 4-7 - Resultado das avaliações simuladas pelo sistema aferido. .....	104
Tabela 5-1 - Média das notas fornecidas por obra .....	111
Tabela 5-2 - Variações nas avaliações reais .....	112
Tabela 5-3 - Influência dos critérios na NG .....	115
Tabela 5-4 - Média das avaliações por obra.....	117
Tabela 5-5 - Médias das avaliações por grupo de notas.....	120
Tabela 5-6 - Média das avaliações por grupo.....	122



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
COST - Cooperação europeia na área de pesquisa científica e tecnológica  
CREA – Conselho Regional de Engenharia e Agronomia  
DER – Departamento de Estradas de Rodagem  
DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte  
DM – Diferença máxima  
D – Durabilidade  
E – Estrutural  
F – Funcional  
FST – *fuzzy set theory*  
FDP – Função de Pertinência  
MD – Máxima diferença  
MNG – Média das Notas Gerais obtidas nos questionários.  
NBR – Normas Brasileiras  
NG – Nota Geral  
NGS – Nota Geral do Sistema criado  
OAE – Obra de Arte Especial  
PROARTE – Programa de Reabilitação de Obras de Arte Especiais



## LISTA DE SÍMBOLOS

$\mu(x)$  - Função de Pertinência;

$z^*$  - Valor defuzzificado que corresponde à média dos máximos do conjunto *fuzzy*;

$\bar{X}$  - Valor defuzzificado que corresponde ao centro de gravidade (centroide) do conjunto *fuzzy*;

$\equiv$  - Comparação entre conjuntos *fuzzy*;

$\subset$  - Contido, inclusão de conjuntos *fuzzy*;

$\cup$  - União de conjuntos *fuzzy*;

$\cap$  - Interseção de conjuntos *fuzzy*;

$A^{-1}$  - Complemento do conjunto *fuzzy* A;



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>27</b>
1.1	Justificativa e Aspectos de Ineditismo .....	28
1.2	Objetivos .....	29
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo Principal</b> .....	<b>29</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>30</b>
1.3	Estrutura da tese .....	30
<b>2</b>	<b>INSPEÇÃO DE OAES</b> .....	<b>31</b>
2.1	Tipos de Inspeção.....	32
2.2	Capacitação dos Inspetores .....	34
2.3	Métodos de Avaliação Utilizados no Brasil .....	35
2.4	Métodos de Avaliação Utilizados em Outros Países.....	40
<b>2.4.1</b>	<b>Dinamarca</b> .....	<b>40</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Eslovênia</b> .....	<b>40</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Estados Unidos da América</b> .....	<b>42</b>
<b>2.4.4</b>	<b>França</b> .....	<b>42</b>
<b>2.4.5</b>	<b>Noruega</b> .....	<b>42</b>
<b>2.4.6</b>	<b>Comparação dos diferentes métodos</b> .....	<b>43</b>
2.5	Principais Defeitos em OAEs de Concreto Armado .....	43
2.6	Estado de Conservação das OAES Brasileiras.....	48
<b>3</b>	<b>INCERTEZAS PRESENTES NO SISTEMA DE</b>	
	<b>AVALIAÇÃO DE OAES</b> .....	<b>53</b>
3.1	Lógica <i>Fuzzy</i> e conjuntos <i>fuzzy</i> .....	54
3.2	Estrutura do Sistema de Inferência <i>Fuzzy</i> .....	56
<b>3.2.1</b>	<b>Fuzzificação</b> .....	<b>57</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Inferência <i>Fuzzy</i></b> .....	<b>61</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Defuzzificação</b> .....	<b>62</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Considerações</b> .....	<b>64</b>
3.3	Operações básicas da Lógica <i>Fuzzy</i> .....	64
<b>3.3.1</b>	<b>Comparação</b> .....	<b>64</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Inclusão</b> .....	<b>65</b>
<b>3.3.3</b>	<b>União</b> .....	<b>65</b>
<b>3.3.4</b>	<b>Interseção</b> .....	<b>66</b>
<b>3.3.5</b>	<b>Complemento</b> .....	<b>67</b>
3.4	Exemplo de utilização da Lógica <i>Fuzzy</i> .....	67
3.5	Conjuntos e Sistemas <i>Fuzzy</i> Aplicados em estruturas.....	71
3.6	Considerações .....	84

<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA FUZZY .....</b>	<b>87</b>
4.1	Parâmetros do sistema <i>Fuzzy</i> .....	88
<b>4.1.1</b>	<b>Definição dos parâmetros iniciais.....</b>	<b>88</b>
4.2	Avaliação simulada.....	90
<b>4.2.1</b>	<b>Resultado dos questionários simulados.....</b>	<b>92</b>
4.3	Definição final do sistema fuzzy.....	94
<b>4.3.1</b>	<b>Testes de diferentes defuzzificações .....</b>	<b>94</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Ajuste nas Funções de pertinência da saída .....</b>	<b>97</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Ajuste nas regras.....</b>	<b>99</b>
<b>5</b>	<b>AVALIAÇÃO DO SISTEMA .....</b>	<b>107</b>
5.1	Inspetores .....	109
5.2	Resultados dos questionários de avaliações reais .....	110
<b>5.2.1</b>	<b>Análise do Raciocínio do inspetor ao avaliar uma OAE</b>	<b>113</b>
5.3	Avaliação do sistema criado .....	115
<b>5.3.1</b>	<b>Média das avaliações por obra.....</b>	<b>116</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Avaliação por proximidade de nota .....</b>	<b>119</b>
<b>5.3.3</b>	<b>Variação na classificação.....</b>	<b>124</b>
<b>5.3.4</b>	<b>Avaliação Final do Sistema <i>Fuzzy</i> Criado.....</b>	<b>127</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>129</b>
6.1	Trabalhos futuros .....	130
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>133</b>
	<b>APÊNDICE A – Questionários Simulados .....</b>	<b>139</b>
	<b>APÊNDICE B – Descrição das obras avaliadas .....</b>	<b>143</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As pontes, pontilhões, viadutos e passarelas são designados como obras de arte especiais (OAEs) e possuem a finalidade de transpor obstáculos. Estas estruturas se diferenciam em relação ao seu comprimento, sua utilização por veículos ou pedestres e em função do obstáculo que atravessam. Estas OAEs, assim como todas as estruturas, sofrem degradação ao longo do tempo, necessitando de manutenções para que possam continuar cumprindo suas funções com segurança.

Nos últimos anos, a falta de manutenção destas obras ou sua execução incorreta causaram diversos acidentes, fato que norteou as discussões sobre esse assunto na comunidade técnica e no governo (MOSCOSO, 2017). Desta maneira, no X Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, realizado em 2018 no Rio de Janeiro, apresentou-se um seminário específico sobre o assunto, no qual alguns dos maiores especialistas da área puderam palestrar e debater. Neste seminário foram apresentadas as principais falhas em estruturas de pontes, mostrados exemplos reais das mesmas, e o Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (DNIT) apresentou os fundamentos do seu Programa de Reabilitação de Obras de Arte Especiais (PROARTE) ainda, então, em desenvolvimento.

Considerando que os recursos materiais e financeiros são finitos, exalta-se a importância da conservação das Obras de Arte Especiais existentes, utilizando-se, para isso, um sistema confiável e integrado de fiscalização, avaliação e manutenção dessas obras. Portanto, para identificar as manutenções necessárias em uma estrutura e evitar o agravamento dos seus defeitos, devem ser realizadas inspeções periódicas.

Assim sendo, visando ao aprimoramento desse processo de conservação, em 2016, a NBR 9452 (2016) - Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto – Procedimento - foi atualizada. Visando aprimorar a descrição das condições da obra, esta norma apresenta três critérios nos quais o inspetor deve classificar a obra: estrutural (E), funcional (F) e durabilidade (D). Portanto, ao final da avaliação, a cada OAE são atribuídas três notas.

Para que os recursos sejam corretamente direcionados, existe a necessidade de comparação direta entre as diferentes obras, logo, esta pode ser facilitada pela criação de uma quarta nota que represente a obra de forma geral. Para isso, faz-se necessária a criação de um sistema que possa fazer esta comparação, levando em consideração os critérios estipulados pela NBR 9452 (2016).

Além disso, durante as inspeções, o inspetor emite um diagnóstico sobre o estado de conservação da estrutura. O inspetor, portanto, introduz no processo de avaliação uma parcela subjetiva, relacionada à sua experiência, seus conhecimentos, ao seu raciocínio e linguagem utilizados (DENG; HU; DENG, 2014). Ao final da inspeção, a estrutura é geralmente classificada de forma qualitativa como: “excelente”, “muito boa”, “boa”, “ruim” ou “muito ruim”. Estas terminologias, que podem ser consideradas vagas e imprecisas, no entanto, são naturais do raciocínio humano e de sua própria linguagem. Sendo assim, uma ferramenta que pode ser utilizada para considerar estas incertezas é o sistema *fuzzy*, pois assim, como afirma Delgado (2002), a característica primordial deste sistema seria a sua capacidade de trabalhar com informações imprecisas.

De acordo com Chen (2009), nos últimos anos, a técnica de conjunto *fuzzy* provou ser muito útil para avaliação do estado de conservação das pontes, já que incertezas são inerentes ao processo de avaliação. De mesma forma, Sasmal *et al.* (2006) afirmam que a utilização de um sistema de gerenciamento de pontes e a precisão da sua classificação dependem dos dados relativos à condição da ponte que, por sua vez, dependem do julgamento subjetivo e da intuição do inspetor. Conseqüentemente, o mesmo autor relata que sistemas *fuzzy* são uma ferramenta útil para lidar com esta incerteza, imprecisão e julgamento impreciso.

Por esta razão, esta pesquisa alia sistemas *fuzzy* com os dados proveniente das inspeções segundo a NBR 9452 (2016), referentes às avaliações em relação ao estado estrutural, funcional e durabilidade, para gerar um sistema capaz de auxiliar a comparação entre diferentes obras.

## 1.1 JUSTIFICATIVA E ASPECTOS DE INEDITISMO

Todas as estruturas estão sujeitas a degradação e as Obras de Arte Especiais não se excluem desse efeito. Tendo em vista a importância e o tamanho dessas obras, percebe-se a necessidade da realização de inspeções com o intuito de avaliar e classificar o estado de conservação dessas. Para que, então, seja possível traçar um plano de manutenção, recuperação, reabilitação e/ou reforço dessas estruturas e garantir a segurança dos usuários, evitando a sua ruína e colapso.

Sendo assim, algumas formas de estimar a deterioração de pontes, prever a evolução de sua condição e efetuar o gerenciamento das mesmas têm sido desenvolvidas e continuam até hoje sendo assunto presente em vários trabalhos. Para essas estimativas é necessária a realização de uma

inspeção na obra, com o intuito de que o inspetor possa observar o real estado de conservação dessas obras. Com essa inspeção, o profissional responsável classifica a obra nas três categorias estipuladas pela NBR 9452 (2016) (estrutural, funcional, durabilidade). No entanto, para a comparação de todas as obras do sistema rodoviário brasileiro, torna-se interessante a criação de uma metodologia que possa facilitar a comparação direta destas obras.

Ressalta-se que, as avaliações realizadas atualmente pelo Departamento Nacional de Infraestrutura (DNIT, 2004b) ainda seguem seu próprio manual, o qual fornece instruções para a avaliação das obras com uma única nota geral, o que se diferencia das recomendações da NBR 9452 (2016). Desta maneira, os inspetores brasileiros estão habituados a avaliação por uma única nota, assim como os pesquisadores que vêm desenvolvendo pesquisas e metodologias que partem de uma única nota vinda da inspeção. Portanto, os resultados desta pesquisa, além de permitir a comparação das obras avaliadas pela nova norma, ainda, possibilita o emprego das diversas metodologias desenvolvidas e em desenvolvimento.

Buscando aprimorar o sistema, assim desenvolvido, as imprecisões intrínsecas ao raciocínio do inspetor são consideradas através do uso de sistemas *fuzzy*. Além do mais, pode-se aprimorar este sistema pelo emprego do conhecimento de diferentes profissionais, experientes na área, o que foi a proposta desta tese.

Sendo assim, essa pesquisa desenvolveu uma forma de comparação entre diferentes obras, considerando as avaliações definidas pela NBR 9452 (2016), e, também, a forma de raciocínio do inspetor de pontes, e suas imprecisões. Com essa tese, foi possível demonstrar como funciona o raciocínio do inspetor ao avaliar uma OAE em função do seu estado estrutural, funcional e durabilidade, visando entender quais são os critérios mais relevantes durante a avaliação.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Principal

Desenvolver uma metodologia que possa comparar as diferentes OAEs avaliadas segundo os critérios da NBR 9452 (2016), utilizando-se de um sistema calibrado pelos conhecimentos de diferentes inspetores experientes nesta área e que, adicionalmente, considere as incertezas da linguagem empregada.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- a. Propor um modelo para as funções de pertinência das avaliações estruturais, funcionais e durabilidade e nota geral;
- b. Desenvolver e calibrar um modelo em função das considerações de profissionais com experiência na área;
- c. Analisar, no modelo proposto, a importância de cada critério da NBR 9452 (2016) na priorização de uma obra;
- d. Definir um sistema para priorização de intervenção em OAEs.

### 1.3 ESTRUTURA DA TESE

Essa tese está estruturada em sete capítulos, incluindo a introdução e as referências bibliográficas.

Inicia-se este trabalho pela introdução, no Capítulo 1, contendo as explicações iniciais do trabalho, objetivos e justificativa de ineditismo. Em seguida, no Capítulo 2 consta a revisão bibliográfica referente as inspeções de Obras de Arte Especiais, apresentando as principais manifestações patológicas presentes neste tipo de obra, assim como, as metodologias utilizadas para sua classificação.

O conceito de incerteza e imprecisão, assim como a explicação sobre sistema *fuzzy* e sua utilização na engenharia de estruturas são apresentados no Capítulo 3. Finalmente, no Capítulo 4 é apresentado o desenvolvimento do sistema *fuzzy* utilizado e no Capítulo 5 apresentam-se as avaliações realizadas neste mesmo sistema. Completando com as conclusões no Capítulo 6 seguido das referências, e dos apêndices, os quais são compostos pela descrição das obras avaliadas.

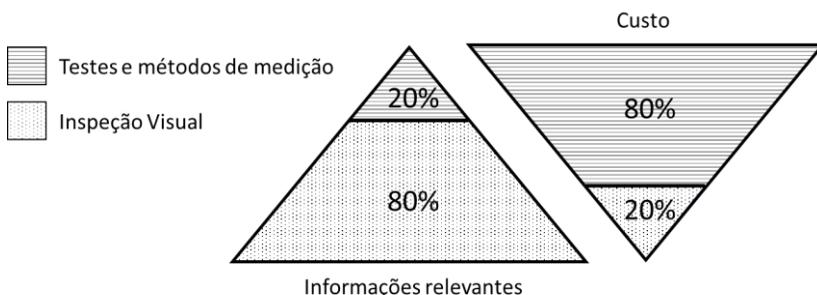
## 2 INSPEÇÃO DE OAES

A inspeção de uma Obra de Arte Especial é composta por uma série de procedimentos técnicos planejados com o objetivo de determinar o seu estado de conservação. As inspeções devem ser cuidadosamente e periodicamente executadas, pois, possibilitam a identificação de danos. Segundo a cooperação europeia na área de pesquisa científica e tecnológica (COST 345, 2007), faz-se importante realizar inspeções em Obras de Arte Especiais, a fim de, garantir o bom funcionamento da estrutura, mantendo sua funcionalidade com segurança para os usuários e verificar a necessidade de intervenção.

Após definido o roteiro de inspeção, busca-se anotar todo e qualquer detalhe a respeito da estrutura e seu comportamento durante o uso. Além disso, é imprescindível a realização de um relatório fotográfico detalhado contendo as descrições claras das anomalias e o diagnóstico final da vistoria, representando o mais fielmente possível a realidade da estrutura (VITÓRIO, 2002).

Pode-se enfatizar a realização das inspeções visuais, pois, estas representam 20% dos custos totais de uma inspeção e trazem cerca de 80% das informações relevantes para uma avaliação (FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON, 2002), conforme apresentado na Figura 2-1. As inspeções visuais apresentam uma ótima relação de custo benefício, e, portanto, devem ser devidamente valorizadas.

Figura 2-1 - Custos da inspeção visual.



Fonte: Adaptado de Fédération Internationale Du Béton, 2002.

Antes da realização de uma inspeção, esta deve ser programada em função das causas que resultaram na necessidade de sua realização, para isso, as mesmas são divididas em diferentes tipos. Além de serem

especificados diferentes tipos de inspeção, também existem critérios para a determinação dos profissionais capacitados a realizá-las.

## 2.1 TIPOS DE INSPEÇÃO

A normatização brasileira, NBR 9452 (2016), classifica as inspeções em quatro tipos: cadastral, rotineira, especial e extraordinária. Ainda, define critérios para a realização de inspeção submersa, a qual corresponde a uma inspeção especial ou extraordinária, dependendo da razão pela qual foi necessária. Estas inspeções são semelhantes às europeias (COST 345, 2007) e às adotadas pelo Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias do DNIT (2004b), o qual prevê ainda, outro tipo de inspeção: a inspeção intermediária.

A inspeção cadastral deve ser realizada logo após o término da construção ou após alterações em suas configurações, como alargamentos, por exemplo. Esta inspeção registra as informações de projeto e da construção da Obra de Arte Especial analisada (NBR9452, 2016).

Já a inspeção rotineira consiste em uma inspeção visual, que, de acordo com a NBR 9452 (2016), deve ser realizada em um tempo inferior a um ano, enquanto o manual do DNIT (2004b) permite um tempo inferior a dois anos. Nesta inspeção, deve-se acompanhar a evolução das anomalias existentes, assim como, o surgimento de novas.

As inspeções especiais, segundo a NBR 9452 (2016), são inspeções detalhadas, realizadas a cada 5 anos, com possibilidade de serem postergadas por até oito anos em função das características e estado da obra. Nesta inspeção, pode ser necessário o emprego de equipamentos de acesso e ensaios específicos. Além do mais, sempre que a avaliação estrutural ou de durabilidade receberem a classificação 1 ou 2, a inspeção especial deve ser realizada (NBR 9452, 2016). A norma do DNIT (2004a) também prevê inspeções especiais “em ocasiões especiais, como antes e durante a passagem de cargas excepcionais” e “em pontes que se distinguem por seu formato ou complexidade”. Nessas inspeções, cada parte da estrutura deve ser minuciosamente analisada por meio de equipamentos especializados, como luneta, câmeras com aproximação óptica, andaimes, veículos dotados de gôndolas ou lanças (ex: caminhão Munck) e instrumentos de precisão para medidas de flechas, deformações e resistência.

Por sua vez, a inspeção extraordinária tem como objetivo avaliar um dano estrutural excepcional causado pela força da natureza

(enchentes, terremotos, ciclones, etc.) ou pela ação do homem (forte impacto de veículos, obras adjacentes, etc.) (DNIT, 2004<sup>a</sup>). Ou seja, é uma inspeção que acontece após uma demanda que não foi programada (NBR 9452, 2016).

Por último, a inspeção intermediária é um tipo de inspeção utilizada para acompanhar um defeito específico da estrutura, já detectado em inspeção anterior (DNIT, 2004a). A comparação entre as frequências de cada tipo de inspeção e em relação às exigências da NBR 9452 (2016) e do DNIT (2004a) estão resumidas na Tabela 2-1.

Tabela 2-1 - Frequência dos diferentes tipos de inspeção.

<b>Tipo de inspeção</b>	<b>Norma DNIT 010/2004 – PRO</b>	<b>NBR 9452 (2016)</b>
<b>Cadastral</b>	Imediatamente após a conclusão da obra	Imediatamente após a conclusão, instalação ou ao se integrar um sistema de monitoramento e acompanhamento viário
<b>Rotineira</b>	A cada 02 (dois) anos	Não superior a 1 (um) ano
<b>Especial</b>	A cada 05 (cinco) anos	Periodicidade de 5 (cinco) anos, com possibilidade de postergação até 8 (oito) anos
<b>Extraordinária</b>	Quando ocorrer um grave acidente na obra	Gerada por demanda não programada: necessidade de avaliação criteriosa de um elemento ou parte da OAE'S, ocorrência de impacto de veículo ou de eventos da natureza
<b>Intermediária</b>	Para certas obras, quando recomendado por inspeções anteriores	-

Fonte: Silva, 2016.

## 2.2 CAPACITAÇÃO DOS INSPETORES

Nos sistemas de gestão e inspeção de OAEs, o fator humano é o mais suscetível a erros, por isso, é importante que os profissionais envolvidos nas inspeções tenham a qualificação adequada, minimizando este problema. Para esse fim, a COST 345 (2007) especifica os conhecimentos mínimos desejáveis para uma inspeção eficiente e eficaz, tais como: conhecimento em ciência dos materiais, no comportamento das estruturas e nas práticas e técnicas construtivas. Ainda, sugerindo a criação de cursos de formação de inspetores e técnicos auxiliares de forma contínua.

Na norma do DNIT (2004a), por sua vez, os inspetores devem sempre ser engenheiros diplomados e registrados no CREA, assessorados por técnicos de nível médio. O DNIT prevê duas categorias de inspetores: inspetor e inspetor sênior. Apesar de a NBR 9452 (2016) não especificar os requisitos para um profissional ser considerado inspetor, a NBR 16230 (2013) - Inspeção de estruturas de concreto - Qualificação e certificação de pessoal - Requisitos determina duas categorias: Inspetor I e Inspetor II. Além do mais, é essencial que estes tenham pleno conhecimento das metodologias de avaliação de OAEs utilizadas. As especificações de DNIT (2004a) e de NBR 16230 (2013) estão presentes na Tabela 2.2.

Tabela 2-2 - Classificação dos Inspetores

<b>Entidade</b>	<b>Classe</b>	<b>Requisitos</b>
<b>ABNT – NBR16230</b>	Inspetor I	Formação superior na área de construção civil com, no mínimo, 1 ano de experiência na área.
		Formação média profissionalizante na área de construção civil, com, no mínimo, 2 anos de experiência.
	Inspetor II	Formação média com, no mínimo 5 anos de experiência na área.
		Formação em engenharia civil, com pós-graduação na área e com, no mínimo 2 anos de experiência.

(continua)

(conclusão)

<b>Entidade</b>	<b>Classe</b>	<b>Requisitos</b>
<b>DNIT</b>		Formação em engenharia civil com, no mínimo 5 anos de experiência.
		Formação superior na área de construção civil com, no mínimo 10 anos de experiência.
	Inspetor	Engenheiro formado com 5 anos, ou mais, de experiência em inspeção de OAEs.
	Inspetor Sênior	Engenheiro formado com 10 anos, ou mais, de experiência em inspeção de OAEs.
	Auxiliar Técnico	Formação média e conhecimento do manual de Inspeção de Pontes

Fonte: Adaptado da NBR 16230 (2013) e DNIT (2004a).

## 2.3 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO UTILIZADOS NO BRASIL

Para o DNIT (2004b), a avaliação é subjetiva, mas o inspetor deve seguir recomendações para a emissão da nota de um elemento estrutural de acordo com a Tabela 2-3. Para a atribuição desta nota, utilizam-se termos linguísticos como “boa”, “sofrível” e “precária”. Estes termos representam informações que embasam o raciocínio humano para diferenciar e classificar condições. Ao final, atribui-se uma nota para a ponte referente à menor nota conferida aos elementos da ponte.

Por outro lado, a norma de inspeção de pontes NBR 9452 (2016), introduz uma tabela diferente da anterior, como apresentado na Tabela 2-4. São utilizados novos critérios, sendo eles: estrutural (E), funcional (F) e durabilidade (D); nos quais, a condição da OAE é avaliada e classificada como excelente, boa, regular, ruim ou crítica, com notas variando, respectivamente de 5 a 1.

Segundo esta norma, o critério estrutural é aquele referente à segurança estrutural, ou seja, relacionado com a capacidade portante e estabilidade da OAE, tendo em vista os estados limites últimos (ELU) e de utilização (ELS).

Já o critério funcional representa os aspectos da OAE relacionados aos seus objetivos, como: possuir requisitos geométricos apropriados

(visibilidade, gabaritos verticais e horizontais). Além destes fatores, também precisa proporcionar conforto e segurança a seus usuários, e, portanto, deve apresentar, guarda-corpos íntegros, ausência de buracos e/ou depressões na pista, assim como sinalização adequada.

Tabela 2-3 - Classificação segundo o DNIT.

Nota	Danos nos elementos / Insuficiência estrutural	Ação corretiva	Condições de estabilidade	Classificação das condições da ponte
5	Não há danos nem insuficiência estrutural.	Nada a fazer.	Boa	Obra sem problemas
4	Há alguns danos, mas não há sinais de que estejam gerando insuficiência estrutural	Nada a fazer; apenas serviços de manutenção	Boa	Obra sem problemas importantes
3	Há danos gerando alguma insuficiência estrutural, mas não há sinais de comprometimento da estabilidade da obra	A recuperação da obra pode ser postergada, devendo-se, porém, neste caso, colocar-se o problema em observação sistemática.	Boa aparentemente	Obra potencialmente problemática Recomenda-se acompanhar a evolução dos problemas através das inspeções rotineiras, para detectar, em tempo hábil, um eventual agravamento da insuficiência estrutural.

(continua)

(conclusão)

Nota	Danos nos elementos / Insuficiência estrutural	Ação corretiva	Condições de estabilidade	Classificação das condições da ponte
2	Há danos gerando significativa insuficiência estrutural na ponte, porém não há ainda, aparentemente, um risco tangível de colapso estrutural.	A recuperação (geralmente com reforço estrutural) da obra deve ser feita no curto prazo.	Sofrível	Obra problemática Postergar demais a recuperação da obra pode levá-la a um estado crítico, implicando também sério comprometimento da vida útil da estrutura. Inspeções intermediárias são recomendáveis para monitorar os problemas.
1	Há danos gerando grave insuficiência estrutural na ponte; o elemento em questão encontra-se em estado crítico, havendo um risco tangível de colapso estrutural.	A recuperação (geralmente com reforço estrutural) - ou casos, em alguns substituição da obra - deve ser feita sem tardar.	Precária	Obra crítica Em alguns casos, pode configurar uma situação de emergência, podendo a recuperação da obra ser acompanhada de medidas preventivas especiais, tais como: restrição de carga na ponte, interdição total ou parcial ao tráfego, escoramentos provisórios, instrumentação com leituras contínuas de deslocamentos e deformações etc.

Fonte: DNIT, 2004a.

Por fim, o critério de durabilidade está relacionado aos parâmetros das OAEs e estes diretamente associados à sua vida útil. Ou seja, estão vinculados à resistência da estrutura em relação a agentes ambientais agressivos, portanto, devem ser avaliados junto com a agressividade do meio. Como exemplo, pode-se citar a ausência de cobrimento de armadura, corrosão e fissuração que permita infiltrações.

Tabela 2-4 - Classificação de pontes de acordo com NBR 9452 (2016).

Nota	Condição	Caracterização estrutural	Caracterização Funcional	Caracterização de durabilidade
5	Excelente	A estrutura apresenta-se em condições satisfatórias, apresentando defeitos irrelevantes e isolados.	A OAE apresenta segurança e conforto aos usuários.	A OAE apresentasse em perfeita condições, devendo ser prevista manutenção de rotina.
4	Boa	A estrutura apresenta danos pequenos e em áreas, sem comprometer a segurança estrutural.	A OAE apresenta pequenos danos que não chegam a causar desconforto ou insegurança ao usuário.	A OAE apresenta pequenas e poucas anomalias, que comprometem sua vida útil, em região de baixa agressividade ambiental.
3	Regular	Há danos que podem vir a gerar alguma deficiência estrutural. Mas não há sinais de comprometimento da estabilidade da obra. Recomenda-se acompanhamento dos problemas. Intervenções podem ser necessárias a médio prazo.	A OAE apresenta desconforto ao usuário, com defeitos que requerem ações de médio prazo.	A OAE apresenta pequenas e poucas anomalias, que comprometem sua vida útil, em região de moderada a alta agressividade ambiental ou a OAE apresenta moderadas a muitas anomalias, que comprometem sua vida útil, em região de baixa agressividade ambiental.

(continua)

(conclusão)				
Nota	Condição	Caracterização estrutural	Caracterização Funcional	Caracterização de durabilidade
2	Ruim	Há danos que comprometem a segurança estrutural da OAE, sem risco iminente. Sua evolução pode levar ao colapso estrutural. A OAE necessita de intervenções significativas a curto prazo.	A OAE com funcionalidade visivelmente comprometida, com riscos de segurança ao usuário, requerendo intervenções de curto prazo.	A OAE apresenta moderadas a muitas manifestações patológicas, que comprometem sua vida útil, em região de alta agressividade ambiental.
1	Crítica	Há danos que geram grave insuficiência estrutural na OAE. Há elementos estruturais em estado crítico, com risco tangível de colapso estrutural. A OAE necessita intervenção imediata, podendo ser necessária restrição de carga, interdição total ou parcial ao tráfego, escoramento provisório e associada instrumentação, ou não.	A OAE não apresenta condições funcionais de utilização.	A OAE encontra-se em elevado grau de deterioração, apontando problema já de risco estrutural e/ou funcional.

Fonte: NBR 9452 ,2016.

A avaliação deve ser feita por componente estrutural em função dos parâmetros estabelecidos, sendo a obra classificada, de forma final, com três notas: as menores atribuídas a cada critério. Portanto, a norma NBR 9452 (2016) difere das recomendações do DNIT (2004b) e das práticas até então utilizadas no Brasil por apresentar três notas finais, as quais permitem uma descrição mais detalhada das condições da obra, facilitando o entendimento do estado que estas se encontram. No entanto, ainda carece uma forma de comparação direta entre as diferentes obras, visando identificar para onde os recursos devem ser enviados com maior urgência.

A NBR 9452 (2016) apresenta boas melhorias em relação a versão anterior, como apresentar uma base de exemplos práticos para auxiliar o inspetor na hora da avaliação. Mesmo com todas as alterações e melhorias, esta norma não leva em conta as imprecisões do raciocínio humano e sua linguagem.

## 2.4 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO UTILIZADOS EM OUTROS PAÍSES

Diversos países possuem sua própria forma de avaliar e classificar uma OAE, algumas destas maneiras estão resumidas a seguir.

### 2.4.1 Dinamarca

Na metodologia dinamarquesa, os elementos da ponte são avaliados em uma escala que varia de zero (danos insignificantes) a 5 (risco de colapso). A nota total da ponte não é necessariamente a nota mais elevada, mas não pode ser superior à do elemento mais danificado nem inferior às dos elementos principais da estrutura (BEVC; MAHUT; GREFSTAD, 1999).

### 2.4.2 Eslovênia

A avaliação da condição de uma ponte/ou dos seus componentes na Eslovênia segue a equação abaixo, que representa a somatória das notas de cada defeito “i” (COST 345, 2007):

$$R = \sum V_D = \sum B_i \cdot K_{1i} \cdot K_{2i} \cdot K_{3i} \cdot K_{4i} \quad (2.1)$$

em que:

$V_D$  - Valor de classificação para o tipo de dano.

$B_i$  – ligado ao efeito potencial de um tipo particular de dano (i) sobre a segurança e / ou a durabilidade do elemento estrutural afetado.

$K_{1i}$  - define a importância do elemento.

$K_{2i}$  - reflete a intensidade do dano.

$K_{3i}$  – descreve a extensão dos danos.

$K_{4i}$  - relacionado a urgência da necessidade de intervenção

Com o valor de R proveniente da Equação 1, classifica-se a ponte de acordo com a Tabela 2-5.

Tabela 2-5 - Sistema de classificação utilizado na Eslovênia

<b>Classe</b>	<b>Descrição</b>	<b>R</b>
<b>1</b>	Critica	>20
<b>2</b>	Ruim	14-22
<b>3</b>	Satisfatória	8-17
<b>4</b>	Boa	3-12
<b>5</b>	Muito Boa	0-5

Fonte: COST 345, 2007.

O estudo realizado por Giovannetti (2014) comparou a metodologia eslovena com a do DNIT e demonstrou que a somatória empregada na Eslovênia acarreta em notas muito elevadas. Giovannetti (2014) sugeriu uma maneira de minimizar este fato pela consideração somente dos defeitos principais de cada elemento.

A vantagem da metodologia aplicada neste país europeu está na obtenção de notas finais com um intervalo maior de valores, facilitando a comparação entre diferentes obras. De forma semelhante, um grupo de pesquisa da Universidade Federal do Paraná (UFPR) vem desenvolvendo uma pesquisa junto ao DNIT para adaptar a metodologia eslovena à realidade Brasileira, buscando, também, solucionar a dificuldade de comparar obras com a mesma classificação (SILVA; SANTOS FILHO, 2017; WARMLING; SANTOS FILHO, 2018).

### **2.4.3 Estados Unidos da América**

Durante a inspeção, nos Estados Unidos, a obra é avaliada em relação aos seus componentes, talude, superestrutura e subestrutura. Atribui-se uma classificação em termos de “boa”, “regular”, “ruim” ou “não aplicável”, à cada elemento dos componentes. A nota final do componente deve ser uma combinação das notas dos seus elementos. Os componentes são avaliados em uma escala variando de 9 (excelente) a 0 (condição de falha). Esta classificação deve caracterizar a condição geral da totalidade do componente, não devendo focar em danos localizados. (U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 2012).

### **2.4.4 França**

O método francês, como apresentado por Bevec; Mahut e Grefstad (1999), divide a ponte em 3 grandes partes: equipamentos (pavimento, junta de dilatação, guarda-corpo, etc.), pilares e apoios (colunas, paredes, fundação, apoios), e deck (laje, longarinas, transversinas, etc.). Cada parte da ponte é avaliada de acordo com um catálogo de defeitos e classificada como: 1 (boa, necessitando de manutenção de rotina), 2 (boa, com pequenos defeitos que necessitam de manutenção especial sem urgência), 2E (representa os defeitos, cujo desenvolvimento podem levar, rapidamente, a classificação 3), 3 (ponte com defeitos que requerem reparos), 3U (necessita de reparos urgentes, pois a capacidade da ponte já está insuficiente ou, logo tornará, devido ao desenvolvimento dos defeitos), e NE (não pode ser inspecionado). A nota final da ponte caracteriza-se pela nota mais desfavorável atribuída a cada parte.

### **2.4.5 Noruega**

Na Noruega existem 4 categorias para indicar a gravidade do dano na estrutura, na qual 1 indica danos pequenos e 4, danos críticos. O inspetor indica a severidade do dano baseado no seu julgamento. A categoria 1 indica danos que podem ser aceitos, sem necessidade de intervenção, já nas categorias 2 à 4 o inspetor deve informar o ano o qual deverá acontecer alguma intervenção (NORWEGIAN PUBLIC ROADS ADMINISTRATION, 2005).

Para obter o resultado da avaliação, a categoria do dano é combinada com a sua consequência, sobre a capacidade de carga, segurança do tráfego, custo de manutenção, ou ambiental e estética. A

avaliação é feita nos elementos individualmente (NORWEGIAN PUBLIC ROADS ADMINISTRATION, 2005).

#### **2.4.6 Comparação dos diferentes métodos**

A maioria das metodologias empregadas na classificação de OAEs apresenta um fator em comum, utilizam-se de termos linguísticos como “boa” e “ruim” para determinação do estado de conservação das obras. Estes termos são naturais do raciocínio humano, no entanto, carregam incertezas e dependem dos conhecimentos e experiência do inspetor. Assim, para a realização das inspeções em OAEs, além do entendimento da metodologia a ser utilizada, é imprescindível que o profissional responsável tenha pleno conhecimento dos defeitos que podem acontecer nestas obras, assim como, os seus indícios.

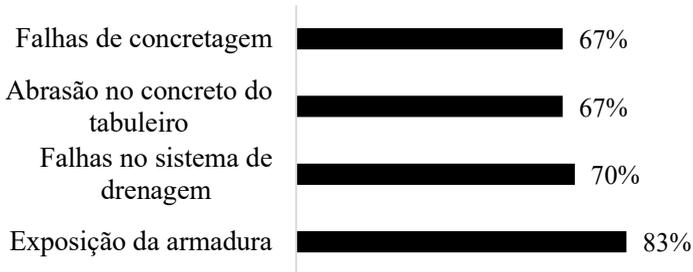
### **2.5 PRINCIPAIS DEFEITOS EM OAES DE CONCRETO ARMADO**

Vitório (2007), em seu estudo no período de 1990 a 2005, avaliou 18 pontes que sofreram colapso ou foram identificados defeitos que poderiam levá-las ao desabamento. Dentre as obras estudadas, somente uma das falhas foi ocasionada por falhas na superestrutura, as demais puderam ser relacionadas a erosão dos rios. Vitório (2007) afirma que este fenômeno é a causa da maioria dos colapsos em pontes.

Por sua vez, Milani e Kripka (2012b), analisaram 58 pontes no estado do Paraná por meio de imagens e relatórios de inspeção, das quais, 48% eram constituídas de concreto armado e 52% de madeira. Dentre essas obras, 95% não possuíam sinalização adequada, 93% não possuíam acostamento, 86% não apresentavam guarda-corpo e 50% não tinham guarda-rodas. Além destas observações, os principais defeitos encontrados, por estes autores, nas obras de concreto armado, estão ilustrados na Figura 2-2.

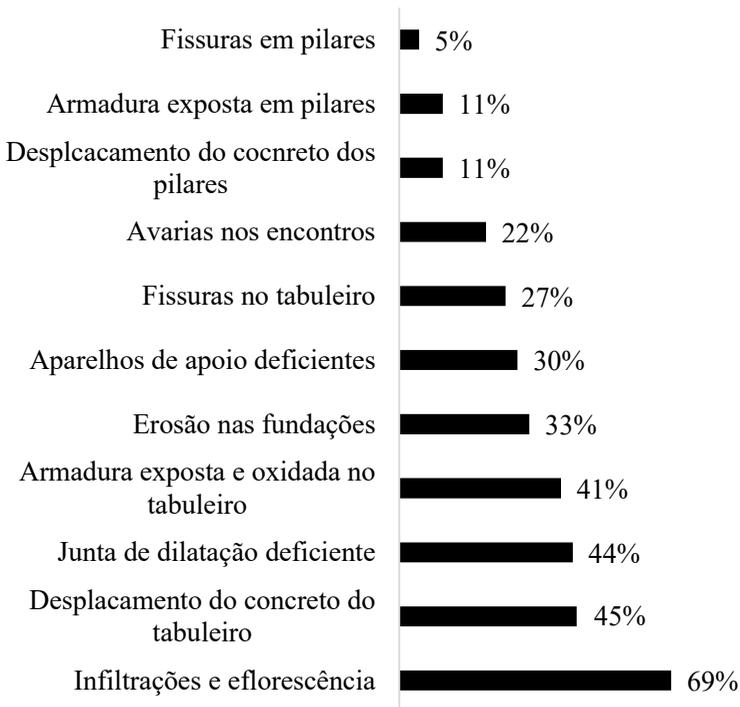
No período entre 2010 e 2011, 100 pontes localizadas em oito rodovias federais brasileiras, nos estados do Piauí, Paraíba, Pernambuco e na Bahia, foram inspecionadas (Vitório; Barros, 2013). Os principais problemas diagnosticados estão esquematizados na Figura 2-3. Nesta ilustração pode-se perceber que os problemas mais frequentes foram infiltração e eflorescência, seguidos de deslocamento do concreto, deficiências nas juntas de dilatação e exposição de armaduras.

Figura 2-2 - Principais defeitos encontrados em OAEs no Paraná.



Fonte: adaptado de Milani; Kripka, 2012b.

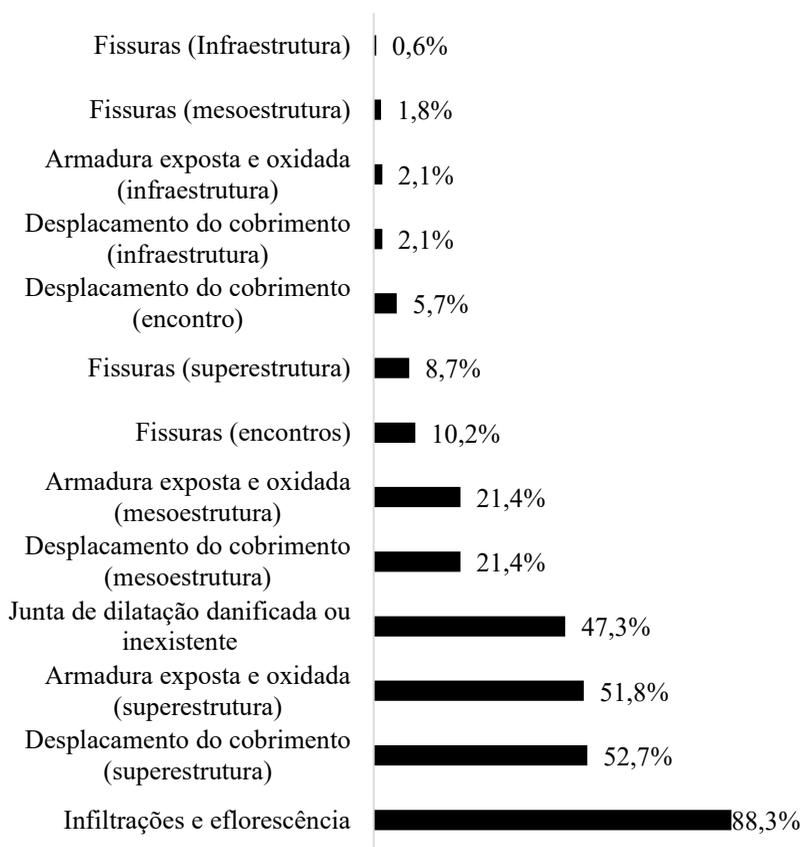
Figura 2-3 - Principais problemas detectados em pontes em oito rodovias brasileiras.



Fonte: adaptado de Vitório; Barros, 2013.

Um estudo realizado por Silva, Monteiro e Vitório (2018), avaliou 332 OAEs no estado de Pernambuco. Nestas obras foram verificadas as manifestações patológicas e os defeitos presentes. As manifestações patológicas mais encontradas foram: infiltrações e eflorescências (em 88% das obras), deslocamento do cobrimento da superestrutura (53% das obras), armaduras expostas e oxidadas na superestrutura (52%) e juntas de dilatação danificadas ou inexistentes (47%). Esses valores e os das demais manifestações encontradas estão mostrados na Figura 2-4.

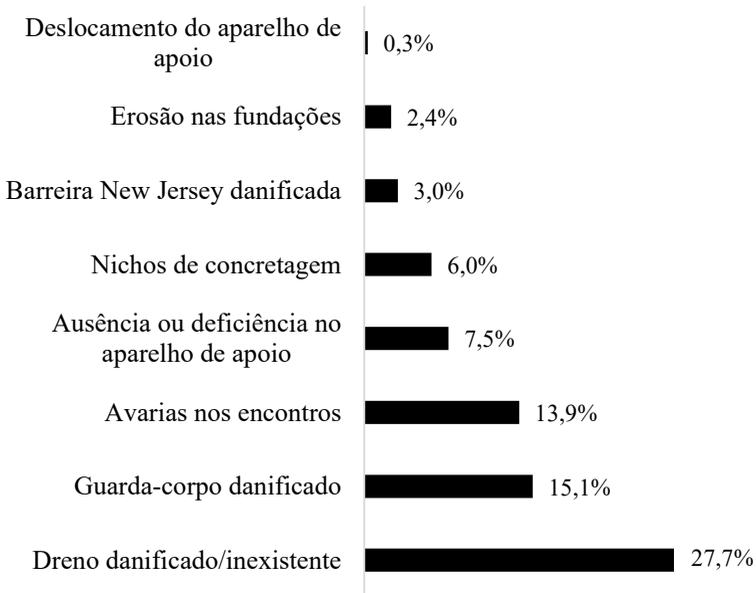
Figura 2-4 - Principais manifestações patológicas em OAEs no estado de Pernambuco.



Fonte: adaptado de Silva; Monteiro; Vitório, 2018.

Ao analisar os danos mais presentes nestas obras, os autores identificaram a existência de drenos danificados ou inexistentes em 28% das estruturas, guarda-corpo danificado em 15% e avarias nos encontros em 14%. Além destes danos, outros foram identificados, como podem ser visualizados na Figura 2-5.

Figura 2-5 - Principais defeitos em OAEs no estado de Pernambuco.



Fonte: adaptado de (Silva; Monteiro; Vitório, 2018).

Estes estudos demonstram que os principais pontos a serem observados em inspeções de OAEs são as infiltrações e eflorescências, deslocamento do concreto, exposição da armadura, defeitos nas juntas de dilatação e nos aparelhos de apoio, fissuras, danos no guarda-corpo e nos drenos. Alguns destes estão ilustrados nas Figuras 2-6. Com a observação destas e outras anomalias, aliado a aplicação das metodologias de avaliação obtém-se a classificação do estado de conservação das obras.

Figura 2-6 – Infiltração (lixiviação).



Figura 2-7 - Eflorescência



Figura 2-8 - Desplacimento do concreto.



Figura 2-9 - Exposição da armadura.



Figura 2-10 - Defeito na junta de dilatação



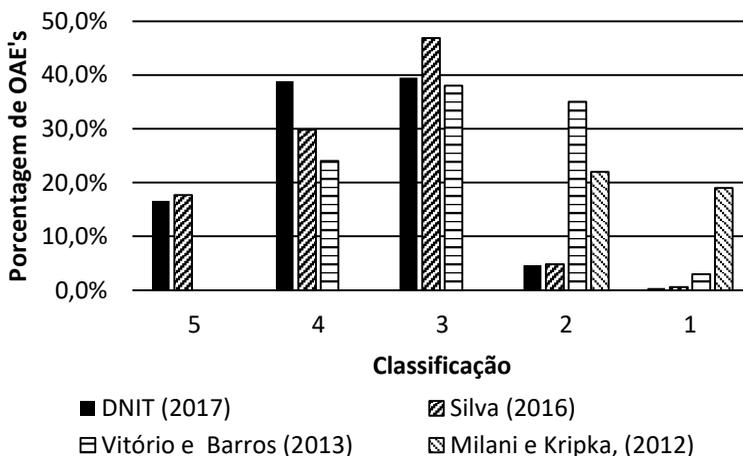
## 2.6 ESTADO DE CONSERVAÇÃO DAS OAES BRASILEIRAS

É importante verificar o estado de conservação das obras existentes na malha rodoviária brasileira, para que seja possível um diagnóstico da real situação. De acordo com o DNIT (2017), dentre as obras sob sua responsabilidade e avaliadas, 0,4% delas foram consideradas precárias, 4,6% sofríveis e 39,5% foram consideradas boas, aparentemente. Assim,

existem 1529 obras classificadas com a nota 3, de forma que, não se diferenciam entre elas, no entanto, as mesmas apresentam características diversas, necessidades e urgências de intervenções distintas. Ou seja, é importante poder diferenciar as obras de forma mais detalhada.

Além das informações fornecidas pelo DNIT, outros estudos foram realizados buscando verificar o estado de conservação de diferentes OAEs, avaliando-as segundo a metodologia do DNIT (2004b). Segundo o estudo realizado por Milani e Kripka (2012), na região de Pato Branco no Paraná, 22% das 58 obras inspecionadas foram consideradas precárias e 19% estavam em um estado sofrível. Já nas inspeções realizadas em 100 OAEs por Vitório e Barros (2013), 3% foram classificadas em estado sofrível, 35% precárias, 38% foram consideradas boas aparentemente, e 24% foram classificadas como boa, recebendo a nota 4. Da mesma forma, em 2016 foi publicado um estudo realizado por Silva (2016), no qual, dentre 332 OAEs, 0,6% foram avaliadas com nota 1, 4,8% com nota 2, 46,9% com nota 3, 29,8% com nota 4 e, finalmente, 17,7% com nota 5. Todas estas classificações estão comparadas na Figura 2-11.

Figura 2-11 - Estado de conservação de OAEs brasileiras.



Fonte: Adaptado de Dnit, 2017; Silva, 2016; Vitório e Barros, 2013 e Milani e Kripka, 2012.

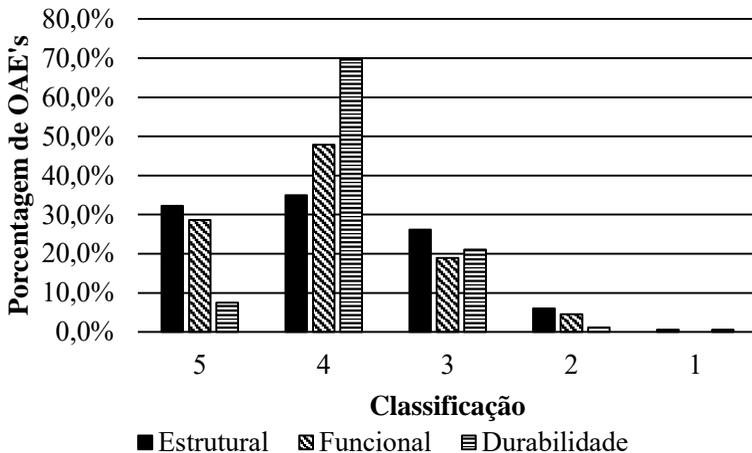
Excluindo-se as avaliações realizadas por Milani e Kripka, (2012), nas quais não foi possível identificar as obras classificadas separadamente com as notas 3, 4 e 5, observa-se que a maioria das obras foram classificadas com a nota 3. Outro ponto a ser notado é que, considerando

todos os autores, em média, 22,4% das obras avaliadas foram classificadas como sofríveis ou precárias, valor considerado demasiadamente elevado.

O trabalho apresentado por Silva (2016) ainda classificou as obras segundo os critérios da NBR 9452 (2016), obtendo os resultados presentes na Figura 2-12 e descritas a seguir:

- Estrutural: 0,6% das obras foram classificadas com nota 1, 6% com nota 2, 26,2% com nota 3, 34,9% com nota 4 e 32,2% com nota 5.
- Funcional: nenhuma obra foi classificada como crítica, 4,5% delas foram classificadas com a nota 2, 19% com nota 3, 47,9% com nota 4 e 28,6% com nota 5.
- Durabilidade: 0,6% das OAEs foram atribuídas com a nota 1, 1,2% com a nota 2, 21,1% com a nota 3, 69,6% com a nota 4 e 7,5% com a nota 5.

Figura 2-12 - Estado de conservação de OAEs de acordo com a metodologia da NBR 9452 (2016).



Fonte: Adaptado de Silva, 2016.

Neste trabalho, realizado por Silva (2016), as obras avaliadas no critério estrutural foram em maior número (34,9%) classificadas com a nota 4, sendo quase a mesma quantidade avaliada como 5 (32,2%), com valores decrescentes a partir da nota 4.

A avaliação funcional apresentou, semelhantemente, a maioria das obras com nota 4, assim como a avaliação da durabilidade. Silva (2016) compara as avaliações realizadas com a metodologia do DNIT (2004a) e da NBR 9452 (2016) pelo critério estrutural, demonstrando que as avaliações obtidas pela segunda metodologia foram mais otimistas, considerando as obras, de maneira geral, com avaliações melhores.

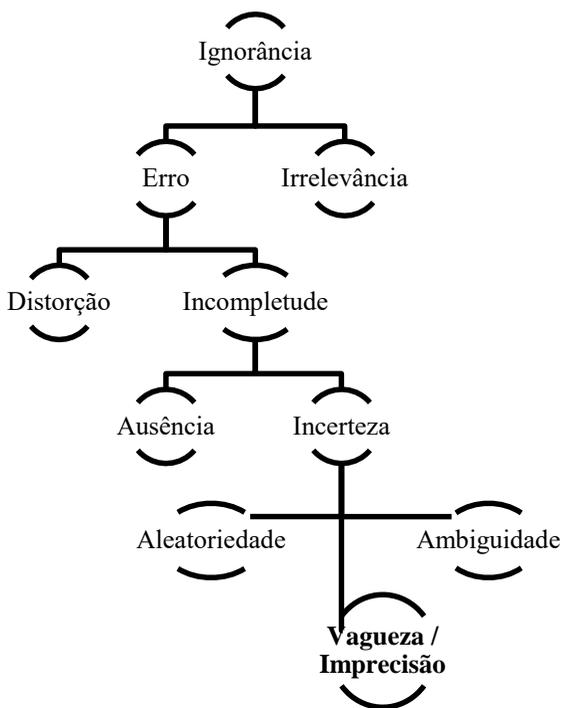
Por fim, as inspeções de OAEs são uma etapa importante para a gestão das rodovias, por isso, devem ser realizadas por profissionais devidamente capacitados e instruídos. Apesar das inspeções dependerem fortemente do inspetor, elas são imprescindíveis e apresentam uma ótima relação custo-benefício. Além do mais, existem algumas metodologias voltadas para a padronização da avaliação e classificação do estado de conservação destas obras. Como visto, no Brasil utiliza-se o método do DNIT (2004a) e da NBR 9452 (2016), os quais, classificam as construções com termos vagos que apresentam incertezas. No entanto, este fato também advém do inspetor, pois, ao classificar uma obra, ele o faz seguindo seu próprio raciocínio, que naturalmente é difuso. Dessa forma, as avaliações exibem erros, os quais podem ser considerados para o aprimoramento do sistema de gerenciamento de OAE.



### 3 INCERTEZAS PRESENTES NO SISTEMA DE AVALIAÇÃO DE OAES

Segundo Costa (1999), a incerteza deriva da ignorância, para a qual, propôs um modelo, apresentado na Figura 3-1. Este modelo aborda alguns problemas de modelagem de um sistema, relacionados a falta de conhecimento sobre algo, ou seja, na ignorância em relação a alguma informação.

Figura 3-1 – Esquema sobre ignorância em informações.



Fonte: Adaptado de Costa, 1999.

Costa (1999) afirma que a ignorância pode ser inicialmente considerada irrelevante ou um erro, conforme apresenta a Figura 3-1. No caso de ser um erro, a informação pode estar distorcida, o que acarreta na alteração dos verdadeiros dados, ou ter a sua base incompleta, podendo então, ser dividida em ausência de informação e incerteza sobre o assunto abordado. Nesta situação, as informações existem, porém não se pode ter

total certeza nos resultados, por terem uma margem de erro. A incerteza pode acontecer por aleatoriedade, ambiguidade, vagueza ou imprecisão.

Na primeira hipótese, é plausível a utilização de distribuições de probabilidades para as variáveis. Porém, no caso de informações vagas ou imprecisas, o raciocínio é aproximado, podendo empregar a teoria dos conjuntos *fuzzy* (ZADEH, 1965). Desta maneira, os tipos de incerteza que podem ser tratados pelos sistemas *fuzzy* são descritos a seguir (SCHWAAB, 2009):

- a. Vagueza: a variável que está sendo analisada não tem uma medida pré-estabelecida. Citando como exemplo, a determinação do sabor de uma comida, o qual pode ser associada a termos como ‘bom’ ou ‘ruim’, ou seja, não existe uma medida para esta definição.
- b. Imprecisão: a variável estudada tem alguma referência ou valor associado, todavia os limites não são precisos. Como o caso da consideração da temperatura como alta ou baixa, pois existem intervalos não exatos de temperaturas agradáveis para os seres humanos.

Estas imprecisões e vaguezas são intrínsecas dos termos da linguagem utilizada. Em especial, devido ao uso de variáveis linguísticas e valores linguísticos como “bom” e “ruim”, “alto” e “baixo”, pois, estes não apresentam limites bem definidos. Este fato acarreta na representação vaga (nebulosa, “*fuzzy*”) de conceitos linguisticamente definidos.

Sendo assim, surgiu a lógica *fuzzy* com o intuito de aproximar a maneira com que o raciocínio natural do ser humano relaciona informações, para, então, obter uma resposta aproximada ao problema estudado. Desta maneira, espera-se, pela utilização de uma modelagem matemática com base no conhecimento advindo da intuição dos seres humanos, resolver problemas complexos e que possuam variáveis com informações incertas (JANÉ, 2004). Como sistemas *fuzzy* combinam essa intuição do ser humano, repleta de incertezas, ao poder dos computadores, produzindo sistemas inteligentes e flexíveis (COX, 1995), essa foi a técnica escolhida para o desenvolvimento desta pesquisa.

### 3.1 LÓGICA FUZZY E CONJUNTOS FUZZY

Segundo Pedrycz e Gomide (2007), os conjuntos *fuzzy* mostram a percepção das pessoas em relação ao mundo. Os mesmos autores

exemplificam essa percepção na classificação de um ambiente como agradável quando a sua temperatura está próxima de 20°C. Ou seja, as temperaturas de 19,5°C e 20,5°C ainda são consideradas agradáveis, porém, as temperaturas de 0°C e 30° seriam consideradas, respectivamente, fria e quente. Consequentemente, pode-se questionar se a temperatura de 25°C seria considerada agradável ou quente. Intuitivamente, sabe-se que esta temperatura está entre quente e agradável. Percebe-se que a diferença entre agradável e quente não é precisamente delimitada, sendo necessária a utilização dos conjuntos *fuzzy* ao trabalhar com tais informações.

Para diferenciar os conjuntos *fuzzy*, necessita-se compreender os conjuntos clássicos, os quais, admitem somente duas opções: falso e verdadeiro, 0 e 1 respectivamente. Estes conjuntos podem representar a pertinência de um elemento ao conjunto  $A$  em um universo  $U$ , por uma equação característica  $f(x)$ :

$$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{se e somente se } x \in U \\ 0 & \text{se e somente se } x \notin U \end{cases} \quad (3.2)$$

No entanto, em alguns casos, a pertinência de um elemento a um conjunto é parcial, desta forma, não se pode afirmar que este elemento pertence ao conjunto ou o contrário. O conceito fundamental dos conjuntos *fuzzy* caracteriza-se por aceitar valores intermediários entre 0 e 1, ou seja, utilizar fronteiras não tão definidas, como a maioria dos conjuntos existentes no mundo real (PEDRYCZ; GOMIDE, 1998)

Um exemplo utilizado por Barros e Bassanezi (2006) para ilustrar a utilização dos conjuntos *fuzzy*, seria a consideração do subconjunto dos números reais “próximos de 2” como abaixo descrito, e perguntar-se-á se os números 7 e 2,001 pertencem ou não ao conjunto  $A$ .

$$A = \{x \in \mathbb{R}: x \text{ é próximo de } 2\} \quad (3.2)$$

Esta resposta é incerta, visto que não se sabe até que ponto um número está próximo de 2. A única afirmação admissível, neste caso, é que 2,001 está mais próximo de 2 do que 7. Portanto surge a necessidade de uma nova ferramenta para abranger estas incertezas. Desta forma, a definição binária é estendida com a utilização de graus de pertinência que possam assumir valores intermediários no intervalo  $[0, 1]$ . Ou seja, a pertinência de elementos de um conjunto  $B$  em um universo  $U$  pode ser representada por uma função de pertinência  $\mu_B$  (ZADEH, 1965):

$$\mu_B(x): U \rightarrow [0, 1], \quad (3.3)$$

Onde  $\mu_B(x)$  é uma função que indica o grau de pertinência de  $x$  em  $B$ . Os valores de  $\mu_B(x) = 1$  e  $\mu_B(x) = 0$  indicam, respectivamente, a completa pertinência e a não pertinência do valor  $x$  no conjunto  $B$ . Estas funções podem ter diferentes formas, sendo as mais comuns, as funções trapezoidais, triangulares e gaussianas.

De maneira semelhante, assim como a lógica clássica utiliza os conjuntos clássicos, para trabalhar com os conjuntos *fuzzy*, emprega-se a lógica *fuzzy*, conhecida também como lógica difusa ou lógica nebulosa. Esta lógica se diferencia da clássica por admitir que uma premissa possa ser parcialmente verdadeira. Assim, além da existência de uma função de pertinência, outra diferença entre a lógica clássica e a *fuzzy* é que esta não necessita de uma correspondência precisa com a regra. Em uma regra, como, se  $A$  então  $B$ , na utilização da lógica clássica é necessário entrar com o parâmetro exato  $A$ , para obter a resposta  $B$ , já na lógica *fuzzy*, pode-se entrar com o parâmetro  $A'$  e obter  $B'$ . No caso de uma regra como “se tomate vermelho, então tomate está maduro”, na lógica *fuzzy* poder-se-ia ter “tomate mais ou menos vermelho” e por consequente “tomate está quase maduro” (DELGADO, 2002). A criação dessa base de regras e de um conjunto de parâmetros de inferência são feitos por um especialista na área, que cria uma base de dados que compõem o sistema *fuzzy*.

Os sistemas *fuzzy* foram criados a partir da definição dos conjuntos *fuzzy* em 1965 por Zadeh. Desde então, foram largamente estudados por pesquisadores que ampliaram as formas de aplicação, criando outras maneiras de utilizá-los. Este presente trabalho apresenta um sistema criado a partir do conhecimento do especialista com partição por grid dos universos das variáveis (onde o especialista define formato e localização de todos os conjuntos *fuzzy*) e com a base de regras completa (base que considera todas as combinações possíveis entre os termos linguísticos presentes nos universos das variáveis de entrada). Assim, visando ter clareza em relação aos conceitos envolvidos na lógica *fuzzy*, esses seguem explicados a seguir.

### 3.2 ESTRUTURA DO SISTEMA DE INFERÊNCIA FUZZY

A estrutura de todo o sistema de inferência *fuzzy* está baseada em três operações: fuzzificação, inferência e defuzzificação. Estas etapas estão explicitadas na Figura 3-2.

### 3.2.1 Fuzzificação

A fuzzificação consiste na etapa que envolve o conceito de variável linguística: variável que assume valores linguísticos ao invés de números. Exemplo altura = baixa, altura = média ou altura = alta, em vez do seu valor numérico.

Figura 3-2 - Estrutura do Sistema de Inferência *Fuzzy*.



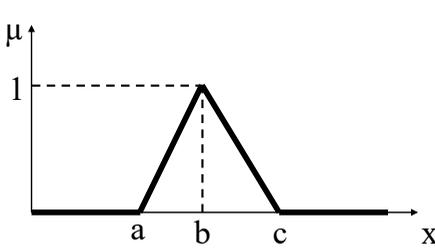
Fonte: Adaptado de Cox, 1995.

Nesta etapa, há a partição do universo, processo no qual as variáveis linguísticas (juntamente com seus termos linguísticos) são definidas, bem como as funções de pertinência (FDP). Ou seja, os valores numéricos são transformados em graus de pertinência para um valor linguístico. Esta etapa engloba a análise do problema, a definição das variáveis, a definição das funções de pertinência.

As funções de pertinência servem para indicar o grau de correspondência de um elemento a um conjunto *fuzzy*. Assim, a fuzzificação mapeia um valor  $x$  para um conjunto *fuzzy*. Usualmente se utilizam funções de pertinência do tipo triangular, trapezoidal ou gaussiano. Os respectivos gráficos e funções podem ser visualizados a seguir na Figuras 3-3, 3-4 e 3-5, respectivamente.

Triangular:

Figura 3-3 - Função Triangular.

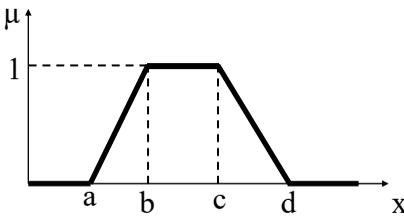


$$\mu = \begin{cases} 0, & \rightarrow \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & \rightarrow \text{se } a < x \leq b \\ \frac{x-c}{b-c}, & \rightarrow \text{se } b < x \leq c \\ 0, & \rightarrow \text{se } x > c \end{cases}$$

Fonte: A autora, 2019

Trapezoidal:

Figura 3-4 - Função Trapezoidal.



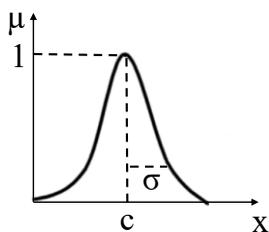
$$\mu = \begin{cases} 0, & \rightarrow \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & \rightarrow \text{se } a < x \leq b \\ 1, & \rightarrow \text{se } b < x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & \rightarrow \text{se } c < x \leq d \\ 0, & \rightarrow \text{se } x > d \end{cases}$$

Fonte: A autora, 2019

Gaussiana:

Figura 3-5 - Função Gaussiana.

$$\mu = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2}$$



Fonte: A autora, 2019

Onde “a”, “b”, “c” e “d” são os pontos indicados nas imagens, “ $\mu$ ” representa a pertinência e “ $\sigma$ ” o desvio padrão.

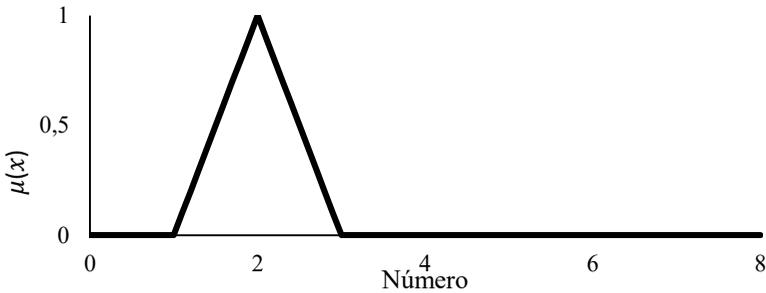
As FDP são definidas de acordo com o problema e contexto que serão utilizadas e a determinação de seu formato mais adequado pode não ser óbvia. No caso de serem determinadas pelo especialista, este usualmente escolhe funções trapezoidais ou triangulares, pois, intuitivamente é mais fácil determinar regiões de pertinência total, nula e média do que os conceitos ligados as funções Gaussianas (sendo estas mais comuns em sistemas de definição automática) (DELGADO, 2002). Zhao e Bose (2002) afirmam que o formato de FDP mais utilizado é o triangular, por trabalhar de forma intuitiva com a maioria das variáveis possíveis.

Considerando novamente o conjunto dos números próximos de 2, (BARROS; BASSANEZI, 2006), utilizando a equação de pertinência como a seguir.

$$\mu(x)_B = \begin{cases} (1 - |x - 2|); & \text{se } 1 \leq x \leq 3 \\ 0; & \text{se } x \notin [1, 3] \end{cases} \quad (3.4)$$

Obtém-se uma função de pertinência como ilustrado na Figura 3 - 6.

Figura 3-6 - Função de pertinência A dos números próximos de 2.



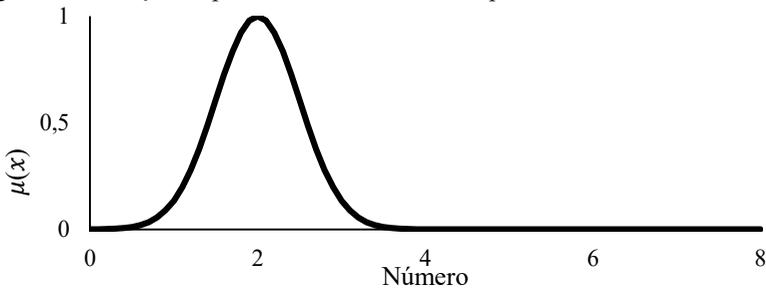
Fonte: A autora, 2019

Então  $\mu(2,001) = 0,999$  e  $\mu(7) = 0$ . Neste caso, pode-se dizer que  $x = 2,001$  é um valor próximo de 2, tendo pertinência igual a 0,999, e  $x = 7$  não é próximo de 2. Porém, esta não é a única maneira de determinar o grau de proximidade de 2, alguém poderia utilizar uma equação definida como:

$$\mu(x)_B = \exp \left[ -1/2 \left( \frac{x-2}{0,5} \right)^2 \right] \quad (3.5)$$

Essa equação 3.5 é mostrada na figura a seguir.

Figura 3-7 - Função de pertinência B dos números próximos de 2.



Fonte: A autora, 2019

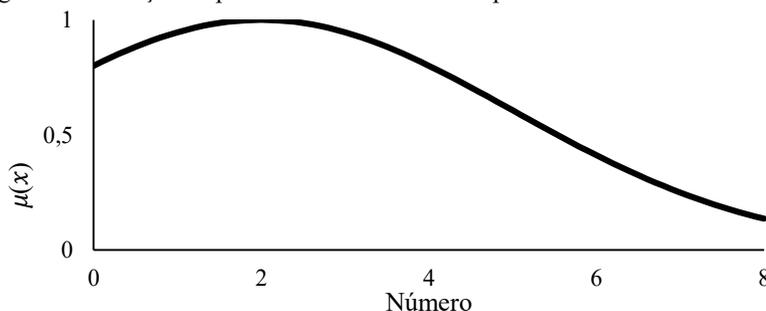
Desta forma  $\mu(2,001) = 0,9999999$  e  $\mu(7) = 1,388 \times 10^{-11}$ . Utilizando esta outra função de pertinência, a conclusão se modifica; agora, o número 2,001 é próximo de 2 com pertinência de 0,9999999 enquanto o número 7 é próximo de 2 com pertinência de  $1,388 \times 10^{-11}$ .

Dentre várias outras opções, pode-se utilizar uma função próxima da anterior, aumentando somente o desvio-padrão, obtendo uma equação como:

$$\mu(x)_B = \exp \left[ -1/2 \left( \frac{x-2}{3} \right)^2 \right] \quad (3.6)$$

A aplicação da equação 3.6 é visualizada na Figura 3-8.

Figura 3-8 - Função de pertinência C dos números próximos de 2.



Fonte: A autora, 2019

Nesta função  $\mu(2,001) = 0,99999994$  e  $\mu(7) = 0,249352$ . Mais uma vez a conclusão se modifica; agora, o número 2,001 é próximo de 2 com grau máximo 1, enquanto o número 7 é próximo de 2 com grau 0,249352.

Como pode-se notar, a caracterização da proximidade é subjetiva e depende da função de pertinência aplicada, que por sua vez, pode ser definida de maneiras diferentes dependendo da avaliação do termo “próximo” pelo especialista. Além disso, a mudança entre pertinência total e não pertinência é realizada de forma suave no contexto *fuzzy*.

### 3.2.2 Inferência *Fuzzy*

A inferência *fuzzy* é a etapa na qual as regras SE-ENTÃO são definidas. A parcela SE define a premissa da regra, já a parcela ENTÃO define o consequente. Para a realização desta etapa existem diversas maneiras, uma das mais comuns, e que é empregada nesta pesquisa, é a de Mandani, que utiliza o mínimo na semântica que conecta na inferência a premissa (“a” e “b”) ao consequente “c”, considerando uma regra com 2 entradas e uma saída. (MAMDANI; ASSILIAN, 1975)

Um exemplo, muito utilizado para a demonstração destas proposições, são as regras a seguir, que representam o risco da realização de um projeto:

- SE dinheiro é adequado OU pessoal é pequeno ENTÃO risco é pequeno;
- SE dinheiro é médio E pessoal é alto, ENTÃO risco é normal;
- SE dinheiro é inadequado, ENTÃO risco é alto.

O conectivo “E” que relaciona os fatos “a” e “b” pode ser representado por meio do valor mínimo ou produto entre “a” e “b”, já o conectivo “OU” de regras “a” ou “b” pode ser representado pelo valor máximo entre “a” e “b” (DELGADO, 2002). Esta etapa é denominada agregação dos antecedentes. Algumas vezes as regras podem possuir diferentes pesos, assim sendo, estes são multiplicados pelo resultado desta agregação.

Além da agregação dos antecedentes e inferência, deve-se fazer a agregação das saídas de todas as regras. Nesta pesquisa, este processo é feito pelo máximo entre as saídas de cada regra. Após esta etapa, obtém-se a saída *fuzzy* inferida pelo sistema, a qual pode ser defuzzificada, conforme descrito na seção 3.2.3.

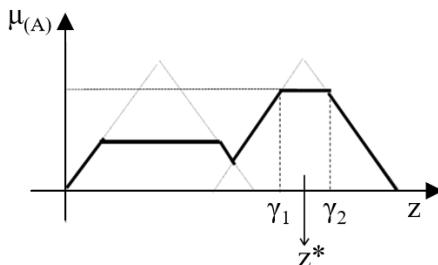
### 3.2.3 Defuzzificação

A defuzzificação é o processo de conversão de um conjunto *fuzzy* em um número real, podendo ser feita de várias maneiras. Dentre as técnicas mais utilizadas estão a média dos máximos e o cálculo do centroide. Outra forma que também pode ser utilizada é o mínimo dos máximos.

O método da média dos máximos considera a média dos valores do universo correspondentes ao limite inferior ( $\gamma_1$ ) e superior ( $\gamma_2$ ) do valor máximo atingido pela função de pertinência. A Figura 3-9 exemplifica a utilização da média dos máximos para a realização da defuzzificação que segue a equação 3-7. Nesta mesma figura,  $\gamma_1$  representa o mínimo dos máximos.

$$z^* = \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} \quad (3.7)$$

Figura 3-9 - Defuzzificação pela média dos máximos.



O método do centroide é o método mais utilizado e se baseia no cálculo do centro de área da função de pertinência. O inconveniente desse método seria somente a complexidade do cálculo que, no caso geral, é obtido de forma numérica com a fórmula a seguir, e representado pela Figura 3-10. Simplificadamente, a integral pode ser substituída por uma somatória.

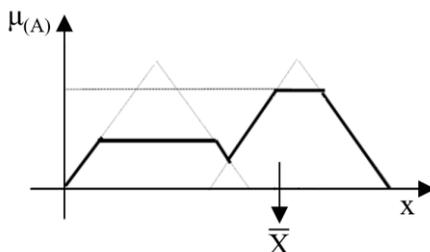
$$\bar{X} = \frac{\int_x x \mu_A(x) dx}{\int_x \mu_A(x) dx} \quad (3.8)$$

Onde:

$\bar{X}$ - Valor defuzzificado que corresponde ao centroide do conjunto fuzzy;

$\mu_A(x)$  - função de pertinência;

Figura 3-10 - Defuzzificação pelo centro de gravidade.



### 3.2.4 Considerações

Existem, ainda, algumas adaptações à concepção do sistema *fuzzy*, como o *fuzzy* tipo-2 e o *fuzzy* probabilístico. O primeiro possui como saída da fuzzificação um conjunto também *fuzzy* (LUCAS, 2009), denominado tipo 2 geral, ou um conjunto clássico, neste caso, denominado tipo 2 intervalar (MENDEL; JHON, 2002). Portanto, o sistema *fuzzy* tipo-2 caracteriza-se por possuir uma dificuldade maior em sua interpretação e utilização (MENDEL; JHON, 2002). O tipo *fuzzy* probabilístico une os conceitos *fuzzy* com conceitos de probabilidade de um evento acontecer (MEGHADADI; AKBARZADEH-T, 2001) e também possui maior dificuldade de utilização.

Embora exista uma percepção de que ambos sejam modelos interessantes para tratar as incertezas presentes nas disparidades das opiniões de especialistas, optou-se pela abordagem tradicional, devido à complexidade da elaboração e análise das regras *fuzzy* e do levantamento de dados práticos para validação do modelo utilizado. Deixando para trabalhos futuros a análise destas modelagens mais complexas.

## 3.3 OPERAÇÕES BÁSICAS DA LÓGICA FUZZY

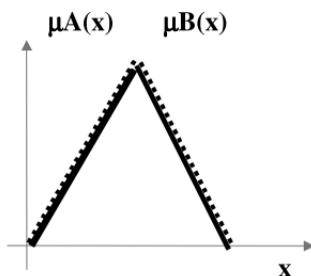
Algumas operações podem ser aplicadas diretamente sobre as funções de pertinência, como: comparação, união, interseção e outros.

Para a exemplificação são utilizados os subconjuntos *fuzzy* A e B com funções de pertinência  $\mu_A(x)$  e  $\mu_B(x)$ , respectivamente e são descritos nas seções a seguir

### 3.3.1 Comparação

Simbologia da comparação:  $A=B$

Considera-se que o conjunto *fuzzy* A seja igual ao conjunto *fuzzy* B se todos os pontos de  $\mu_A(x)$  forem iguais aos pontos de  $\mu_B(x)$  (ZADEH, 1965; CAVALCANTI *et al.*, 2012), como pode ser visualizado na Figura 3-11.

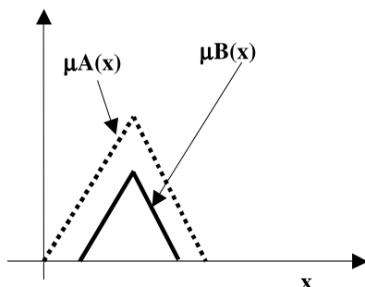
Figura 3-11 -  $A=B$ .

Fonte: Cavalcanti *et al.*, 2012.

### 3.3.2 Inclusão

Simbologia de contido:  $B \subset A$

Considera-se que o conjunto *fuzzy* B esteja contido no conjunto *fuzzy* A se todos os valores de  $\mu_B(x)$  forem menores ou iguais aos valores de  $\mu_A(x)$  (ZADEH, 1965; CAVALCANTI *et al.*, 2012), como pode ser visualizado na Figura 3-12.

Figura 3-12 -  $B \subset A$ .

Fonte: Cavalcanti *et al.*, 2012.

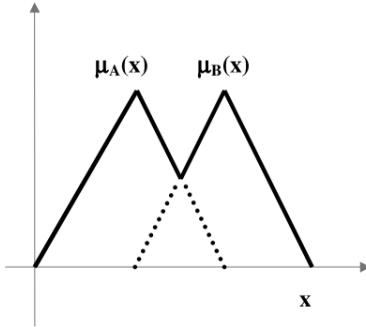
### 3.3.3 União

Simbologia de união:  $A \cup B$

Considera-se que a união do conjunto *fuzzy* A com o conjunto *fuzzy* B seja a função com maior valor no ponto. Ou seja, será  $\mu_A(x)$  nos pontos em que  $\mu_A(x) > \mu_B(x)$ , e será  $\mu_B(x)$  nos pontos que  $\mu_A(x) < \mu_B(x)$  (ZADEH, 1965; CAVALCANTI *et al.*, 2012), como pode ser visualizado

na Figura 3-13. A união de conjuntos *fuzzy* pode ser identificada pela conjunção “ou”.

Figura 3-13 -  $A \cup B$ .



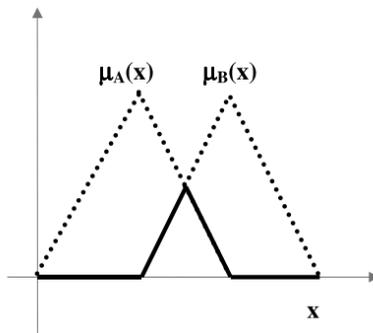
Fonte: Cavalcanti *et al.*, 2012.

### 3.3.4 Interseção

Simbologia de interseção:  $A \cap B$

Considera-se que a interseção do conjunto *fuzzy* A com o conjunto *fuzzy* B seja a função com menor valor no ponto. Ou seja, será  $\mu_A(x)$  nos pontos em que  $\mu_A(x) < \mu_B(x)$ , e será  $\mu_B(x)$  nos pontos que  $\mu_A(x) > \mu_B(x)$  (ZADEH, 1965; CAVALCANTI *et al.*, 2012), como pode ser visualizado na Figura 3-14. A interseção de conjuntos *fuzzy* pode ser identificada pela conjunção “e”.

Figura 3-14 -  $A \cap B$ .



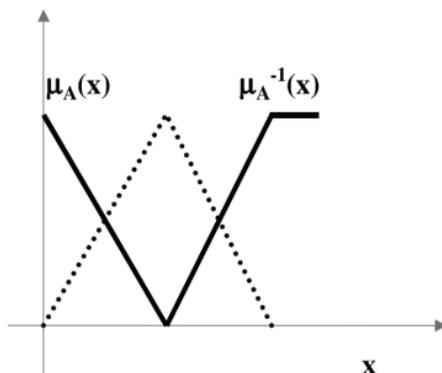
Fonte: Cavalcanti *et al.*, 2012.

### 3.3.5 Complemento

Simbologia de complemento:  $A^{-1}$

Considera-se que o complemento do conjunto *fuzzy* A seja o conjunto *fuzzy*  $A^{-1}$ , cuja função de pertinência pode ser  $\mu_{A^{-1}}(x) = 1 - \mu_A(x)$  (ZADEH, 1965), como pode ser visualizado na Figura 3-15.

Figura 3-15 -  $A^{-1}$



Fonte: Cavalcanti *et al.*, 2012.

## 3.4 EXEMPLO DE UTILIZAÇÃO DA LÓGICA FUZZY

Este exemplo é largamente empregado para demonstrar a utilização do raciocínio *fuzzy*, no entanto foi modificado para acrescentar a demonstração da utilização de diferentes pesos para as regras. Seu objetivo é analisar o risco de um determinado projeto, o qual depende da quantidade de dinheiro e do número de pessoas envolvidas. Essas informações são os dados de entrada do problema.

Para o exemplo, supôs-se uma quantidade de dinheiro de 35 mil reais e 60 pessoas. As regras que foram estipuladas são:

- R1 – Se o dinheiro for considerado adequado ou pessoal for considerado pequeno, então, risco considerado pequeno (peso 1);
- R2 - Se dinheiro for considerado médio e pessoal for considerado alto, então, risco é considerado normal (peso 0,9);
- R3 - Se dinheiro for considerado inadequado, então, risco é considerado alto (peso 1).

1º passo - fuzzificação.

Nesta etapa, são criadas as funções de pertinência e rotuladas de acordo com as Figuras 3-16 e 3-17.

Figura 3-16 - Função de pertinência para a quantidade de dinheiro.

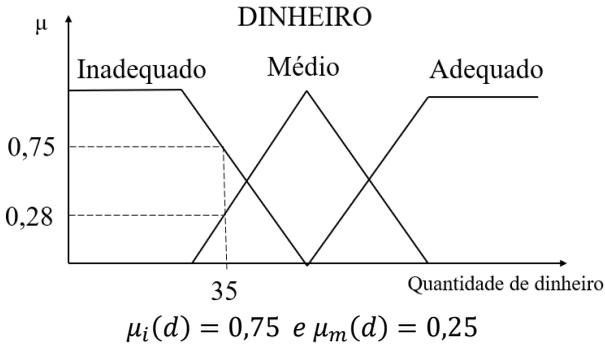
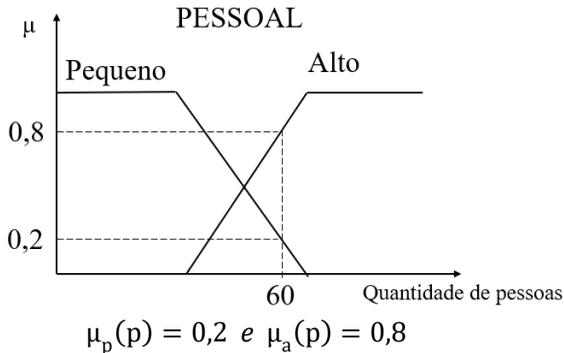


Figura 3-17 - Função de pertinência para o número de pessoas envolvidas.



Por estas funções de pertinência, entende-se que, a quantidade de 35 mil reais é considerada inadequada com um grau de pertinência de 0,75 ( $\mu_i(d) = 0,75$ ), e é considerada mediana com um grau de pertinência de 0,28 ( $\mu_m(d) = 0,28$ ). Já um grupo de 60 pessoas é considerado pequeno com um grau 0,2 ( $\mu_p(p) = 0,2$ ) e considerado alto com um grau 0,8 ( $\mu_a(p) = 0,8$ ).

2º Passo – inferência.

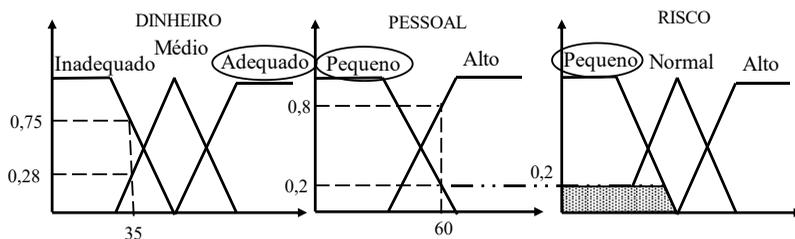
Neste passo, será considerado, como explicado em 3.2.2; que o conector linguístico “ou” significa a união das funções, ou seja, o máximo

entre elas e o conector linguístico “e”, significa a intersecção das funções, ou seja, o mínimo entre elas.

a) Regra 1 - Se o dinheiro for considerado adequado ou pessoal for considerado pequeno, então, risco considerado pequeno (peso 1);

O dinheiro foi considerado adequado com grau nulo e o grupo foi considerado pequeno com grau 0,2. Como o conector linguístico utilizado na regra foi “ou”, utiliza-se o maior destes valores, ou seja, a agregação dos antecedentes resulta num grau 0,2 (logo, a regra dispara com nível 0,2). Através da semântica da regra, relaciona-se o antecedente com o conseqüente, então neste caso, como a semântica é dada pelo mínimo, o antecedente influencia no conseqüente (risco pequeno) com um grau 0,2 e a saída inferida pela regra é mostrada na área em cinza destacada na Figura 3-18:

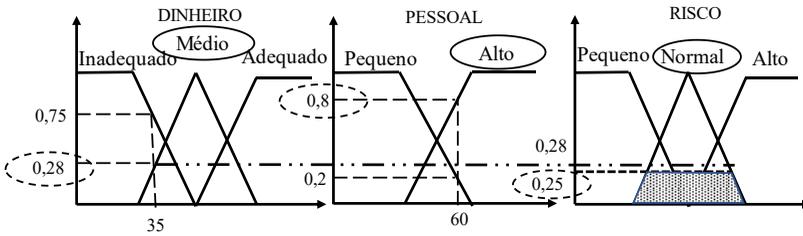
Figura 3-18 - Regra 1.



b) Regra 2 - Se dinheiro for considerado médio e pessoal for considerado alto, então, risco é considerado normal (peso 0,9):

O dinheiro foi considerado médio com grau 0,28 e o grupo foi considerado alto com grau 0,8. Como o conector linguístico utilizado na regra foi “e”, utiliza-se o menor destes valores, e a partir da semântica da regra também dada pelo mínimo, a saída inferida pela regra seria dada pelo corte do risco considerado normal no nível 0,28. No entanto, como a regra tem peso 0,9, multiplica-se esse peso por 0,28, obtendo-se a saída com corte em 0,25. Esse raciocínio pode ser visto na Figura 3-19 a seguir.

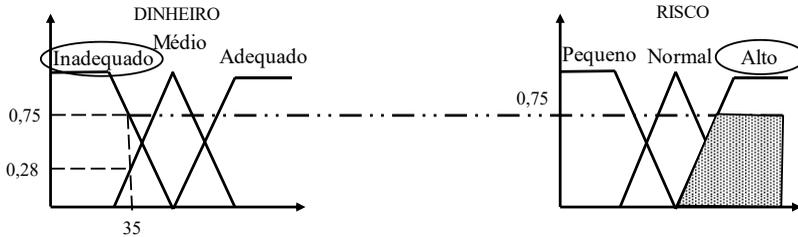
Figura 3-19 - Regra 2.



c) Regra 3 - Se dinheiro for considerado inadequado, então, risco é considerado alto (peso 1):

O dinheiro foi considerado inadequado com grau 0,75, portanto, o risco é considerado alto com um grau 0,75. Neste caso não há a agregação de antecedentes e o próprio grau 0,75 é o nível de disparo da regra. Considerando a semântica da regra, novamente dada pelo mínimo, tem-se o raciocínio mostrado na Figura 3-10 a seguir.

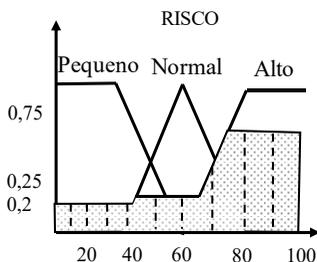
Figura 3-20 - Regra 3.



### 3º Passo – defuzzificação

Para realizar a defuzzificação, unem-se os gráficos das saídas de cada regra, utilizando o máximo valor entre elas, como pode ser visualizado na Figura 3-21, e calcula-se o centroide da figura formada, para obter o resultado numérico defuzzificado.

Figura 3-21 - Defuzzificação.



$$c = \frac{(10 + 20 + 30 + 40) * 0,2 + (50 + 60 + 70) * 0,25 + (80 + 90 + 100) * 0,75}{0,2 + 0,2 + 0,2 + 0,2 + 0,25 + 0,25 + 0,25 + 0,75 + 0,75 + 0,75}$$

$$c = \frac{267,5}{3,8} = 70,4$$

Portanto, se, para a realização deste projeto, a quantidade de dinheiro necessária for 35 mil reais e necessitar de 60 pessoas, o seu risco, em uma escala de 0 a 100, será 70,4.

### 3.5 CONJUNTOS E SISTEMAS FUZZY APLICADOS EM ESTRUTURAS

Alguns estudos sobre aplicações da Teoria dos Conjuntos *Fuzzy* (*fuzzy set theory* - FST) para a avaliação do estado das estruturas foram realizados. Sasmal *et al.* (2006) desenvolveram um estudo relacionando funções de pertinência para a classificação dos elementos das OAEs com uma escala variando de 0 a 9 (como utilizada nos Estados Unidos) com a importância dos mesmos em relação à estrutura, gerando uma nota final. A nota 9 significa as melhores condições possíveis e os valores decrescentes indicam o aumento dos danos, as notas abaixo de 1 refletem a necessidade de intervenção imediata.

No estudo de Sasmal *et al.* (2006), a ponte é dividida em três grandes componentes, cada um destes componentes é dividido em elementos os quais o inspetor avalia e fornece uma nota. A nota de um componente é baseada na nota dos seus elementos e a nota total da ponte é baseada na nota dos seus componentes. Cada elemento influencia a nota final de uma forma diferente, com um peso diferente. A Tabela 3-1 mostra os valores das médias utilizadas para os coeficientes de importância de alguns elementos.

Tabela 3-1- Média dos coeficientes de importância.

Elemento	Classificação									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Pavimento</b>	1	0,9	0,8	0,7	0,61	0,51	0,45	0,33	0,23	0,17
<b>Laje de concreto</b>	1	0,96	0,92	0,89	0,85	0,81	0,77	0,72	0,5	0,42
<b>Guarda-rodas</b>	1	0,85	0,7	0,55	0,4	0,25	0,2	0,14	0,1	0,08
<b>Meio do Vão</b>	1	0,85	0,7	0,54	0,39	0,24	0,21	0,14	0,11	0,09
<b>Passarela</b>	1	0,88	0,76	0,64	0,52	0,4	0,33	0,25	0,17	0,14
<b>Parapeito</b>	1	0,88	0,76	0,63	0,51	0,39	0,33	0,26	0,19	0,19
<b>Guarda-corpo</b>	1	0,88	0,76	0,65	0,53	0,41	0,35	0,26	0,19	0,16
<b>Pintura</b>	1	0,87	0,74	0,61	0,48	0,35	0,31	0,24	0,18	0,15
<b>Drenagem</b>	1	0,9	0,8	0,7	0,61	0,51	0,45	0,35	0,29	0,22
<b>Iluminação</b>	1	0,86	0,72	0,57	0,43	0,29	0,27	0,2	0,16	0,15
<b>Utilidades</b>	1	0,85	0,7	0,55	0,4	0,25	0,23	0,17	0,13	0,11
<b>Infiltração em juntas</b>	1	0,91	0,82	0,72	0,63	0,54	0,49	0,41	0,34	0,28
<b>Junta de dilatação</b>	1	0,92	0,85	0,77	0,7	0,62	0,55	0,47	0,38	0,3

Fonte: Adaptado de Sasmal *et al.*, 2006.

Percebe-se que, segundo os resultados apresentados, a importância que um determinado elemento apresenta, na composição da avaliação final e uma obra, aumenta com a deterioração. Esses pesos, para importância estrutural, foram originalmente construídos por meio de uma pesquisa com engenheiros e inspetores de pontes nos Estados Unidos da América (TEE; BOWMAN; SINHA, 1988).

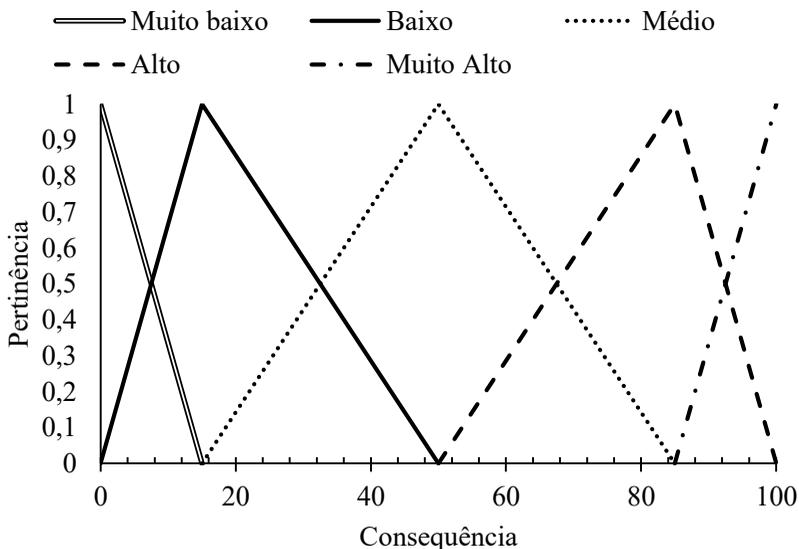
Para a criação das funções de pertinência da classificação dos elementos, Sasmal *et al.* (2006) afirmam que geralmente estas funções são assumidas sem a indicação de uma razão específica. Em sequência, para obter a condição total da ponte, utilizou-se uma média ponderada *fuzzy* (GUH; PO; LEE, 2008). Posteriormente, observou-se que, utilizando este sistema, quanto maior a quantidade de elementos avaliados na ponte, maior a complexidade do sistema.

Ainda em 2006, Kim, Kim e Hong (2006) apresentaram um sistema que utiliza a lógica *fuzzy* para a avaliação de estruturas de edifícios de concreto armado. O inspetor realiza inspeções visuais e

alimenta o sistema, que, por sua vez, obtém o atual estado de conservação dos edifícios. As categorias de avaliação incluem o histórico do edifício (formato, acidentes, alterações no uso), as condições ambientais (exposição a agentes que podem deteriorar a estrutura, vibração, vizinhança), a capacidade estrutural (estimativa indireta da resistência estrutural, estado de fissuração, deformações, movimentação estrutural) e durabilidade (capacidade da estrutura em resistir a deterioração, armadura aparente, corrosão, fissuras, infiltração). Segundo os próprios autores, a importância de cada um dos critérios utilizados ainda precisa ser melhor estudada (KIM, KIM e HONG, 2006).

Em sequência, Wang e Elhag (2007) propuseram um sistema *fuzzy* para tomada de decisões em grupo, para avaliação do risco de colapso de pontes – produto entre probabilidade e consequência de falha da estrutura. Neste sistema os inspetores avaliam as consequências utilizando termos linguísticos, como “Muito Alto”, “Alto”, “Médio”, “Baixo” e “Muito Baixo”, no lugar de valores numéricos, utilizando funções de pertinência triangulares apresentadas na Figura 3-22.

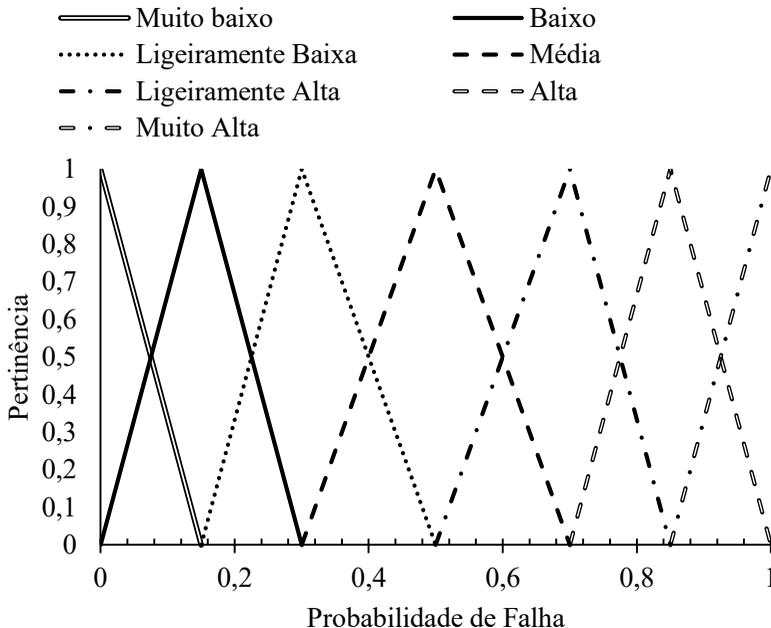
Figura 3-22 - Função de pertinência para as consequências.



Fonte: Adaptado de Wang e Elhag, 2007.

Já a probabilidade de falha é avaliada em “Certa” (pertinência igual a unidade) “Muito Alta”, “Alta”, “Ligeiramente Alta”, “Média”, “Ligeiramente Baixa”, “Baixa” e “Muito Baixa”, como visto na Figura 3-23.

Figura 3-23 - Função de pertinência da probabilidade de falha.



Fonte: Adaptado de Wang e Elhag, 2007.

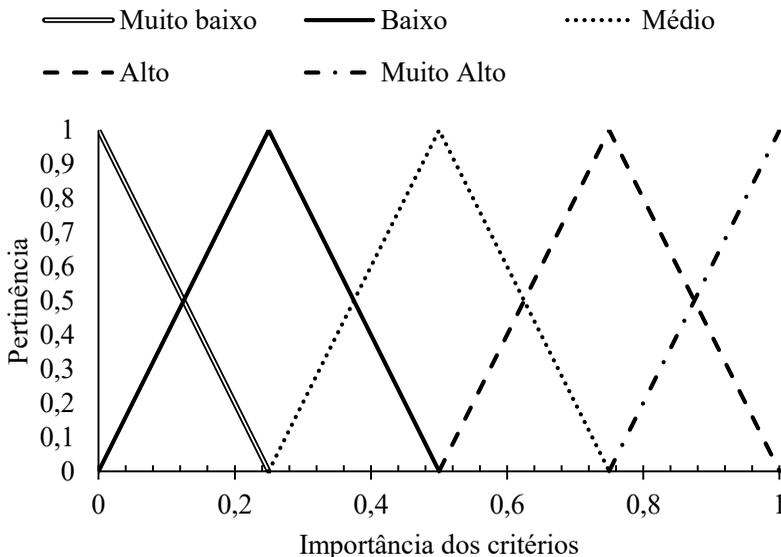
Na metodologia proposta, os inspetores classificam a OAE em quatro critérios:

- a) Segurança – critério relacionado à segurança dos usuários;
- b) Funcionalidade – pertinente a garantia de utilização e serviço da obra;
- c) Sustentabilidade – equilíbrio entre as despesas e os trabalhos de manutenção, fazendo manutenções preventivas e evitando o acúmulo de trabalho;

d) Ambiental – efeitos da construção sobre o ambiente no qual está inserida.

Para caracterizar a importância de cada critério, criaram-se funções de pertinência que as relacionam com a sua respectiva nota, Figura 3-24.

Figura 3-24 - Função de pertinência para a importância dos critérios.



Fonte: Adaptado de Wang e Elhag, 2007.

Com o fim de calcular o risco, multiplica-se a probabilidade de falha pela consequência, realiza-se a defuzzificação e então aplicam-se os pesos (resultado obtido pela média ponderada da defuzzificação das importâncias). Por fim, o artigo apresenta os resultados obtidos pela avaliação de cinco obras, cada qual, realizada por três inspetores.

No trabalho apresentado por Tarighat e Miyamoto (2009), um sistema *fuzzy* é usado para a avaliação de tabuleiros de pontes, resultando em uma classificação de suas condições. Cinco categorias foram utilizadas para a inspeção: desagregação, abertura de fissuras, delaminação, teste de auscultação e probabilidade de corrosão.

Estes critérios foram classificados como:

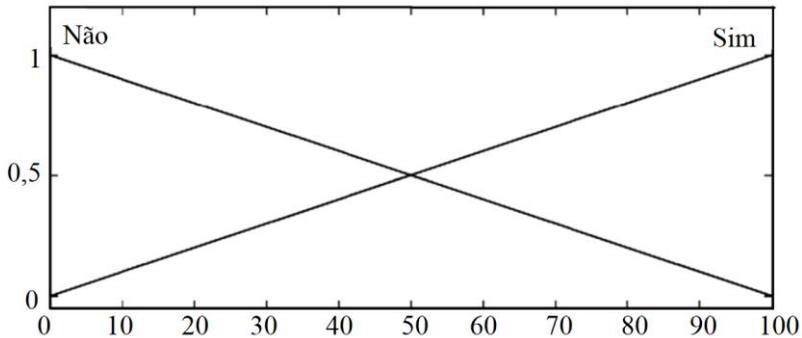
a) Desagregação = Sim ou não;

- b) Abertura de fissuras = Sem fissuras, fissuras finas ou fissuras largas;
- c) Delaminação = Não, talvez ou sim;
- d) Auscultação (teste de contato com um martelo) = Firme, moderado, oco ou muito oco;
- e) Probabilidade de corrosão = Baixa, moderada ou alta.

As funções de pertinência utilizadas no artigo são mostradas nas Figura 3-25 a Fonte: Adaptado de TARIGHAT e Miyamoto, 2009.

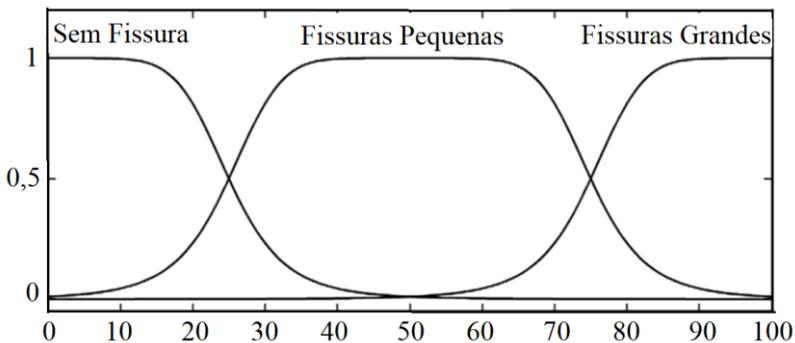
Figura 3-29. No entanto, as razões para a utilização destes formatos não são apontadas.

Figura 3-25 - Função de pertinência de deslocamento.



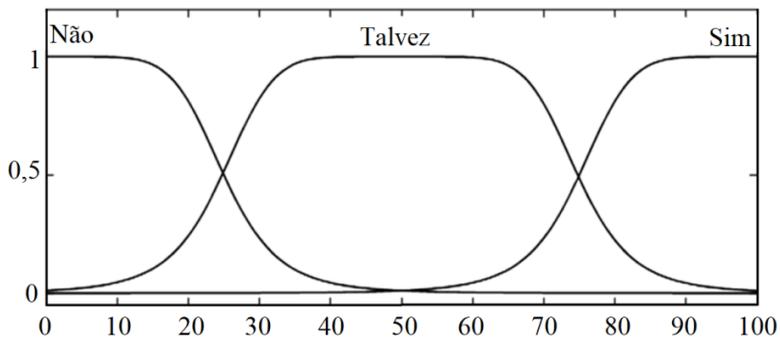
Fonte: Adaptado de Tarighat e Miyamoto, 2009.

Figura 3-26 - Função de pertinência de fissuras.



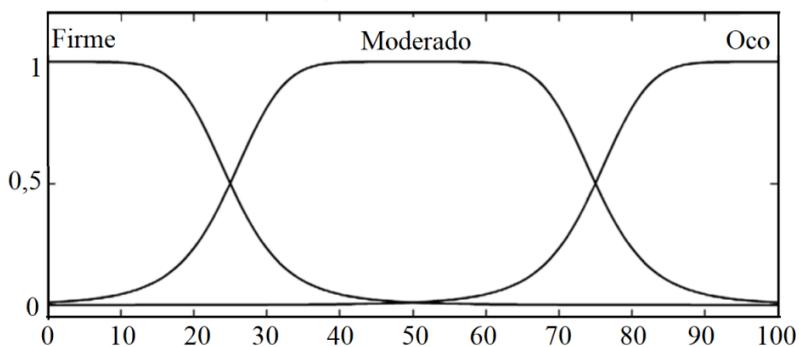
Fonte: Adaptado de Tarighat e Miyamoto, 2009.

Figura 3-27 - Função de pertinência de delaminação.



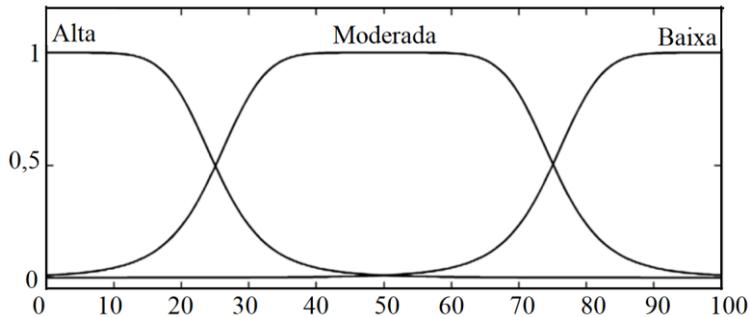
Fonte: Adaptado de Tarighat e Miyamoto, 2009.

Figura 3-28 - Função de pertinência e teste com martelo (auscultação).



Fonte: Adaptado de Tarighat e Miyamoto, 2009.

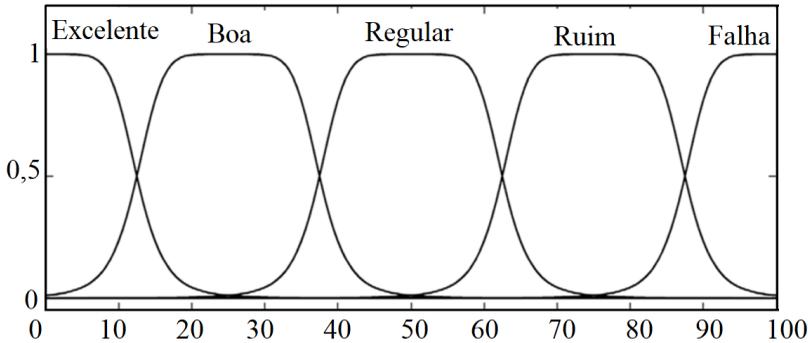
Figura 3-29 - Função de pertinência da probabilidade de corrosão.



Fonte: Adaptado de Tarighat e Miyamoto, 2009.

Para unir as informações de entrada (Figuras 3-25 a 3-29) e saída (Figura 3-30), 162 regras foram utilizadas para realizar todas as combinações de sintomas possíveis, e o peso de cada uma delas foi considerado o mesmo. Os autores concluem que as funções de pertinência utilizadas são aproximações da realidade, que elas podem ser melhoradas.

Figura 3-30 - Função de pertinência da classificação do tabuleiro.



Fonte: Adaptado de Tarighat e Miyamoto, 2009.

Pode-se perceber que, para a observação de cinco parâmetros utilizou-se um número grande de regras. Estender esta metodologia para o total da ponte e dos parâmetros que podem ser observados necessitaria de uma elevada quantidade de regras que poderia acarretar em um sistema mais robusto.

Mitra, Jain e Bhattacharjee (2010) desenvolveram um método utilizando lógica *fuzzy* e inspeção visual para avaliar a manifestação de carbonatação e presença de cloretos. Um questionário foi criado para averiguar a percepção dos inspetores em relação à classificação dos danos entre “alto”, “médio”, “baixo” e “muito baixo”. Por meio deste questionário obtiveram 22 respostas. Os danos que fizeram parte da investigação foram:

1. Corrosão e fissuras;
2. Desagregação, deslocamentos e perda da seção da armadura;
3. Falha na execução, como nichos de concretagem e marcas de umidade;
4. Carbonatação e presença de cloretos.

Tomando o dano 1 como exemplo, criaram-se duas tabelas: Tabela 3-2 e Tabela 3-3. Os questionários foram elaborados a partir da combinação de ambas as tabelas, gerando os histogramas da Figura 3-31, nos quais, os eixos das ordenadas representam a quantidade de especialistas que responderam e os eixos das abscissas a classificação.

Tabela 3-2 - Estado e condição dos danos.

<b>Estado</b>	<b>Condição</b>
<b>1</b>	Sem fissuras visíveis
<b>2</b>	Corrosão com algumas fissuras paralelas as barras em uma direção
<b>3</b>	Corrosão com várias fissuras paralelas as barras em duas direções
<b>4</b>	Corrosão com extensas fissuras paralelas as barras em duas direções

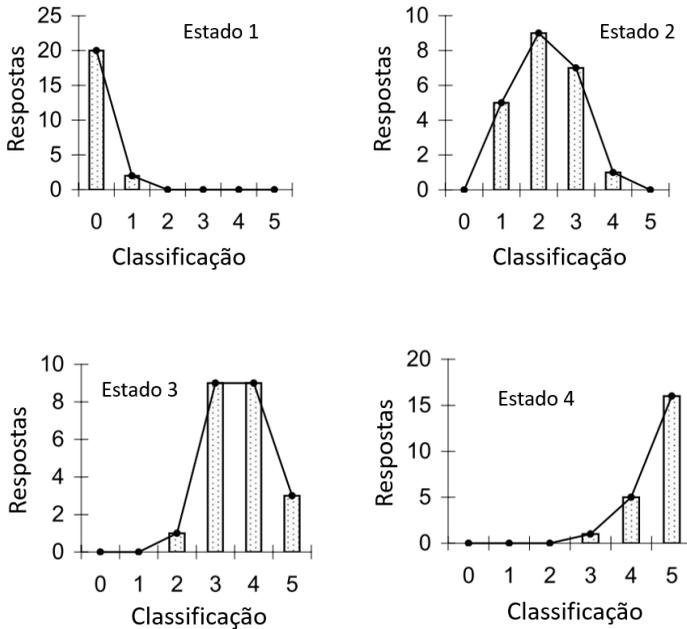
Fonte: Mitra; Jain e Bhattacharjee, 2010.

Tabela 3-3 - Classificação e descrição dos danos.

<b>Classificação</b>	<b>Descrição</b>
<b>0</b>	Não necessita reparos.
<b>1</b>	Prioridade muito baixa de reparo, que pode ser adiado por um longo período.
<b>2</b>	Prioridade baixa de reparo, que pode ser adiado por algum período.
<b>3</b>	Prioridade média de reparo, ações imediatas devem ser tomadas.
<b>4</b>	Prioridade alta de reparo, que deve ser realizado o mais breve possível.
<b>5</b>	Condição crítica, o reparo é de extrema prioridade.

Fonte: Mitra; Jain e Bhattacharjee, 2010.

Figura 3-31 - Histograma de corrosão e fissuras.

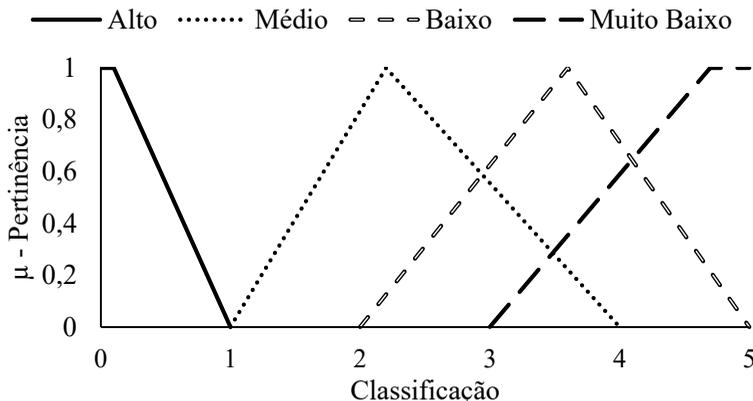


Fonte: Adaptado de Mitra; Jain e Bhattacharjee, 2010.

Os autores consideraram que os formatos das funções de pertinência resultantes poderiam se assemelhar a triângulos e trapézios, resultando nas funções de pertinência mostradas na Figura 3-32. A determinação dos parâmetros “a”, “b” e “c” (ver Figura 3-3) das funções triangulares consideradas envolveu a transformação das respostas do histograma para funções de pertinência. Os eixos verticais dos histogramas representam os “números de respostas” obtidos em relação a determinada classificação. Desta maneira, os parâmetros “a” e “c” representam a classificação com o menor “número de respostas” para uma condição particular, enquanto o parâmetro “b”, correspondente ao valor unitário, representa o valor com maior confiança. Assim sendo, a constante “b” recebeu o valor da média ponderada das respostas de uma condição particular, portanto, este valor representa a tendência central entre estas respostas. Conseqüentemente, os parâmetros “a” e “c” foram determinados de maneira a representarem a classificação mais próxima de “b” que possua a resposta mais próxima da nula. As funções trapezoidais foram obtidas similarmente. Na sequência, estas funções de

pertinência foram relacionadas e defuzzificadas para a obtenção da classificação das obras.

Figura 3-32 - Funções de pertinência para corrosão e fissuras.



Fonte: Adaptado de Mitra; Jain; Bhattacharjee, 2010.

Jain e Bhattacharjee (2012) realizaram um trabalho no qual foi preparado um questionário utilizando as informações sobre mecanismos de deterioração e suas correspondentes manifestações patológicas. Estas manifestações foram organizadas em classes referentes aos seus níveis de severidade e extensão. Este questionário foi respondido por profissionais da engenharia civil, fornecendo uma nota de 0 a 5, crescente de acordo com o estado de deterioração, para, com estas informações, gerar funções de pertinência, que foram combinadas e defuzzificadas pelo método do centroide. A Tabela 3-4 apresenta um exemplo de questão proposta com o número de profissionais que forneceram cada nota da classificação para cada uma destas descrição.

Tabela 3-4 - Exemplo de questão.

Descrição da Condição	Classificação					
	0	1	2	3	4	5
<b>Deslocamentos menores que 20 mm de profundidade e não superiores a 150 mm em qualquer outra dimensão</b>	1	2	3	7	6	2

---

**Deslocamentos superiores  
a 20 mm de profundidade  
com qualquer outra  
dimensão maior do que 150  
mm**

---

0    1    1    3    8    8

---

Fonte: Jain e Bhattacharjee, 2012.

Um total de 23 profissionais responderam aos questionários, dentre eles: 65% professores, 26% especialistas sêniores e 9% pesquisadores. Pelas respostas obtidas, ficou claro que em alguns casos, as respostas foram muito semelhantes, no entanto, em outros casos, as opiniões divergiram significativamente. Na sequência, as respostas obtidas foram analisadas e os conjuntos *fuzzy*, para cada uma das condições do questionário, foram criados.

Algumas correções dos dados foram realizadas antes de se gerar as funções de pertinências, por exemplo, na obtenção de um número de respostas R0, R1, R2, R3, R4 e R5 para a classificação 0, 1, 2, 3, 4 e 5 respectivamente. Se R3 for menor que R2 e R4, então R3 passa a ser a média entre R2 e R4. Ou seja, se a quantidade de especialistas que responderam que um determinado dano possui classificação 3 for menor do que o número de especialistas que respondem que o mesmo dano deve ter classificação 2 e menor que o número que julga ter classificação 4, então o número de respostas para a classificação 3 é substituído pela média do número de respostas 2 e 4.

Quando o número de respostas for pequeno, menor que 10% do total de respostas, este iguala-se a zero. Na sequência, os valores das funções de pertinência foram então obtidos pela equação a seguir.

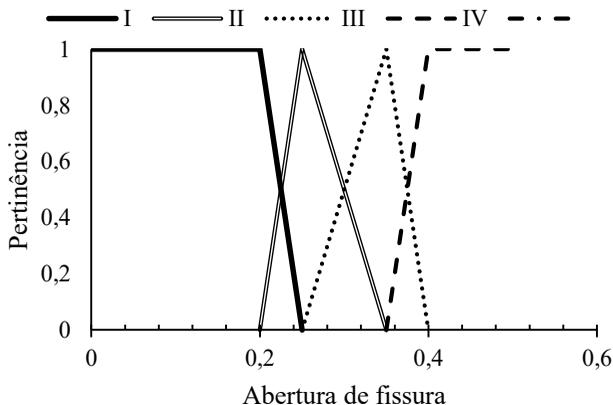
$$\mu_{xi} = \frac{R_i}{\max(R_i)} ; i = 0,1,2 \dots 5 \quad (3.9)$$

Diferente de muitos trabalhos, este artigo apresenta a formulação das funções de pertinência, sendo as mesmas criadas pela utilização do preenchimento de questionários por especialistas, porém é limitada em alguns casos específicos de problemas que podem ocorrer nas obras.

Posteriormente, Dan *et al.* (2014) aliaram a utilização de sistema *fuzzy* com uma técnica de avaliação online baseada em processos de múltipla escolha para monitorar a condição de uma ponte em Xangai - China. Com esse intuito, foram utilizados 478 sensores distribuídos ao longo de toda a ponte. Também na China, foi desenvolvida uma maneira de avaliar pontes que utilizam o sistema *fuzzy* junto com um processo de hierarquização. Para este fim, fez-se uso de funções de pertinência

relacionadas a corrosão da armadura, abertura de fissuras (Figura 3-33), resistência do concreto, danos no concreto e espessura do cobrimento; classificando a estrutura em quatro grupos, variando de 1 (boa) a 4 (ruim). (FANGWEN; CAOFANG; CHENGFENG, 2015). Por fim, os autores aplicaram a metodologia em uma ponte em arco situada na China.

Figura 3-33 - Funções de pertinência para abertura de fissuras.



Fonte: Adaptado de Fangwen; Caofang e Chengfeng, 2015.

Posteriormente, outro estudo aplicou o sistema *fuzzy* na avaliação dos danos causados por incêndios em estruturas de concreto armado (CHO *et al.*, 2017). O método utilizou funções triangulares e trapezoidais ligadas a critérios como temperatura do fogo, espessura do deslocamento e abertura de fissuras. Além do mais, o referido artigo compara os resultados obtidos pelo próprio método com os obtidos em inspeção em uma obra real que sofreu um incêndio, obtendo resultados próximos.

Em 2018, Pragalath *et al.* criaram uma metodologia que alia a lógica *fuzzy* com um algoritmo desenvolvido para identificar danos nas estruturas por meio de imagens. O sistema *fuzzy* utilizado foi baseado no sistema desenvolvido por Jain e Bhattacharjee (2012), e apresentava uma escala de 0 (sem danos) a 5 (crítica). A metodologia desenvolvida foi então testada em duas obras, uma ponte e uma edificação, que obtiveram uma nota final, respectivamente de 2,33 e 3,68.

No mesmo ano, Hamdia, Arafa e Alqedra (2018) apresentaram um artigo sobre um modelo de avaliação, que utiliza o sistema *fuzzy* para estimar a importância de alguns critérios envolvidos na avaliação de construções em concreto armado. Os critérios analisados foram: o

histórico do edifício (alterações de carga, histórico de manutenção), as condições ambientais, a capacidade estrutural, a durabilidade e o envolvimento profissional na construção (verifica se o projeto, construção e supervisão foram realizados por profissionais devidamente capacitados). Para este fim, alguns questionários foram realizados perguntando, a profissionais da área, qual a importância relativa de cada critério em relação aos demais, sendo que as respostas possíveis utilizavam termos como “fortemente”, “muito fortemente” e “moderadamente”. Assim, os resultados indicaram que a capacidade estrutural apresentou maior importância, como fator de ponderação de 50,1%, seguido da durabilidade (22,5%), das condições ambientais (12,5%), do histórico da construção (9,3%) e por último, o envolvimento profissional (5,6%).

### 3.6 CONSIDERAÇÕES

A utilização do sistema *fuzzy* para a avaliação de pontes vem sendo estudada nos últimos anos, com diferentes metodologias desenvolvidas de forma a otimizar a avaliação das OAEs pela consideração do raciocínio difuso do inspetor. Como visto, neste capítulo, existem diversas formas de empregar esse raciocínio, dependendo do objetivo específico. No caso desta presente pesquisa, decidiu-se pela utilização da lógica *fuzzy* clássica, e sua escolha justifica-se por esta possuir fácil interpretabilidade e cumprir com a intenção desta tese, além de gerar uma nota geral baseada em três notas iniciais, relacionadas a estrutura, funcionalidade e durabilidade da obra avaliada, considerando a forma do ser humano raciocinar.

Nota-se também que, na maior parte dos trabalhos não existe um estudo sobre quais as funções de pertinência que melhor se adequam, nem quais as melhores regras a serem utilizadas para relacionar os dados avaliados. Além disso, observa-se que a utilização de uma metodologia que utiliza a avaliação de cada defeito observado como uma variável de entrada pode gerar um sistema com muitas regras. Isso poderia originar um sistema muito grande, pois, são vários os defeitos que podem existir em diversos elementos, que por sua vez, podem ser construídos de diferentes maneiras, e cada um com uma função de pertinência própria. Portanto, torna-se interessante a utilização de parâmetros (variáveis) mais abrangentes como os utilizados na NBR 9452 (2016).

Um importante ponto observado foi que, na maioria dos trabalhos, os métodos desenvolvidos não foram testados, ou foram testados em

poucas obras com a avaliação de poucos inspetores ou até mesmo de um único inspetor. Mesmo no caso dos sistemas testados, os resultados, da maioria dos trabalhos, não foram comparados com uma referência.

Os trabalhos que necessitaram de questionários para a criação do sistema a ser utilizado, o fizeram pela obtenção da resposta de cerca de 20 profissionais, dentre os quais, professores, pesquisadores e especialistas no campo de avaliação de OAEs. No entanto, em sua maioria, os artigos não descreveram a existência de um sistema de validação do método desenvolvido.



#### 4 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA *FUZZY*

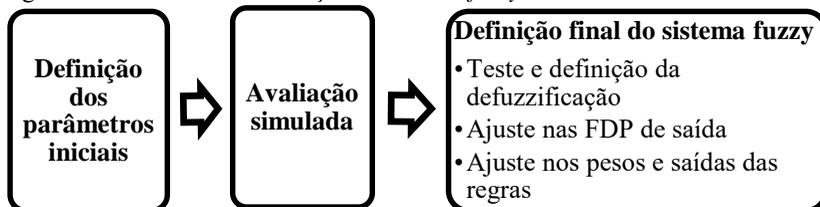
Esta tese se caracteriza por ser um trabalho teórico prático, na qual, verificou-se o pensamento e raciocínio do inspetor de pontes ao avaliar uma obra. Utilizando-se, para este fim, os critérios da NBR 9452 (2016) e os conhecimentos e experiências de diversos profissionais da área modelados pela utilização do sistema *fuzzy*. Esta modelagem foi realizada utilizando a ferramenta *fuzzy* do software MatLab.

Para atingir este objetivo, foram criadas as funções de pertinência das entradas do sistema, que consistem nas notas dos três critérios: estrutural, funcional e durabilidade. Assim também, as regras foram definidas com o intuito de relacionar estas funções e fazer a inferência do modelo com as funções de pertinência de saída do sistema. Estas que são defuzzificadas para a obtenção da Nota Geral (NG) da obra a ser utilizada na priorização de intervenção.

O sistema foi desenvolvido de forma a incluir o raciocínio real dos inspetores, para tanto, produziu-se um questionário simulado (apresentado no Apêndice A), o qual permite que todas as regras desenvolvidas fossem ativadas. Este questionário foi aplicado a profissionais da área de inspeção de OEAs. O inspetor fornecia uma nota geral (NG) em função, somente, das notas de cada um dos critérios (durabilidade, estrutural e funcional). Com este questionário foram testadas diferentes formas de defuzzificação (pelo centroide, pelo mínimo dos máximos e pela média dos máximos) e as regras puderam ser aferidas.

A definição final do sistema incluiu um estudo sobre o modelo de defuzzificação e o acerto das funções de pertinência de saída. Além disso, abrange o estudo dos pesos e saídas de cada regra a serem utilizados de forma que a média das notas finais, respondidas por cada inspetor, fosse mais próxima daquela fornecida pelo sistema. Todo esse processo está resumido na Figura 4-1.

Figura 4-1 - Processo de definição do sistema *fuzzy*.



#### 4.1 PARÂMETROS DO SISTEMA *FUZZY*

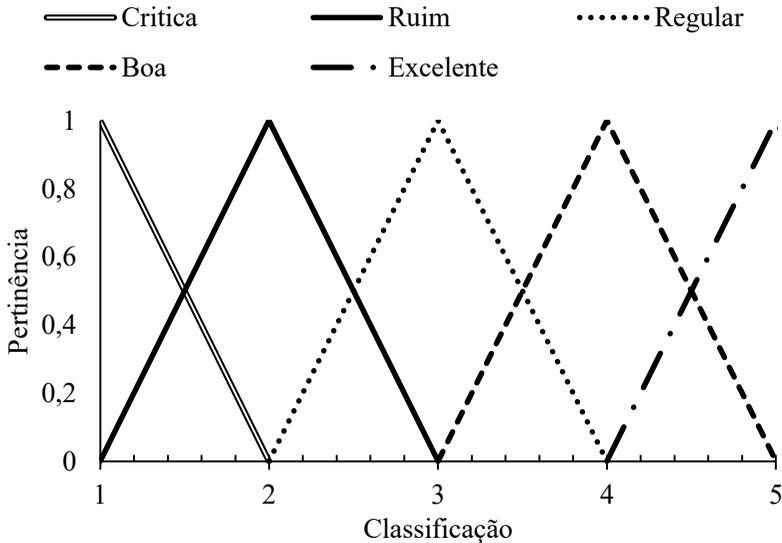
A primeira etapa desta metodologia constituiu na criação e modelagem do sistema. Assim, foram definidas as FDP das entradas e saídas e suas regras.

##### 4.1.1 Definição dos parâmetros iniciais

Os dados de entrada do sistema desenvolvido referem-se aos três parâmetros presentes na NBR 9452 (2016): estrutural, funcional e durabilidade, sendo que cada um destes parâmetros possui 5 classificações: Crítica, Ruim, Regular, Boa e Excelente; de modo que, para cada classificação foi associada a uma função de pertinência diferente.

Para a modelagem de um sistema por meio de especialistas, o usual e mais lógico é adotar funções triangulares, como visto no tópico 3.2.1, estas funções, inicialmente, possuem o formato demonstrado na Figura 4-2.

Figura 4-2 - Funções de pertinência dos critérios de entrada.



As variáveis “a”, “b” e “c” destas funções, apresentadas, também, no item 3.2.1, estão demonstradas na Tabela 4-1 a seguir. De mesma maneira, foram criadas funções triangulares para a saída gerada.

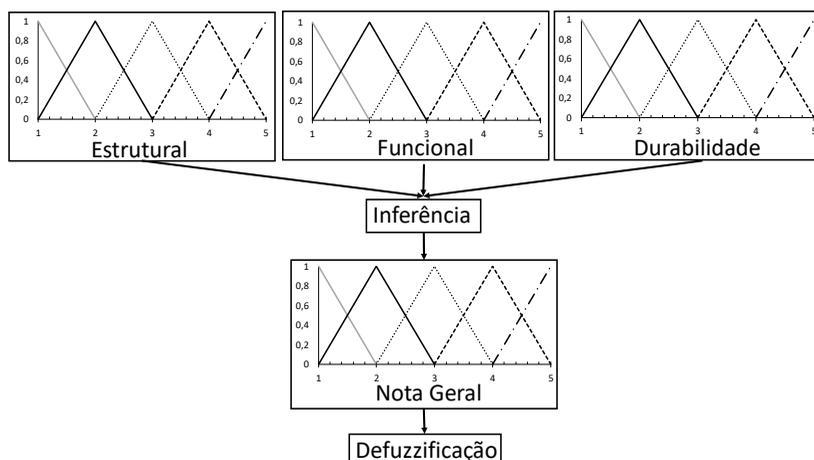
Tabela 4-1 - Variáveis das funções de pertinência de entrada

<b>Função de Pertinência</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>
<b>Crítica</b>	-	1	2
<b>Ruim</b>	1	2	3
<b>Regular</b>	2	3	4
<b>Boa</b>	3	4	5
<b>Excelente</b>	4	5	-

Posteriormente, foram verificadas algumas diferentes maneiras de defuzzificação (pelo centroide, pelo mínimo dos máximos e pela média dos máximos). Somente após esta etapa, foram feitos os ajustes finos nas funções de pertinência, em função da forma de defuzzificação.

A Figura 4-3, demonstra o sistema *fuzzy* criado inicialmente, isto é, as funções de pertinência dos critérios de entrada, relacionadas com as funções da nota geral por meio da inferência, ou seja, pelas regras, finalizando com a defuzzificação.

Figura 4-3 - Sistema *fuzzy* criado inicialmente.



Para a realização da inferência, foram desenvolvidas 125 regras, com todas as combinações possíveis dos termos linguísticos das variáveis

de entrada. Assim sendo, a parte “se” de alguma dessas regras está descrita no Quadro 4-1. As partes “então” foram inicialmente estimadas para, em seguida, serem calibradas, gerando as regras finais do sistema e estão descritas na Tabela 4-6.

Quadro 4-1 - Parte "se" das regras.

1. Se (Estrutural é Crítica) e (Funcional é Crítica) e (Durabilidade é Crítica)
2. Se (Estrutural é Crítica) e (Funcional é Crítica) e (Durabilidade é Ruim)
3. Se (Estrutural é Crítica) e (Funcional é Crítica) e (Durabilidade é Regular)
4. Se (Estrutural é Crítica) e (Funcional é Crítica) e (Durabilidade é Boa)
5. Se (Estrutural é Crítica) e (Funcional é Crítica) e (Durabilidade é Excelente)
22. Se (Estrutural é Crítica) e (Funcional é Excelente) e (Durabilidade é Ruim)
28. Se (Estrutural é Ruim) e (Funcional é Crítica) e (Durabilidade é Regular)
75. Se (Estrutural é Regular) e (Funcional é Excelente) e (Durabilidade é Excelente)
84. Se (Estrutural é Boa) e (Funcional é Ruim) e (Durabilidade é Boa)
125. Se (Estrutural é Excelente) e (Funcional é Excelente) e (Durabilidade é Excelente)

Em seguida, após a determinação do sistema, realizou-se a avaliação simulada.

## 4.2 AVALIAÇÃO SIMULADA

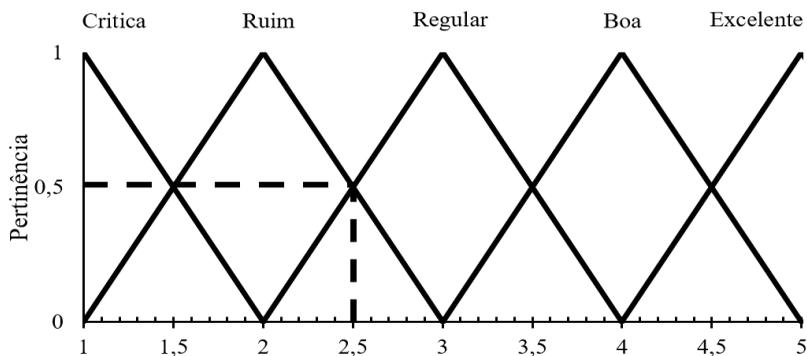
Para verificar todas as regras, decidiu-se adotar alguns valores de entrada do sistema, avaliações estruturais, funcionais e de durabilidade, e indagar a profissionais da área qual seria a avaliação geral de uma OAE que tivesse obtido estas notas. Para esta etapa, elaborou-se um primeiro questionário com obras fictícias. Desta maneira, pode-se verificar o raciocínio do inspetor independente da obra analisada, em função, somente, das notas dos critérios.

Assim, para esta tarefa, adotaram-se valores de entrada que ativassem duas FDP com pertinência de 0,5 cada. Ou seja, utilizaram-se valores com final 0,5 (sendo 1,5 - 2,5 - 3,5 e 4,5). Por exemplo, a entrada

2,5 ativa as funções “Ruim” e “Regular” simultaneamente, como demonstrado na

Figura 4-4. Portanto, com cada entrada ativando duas regras, pode-se diminuir o tamanho do questionário e continuar a abranger todas as regras. Vale salientar que este método, embora, reduza o questionário deixa o ajuste fino das regras mais trabalhoso.

Figura 4-4 - Ativação das regras simuladas.



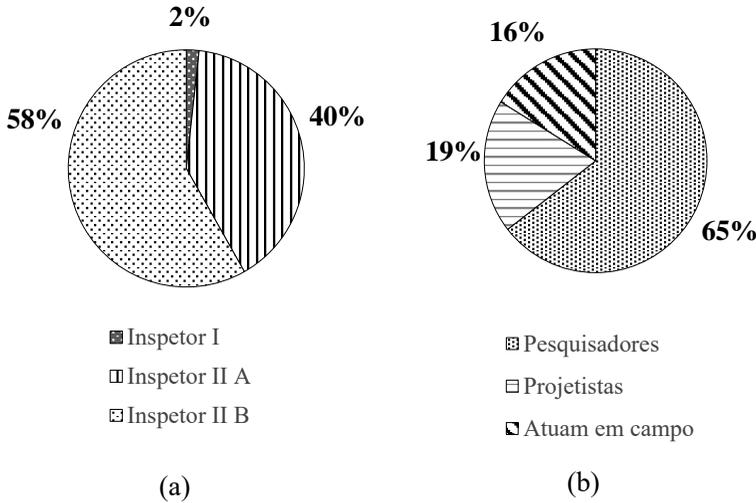
Foram então, realizadas todas as combinações possíveis destes valores em cada critério, e em seguida elaborados questionários enviados a profissionais para fornecerem a avaliação geral. Cada combinação foi utilizada como entrada e gerada uma nota final. Estas notas foram comparadas com as médias das respostas obtidas para cada entrada.

Com a intenção de obter avaliações confiáveis, o convite para contribuir com este trabalho foi efetuado somente a inspetores com experiência na área. Alguns inspetores inclusive participaram da elaboração da NBR 9452 (2016).

Ao total, 15 profissionais responderam a essas avaliações, sendo que 16% atuam no campo com inspeção de OAE, 19% são projetistas e 65% são pesquisadores. Com a intenção de caracterizar ainda mais os inspetores, estes foram, também, separados de acordo com tempo de experiência dos inspetores, referindo-se a NBR 16230 (2013) (como explicado no item 2.2), porém, com uma subdivisão dos inspetores II. Assim, 58% das respostas foram realizadas por Inspetores II B, aqui considerados com mais de 10 anos de experiência. De mesma maneira, 40% das respostas foram feitas por Inspetores II A, considerados com experiência entre 5 e 10 anos. Somente 2% das respostas obtidas vieram

de Inspetores I, com tempo de experiência entre 1 e 5 anos. A Figura 4-5 (a) e (b) apresenta estas distribuições. Para a obtenção destes valores, nos casos de profissionais que se adequam a mais de uma classificação, os mesmos foram considerados nos dois grupos.

Figura 4-5 - Classificação dos profissionais que responderam as avaliações simuladas.



#### 4.2.1 Resultado dos questionários simulados

Para a aferição do sistema, calculou-se a média das notas gerais respondidas pelos inspetores para cada conjunto de dados de entrada, composto pelas notas: estrutural, funcional e durabilidade. Estas médias e seus respectivos desvios padrões estão apresentados na Tabela 4-2, organizados em ordem decrescente de desvio padrão.

Nota-se que o maior desvio padrão foi 1,20 e a média foi 0,39. Outro ponto a ser observado é que, em geral, o desvio padrão é maior nos casos em que a obra teria sido bem avaliada no critério estrutural e durabilidade, porém, recebeu nota baixa no critério funcional. O desvio continua elevado nos casos em que a avaliação era alta no estrutural e em um dos outros dois critérios, porém, baixa no outro. Portanto, isso indica uma indecisão e falta de consenso dos inspetores ao avaliar uma obra boa estruturalmente, mas ruim nos outros critérios.

Em geral, houve uma conformidade maior das notas quando as avaliações de entradas possuíam valores próximos e quando a nota estrutural era baixa. Assim, o maior desvio padrão quando o estrutural recebeu nota 1,5 foi 0,59; sendo até duas vezes menor que o desvio máximo encontrado.

Pode-se perceber que existem interpretações diferentes entre os inspetores em relação a importância dos critérios. Verificando-se as avaliações individuais, alguns inspetores atribuíram uma nota final que apresentou uma diferença de 71% (MD- maior diferença) em relação à média desta mesma avaliação, obtida pela consideração de todos os inspetores, obedecendo a fórmula 4-1. Verificando todas estas maiores diferenças e obtendo a sua média, chegou-se ao valor de 22%.

$$MD \geq \left\{ \begin{array}{l} \frac{|Maior\ resultado\ obtido - Média\ destes\ resultados|}{Média\ destes\ resultados} \\ \frac{|Menor\ resultado\ obtido - Média\ destes\ resultados|}{Média\ destes\ resultados} \end{array} \right. \quad (4-1)$$

Tabela 4-2 - Média das avaliações simuladas e respectivos desvios padrões.

<b>E</b>	<b>F</b>	<b>D</b>	<b>NG - Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>D</b>	<b>NG - Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<b>4,5</b>	1,5	3,5	2,35	1,20	4,5	3,5	4,5	4,20	0,29
<b>3,5</b>	1,5	4,5	2,30	1,13	3,5	2,5	3,5	2,70	0,28
<b>4,5</b>	4,5	1,5	2,89	0,99	4,5	2,5	2,5	2,70	0,28
<b>4,5</b>	2,5	4,5	3,20	0,99	4,5	4,5	3,5	3,70	0,28
<b>3,5</b>	1,5	3,5	2,15	0,92	2,5	4,5	2,5	2,69	0,26
<b>4,5</b>	3,5	1,5	2,75	0,86	1,5	2,5	2,5	1,67	0,25
<b>4,5</b>	1,5	1,5	2,53	0,82	2,5	1,5	2,5	2,24	0,24
<b>4,5</b>	1,5	4,5	3,63	0,81	3,5	3,5	2,5	2,67	0,23
<b>4,5</b>	3,5	2,5	3,27	0,79	1,5	3,5	3,5	1,65	0,21
<b>3,5</b>	4,5	1,5	2,05	0,78	1,5	3,5	4,5	1,65	0,21
<b>4,5</b>	4,5	2,5	3,46	0,76	1,5	4,5	3,5	1,65	0,21
<b>4,5</b>	1,5	2,5	2,84	0,74	3,5	4,5	4,5	3,65	0,21
<b>3,5</b>	1,5	2,5	1,98	0,67	4,5	3,5	3,5	3,65	0,21
<b>4,5</b>	2,5	1,5	1,95	0,64	2,5	3,5	2,5	2,50	0,21
<b>1,5</b>	4,5	4,5	2,05	0,59	1,5	1,5	1,5	1,42	0,18

(continua)

(conclusão)

E	F	D	NG - Média	Desvio Padrão	E	F	D	NG - Média	Desvio Padrão
3,5	3,5	1,5	1,91	0,57	1,5	1,5	2,5	1,58	0,18
2,5	1,5	3,5	1,90	0,57	1,5	2,5	1,5	1,52	0,15
3,5	2,5	4,5	2,85	0,49	2,5	3,5	3,5	2,60	0,14
3,5	1,5	1,5	1,85	0,49	1,5	2,5	3,5	1,60	0,14
3,5	2,5	1,5	1,85	0,49	1,5	3,5	2,5	1,60	0,14
1,5	4,5	2,5	1,82	0,47	1,5	1,5	3,5	1,57	0,12
1,5	2,5	4,5	1,92	0,44	2,5	4,5	3,5	2,58	0,11
3,5	4,5	2,5	2,80	0,42	4,5	4,5	4,5	4,53	0,09
4,5	2,5	3,5	2,80	0,42	1,5	3,5	1,5	1,55	0,07
2,5	3,5	1,5	2,02	0,36	2,5	2,5	4,5	2,55	0,07
1,5	4,5	1,5	1,62	0,36	3,5	2,5	2,5	2,55	0,07
2,5	4,5	1,5	2,32	0,36	3,5	3,5	4,5	3,55	0,07
2,5	3,5	4,5	2,79	0,36	2,5	2,5	3,5	2,53	0,04
2,5	2,5	1,5	1,75	0,35	2,5	2,5	2,5	2,50	0,00
1,5	1,5	4,5	1,84	0,35	3,5	3,5	3,5	3,50	0,00
2,5	4,5	4,5	2,76	0,34	3,5	4,5	3,5	3,50	0,00
2,5	1,5	4,5	2,47	0,31	<b>Médio</b>				<b>0,39</b>
2,5	1,5	1,5	1,95	0,30	<b>Máximo</b>				<b>1,20</b>

E – Estrutural  
F – Funcional  
D – Durabilidade  
NG – Nota Geral

#### 4.3 DEFINIÇÃO FINAL DO SISTEMA FUZZY

##### 4.3.1 Testes de diferentes defuzzificações

Foram criados três casos com diferentes formas de defuzzificação, sendo os casos: 1A – defuzzificação pelo centroide, 1B – defuzzificação pelo mínimo dos máximos e 1C – defuzzificação pela média dos máximos. As avaliações simuladas foram testadas e seus resultados estão presentes na Tabela 4-3. Assim, verificou-se que o caso 1B apresentou

diferenças máximas menores, porém, a média das diferenças foi maior. Já o caso 1C obteve resultados próximo ao do caso 1A. Como as diferenças entre o modelo 1A e 1C foram pequenas e a defuzzificação pelo centroide é a mais utilizada, optou-se por este modelo. Adotando então o modelo de defuzzificação pelo centroide, foi necessário efetuar alguns ajustes nas FDP de saída, que são detalhadas no item a seguir.

Tabela 4-3 - Diferenças máximas e médias para os casos de 1A à 1C

E	F	D	NG	A	Diferença	B	Diferença	C	Diferença
					%		%		%
1,5	1,5	1,5	1,4	1,9	-32%	1,0	30%	1,7	-23%
1,5	1,5	2,5	1,6	1,9	-18%	1,0	37%	1,7	-10%
1,5	1,5	4,5	1,8	2,4	-29%	1,0	46%	2,2	-22%
1,5	2,5	1,5	1,5	1,9	-23%	1,0	34%	1,7	-14%
1,5	2,5	2,5	1,7	2,4	-42%	1,0	40%	2,2	-34%
1,5	2,5	4,5	1,9	2,4	-23%	1,0	48%	2,2	-17%
1,5	4,5	1,5	1,6	1,9	-15%	1,0	38%	1,7	-7%
1,5	4,5	2,5	1,8	2,4	-30%	1,0	45%	2,2	-23%
1,5	4,5	4,5	2,1	2,4	-20%	1,0	51%	2,4	-17%
2,5	1,5	1,5	2,0	1,9	4%	1,0	49%	1,7	11%
2,5	1,5	2,5	2,2	2,5	-12%	1,5	32%	2,5	-12%
2,5	1,5	4,5	2,5	2,5	-1%	1,5	38%	2,5	-1%
2,5	3,5	1,5	2,0	2,4	-17%	1,0	50%	2,2	-11%
2,5	3,5	2,5	2,5	2,5	0%	1,5	39%	2,5	0%
2,5	3,5	4,5	2,8	3,5	-25%	2,5	10%	3,5	-25%
2,5	4,5	1,5	2,3	2,4	-2%	1,0	57%	2,2	3%
2,5	4,5	2,5	2,7	2,5	7%	1,5	43%	2,5	7%
2,5	4,5	4,5	2,8	3,5	-27%	2,5	9%	3,5	-27%
4,5	1,5	1,5	2,5	2,5	1%	1,5	40%	2,5	1%
4,5	1,5	2,5	2,8	3,0	-6%	2,5	11%	3,0	-6%
4,5	1,5	4,5	3,6	3,5	4%	2,5	31%	3,5	4%
4,5	3,5	1,5	2,8	2,5	9%	1,5	45%	2,5	9%
4,5	3,5	2,5	3,3	3,0	8%	2,5	23%	3,0	8%
4,5	3,5	4,5	4,2	4,0	5%	3,5	16%	4,0	5%

(continua)

(continuação)

4,5	4,5	1,5	2,9	2,5	13%	1,5	47%	2,5	13%
4,5	4,5	2,5	3,5	3,5	-1%	2,5	27%	3,5	-1%
1,5	1,5	3,5	1,6	1,9	-19%	1,0	36%	1,7	-11%
1,5	2,5	3,5	1,6	2,4	-48%	1,0	38%	2,2	-40%
1,5	3,5	1,5	1,6	1,9	-21%	1,0	35%	1,7	-12%
1,5	3,5	2,5	1,6	2,4	-48%	1,0	38%	2,2	-40%
1,5	3,5	3,5	1,7	2,4	-48%	1,0	39%	2,4	-45%
1,5	3,5	4,5	1,7	2,4	-48%	1,0	39%	2,4	-45%
1,5	4,5	3,5	1,7	2,4	-48%	1,0	39%	2,4	-45%
2,5	1,5	3,5	1,9	2,5	-32%	1,5	20%	2,5	-32%
2,5	2,5	1,5	1,8	1,9	-7%	1,0	43%	1,7	1%
2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	0%	1,5	39%	2,5	0%
2,5	2,5	3,5	2,5	2,5	1%	1,5	40%	2,5	1%
2,5	2,5	4,5	2,6	2,5	2%	1,5	40%	2,5	2%
2,5	3,5	3,5	2,6	3,0	-15%	2,5	3%	3,0	-15%
2,5	4,5	3,5	2,6	3,0	-16%	2,5	2%	3,0	-16%
3,5	1,5	1,5	1,9	2,5	-35%	1,5	18%	2,5	-35%
3,5	1,5	2,5	2,0	2,5	-27%	1,5	23%	2,5	-27%
3,5	1,5	3,5	2,2	3,5	-63%	2,5	-17%	3,5	-63%
3,5	1,5	4,5	2,3	3,5	-52%	2,5	-10%	3,5	-52%
3,5	2,5	1,5	1,9	2,5	-35%	1,5	18%	2,5	-35%
3,5	2,5	2,5	2,6	2,5	2%	1,5	40%	2,5	2%
3,5	2,5	3,5	2,7	3,5	-30%	2,5	7%	3,5	-30%
3,5	2,5	4,5	2,9	3,5	-23%	2,5	12%	3,5	-23%
3,5	3,5	1,5	1,9	2,5	-31%	1,5	20%	2,5	-31%
3,5	3,5	2,5	2,7	2,5	6%	1,5	43%	2,5	6%
3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	0%	2,5	28%	3,5	0%
3,5	3,5	4,5	3,6	3,5	1%	2,5	29%	3,5	1%
3,5	4,5	1,5	2,1	2,5	-22%	1,5	26%	2,5	-22%
3,5	4,5	2,5	2,8	3,5	-25%	2,5	10%	3,5	-25%
3,5	4,5	3,5	3,5	3,5	0%	2,5	28%	3,5	0%
3,5	4,5	4,5	3,7	3,5	4%	2,5	31%	3,5	4%

(continua)

										(conclusão)
4,5	1,5	3,5	2,4	3,5	-49%	2,5	-7%	3,5	-49%	
4,5	2,5	1,5	2,0	2,5	-28%	1,5	22%	2,5	-28%	
4,5	2,5	2,5	2,7	3,0	-11%	2,5	7%	3,0	-11%	
4,5	2,5	3,5	2,8	3,5	-25%	2,5	10%	3,5	-25%	
4,5	2,5	4,5	3,2	4,0	-25%	3,5	-10%	4,0	-25%	
4,5	3,5	3,5	3,7	3,5	4%	2,5	31%	3,5	4%	
4,5	4,5	3,5	3,7	3,5	5%	2,5	32%	3,5	5%	
4,5	4,5	4,5	4,5	4,1	9%	3,5	22%	4,3	6%	
Média					19%	30%		18%		
Máx.					63%	57%		63%		

---

E – Estrutural  
F – Funcional  
D – Durabilidade  
NG – Nota Geral  
A – Nota geral do sistema no caso A  
B – Nota geral do sistema no caso B  
C - Nota geral do sistema no caso C

### 4.3.2 Ajuste nas Funções de pertinência da saída

Como a defuzzificação foi definida em função do centroide, e considerando seu formato triangular, como mostrado na Figura 4-6, o valor resultante de uma avaliação 1; 1 e 1 seria 1,33. Da mesma maneira, a resposta para uma entrada 5; 5 e 5 seria 4,67. Aliado a este fator, percebeu-se que, de maneira geral, as entradas (E, D e F) que apresentavam NG entre 1 e 2, obtiveram notas gerais obtidas pelo sistema fuzzy desenvolvido (NGS) maiores do que as esperadas, como pode ser visto na Tabela 4-3. Ou seja, com o centroide da figura a ser defuzzificada, resultante da inferência, deslocado para a direita. Por isso, optou-se inicialmente por diminuir o peso das regras com saídas diferentes de “então crítica”, percebendo que as regras que ativavam esta saída possuíam uma confiança maior, conseqüentemente suas ativações poderiam deslocar o centroide da figura para a esquerda, diminuindo a NGS obtida. Assim, inicialmente, as regras que ativam as funções com saída “então crítica” mantiveram o peso 1 e as demais passaram a ter peso 0,5. Esse fator fica mais claro ao observar as Figura 4-7 e Figura 4-8, que ilustra uma possível configuração da figura obtida pela inferência do sistema com as regras tendo o mesmo peso e com pesos diferentes.

Figura 4-6 - Problema gerado pela defuzzificação.

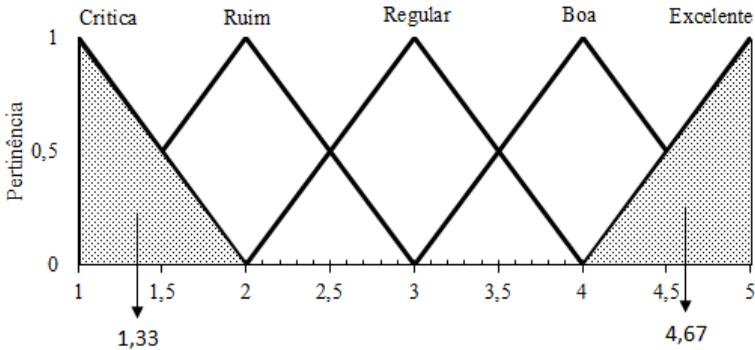


Figura 4-7 - Resultado da inferência com as regras com pesos iguais

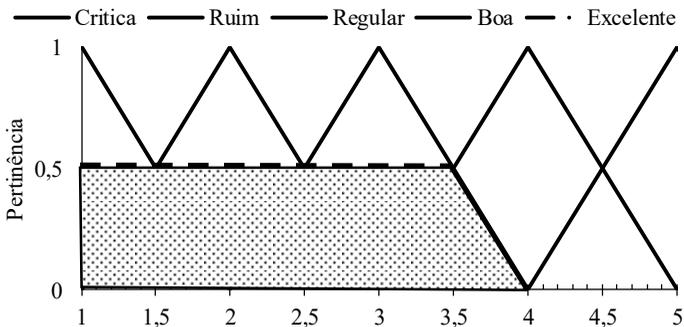
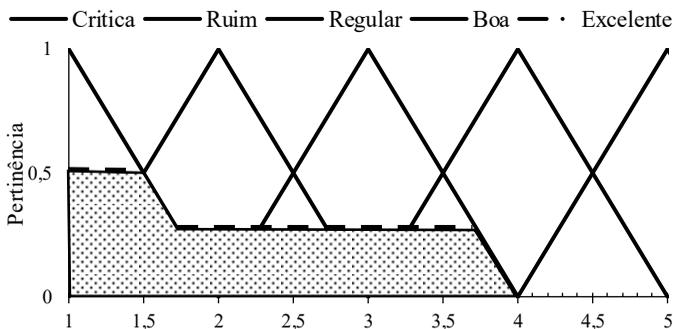


Figura 4-8 - Resultado da inferência com as regras com pesos diferentes



Além desta alteração dos pesos, para resolver a defuzzificação pelo centroide, ajustaram-se as funções Crítica e Excelente para que seus limites externos fossem ampliados, assim, o domínio passou a ser [0,61; 5,46]. As demais funções foram adequadas a esta nova realidade, e seus

formatos estão ilustrados na Figura 4-9 e seus valores, conforme explicados na Figura 3-3, aparecem na Tabela 4-4. Observa-se que os limites precisaram de ajuste diferentes, este fato foi ocasionado pela diferença de peso das regras.

Figura 4-9 - Funções de Pertinência da saída do sistema.

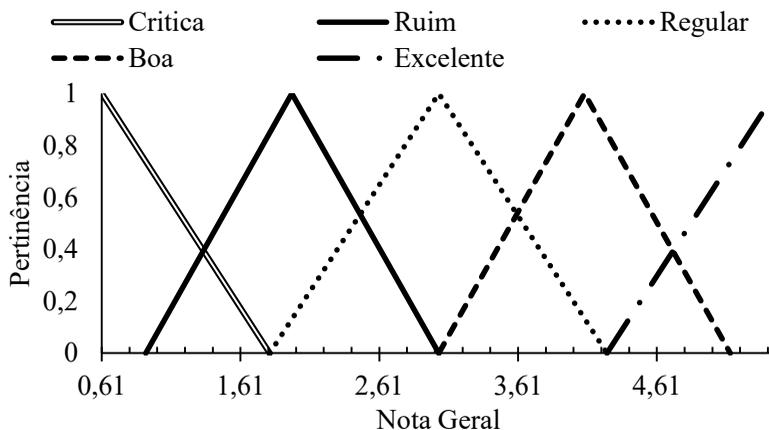


Tabela 4-4 - Valores finais das funções de pertinência da saída do sistema.

Função de Pertinência	a	b	c
<b>Crítica</b>	-	0,61	1,82
<b>Ruim</b>	0,927	1,98	3,04
<b>Regular</b>	1,82	3,04	4,25
<b>Boa</b>	3,04	4,09	5,14
<b>Excelente</b>	4,25	5,46	-

### 4.3.3 Ajuste nas regras

A partir das informações derivadas das avaliações simuladas pode-se ajustar as regras. Primeiramente, cada conjunto de avaliação de entrada, composto pelas notas dos três critérios, foi inserido no sistema desenvolvido, obtendo-se então, a nota geral da obra, segundo as regras estimadas anteriormente. Desta maneira, confrontou-se a média das avaliações simuladas, obtidas nos questionários, com os valores advindos do modelo criado e verificaram-se as diferenças dos resultados.

Para que as regras pudessem ser averiguadas, inicialmente foi criada uma tabela com os dados de entrada e as regras ativadas pelos

mesmos. Pode-se verificar quais as regras que apresentavam maior discrepância se comparadas com as médias das avaliações simuladas. Para ilustrar, a Tabela 4-5 traz as regras ativadas por uma entrada do sistema.

Tabela 4-5 - Exemplo de regras ativadas para cada entrada.

<b>Entradas do sistema</b>			<b>Regras ativadas</b>							
<b>E</b>	<b>F</b>	<b>D</b>								
2,5	3,5	4,5	39	40	44	45	64	65	69	70

Portanto, cada regra foi estudada verificando-se a necessidade de melhorar ou piorar a sua classificação da saída ou alterar seu peso, isso foi feito com a intenção de reduzir a diferença entre as médias das avaliações simuladas e a saída do sistema criado ( $\text{Diferença em \%} = |\text{NG-NGS}/\text{NG}|$ ), para no máximo 10%.

Por fim, as regras foram definidas e suas entradas, saídas e pesos estão indicados na Tabela 4-6. Assim sendo, como exemplo, tem-se a regra 8 descrita como “Se Estrutural é Crítica e Funcional é Ruim e Durabilidade é Regular, então a Nota Geral é Crítica”, essa consideração possui peso 1.

Tabela 4-6 - Regras finais.

<b>Regra</b>	<b>Entradas</b>			<b>Saída Nota Geral</b>	<b>Peso</b>
	<b>Estrutural</b>	<b>Funcional</b>	<b>Durabilidade</b>		
<b>1</b>	Crítica	Crítica	Crítica	Crítica	1
<b>2</b>	Crítica	Crítica	Ruim	Crítica	1
<b>3</b>	Crítica	Crítica	Regular	Crítica	1
<b>4</b>	Crítica	Crítica	Boa	Crítica	1
<b>5</b>	Crítica	Crítica	Excelente	Crítica	1
<b>6</b>	Crítica	Ruim	Crítica	Crítica	1
<b>7</b>	Crítica	Ruim	Ruim	Crítica	1
<b>8</b>	Crítica	Ruim	Regular	Crítica	1
<b>9</b>	Crítica	Ruim	Boa	Crítica	1
<b>10</b>	Crítica	Ruim	Excelente	Crítica	1
<b>11</b>	Crítica	Regular	Crítica	Crítica	1
<b>12</b>	Crítica	Regular	Ruim	Crítica	1

(continua)

(continuação)

Regra	Entradas			Saída	Peso
	Estrutural	Funcional	Durabilidade	Nota Geral	
13	Crítica	Regular	Regular	Crítica	1
14	Crítica	Regular	Boa	Crítica	1
15	Crítica	Regular	Excelente	Crítica	1
16	Crítica	Boa	Crítica	Crítica	1
17	Crítica	Boa	Ruim	Crítica	1
18	Crítica	Boa	Regular	Crítica	1
19	Crítica	Boa	Boa	Crítica	1
20	Crítica	Boa	Excelente	Crítica	1
21	Crítica	Excelente	Crítica	Crítica	1
22	Crítica	Excelente	Ruim	Crítica	1
23	Crítica	Excelente	Regular	Crítica	1
24	Crítica	Excelente	Boa	Crítica	1
25	Crítica	Excelente	Excelente	Crítica	1
26	Ruim	Crítica	Crítica	Crítica	1
27	Ruim	Crítica	Ruim	Crítica	1
28	Ruim	Crítica	Regular	Crítica	1
29	Ruim	Crítica	Boa	Crítica	0,5
30	Ruim	Crítica	Excelente	Ruim	0,5
31	Ruim	Ruim	Crítica	Crítica	1
32	Ruim	Ruim	Ruim	Ruim	0,3
33	Ruim	Ruim	Regular	Ruim	0,7
34	Ruim	Ruim	Boa	Ruim	0,5
35	Ruim	Ruim	Excelente	Regular	0,2
36	Ruim	Regular	Crítica	Crítica	1
37	Ruim	Regular	Ruim	Ruim	0,7
38	Ruim	Regular	Regular	Ruim	0,5
39	Ruim	Regular	Boa	Ruim	0,5
40	Ruim	Regular	Excelente	Regular	0,1
41	Ruim	Boa	Crítica	Crítica	0,5
42	Ruim	Boa	Ruim	Ruim	0,5
43	Ruim	Boa	Regular	Ruim	0,5
44	Ruim	Boa	Boa	Ruim	0,5
45	Ruim	Boa	Excelente	Regular	0,1

(continua)

(continuação)

<b>Regra</b>	<b>Entradas</b>			<b>Saída Nota Geral</b>	<b>Peso</b>
	<b>Estrutural</b>	<b>Funcional</b>	<b>Durabilidade</b>		
46	Ruim	Excelente	Crítica	Crítica	0,5
47	Ruim	Excelente	Ruim	Ruim	0,5
48	Ruim	Excelente	Regular	Regular	0,1
49	Ruim	Excelente	Boa	Regular	0,1
50	Ruim	Excelente	Excelente	Regular	0,5
51	Regular	Crítica	Crítica	Crítica	1
52	Regular	Crítica	Ruim	Crítica	1
53	Regular	Crítica	Regular	Crítica	0,5
54	Regular	Crítica	Boa	Crítica	0,2
55	Regular	Crítica	Excelente	Ruim	0,5
56	Regular	Ruim	Crítica	Crítica	0,7
57	Regular	Ruim	Ruim	Regular	0,2
58	Regular	Ruim	Regular	Regular	0,4
59	Regular	Ruim	Boa	Regular	0,4
60	Regular	Ruim	Excelente	Regular	0,5
61	Regular	Regular	Crítica	Crítica	0,7
62	Regular	Regular	Ruim	Regular	0,2
63	Regular	Regular	Regular	Regular	0,5
64	Regular	Regular	Boa	Regular	0,5
65	Regular	Regular	Excelente	Regular	0,5
66	Regular	Boa	Crítica	Crítica	0,5
67	Regular	Boa	Ruim	Ruim	0,5
68	Regular	Boa	Regular	Regular	0,5
69	Regular	Boa	Boa	Regular	0,5
70	Regular	Boa	Excelente	Boa	0,2
71	Regular	Excelente	Crítica	Crítica	0,5
72	Regular	Excelente	Ruim	Regular	0,3
73	Regular	Excelente	Regular	Regular	0,5
74	Regular	Excelente	Boa	Regular	0,5
75	Regular	Excelente	Excelente	Regular	0,5
76	Boa	Crítica	Crítica	Crítica	0,5
77	Boa	Crítica	Ruim	Crítica	0,2
78	Boa	Crítica	Regular	Crítica	0,2

(continua)

(continuação)

<b>Regra</b>	<b>Entradas</b>			<b>Saída</b>	<b>Peso</b>
	<b>Estrutural</b>	<b>Funcional</b>	<b>Durabilidade</b>	<b>Nota Geral</b>	
<b>79</b>	Boa	Crítica	Boa	Crítica	0,1
<b>80</b>	Boa	Crítica	Excelente	Crítica	0,1
<b>81</b>	Boa	Ruim	Crítica	Crítica	0,5
<b>82</b>	Boa	Ruim	Ruim	Ruim	0,3
<b>83</b>	Boa	Ruim	Regular	Ruim	0,3
<b>84</b>	Boa	Ruim	Boa	Ruim	0,2
<b>85</b>	Boa	Ruim	Excelente	Regular	0,2
<b>86</b>	Boa	Regular	Crítica	Ruim	0,5
<b>87</b>	Boa	Regular	Ruim	Regular	0,2
<b>88</b>	Boa	Regular	Regular	Regular	0,5
<b>89</b>	Boa	Regular	Boa	Boa	0,2
<b>90</b>	Boa	Regular	Excelente	Boa	0,2
<b>91</b>	Boa	Boa	Crítica	Ruim	0,2
<b>92</b>	Boa	Boa	Ruim	Regular	0,2
<b>93</b>	Boa	Boa	Regular	Regular	0,5
<b>94</b>	Boa	Boa	Boa	Boa	0,5
<b>95</b>	Boa	Boa	Excelente	Boa	0,5
<b>96</b>	Boa	Excelente	Crítica	Ruim	0,2
<b>97</b>	Boa	Excelente	Ruim	Regular	0,3
<b>98</b>	Boa	Excelente	Regular	Boa	0,2
<b>99</b>	Boa	Excelente	Boa	Boa	0,5
<b>100</b>	Boa	Excelente	Excelente	Boa	0,5
<b>101</b>	Excelente	Crítica	Crítica	Crítica	0,5
<b>102</b>	Excelente	Crítica	Ruim	Regular	0,5
<b>103</b>	Excelente	Crítica	Regular	Regular	0,4
<b>104</b>	Excelente	Crítica	Boa	Regular	0,4
<b>105</b>	Excelente	Crítica	Excelente	Regular	0,4
<b>106</b>	Excelente	Ruim	Crítica	Regular	0,2
<b>107</b>	Excelente	Ruim	Ruim	Regular	0,2
<b>108</b>	Excelente	Ruim	Regular	Regular	0,4
<b>109</b>	Excelente	Ruim	Boa	Regular	0,4
<b>110</b>	Excelente	Ruim	Excelente	Boa	0,7
<b>111</b>	Excelente	Regular	Crítica	Ruim	0,5

(continua)

(conclusão)

Regra	Entradas			Saída Nota Geral	Peso
	Estrutural	Funcional	Durabilidade		
112	Excelente	Regular	Ruim	Regular	0,2
113	Excelente	Regular	Regular	Regular	0,5
114	Excelente	Regular	Boa	Boa	0,2
115	Excelente	Regular	Excelente	Boa	0,5
116	Excelente	Boa	Crítica	Regular	0,5
117	Excelente	Boa	Ruim	Regular	0,5
118	Excelente	Boa	Regular	Regular	0,5
119	Excelente	Boa	Boa	Boa	0,5
120	Excelente	Boa	Excelente	Boa	0,5
121	Excelente	Excelente	Crítica	Regular	0,5
122	Excelente	Excelente	Ruim	Regular	0,5
123	Excelente	Excelente	Regular	Boa	0,5
124	Excelente	Excelente	Boa	Boa	0,5
125	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	0,5

Seguindo-se com a aferição das regras, com a alteração das saídas ou dos pesos, reduziu-se a diferença obtida pelas avaliações simuladas para uma máxima de 9,5% e uma média de 4,2%. Todos os resultados da avaliação simulada, os dados de entrada, a média das notas gerais (NG) obtidos pelos questionários e a nota geral do sistema (NGS) estão demonstradas na Tabela 4-7.

Tabela 4-7 - Resultado das avaliações simuladas pelo sistema aferido.

Dados de entrada					Diferença	
E	F	D	NG	NGS		%
1,5	1,5	1,5	1,42	1,43	-0,01	-0,6%
1,5	1,5	2,5	1,58	1,63	-0,05	-3,0%
1,5	1,5	4,5	1,84	1,83	0,01	0,8%
1,5	2,5	1,5	1,52	1,63	-0,11	-7,1%
1,5	2,5	2,5	1,67	1,63	0,04	2,5%
1,5	2,5	4,5	1,92	1,83	0,09	4,9%
1,5	4,5	1,5	1,62	1,55	0,07	4,2%
1,5	4,5	2,5	1,82	1,70	0,12	6,5%
1,5	4,5	4,5	2,05	2,09	-0,04	-2,1%

(continua)

(continuação)

<b>Dados de entrada</b>					<b>Diferença</b>	
<b>E</b>	<b>F</b>	<b>D</b>	<b>NG</b>	<b>NGS</b>		<b>%</b>
2,5	1,5	1,5	1,95	1,76	0,19	9,5%
2,5	1,5	2,5	2,24	2,03	0,21	9,5%
2,5	1,5	4,5	2,47	2,34	0,13	5,2%
2,5	3,5	1,5	2,02	1,86	0,16	8,0%
2,5	3,5	2,5	2,50	2,48	0,02	0,8%
2,5	3,5	4,5	2,79	2,80	-0,01	-0,2%
2,5	4,5	1,5	2,32	2,17	0,15	6,3%
2,5	4,5	2,5	2,69	2,58	0,11	4,2%
2,5	4,5	4,5	2,76	2,80	-0,04	-1,3%
4,5	1,5	1,5	2,53	2,37	0,16	6,3%
4,5	1,5	2,5	2,84	2,61	0,24	8,3%
4,5	1,5	4,5	3,63	3,39	0,24	6,7%
4,5	3,5	1,5	2,75	2,58	0,17	6,3%
4,5	3,5	2,5	3,27	3,03	0,24	7,2%
4,5	3,5	4,5	4,20	4,09	0,11	2,6%
4,5	4,5	1,5	2,89	2,80	-0,09	-3,1%
4,5	4,5	2,5	3,46	3,49	-0,03	-1,0%
1,5	1,5	3,5	1,57	1,63	-0,06	-3,9%
1,5	2,5	3,5	1,60	1,63	-0,03	-1,7%
1,5	3,5	1,5	1,55	1,63	-0,08	-5,0%
1,5	3,5	2,5	1,60	1,63	-0,03	-1,7%
1,5	3,5	3,5	1,65	1,55	0,10	5,9%
1,5	3,5	4,5	1,65	1,70	-0,05	-3,1%
1,5	4,5	3,5	1,65	1,70	-0,05	-3,1%
2,5	1,5	3,5	1,90	2,03	-0,13	-6,7%
2,5	2,5	1,5	1,75	1,86	-0,11	-6,2%
2,5	2,5	2,5	2,50	2,48	0,02	0,8%
2,5	2,5	3,5	2,53	2,48	0,05	1,8%
2,5	2,5	4,5	2,55	2,58	-0,03	-1,0%
2,5	3,5	3,5	2,60	2,58	0,02	0,9%
2,5	4,5	3,5	2,58	2,58	0,00	0,1%
3,5	1,5	1,5	1,85	1,76	0,09	4,6%
3,5	1,5	2,5	1,98	2,01	-0,04	-1,9%

(continua)

(conclusão)

<b>Dados de entrada</b>					<b>Diferença</b>		
<b>E</b>	<b>F</b>	<b>D</b>	<b>NG</b>	<b>NGS</b>		<b>%</b>	
3,5	1,5	3,5	2,15	2,29	-0,14	-6,4%	
3,5	1,5	4,5	2,30	2,49	-0,19	-8,2%	
3,5	2,5	1,5	1,85	1,95	-0,10	-5,2%	
3,5	2,5	2,5	2,55	2,71	-0,16	-6,4%	
3,5	2,5	3,5	2,70	2,94	-0,24	-9,0%	
3,5	2,5	4,5	2,85	3,03	-0,18	-6,5%	
3,5	3,5	1,5	1,91	1,95	-0,04	-2,2%	
3,5	3,5	2,5	2,67	2,58	0,09	3,3%	
3,5	3,5	3,5	3,50	3,49	0,01	0,2%	
3,5	3,5	4,5	3,55	3,49	0,06	1,6%	
3,5	4,5	1,5	2,05	2,17	-0,12	-6,1%	
3,5	4,5	2,5	2,80	2,80	0,00	0,1%	
3,5	4,5	3,5	3,50	3,49	0,01	0,2%	
3,5	4,5	4,5	3,65	3,49	0,16	4,3%	
4,5	1,5	3,5	2,35	2,54	-0,19	-8,1%	
4,5	2,5	1,5	1,95	2,06	-0,11	-5,7%	
4,5	2,5	2,5	2,70	2,71	-0,01	-0,5%	
4,5	2,5	3,5	2,80	2,94	-0,14	-5,1%	
4,5	2,5	4,5	3,20	3,44	-0,24	-7,4%	
4,5	3,5	3,5	3,65	3,49	0,16	4,3%	
4,5	4,5	3,5	3,70	3,49	0,21	5,6%	
4,5	4,5	4,5	4,53	4,32	0,21	4,5%	
					Máximo	0,24	9,5%
					Média	0,10	4,2%

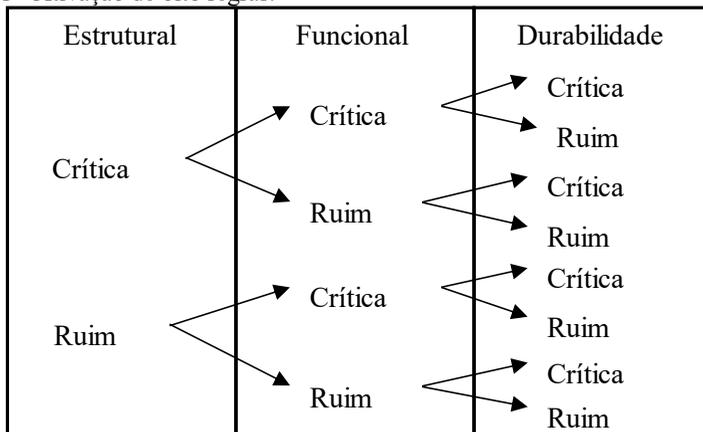
E – Estrutural  
F – Funcional  
D – Durabilidade  
NG – Nota Geral  
NGS – Nota geral do sistema criado  
Diferença = NG-NGS  
Diferença em % = NG-NGS/NG

## 5 VALIDAÇÃO DO SISTEMA

Para que a avaliação do sistema pudesse acontecer, foi necessária a realização de um outro questionário, com a intenção de obter dados reais de avaliações de OAEs por diversos inspetores.

Inicialmente, na determinação do número de OAEs necessárias, verificou-se que cada entrada do sistema criado, sendo um valor não inteiro para cada parâmetro, solicita 2 FDP, e, por conseguinte aciona 8 regras, como mostrado na Tabela 4-5 e na Figura 5-1. Tendo em vista que, foram criadas 125 regras, seriam necessárias, pelo menos, 16 obras potencialmente muito distintas para acionar e testar todas as regras. Portanto, considerando as variabilidades das avaliações, selecionaram-se 30 obras, buscando assim verificar o maior número de regras. Porém, para abranger todas as combinações de notas nos três parâmetros da NBR 9452 (2016), seriam necessárias obras muito distintas. Por exemplo, com avaliações excelentes no critério estrutural e críticas no critério durabilidade, dificilmente encontradas, praticamente impossibilitando o teste de todas as regras. No entanto, a calibração do sistema foi efetuada pela ativação de todas as regras, assim sendo, mesmo com a ausência da ativação de algumas regras nesta fase do teste, é possível avaliar o sistema de maneira geral.

Figura 5-1 - Ativação de oito regras.



No entanto, sabe-se que o tempo demandado para a avaliação de uma obra e a atribuição das notas é considerável, portanto, a avaliação de 30 obras não seria uma tarefa que muitos profissionais poderiam dispor

de seu tempo para realizá-la. Assim, buscando o equilíbrio do tempo necessário para responder aos questionários e a quantidade dos mesmos, separaram-se as obras em três conjuntos de 10. Isso inclusive, possibilitou a análise das respostas de cada questionário, verificando as regras ativas, para, então, selecionar obras novas com o intuito de ativarem regras diferentes.

Cada uma destas obras foi descrita, em uma ou duas páginas, por fotografias gerais e específicas das anomalias, além de breves descrições. Buscou-se ilustrar as características gerais da obra e de seus problemas de forma resumida, para não solicitar demasiado tempo dos inspetores. Estas descrições estão apresentadas no Apêndice B.

As informações e fotografias das OAEs utilizadas nesta pesquisa foram fornecidas pelo escritório AAD Projetos Consultoria e Engenharia Ltda, pelo DER-PR e pelo DNIT.

Inicialmente, obtiveram-se informações de cerca de 600 OAEs. Dentre estas, algumas foram descartadas por não possuírem informações detalhadas das anomalias, poucas fotos ou não se adequarem aos objetivos da pesquisa.

A partir disto, foram selecionadas algumas obras, potencialmente com diferentes classificações de acordo com os critérios da NBR 9452 (2016). Em seguida, buscando uma maior abrangência de regras a serem ativas, foram selecionadas 10 OAEs para constituírem o primeiro questionário desta nova fase.

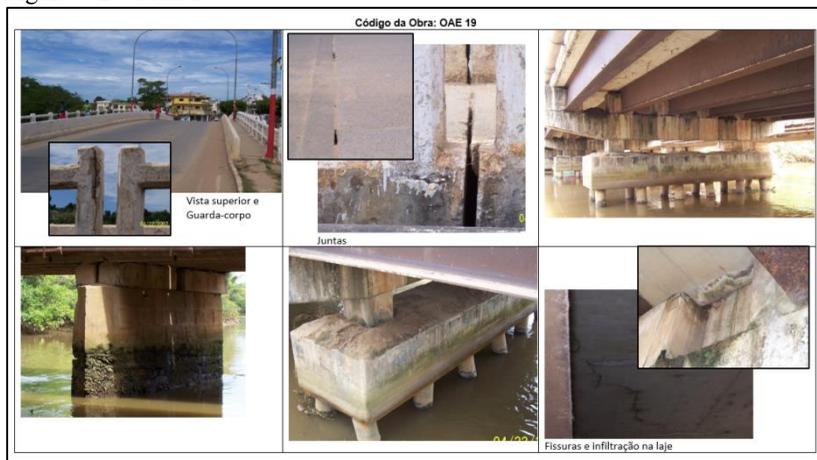
Após obtidas 10 respostas deste questionário, os dados foram analisados e as regras ativas por estas inspeções foram verificadas. Outras 10 obras foram então elegidas para compor um segundo questionário, com a intenção de ativarem outras regras. Seguindo o mesmo procedimento, após a obtenção das respostas do segundo questionário, gerou-se um terceiro questionário.

De forma a exemplificar as informações constantes em cada questionário, apresentam-se na Figura 5-2 as informações fornecidas para a OAE 23, uma das dez OAEs presentes no terceiro questionário. Para responder a estes questionários foram convidados profissionais experientes na área. O Apêndice B apresenta todas as informações das 30 OAE presentes nos questionários. O primeiro questionário continha as informações referentes às OAE 1 a OAE 10, o segundo as informações das OAE 11 a OAE 20 e por fim o terceiro referente às OAE 21 a OAE 30.

A partir de cada grupo de fotos e descrições, o inspetor procedia a avaliação da OAE, atribuindo notas para cada critério e uma nota geral. Foi solicitado que estas notas fossem fornecidas com valores não inteiros.

A utilização de valores decimais permitiu ao inspetor a liberdade de classificar uma obra entre diferentes classes, por exemplo, classificar uma obra um pouco como boa e um pouco como regular, e, portanto, fornecer uma avaliação mediana entre estas, como 3,4.

Figura 5-2 - OAE 23.



## 5.1 INSPETORES

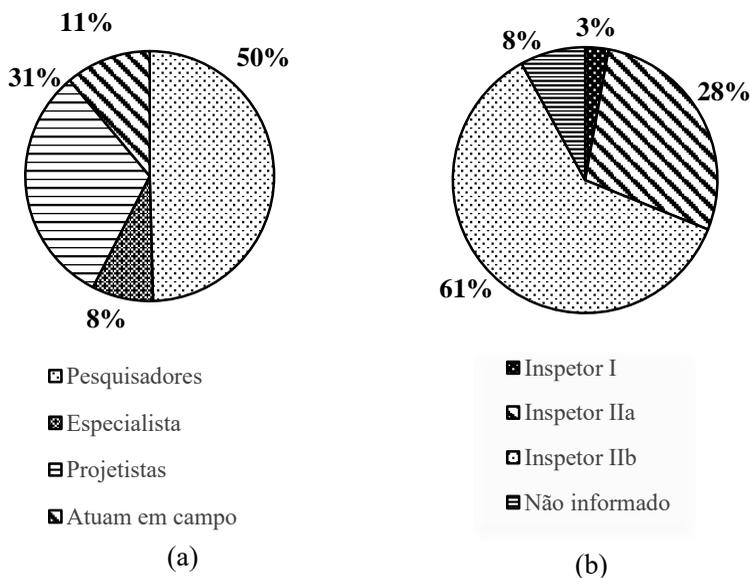
Semelhantemente às avaliações simuladas, os questionários foram enviados a profissionais com experiência neste campo de atuação, no entanto, estes também foram enviados a engenheiros formados e cursando especialização em patologia das construções, tendo realizado o módulo de inspeção em pontes.

O quadro de inspetores incluiu profissionais do DNIT, DER-PR, autônomos, profissionais que realizam inspeções em campo, professores e pesquisadores.

Foram convidados aproximadamente 87 profissionais para responderem aos questionários, dentre os quais, 30 retornaram com as avaliações efetuadas, desta forma a taxa de retorno foi de cerca de 34%. Com isso, foram obtidas 351 avaliações, das quais: 50% foram realizadas por pesquisadores da área de pontes, 8% por engenheiros civis especialistas em patologia das construções, 11% por profissionais que atuam em campo com inspeção de obras de arte especiais e 31% por projetistas de pontes. Estes dados estão ilustrados na Figura 5-3(a).

Com a intenção de caracterizar ainda mais os inspetores, a Figura 5.3(b) apresenta o tempo de experiência dos inspetores, da mesma maneira que no item 4.2, referindo-se a NBR 16230 (2013), em relação a quantidade de obras avaliadas. Assim, 61% das avaliações foram realizadas por Inspectores Ib, aqui considerados com mais de 10 anos de experiência. De mesma maneira, 28% das avaliações foram realizadas por Inspectores Ia, considerados com experiência entre 5 e 10 anos. Somente 3% das avaliações obtidas vieram de Inspectores I, com tempo de experiência entre 1 e 5 anos. Por fim, 8% dos avaliadores não informaram o tempo de experiência.

Figura 5-3 - Classificação dos inspetores que responderam aos questionários reais.



## 5.2 RESULTADOS DOS QUESTIONÁRIOS DE AVALIAÇÕES REAIS

A Tabela 5-1 apresenta as médias das notas fornecidas para cada OAE, assim como, a quantidade de avaliações. Alguns inspetores forneceram valores abaixo do intervalo de análise [1; 5]. Nesta situação, estes valores foram adaptados para o intervalo, e passaram a valer um.

Tabela 5-1 - Média das notas fornecidas por obra

<b>Obra</b>	<b>Quantidade de avaliações</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>D</b>	<b>NG</b>
<b>OAE 1</b>	10	3,04	1,59	3,03	2,47
<b>OAE 2</b>	10	2,75	2,73	2,32	2,39
<b>OAE 3</b>	10	2,94	1,92	2,71	2,61
<b>OAE 4</b>	10	3,33	2,67	3,09	2,99
<b>OAE 5</b>	9	3,42	2,61	3,31	3,21
<b>OAE 6</b>	9	3,73	3,30	3,56	3,60
<b>OAE 7</b>	11	1,32	2,13	1,25	1,35
<b>OAE 8</b>	11	1,45	2,56	1,76	1,55
<b>OAE 9</b>	11	1,40	2,09	1,66	1,48
<b>OAE 10</b>	11	4,00	3,90	4,27	3,97
<b>OAE 11</b>	14	1,99	1,83	2,56	1,79
<b>OAE 12</b>	14	1,56	2,14	2,22	1,72
<b>OAE 13</b>	14	2,60	4,11	2,48	2,64
<b>OAE 14</b>	15	3,41	4,19	3,61	3,46
<b>OAE 15</b>	15	1,61	2,96	2,02	1,62
<b>OAE 16</b>	14	3,32	4,19	3,52	3,36
<b>OAE 17</b>	14	4,26	3,89	3,93	3,99
<b>OAE 18</b>	15	3,67	3,55	3,60	3,51
<b>OAE 19</b>	14	3,91	3,89	3,63	3,59
<b>OAE 20</b>	15	3,69	3,32	3,49	3,20
<b>OAE 21</b>	10	2,38	2,72	3,01	2,33
<b>OAE 22</b>	13	2,79	2,50	2,89	2,54
<b>OAE 23</b>	11	3,20	3,29	2,86	2,92
<b>OAE 24</b>	10	2,64	2,62	2,25	2,31
<b>OAE 25</b>	11	2,13	3,15	1,83	1,86
<b>OAE 26</b>	10	3,66	1,94	3,30	2,41
<b>OAE 27</b>	10	3,94	3,97	3,09	3,27
<b>OAE 28</b>	10	3,97	1,72	3,42	2,46
<b>OAE 29</b>	10	1,29	3,44	1,69	1,29
<b>OAE 30</b>	10	4,27	4,48	3,67	3,89

E – Estrutural  
F – Funcional  
D – Durabilidade  
NG – Nota Geral

Os desvios padrões e coeficientes de variação obtidos para cada OEA estão descritos na Tabela 5-2. O maior desvio padrão observado foi de 1,28 atribuído a avaliações de durabilidade, seguido por 1,27 na avaliação do critério funcional, que obteve a maior média no valor de 0,84. O coeficiente de variação máximo foi justamente do critério funcional com valor de 54%. Assim, percebe-se a variabilidade das opiniões dos inspetores, principalmente em relação ao critério funcional.

Tabela 5-2 - Variações nas avaliações reais

Obra	Desvio padrão				Coeficiente de variação			
	E	F	D	NG	E	F	D	NG
<b>OAE 1</b>	0,59	0,56	0,74	0,74	19%	35%	24%	30%
<b>OAE 2</b>	0,49	0,87	0,79	0,39	18%	32%	34%	16%
<b>OAE 3</b>	0,50	0,84	0,55	0,69	17%	44%	20%	26%
<b>OAE 4</b>	0,55	0,87	0,52	0,51	17%	33%	17%	17%
<b>OAE 5</b>	0,73	<b>1,27</b>	0,46	0,97	21%	49%	14%	30%
<b>OAE 6</b>	0,67	0,40	0,49	0,54	18%	12%	14%	15%
<b>OAE 7</b>	0,33	1,15	0,32	0,27	25%	<b>54%</b>	26%	20%
<b>OAE 8</b>	0,41	0,80	0,75	0,49	28%	31%	43%	32%
<b>OAE 9</b>	0,40	0,88	0,61	0,35	28%	42%	37%	23%
<b>OAE 10</b>	0,97	0,63	0,62	0,72	24%	16%	15%	18%
<b>OAE 11</b>	0,75	0,79	<b>1,28</b>	0,66	38%	43%	50%	37%
<b>OAE 12</b>	0,56	1,03	1,06	0,69	36%	48%	48%	40%
<b>OAE 13</b>	0,75	0,81	0,50	0,59	29%	20%	20%	22%
<b>OAE 14</b>	0,66	0,63	0,77	0,74	19%	15%	21%	21%
<b>OAE 15</b>	0,61	1,23	1,00	0,62	38%	42%	50%	38%
<b>OAE 16</b>	0,91	0,88	0,97	0,61	27%	21%	28%	18%
<b>OAE 17</b>	0,56	0,88	0,64	0,57	13%	23%	16%	14%
<b>OAE 18</b>	0,67	0,76	0,86	0,70	18%	22%	24%	20%
<b>OAE 19</b>	0,76	0,73	0,84	0,78	20%	19%	23%	22%
<b>OAE 20</b>	0,98	1,08	0,92	1,06	27%	33%	26%	33%
<b>OAE 21</b>	0,52	0,79	0,61	0,70	22%	29%	20%	30%
<b>OAE 22</b>	0,86	0,78	0,72	0,72	31%	31%	25%	28%
<b>OAE 23</b>	0,75	0,61	0,82	0,66	23%	18%	29%	23%
<b>OAE 24</b>	0,67	1,03	0,53	0,62	25%	39%	24%	27%

(continua)

(conclusão)

Obra	Desvio padrão				Coeficiente de variação			
	E	F	D	NG	E	F	D	NG
<b>OAE 25</b>	0,64	0,96	0,45	0,41	30%	31%	25%	22%
<b>OAE 26</b>	0,76	0,61	0,60	0,93	21%	32%	18%	39%
<b>OAE 27</b>	0,82	0,66	0,52	0,54	21%	17%	17%	17%
<b>OAE 28</b>	0,63	0,60	0,76	0,75	16%	35%	22%	30%
<b>OAE 29</b>	0,40	1,13	0,55	0,40	31%	33%	32%	31%
<b>OAE 30</b>	0,48	0,92	0,46	0,51	11%	20%	13%	13%
<b>Média</b>	0,65	0,84	0,69	0,63	24%	31%	26%	25%
<b>Máximo</b>	0,98	1,27	1,28	1,06	38%	54%	50%	40%

E – Estrutural  
F – Funcional  
D – Durabilidade  
NG – Nota Geral

### 5.2.1 Análise do Raciocínio do inspetor ao avaliar uma OAE

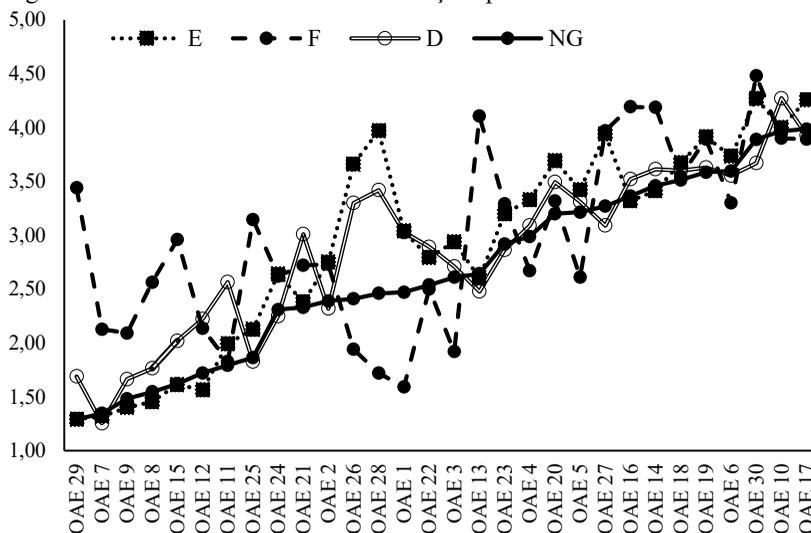
A Figura 5-4 apresenta as médias das avaliações por cada critério e pela nota global por OEA, organizadas de maneira crescente pela NG. Desta forma é possível visualizar que, para as obras mais críticas, a avaliação estrutural é a que mais se aproxima da nota geral, portanto, com maior influência sobre ela.

Essa observação também foi verificada na avaliação simulada e considerada no sistema criado, pois, as regras com entrada crítica no critério estrutural possuem saída crítica com peso unitário, sendo as regras com maior peso.

Outro ponto a ser observado é que a NG caminha, na maioria dos casos, próximo das avaliações E e D, principalmente quando uma destas é a avaliação mais crítica. No entanto, quando a avaliação funcional recebeu a menor nota, a nota geral da obra obteve resultado intermediário entre os critérios.

A Figura 5-4 também confirma a proximidade entre os critérios estrutural e durabilidade, assim como mostra a independência, de maneira geral, das considerações funcionais em relação às demais avaliações.

Figura 5-4 - Gráfico das médias das avaliações por obra.



Somente pela análise da Figura 5-4, não fica claro se o critério de durabilidade seria o segundo com maior influência sobre a avaliação geral ou se a proximidade entre ele e a NG se deve à proximidade entre a avaliação estrutural e durabilidade. Sendo assim, partiu-se para a verificação das regras criadas e aferidas, fixando-se a avaliação estrutural e analisando duplas de regras. Por exemplo, fixa-se a regra estrutural em Excelente, e avaliando a saída da regra e seu peso quando as entradas são: F – Regular e D – Boa, em seguida F – Boa e D – Regular, esse é o caso das regras a seguir.

R114 - Se Estrutural é Excelente e Funcional é Regular e Durabilidade é Boa, então a Nota Geral é Boa (0,2);

R118 - Se Estrutural é Excelente e Funcional é Boa e Durabilidade é Regular, então a Nota Geral é Regular (0,5);

No caso de ambas as regras, a função de saída foi a mesma da entrada do critério durabilidade, diferenciando-se da entrada Funcional. Sendo assim, neste caso, a avaliação em relação a durabilidade teve maior influência na NG que a funcional. Analisando-se cada dupla de regras desta maneira, obteve-se a Tabela 5-3, a qual demonstra para cada entrada fixada do critério estrutural, qual a porcentagem dos casos nos quais os critérios funcional e durabilidade tiveram maior influência e aqueles em que não se obteve diferença nesta análise.

Tabela 5-3 - Influência dos critérios na NG

<b>E</b>	<b>F</b>	<b>D</b>	<b>Igual</b>
<b>Crítica</b>	0%	0%	100%
<b>Ruim</b>	0%	20%	80%
<b>Regular</b>	20%	60%	20%
<b>Boa</b>	50%	30%	20%
<b>Excelente</b>	20%	60%	20%
<b>Total</b>	23%	43%	35%

E – Estrutural  
F – Funcional  
D – Durabilidade

Observa-se que, de maneira geral, a durabilidade teve maior influência que o funcional, em 43% dos casos. Já em 35% das duplas de regras verificadas, a influência foi a mesma e em somente 23% o critério funcional teve maior peso. No entanto, nota-se que, quando a consideração estrutural foi boa, o critério F passou a ter um peso superior a D. Quando o E foi ruim, na maioria das vezes, 80%, ambos os critérios tiveram a mesma influência na avaliação final.

Realizando a mesma análise, fixando-se o critério funcional, observou-se que o parâmetro E influenciou mais em 60% dos casos, o de D em 10%, e o peso foi o mesmo em 30%. Por último, fixando-se a durabilidade, o critério estrutural foi o mais influente em 68% dos casos, o F em 4% e a influência foi a mesma em 28%. Ou seja, essa influência deve ser analisada caso a caso, regra a regra, fato que justifica, ainda mais, a utilização do sistema *fuzzy*. Analisando de forma geral, o critério que mais influencia é o estrutural, seguido da durabilidade e do funcional.

### 5.3 AVALIAÇÃO DO SISTEMA CRIADO

As respostas fornecidas pelos profissionais foram utilizadas para avaliar o sistema de duas maneiras: pelas médias das avaliações de cada obra e por grupos de proximidade de notas.

### 5.3.1 Média das avaliações por obra

A avaliação do sistema pelas médias das avaliações de cada obra consistiu em comparar a média de todas as avaliações para cada OAE com aquela dada pelo sistema. Ou seja, obteve-se a média para cada critério de cada obra avaliada por diferentes inspetores.

As médias de cada critério apresentadas na Tabela 5-1 foram lançadas no sistema criado ativando 66 das 125 regras conforme apresentado no Quadro 5-1. As respostas geradas pelo sistema, foram comparadas com as médias das notas gerais advindas dos questionários. A Tabela 5-4 apresenta a média das notas globais por OAE fornecida pelos inspetores (NG), e a resposta do sistema (NGS). A diferença numérica e percentual com relação à média da nota global também estão apresentadas nesta mesma tabela.

Quadro 5-1 - Regras ativadas pelas médias por obra.

<b>Obra</b>	<b>Regras ativadas</b>							
<b>OAE 1</b>	53	54	58	59	78	79	83	84
<b>OAE 2</b>	32	33	37	38	57	58	62	63
<b>OAE 3</b>	27	28	32	33	52	53	57	58
<b>OAE 4</b>	58	59	63	64	83	84	88	89
<b>OAE 5</b>	58	59	63	64	83	84	88	89
<b>OAE 6</b>	63	64	68	69	88	89	93	94
<b>OAE 7</b>	6	7	11	12	31	32	36	37
<b>OAE 8</b>	6	7	11	12	31	32	36	37
<b>OAE 9</b>	6	7	11	12	31	32	36	37
<b>OAE 10</b>	89	90	94	95	114	115	119	120
<b>OAE 11</b>	2	4	7	9	27	29	32	34
<b>OAE 12</b>	7	8	12	13	32	33	37	38
<b>OAE 13</b>	42	43	47	48	67	68	72	73
<b>OAE 14</b>	68	69	73	74	93	94	98	99
<b>OAE 15</b>	7	8	12	13	32	33	37	38
<b>OAE 16</b>	68	69	73	74	93	94	98	99
<b>OAE 17</b>	88	89	93	94	113	114	118	119
<b>OAE 18</b>	63	64	68	69	88	89	93	94
<b>OAE 19</b>	63	64	68	69	88	89	93	94

(continua)

(conclusão)

<b>Obra</b>	<b>Regras ativadas</b>							
<b>OAE 20</b>	63	64	68	69	88	89	93	94
<b>OAE 21</b>	33	34	38	39	58	59	63	64
<b>OAE 22</b>	32	33	37	38	57	58	62	63
<b>OAE 23</b>	62	63	67	68	87	88	92	93
<b>OAE 24</b>	32	33	37	38	57	58	62	63
<b>OAE 25</b>	36	37	41	42	61	62	66	67
<b>OAE 26</b>	53	54	58	59	78	79	83	84
<b>OAE 27</b>	63	64	68	69	88	89	93	94
<b>OAE 28</b>	53	54	58	59	78	79	83	84
<b>OAE 29</b>	11	12	16	17	36	37	41	42
<b>OAE 30</b>	93	94	98	99	118	119	123	124

Tabela 5-4 - Média das avaliações por obra.

<b>Obra</b>	<b>NG</b>	<b>NGS</b>	<b>Diferença</b>	
				<b>%</b>
<b>OAE 1</b>	2,47	2,45	0,02	0,81%
<b>OAE 2</b>	2,39	2,55	-0,16	-6,69%
<b>OAE 3</b>	2,61	2,77	-0,16	-6,13%
<b>OAE 4</b>	2,99	2,89	0,1	3,34%
<b>OAE 5</b>	3,21	2,93	0,28	8,72%
<b>OAE 6</b>	3,60	3,39	0,21	5,83%
<b>OAE 7</b>	1,35	1,25	0,1	7,41%
<b>OAE 8</b>	1,55	1,58	-0,03	-1,94%
<b>OAE 9</b>	1,48	1,33	0,15	10,14%
<b>OAE 10</b>	3,97	4,09	-0,12	-3,02%
<b>OAE 11</b>	1,79	1,86	-0,07	-3,91%
<b>OAE 12</b>	1,72	1,49	0,23	13,37%
<b>OAE 13</b>	2,64	2,55	0,09	3,41%
<b>OAE 14</b>	3,46	3,40	0,06	1,73%
<b>OAE 15</b>	1,62	1,72	-0,1	-6,17%

(continua)

(conclusão)				
Obra	NG	NGS	Diferença %	
<b>OAE 16</b>	3,36	3,36	0	0,00%
<b>OAE 17</b>	3,99	3,99	0	0,00%
<b>OAE 18</b>	3,51	3,59	-0,08	-2,28%
<b>OAE 19</b>	3,59	3,65	-0,06	-1,67%
<b>OAE 20</b>	3,20	3,37	-0,17	-5,31%
<b>OAE 21</b>	2,33	2,43	-0,1	-4,29%
<b>OAE 22</b>	2,54	2,72	-0,18	-7,09%
<b>OAE 23</b>	2,92	2,90	0,02	0,68%
<b>OAE 24</b>	2,31	2,37	-0,06	-2,60%
<b>OAE 25</b>	1,86	1,95	-0,09	-4,84%
<b>OAE 26</b>	2,41	2,43	-0,02	-0,83%
<b>OAE 27</b>	3,27	3,11	0,16	4,89%
<b>OAE 28</b>	2,46	1,98	0,48	19,51%
<b>OAE 29</b>	1,29	1,47	-0,18	-13,95%
<b>OAE 30</b>	3,89	3,63	0,26	6,68%
		Média	0,12	5,2%
		Maior	0,48	19,51%
NG – Nota Geral				
NGS – Nota geral do sistema criado				
Diferença =  NG-NGS				
Diferença em % =  NG-NGS /NG				

A diferença média encontrada considerando todas as OEAs foi próxima de 5,2%. A maior diferença obtida foi de 19,51% que corresponde a OAE 28, que ativou as regras 53; 54; 58; 59; 78; 79; 83 e 84 indicadas no Quadro 5.1. As OEAs 1 e 26 também ativaram as mesmas regras, porém, nestes casos a diferença foi de somente 1% e 0,7%, respectivamente. Conclui-se, portanto, que a diferença não necessariamente está relacionada às regras utilizadas.

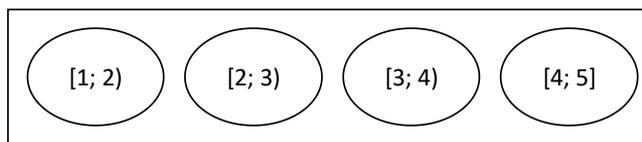
Contudo, nas avaliações simuladas, estas mesmas regras obtiveram um desvio padrão de 0,92 correspondendo a um coeficiente de variação de 43%, sendo um dos maiores valores encontrados, indicando uma falta de consenso dos inspetores ao fornecer uma nota geral a uma obra com estas características, baixa avaliação no critério funcional, inferior as dos demais critérios. Assim, essa diferença elevada obtida na OAE 28, pode estar relacionada justamente com a variação na consideração da NG pelos inspetores que avaliaram esta obra, ou seja, com a incerteza do inspetor na avaliação da ponte.

Vale salientar que no tópico 4.3.3 foi estipulada uma variação máxima de 10% entre a NG e a NGS. Apesar de a maior diferença ultrapassar esse limite, a média se encontra bem abaixo dele, sendo, praticamente a metade.

### 5.3.2 Avaliação por proximidade de nota

Para a avaliação por proximidade de notas, as OAEs que possuíssem avaliações semelhantes foram agrupadas. Para isso, foram criados grupos de classificação, com valores entre [1; 2), [2; 3); [3; 4) e [4; 5] como apresentados na Figura 5-5. Esta forma de comparação foi realizada com a intenção de abranger as regras ainda não testadas e verificar se o raciocínio do inspetor ao juntar as três notas (E, F e D) para criar a NG, independe da obra analisada, mas sim, destas notas.

Figura 5-5 - Grupos de proximidades de notas.



Por exemplo, as duas avaliações a seguir foram agrupadas independente de pertencerem a OEA diferentes:

OAE1 – Estrutural = 1,3; Funcional = 2,7; Durabilidade = 1,5;

OAE2 – Estrutural = 1,8; Funcional = 2,1; Durabilidade = 1,2.

Somente foram considerados grupos que possuíssem pelo menos 3 avaliações. Após o agrupamento, foram calculadas as médias em relação a cada parâmetro por grupo. A Tabela 5-5 apresenta os grupos, o número

de avaliações por grupo e as médias das avaliações para cada critério e para a nota global.

Tabela 5-5 - Médias das avaliações por grupo de notas.

<b>Grupo</b>	<b>Número de avaliações</b>	<b>Média das avaliações</b>			
		<b>E</b>	<b>F</b>	<b>D</b>	<b>NG</b>
<b>G1</b>	23	1,23	1,30	1,16	1,20
<b>G2</b>	5	1,30	1,38	2,36	1,48
<b>G3</b>	20	1,33	2,36	1,37	1,38
<b>G4</b>	5	1,60	2,16	2,28	1,68
<b>G5</b>	4	1,58	2,15	3,20	1,63
<b>G6</b>	5	1,22	3,50	1,44	1,30
<b>G7</b>	8	1,50	3,25	2,29	1,89
<b>G8</b>	7	1,41	4,37	1,54	1,46
<b>G9</b>	3	1,57	4,17	2,27	1,57
<b>G10</b>	5	2,36	1,16	2,52	1,56
<b>G11</b>	8	2,24	2,33	1,48	1,89
<b>G12</b>	12	2,41	2,49	2,35	2,34
<b>G13</b>	4	2,55	2,50	3,28	2,60
<b>G14</b>	3	2,67	3,40	1,27	2,00
<b>G15</b>	15	2,47	3,37	2,45	2,63
<b>G16</b>	12	2,49	3,41	3,27	2,76
<b>G17</b>	13	2,49	4,39	2,43	2,36
<b>G18</b>	9	3,28	1,32	2,48	2,13
<b>G19</b>	8	3,45	1,30	3,21	2,16
<b>G20</b>	9	3,32	2,37	2,53	2,68
<b>G21</b>	10	3,42	2,48	3,41	3,20
<b>G22</b>	7	3,20	3,17	2,31	2,81
<b>G23</b>	20	3,42	3,51	3,35	3,32
<b>G24</b>	5	3,38	3,32	4,10	3,32
<b>G25</b>	13	3,41	4,48	3,40	3,35

(continua)

(conclusão)

Grupo	Número de avaliações	Média das avaliações			
		E	F	D	NG
<b>G26</b>	5	3,40	4,30	4,04	3,46
<b>G27</b>	4	4,23	1,40	3,43	2,28
<b>G28</b>	5	4,46	1,36	4,24	2,94
<b>G29</b>	9	4,18	2,36	3,56	3,09
<b>G30</b>	3	4,30	2,43	4,27	3,27
<b>G31</b>	8	4,16	3,34	3,28	3,29
<b>G32</b>	10	4,29	3,43	4,48	4,07
<b>G33</b>	19	4,43	4,56	3,47	3,92
<b>G34</b>	29	4,47	4,51	4,37	4,37

E – Estrutural  
F – Funcional  
D – Durabilidade  
NG – Nota Geral

As médias para cada critério ativaram 92 das 125 regras, ativando 26 regras a mais que as ativadas pela média por obra, como demonstrado no Quadro 5-2.

Quadro 5-2 - Regras ativadas pelos grupos de proximidades de notas.

Grupo	Regras Ativadas							
	1	2	6	7	26	27	31	32
<b>G1</b>	1	2	6	7	26	27	31	32
<b>G2</b>	2	4	7	9	27	29	32	34
<b>G3</b>	6	7	11	12	31	32	36	37
<b>G4</b>	7	8	12	13	32	33	37	38
<b>G5</b>	8	9	13	14	33	34	38	39
<b>G6</b>	11	12	16	17	36	37	41	42
<b>G7</b>	12	13	17	18	37	38	42	43
<b>G8</b>	16	17	21	22	41	42	46	47
<b>G9</b>	17	19	22	24	42	43	47	48
<b>G10</b>	27	28	32	33	52	53	57	58
<b>G11</b>	31	32	36	37	56	57	61	62
<b>G12</b>	32	33	37	38	57	58	62	63
<b>G13</b>	33	34	38	39	58	59	63	64

(continua)

(conclusão)

<b>Grupo</b>	<b>Regras Ativadas</b>							
<b>G14</b>	36	37	41	42	61	62	66	67
<b>G15</b>	37	38	42	43	62	63	67	68
<b>G16</b>	38	39	43	44	63	64	68	69
<b>G17</b>	42	43	47	48	67	68	72	73
<b>G18</b>	52	53	57	58	77	78	82	83
<b>G19</b>	53	54	58	59	78	79	83	84
<b>G20</b>	57	58	62	63	82	83	87	88
<b>G21</b>	58	59	63	64	83	84	88	89
<b>G22</b>	62	63	67	68	87	88	92	93
<b>G23</b>	63	64	68	69	88	89	93	94
<b>G24</b>	64	65	69	70	89	90	94	95
<b>G25</b>	68	69	73	74	93	94	98	99
<b>G26</b>	69	70	74	75	94	95	99	100
<b>G27</b>	78	79	83	84	103	104	108	109
<b>G28</b>	79	80	84	85	104	105	109	110
<b>G29</b>	83	84	88	89	108	109	113	114
<b>G30</b>	84	85	89	90	105	110	114	115
<b>G31</b>	88	89	93	94	113	114	118	119
<b>G32</b>	89	90	94	95	114	115	119	120
<b>G33</b>	93	94	98	99	118	119	123	124
<b>G34</b>	94	95	99	100	119	120	124	125

Após a inserção destes valores no sistema *fuzzy* criado, as respostas geradas pelo sistema (NGS) foram comparadas com as médias das notas gerais por grupo. A Tabela 5-6 apresenta os resultados e as diferenças numéricas e percentuais com relação à média da nota global.

Tabela 5-6 - Média das avaliações por grupo.

<b>Grupo</b>	<b>NG</b>	<b>NGS</b>	<b>Diferença</b>	
			<b>%</b>	
<b>G1</b>	1,2	1,16	0,04	3,33%
<b>G2</b>	1,48	1,46	0,02	1,35%
<b>G3</b>	1,38	1,48	-0,1	-7,25%
<b>G4</b>	1,68	1,55	0,13	7,74%
<b>G5</b>	1,63	1,7	-0,07	-4,29%
<b>G6</b>	1,3	1,43	-0,13	-10,00%
<b>G7</b>	1,89	1,63	0,26	13,76%
<b>G8</b>	1,46	1,48	-0,02	-1,37%

(continua)

(conclusão)

<b>Grupo</b>	<b>NG</b>	<b>NGS</b>	<b>Diferença %</b>	
<b>G9</b>	1,57	1,68	-0,11	-7,01%
<b>G10</b>	1,56	1,6	-0,04	-2,56%
<b>G11</b>	1,89	1,67	0,22	11,64%
<b>G12</b>	2,34	2,38	-0,04	-1,71%
<b>G13</b>	2,6	2,51	0,09	3,46%
<b>G14</b>	2	1,72	0,28	14,00%
<b>G15</b>	2,63	2,44	0,19	7,22%
<b>G16</b>	2,76	2,56	0,2	7,25%
<b>G17</b>	2,36	2,52	-0,16	-6,78%
<b>G18</b>	2,13	1,81	0,32	15,02%
<b>G19</b>	2,16	2,04	0,12	5,56%
<b>G20</b>	2,68	2,78	-0,1	-3,73%
<b>G21</b>	3,2	2,95	0,25	7,81%
<b>G22</b>	2,81	2,74	0,07	2,49%
<b>G23</b>	3,32	3,39	-0,07	-2,11%
<b>G24</b>	3,32	3,33	-0,01	-0,30%
<b>G25</b>	3,35	3,42	-0,07	-2,09%
<b>G26</b>	3,46	3,39	0,07	2,02%
<b>G27</b>	2,28	2,29	-0,01	-0,44%
<b>G28</b>	2,94	3,17	-0,23	-7,82%
<b>G29</b>	3,09	2,89	0,2	6,47%
<b>G30</b>	3,27	3,26	0,01	0,31%
<b>G31</b>	3,29	3,29	0	0,00%
<b>G32</b>	4,07	4,09	-0,02	-0,49%
<b>G33</b>	3,92	3,51	0,41	10,46%
<b>G34</b>	4,37	4,26	0,11	2,52%
		<b>Média</b>	0,12	5,30%
		<b>Maior</b>	0,41	15,02%

NG – Nota Geral

NGS – Nota geral do sistema criado

Diferença = |NG-NGS|

Diferença em % = |NG-NGS|/NG

A maior diferença em percentagem foi de 15,02% para o G18 e a diferença média foi de 5,30%. Esse resultado foi ainda melhor, ou seja, menor, que o encontrado na avaliação por médias de OEA, apresentado no item anterior. Desta forma, pode-se concluir que as notas gerais de

uma obra podem ser atribuídas em função somente das notas dos três critérios, independente das características da obra, pois, estas já foram consideradas na avaliação e na atribuição de valores nos quesitos estrutural, funcional e durabilidade.

De mesma forma que as maiores diferenças do item anterior puderam ser relacionadas com a grande variabilidade das considerações dos inspetores em avaliar pontes, a diferença de 15% pode ter a mesma causa. Os dados de entrada do Grupo 18 (avaliações E, F e D), ativam o mesmo conjunto de regras (52, 53, 57, 58, 77, 78, 82 e 83) que obteve um desvio padrão de 0,67 nas avaliações simuladas. Também, como no item anterior, apesar de a diferença máxima ultrapassar o limite utilizado nas avaliações simuladas, a diferença média encontrada é próxima da metade desse mesmo limite (10%).

### 5.3.3 Variação na classificação

Tendo em mente que um dos objetivos deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema que possa diferenciar as OAEs, auxiliando na priorização da intervenção, efetuou-se a ordem de classificação das 30 obras avaliadas em função de diferentes parâmetros. Assim sendo, comparou-se esta ordem com a priorização utilizando as médias das notas gerais, obtidas nos questionários.

Foram criadas 6 priorizações: uma em função de cada critério (Estrutural, Funcional e Durabilidade), uma em relação à média das Notas Gerais advindas dos questionários, outra em relação a menor das notas atribuídas aos critérios e, uma última, em função da nota geral do sistema desenvolvido. Estas ordens de priorização estão apresentadas no Quadro 5-3. No qual pode-se perceber que, de maneira geral, a posição de uma obra priorizada em função da NG e da NGS varia em três posições, sendo considerada uma diferença pequena.

Quadro 5-3 - Ordem de priorização de intervenção.

<b>E</b>	<b>F</b>	<b>D</b>	<b>NG</b>	<b>Menor</b>	<b>NGS</b>
OAE 29	OAE 1	OAE 7	OAE 29	OAE 7	OAE 7
OAE 7	OAE 28	OAE 9	OAE 7	OAE 29	OAE 9
OAE 9	OAE 11	OAE 29	OAE 9	OAE 9	OAE 29
OAE 8	OAE 3	OAE 8	OAE 8	OAE 8	OAE 12
OAE 12	OAE 26	OAE 25	OAE 15	OAE 12	OAE 8

(continua)

(conclusão)

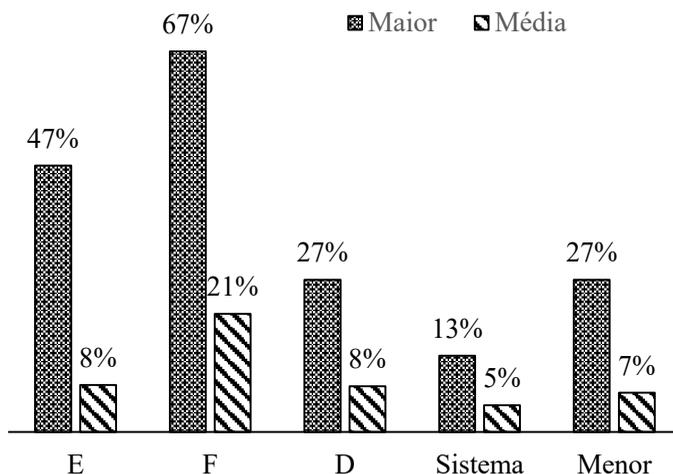
<b>E</b>	<b>F</b>	<b>D</b>	<b>NG</b>	<b>Menor</b>	<b>NGS</b>
OAE 15	OAE 9	OAE 15	OAE 12	OAE 1	OAE 15
OAE 11	OAE 7	OAE 12	OAE 11	OAE 15	OAE 11
OAE 25	OAE 12	OAE 24	OAE 25	OAE 28	OAE 25
OAE 21	OAE 22	OAE 2	OAE 24	OAE 25	OAE 28
OAE 13	OAE 8	OAE 13	OAE 21	OAE 11	OAE 24
OAE 24	OAE 5	OAE 11	OAE 2	OAE 3	OAE 26
OAE 2	OAE 24	OAE 3	OAE 26	OAE 26	OAE 21
OAE 22	OAE 4	OAE 23	OAE 28	OAE 24	OAE 1
OAE 3	OAE 21	OAE 22	OAE 1	OAE 2	OAE 2
OAE 1	OAE 2	OAE 21	OAE 22	OAE 21	OAE 13
OAE 23	OAE 15	OAE 1	OAE 3	OAE 13	OAE 22
OAE 16	OAE 25	OAE 4	OAE 13	OAE 22	OAE 3
OAE 4	OAE 23	OAE 27	OAE 23	OAE 5	OAE 4
OAE 14	OAE 6	OAE 26	OAE 4	OAE 4	OAE 23
OAE 5	OAE 20	OAE 5	OAE 20	OAE 23	OAE 5
OAE 26	OAE 29	OAE 28	OAE 5	OAE 27	OAE 27
OAE 18	OAE 18	OAE 20	OAE 27	OAE 6	OAE 16
OAE 20	OAE 19	OAE 16	OAE 16	OAE 20	OAE 20
OAE 6	OAE 17	OAE 6	OAE 14	OAE 16	OAE 6
OAE 19	OAE 10	OAE 18	OAE 18	OAE 14	OAE 14
OAE 27	OAE 27	OAE 14	OAE 19	OAE 18	OAE 18
OAE 28	OAE 13	OAE 19	OAE 6	OAE 19	OAE 30
OAE 10	OAE 14	OAE 30	OAE 30	OAE 30	OAE 19
OAE 17	OAE 16	OAE 17	OAE 10	OAE 17	OAE 17
OAE 30	OAE 30	OAE 10	OAE 17	OAE 10	OAE 10
E – Estrutural F – Funcional D – Durabilidade NG – Nota Geral NGS – Nota Geral do Sistema criado					

Em seguida, as variações das classificações encontradas foram verificadas, atentando-se para a porcentagem que cada variação representava pela equação 5.1. Por exemplo, a OAE 28, que obteve a maior variação, ficou na 27ª posição considerando o critério estrutural, na 2ª posição pelo funcional, na 21ª posição pela durabilidade, na 13ª posição pela NG média, na 8ª posição considerando a menor nota e finalmente na 9ª posição pela NGS (nota geral do sistema). Considerando as 30 obras, a posição desta OAE na classificação, em relação à da NG, variou em 47% considerando o critério estrutural ( $(27-13)/30=0,47$ ), 37% considerando o funcional, 27% devido à durabilidade, 17% pela menor nota e 13% pelo NGS.

$$\text{Variação na posição} = \frac{\text{Posição de comparação} - \text{Posição na NG}}{30} \quad (5.1)$$

Para ilustrar estas variações, a Figura 5-6 apresenta a maior variação em relação a cada uma destas comparações, assim como a variação média obtida em todas as obras analisadas.

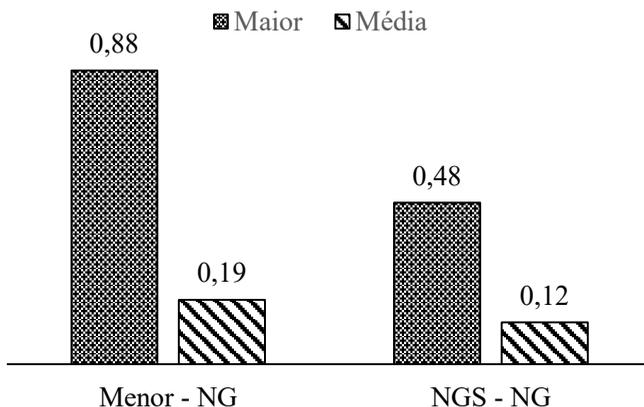
Figura 5-6 - Variação na priorização.



Por conseguinte, ficou claro que o sistema criado apresentou a priorização mais próxima daquela obtida pelas notas globais advindas dos questionários, estes que foram respondidos por especialistas na área.

Assim sendo, a segunda forma que mais se assemelha seria a consideração da menor nota, porém, ao se considerar o total de obras no território nacional, essa variação de 27% pode tornar-se significativa. Detalhando melhor esta comparação, a Figura 5-7 mostra a variação máxima e média destas notas em relação à média da NG, deixando claro que a máxima variação da NGS em relação a NG é aproximadamente a metade da obtida pela menor nota.

Figura 5-7 - Variação considerando a NGS ou a menor nota em relação a NG.



Como já esperado, o ranqueamento das obras pelo critério funcional foi aquele que mais se diferenciou. A terceira priorização mais próxima da obtida pela NG foi utilizando a durabilidade.

### 5.3.4 Avaliação Final do Sistema *Fuzzy* Criado

Em vista do apresentado, conclui-se que o sistema desenvolvido apresenta uma boa aproximação em relação aos questionários respondidos, diminuindo as incertezas deste processo. Além disso, pelo verificado no item 5.3.2 percebe-se que a avaliação geral da obra pode ser realizada somente em função das notas dos critérios E, F e D, independentemente da obra, podendo ser automatizada.

Como descrito nos itens 0 e 5.3.2, 92 das 125 regras puderam ser testadas pelos dados dos questionários, no entanto, 33 regras não foram ativadas por estas entradas, que estão apresentadas no quadro a seguir.

Quadro 5-4 - Regras não testadas.

<b>Regras não testadas</b>										
3	5	10	15	20	23	25	30	35	40	45
49	50	51	55	60	71	76	81	86	91	96
97	101	102	106	107	111	112	116	117	121	122

Em geral, estas regras ativam funções de pertinência de entradas com três ou quatro classes de diferença, por exemplo, crítica no critério de durabilidade e boa no estrutural. As exceções são as regras 3 e 51, mas a diferença em duas classes destas, é justamente entre os critérios durabilidade e estrutural, que são os que caminham mais próximos.

Sendo assim, estas são regras ativadas com frequência inferior às demais, e, portanto, acabaram não sendo abrangidas pelas obras selecionadas. Contudo, todas as regras foram calibradas pelas avaliações simuladas e todas as que foram testadas pelas avaliações reais apresentaram bons resultados. Por conseguinte, as evidências indicam que todas as regras possuam uma boa aproximação com o raciocínio do inspetor.

Assim, essa pesquisa apresenta um avanço nos conhecimentos sobre avaliação de pontes e no entendimento da forma de raciocínio do inspetor para a realização da mesma. Desta maneira, as próximas avaliações de OAEs a serem realizadas em função dos critérios estrutural, funcional e durabilidade podem ser comparadas entre si, de forma a aprimorar o sistema de gerenciamento de obras de arte especiais. Esta comparação pode ser realizada pelo emprego do sistema desenvolvido, que considera as imprecisões intrínsecas ao inspetor de pontes e que, além disso, foi previamente calibrado pelo raciocínio de diversos profissionais experientes.

## 6 CONCLUSÕES

Foi desenvolvido um sistema *fuzzy* com a utilização de avaliações simuladas. Este sistema foi então aplicado e testado através de avaliações de obras reais. No total, foram 30 OAEs, sendo que cada obra foi avaliada por cerca de 9 a 15 diferentes inspetores experientes. Desta forma, o sistema desenvolvido pode ser comparado com informações reais obtidas por um extenso questionário que possibilitou a credibilidade dos resultados obtidos.

Neste processo identificou-se que as maiores dúvidas dos inspetores foram ao atribuir uma única nota geral nos casos em que as avaliações estruturais e durabilidade foram consideradas melhores que as funcionais, com grande diferença entre estas considerações. Esse fator pode ser detectado pois, foram nestas avaliações simuladas que se obtiveram os maiores desvios padrões.

Na etapa do desenvolvimento do sistema verificou-se que as regras com maior peso deveriam ser aquelas com saídas que ativavam a função crítica. Além disso, houve a necessidade do ajuste das funções de pertinência dos extremos devido à forma de defuzzificação pelo centroide. Para isso, estas funções foram adaptadas para que seus centroides ficassem posicionados nas saídas 1 (no caso da função crítica) e 5 (no caso da função excelente). Com as funções e forma de defuzzificação definidas, as saídas das regras e seus pesos foram aprimorados e, em seguida, comparados com as avaliações dos inspetores.

A etapa da validação consistiu na comparação do sistema criado com os resultados avaliações reais, obtidos por diversos inspetores. A comparação realizada utilizando-se a média das avaliações por obra apresentou uma diferença máxima de 15% e uma média de 5,2%. A diferença máxima foi encontrada no caso de uma obra avaliada com notas E (3,97), F (1,72) e D (3,42) que ativaram as mesmas regras acionadas na avaliação simulada com desvio padrão de 0,92 – um dos maiores desvios encontrados. Já na avaliação por proximidade de notas, a maior diferença detectada foi de 15% e a média foi de 5,4%. As maiores diferenças também puderam ser relacionadas com a grande variabilidade das considerações dos inspetores.

Pelos resultados obtidos, percebe-se que é possível isolar o raciocínio do inspetor em função somente das notas para gerar a NG, pois, os valores encontrados pela avaliação simulada foram próximos aos obtidos pelo sistema criado ao entrar com os dados das avaliações reais por obra e por proximidade de nota. Além disso, dentre as formas de priorização testadas, em função de cada critério, da menor nota, da média

das avaliações dos critérios e a gerada pelo sistema criado, a que mais se aproximou da priorização obtida pela avaliação dos inspetores foi a desenvolvida nesta pesquisa, utilizando o sistema *fuzzy*. Ou seja, esses fatos realçam a viabilidade do emprego da metodologia desenvolvida nesta pesquisa, para ordenar as obras de acordo com suas avaliações em função dos critérios estrutural, funcional e durabilidade.

Nesta priorização, percebeu-se que o critério que mais influencia a avaliação geral de uma obra de arte especial é o estrutural, seguido da durabilidade e do funcional. No entanto, detectou-se que essa influência varia em função do estado da obra, demonstrando, ainda mais, a importância da utilização do sistema *fuzzy* na descrição do raciocínio do inspetor.

Para finalizar, este é um trabalho inovador por juntar as avaliações estrutural, funcional e de durabilidade em uma única nota capaz de comparar as diferentes obras. Ainda, o sistema foi desenvolvido a partir da experiência de diversos profissionais capacitados, e considera as incertezas do raciocínio do inspetor.

Com este sistema de priorização, obtém-se o benefício da racionalização dos recursos financeiros e humanos empregados para a realização do gerenciamento, manutenção e reparos das diversas Obras de Arte Especiais espalhadas pelo território nacional. Com esta racionalização pode-se minimizar os custos e economizar recursos e mesmo assim garantir a segurança das obras e de seus usuários.

## 6.1 TRABALHOS FUTUROS

Com a realização deste trabalho surgem outras ideias a serem exploradas.

- a) Aplicar o sistema *fuzzy* tipo-2 nesta metodologia, considerando-se as imprecisões nas variáveis de entrada, pela utilização de FDP para esses dados;
- b) Empregar o sistema *fuzzy* probabilístico na geração da nota única, de maneira a utilizar uma distribuição probabilística nos dados de entrada do sistema;
- c) Buscar obras para ativar as regras não testadas;
- d) Relacionar o peso das regras com a dispersão da opinião dos inspetores;
- e) Utilização de um sistema automático de geração de sistema *fuzzy*;

- f) Consideração de mais parâmetros na priorização das obras como: importância da rodovia, fluxo de veículos, classe de agressividade do meio, consequência da interrupção do tráfego.



## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16230**: inspeção de estruturas de concreto: qualificação e certificação de pessoal: requisitos. Rio de Janeiro, RJ, 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR 9452**: inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, RJ, 2016.

BARROS, L. C. DE; BASSANEZI, R. C. **Tópicos de Lógica Fuzzy e Biomatemática**. 5. ed. Campinas, SP: UNICAMP/IMECC, 2006.

BEVC, L.; MAHUT, B.; GREFSTAD, K. Review of current practice for assessment of structural condition and classification of defects. **BRIME PL97-2220**. Project funded by European Commission, Deliverable D2, 1999.

CAVALCANTI, J. H. F. *et al.* **Lógica Fuzzy aplicada às engenharias**. João Pessoa, PB: Câmara do Livro, 2012.

CHEN, M. C. M. A Fuzzy Evaluation Approach for Bridge Based on Domain Knowledge. *In: Anais of International Asia Conference On Informatics In Control, Automation And Robotics*, 2009, Bangkok, Piscataway, NJ: IEEE, 2009, p. 269-272.

CHO, H.-C. *et al.* Fire Damage Assessment of Reinforced Concrete Structures Using Fuzzy Theory. **Applied Sciences**. Basel, Switzerland: MDPI AG, v. 7, n. 5, p. 22-37, 2017.

COST 345 - EUROPEAN CO-OPERATION IN THE FIELD OF SCIENTIFIC AND TECHNICAL RESEARCH. **COST 345**: Procedures for Assessing Highway Structures: Final report, 2007. Disponível em: <[http://cost345.zag.si/Reports/COST\\_345\\_WG23.pdf](http://cost345.zag.si/Reports/COST_345_WG23.pdf)>. Acesso em: 03 de fev. de 2019.

COSTA, P. A. B. **Um enfoque segundo a Teoria de Conjuntos Difusos para a Meta-Análise**. 1999, 155f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

COX, E. D. **Fuzzy logic for business and industry**. Rockland, MA:

Charles River Media, Inc., 1995.

DAN, D. *et al.* The application of a fuzzy inference system and analytical hierarchy process based online evaluation framework to the Donghai Bridge Health Monitoring System. **Smart Structures and Systems**, v. 14, n. 2, p. 129-144, 2014.

DELGADO, M. R. de B. da S. **Projeto Automático de Sistemas Nebulosos: Uma Abordagem Co-Evolutiva**. 2002, 204f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

DENG, X.; HU, Y.; DENG, Y. Bridge Condition Assessment Using D Numbers. **The Scientific World Journal**, v. 2014, Article ID 358057, p. 1-11, 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **Norma DNIT 010/2004 - PRO: inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido: procedimento**. Rio de Janeiro, RJ, 2004a.

\_\_\_\_\_. **Relatório Gerencial - Atlas de Manutenção Rodoviária**. Brasil, 2017.

\_\_\_\_\_. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação do Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2004b.

FANGWEN, W.; CAO FANG, Y.; CHENG FENG, X. Durability Evaluation of Reinforced Concrete Arch Bridge Based on Fuzzy Analytic Hierarchy Process Method. **The Open Civil Engineering Journal**, [s.l.], v. 9, p. 888-895, 2015.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. Bulletin n. 17. **Management, maintenance and strengthening of concrete structures**: Technical report. Lausanne, Switzerland: FIB, CEB-FIP, 2002. Disponível em: <[https://www.istructe.org/fibuk/files/fib\\_bull17\\_nmg.pdf](https://www.istructe.org/fibuk/files/fib_bull17_nmg.pdf)>. Acesso em: 31 mai. de 2018.

GIOVANNETTI, A. C. V. P. **Avaliação do estado de conservação de pontes** - Estudo de caso. 2014. 130f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

GUH, Y. Y.; PO, R.-W.; LEE, E. S. The fuzzy weighted average within a generalized means function. **Computers and Mathematics with Applications**, v. 55, n° 12, p. 2699-2706, 2008.

HAMDIA, K. M.; ARAFA, M.; ALQEDRA, M. Structural damage assessment criteria for reinforced concrete buildings by using a Fuzzy Analytic Hierarchy process. **Underground Space**, v. 3, n. 3, p. 243-249, 2018.

JAIN, K. K.; BHATTACHARJEE, B. Application of Fuzzy concepts to the visual assessment of deteriorating reinforced concrete structures. **Journal of Construction Engineering and Management**. American Society of Civil Engineers, v. 138, n. 3, p. 399-408, 2012.

JANÉ, D. D. A. Uma introdução ao estudo da lógica *fuzzy*. **Revista de Humanidades e Ciências Sociais Aplicadas**, n. 2, p. 1-16, 2004.

ZHAO, J; BOSE, B. K. Evaluation of membership functions for fuzzy logic controlled induction motor drive. In: IEEE 2002 28<sup>th</sup> **Annual Conference Of The Industrial Electronics Society**. Sevilla, Spain. Sevilla: IEEE, IECON, v. 1, p. 229-234, 2002.

KIM, Y. M.; KIM, C. K.; HONG, S. G. *Fuzzy* based state assessment for reinforced concrete building structures. **Engineering Structures**, [s.l.], v. 28, n. 9, p. 1286-1297, Jul. 2006,

LUCAS, L. A. **Sistema de inferência fuzzy geral do tipo-2 aplicado à classificação**. 2009. 108f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

MAMDANI, E. H.; ASSILIAN, S. An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller. **International Journal of Man-Machine Studies**, v. 7, n. 1, p. 1-13, Jan. 1975.

MEGHADADI, A. H.; AKBARZADEH-T, M.-R. Probabilistic fuzzy logic and probabilistic fuzzy systems. *In: IEEE 2001 10<sup>th</sup> International Conference On Fuzzy Systems*. 2001, Melbourne, Victoria, Australia. Melbourne: IEEE, v. 2, 2001, p. 1127-1130.

MENDEL, J. M.; JHON, R. I. B. Type-2 Fuzzy logic made simple. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, v. 10, n<sup>o</sup> 2, p. 117-127, Apr. 2002.

MILANI, C. J.; KRIPKA, M. Subsídios para o Diagnóstico de Pontes Rodoviárias. *Engenharia (São Paulo)*, v. 612, p. 98-100, 2012a.

\_\_\_\_\_. Diagnosis of pathologies in bridges of the road system in Brazil. *ConstructII*, v. 13, n. 1, p. 26-34, 2012b.

\_\_\_\_\_. Subsídio de pontes rodoviárias: Conclusões do levantamento realizado nas pontes do município de Pato Branco (PR). *Engenharia: Construção*, v. 612, p. 88-90, 2012c.

MITRA, G.; JAIN, K. K.; BHATTACHARJEE, B. Condition Assessment of Corrosion-Distressed Reinforced Concrete Buildings Using Fuzzy Logic. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, v. 24, n. 6, p. 562-570, Dec. 2010.

MOSCOSO, Y. F. M. **Modelos de degradação para aplicação em sistemas de gerenciamento de Obras de Arte Especiais - OAES**. 2017. 210f. Tese (Doutorado em em Estruturas e Construção Civil). Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, 2017.

NORWEGIAN PUBLIC ROADS ADMINISTRATION. **Handbook for Bridge Inspections**. Noruega, Dec. 2005.

PEDRYCZ, W.; GOMIDE, F. **An introduction to Fuzzy sets: Analysis and Design**. MIT Press, Cambridge, MA., 1998.

\_\_\_\_\_. **Fuzzy systems engineering: toward human centric computing**. [Manhattan]: Wiley-IEEE Press, 2007.

PRAGALATH, H. *et al.* Deterioration assessment of infrastructure using Fuzzy logic and image processing algorithm. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, v. 32, n. 2, p. 1-13, Apr. 2018.

SASMAL, S. *et al.* Fuzzy logic based condition rating of existing reinforced concrete bridges. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, v. 20, n. 3, p. 261-273, Aug. 2006.

SCHWAAB, A. A. dos S. **Modelagem dinâmica-fuzzy aplicada a um modelo de envelhecimento e risco**. 2009. 106f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação). Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

SILVA, C. F.; SANTOS FILHO, M. L. Aplicação do modelo matemático para ranqueamento de obras de arte especiais desenvolvido pelo Escritório Modelo de Engenharia Civil – EMEA/UFPR – Um estudo de caso. **Revista Técnico-Científica do Crea-PR**, Edição Especial 2º Simpósio Paranaense de Patologia das Construções, p. 315-328, 2017.

SILVA, C. J. G. **Uma amostra das condições estruturais e funcionais de pontes e viadutos das rodovias federais de Pernambuco**. 2016. 141f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade de Pernambuco, 2016.

SILVA, C. J. G.; MONTEIRO, E. C. B.; VITÓRIO, J. P. A. Condições estruturais e funcionais de pontes e viadutos das rodovias federais de Pernambuco. **Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción - ALCONPAT**, v. 8, n. 1, p. 79-93, enero./abr. 2018.

TARIGHAT, A.; MIYAMOTO, A. Fuzzy concrete bridge deck condition rating method for practical bridge management system. **Expert Systems with Applications**, v. 36, n. 10, p. 12077-12085, 2009.

TEE, A. B.; BOWMAN, M. D.; SINHA, K. C. A fuzzy mathematical approach for bridge condition evaluation. **Civil Engineering and Environmental Systems**, v. 5, n. 1, p. 17-24, Mar. 1988.

U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Federal Highway Administration. **Bridge Inspector's Reference Manual (BIRM)**. Publication No. FHWA NHI 12-049, Dec. 2012. Disponível em: <<http://www.fhwa.dot.gov/bridge/nbis/pubs/nhi12049.pdf>>. Acesso em: 02 de fev. de 2019.

VITÓRIO, J. A. P. **Pontes rodoviárias: fundamentos, conservação e gestão**. Recife: CREA-PE, 2002.

\_\_\_\_\_. **Acidentes estruturais em pontes rodoviárias: Causas, diagnósticos e soluções**. In: **Anais II congresso brasileiro de pontes e estruturas**. 2007, Rio de Janeiro, RJ. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pontes e Estruturas, IABSE, 2007, p. 1-20. Disponível em: <[http://vitorioemelo.com.br/publicacoes/Acidentes\\_Estruturais\\_Pontes Rodoviarrias\\_Causas\\_Diagnosticos\\_Solucoes.pdf](http://vitorioemelo.com.br/publicacoes/Acidentes_Estruturais_Pontes_Rodoviarrias_Causas_Diagnosticos_Solucoes.pdf)>. Acesso em: 2 de nov. de 2018.

VITÓRIO, J. A. P.; BARROS, R. M. M. C. Análise dos danos estruturais e das condições de estabilidade de 100 pontes rodoviárias no Brasil. In: **Anais 3º Congresso Nacional Sobre Segurança E Conservação De Pontes**. 2013, Porto, Portugal. Porto, Portugal: ASCP, 2013, p. 62-70.

WANG, Y.-M.; ELHAG, T. M. S. A fuzzy group decision making approach for bridge risk assessment. **Computers and Industrial Engineering**, v. 53, n. 1, p. 137-148, Aug. 2007.

WARMLING, G. M. B.; SANTOS FILHO, M. L. Aplicação de metodologia objetiva para avaliação de obras de arte especiais em rodovias no estado do Paraná. In: **X Congresso Brasileiro De Pontes E Estruturas**, 2018, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: CBPE, 2018. Não paginado.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control**. v. 8, n. 3, p. 338-353, Jun. 1965.

## **APÊNDICE A – Questionários Simulados**



Nesta etapa deve-se fornecer uma Nota Geral somente em função das avaliações já fornecidas de cada critério, com o intuito de verificar o raciocínio do inspetor somente em função das notas dos critérios e não em relação a obra.

<b>E</b>	<b>F</b>	<b>D</b>	<b>Nota Geral</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>D</b>	<b>Nota Geral</b>
1,5	1,5	1,5		3,5	1,5	1,5	
1,5	1,5	2,5		3,5	1,5	2,5	
1,5	1,5	4,5		3,5	1,5	3,5	
1,5	2,5	1,5		3,5	1,5	4,5	
1,5	2,5	2,5		3,5	2,5	1,5	
1,5	2,5	4,5		3,5	2,5	2,5	
1,5	4,5	1,5		3,5	2,5	3,5	
1,5	4,5	2,5		3,5	2,5	4,5	
1,5	4,5	4,5		3,5	3,5	1,5	
1,5	1,5	3,5		3,5	3,5	2,5	
1,5	2,5	3,5		3,5	3,5	3,5	
1,5	3,5	1,5		3,5	3,5	4,5	
1,5	3,5	2,5		3,5	4,5	1,5	
1,5	3,5	3,5		3,5	4,5	2,5	
1,5	3,5	4,5		3,5	4,5	3,5	
1,5	4,5	3,5		3,5	4,5	4,5	
2,5	1,5	1,5		4,5	1,5	1,5	
2,5	1,5	2,5		4,5	1,5	2,5	
2,5	1,5	4,5		4,5	1,5	4,5	
2,5	3,5	1,5		4,5	3,5	1,5	
2,5	3,5	2,5		4,5	3,5	2,5	
2,5	3,5	4,5		4,5	3,5	4,5	
2,5	4,5	1,5		4,5	4,5	1,5	
2,5	4,5	2,5		4,5	4,5	2,5	
2,5	4,5	4,5		4,5	1,5	3,5	
2,5	1,5	3,5		4,5	2,5	1,5	
2,5	2,5	1,5		4,5	2,5	2,5	
2,5	2,5	2,5		4,5	2,5	3,5	
2,5	2,5	3,5		4,5	2,5	4,5	
2,5	2,5	4,5		4,5	3,5	3,5	
2,5	3,5	3,5		4,5	4,5	3,5	
2,5	4,5	3,5		4,5	4,5	4,5	



## **APÊNDICE B – Descrição das obras avaliadas**





Falha no guarda corpo

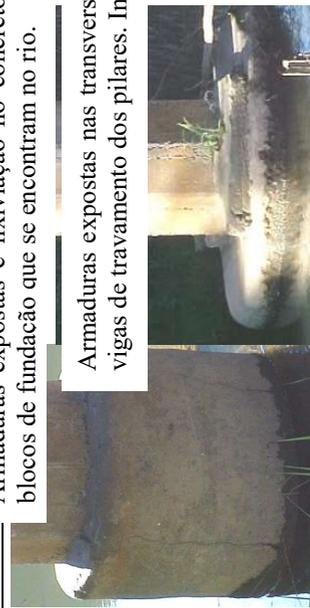


Vista da pista



Fissuras e efflorescência na laje

Armaduras expostas e lixiviação no concreto dos blocos de fundação que se encontram no rio.



Armaduras expostas nas transversinas, nos pilares e nas vigas de travamento dos pilares. Infiltração nas cortinas.



Armaduras expostas na laje do balanço.

## OAE 2

Obs: Armaduras expostas em todas as faces das transversinas, nas cortinas, nas lajes internas, nas lajes em balanço e nos pilares da parte antiga. Vibração Excessiva.



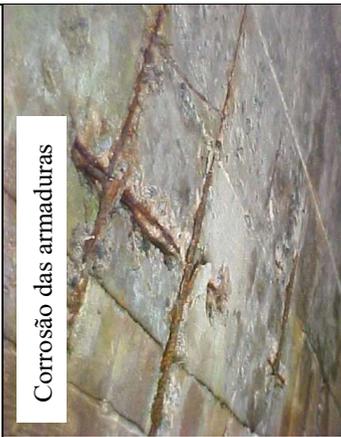
Falta de junta longitudinal.



Armaduras expostas e fissuras por infiltração em todas as faces das longarinas da parte antiga.



Corrosão das armaduras





Guarda-corpos danificados e destruídos



Armadura exposta nas lajes internas.



Armaduras expostas, disgregação do concreto e fissuras nas lajes dos balanços.

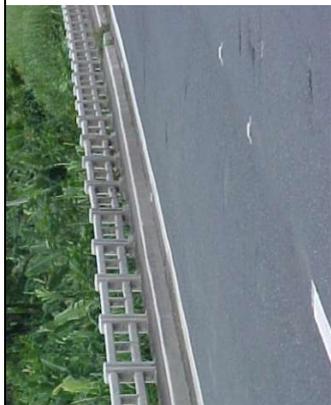


Armaduras expostas, disgregações e fissuras nas longarinas.

OAE 4



Falta de placa de ponte estreita e Degrau na pista (encontros)



Pavimento ruim



Armaduras expostas na longarina e nas lajes em balanço



Ausência de pingadeiras e fissuras nas lajes em balanço

OAE 5



Ausência de acostamento, ausência de laje de transição e guarda corpo obsoleto



Armaduras expostas no



Erosão



Armadura exposta

OAE 6

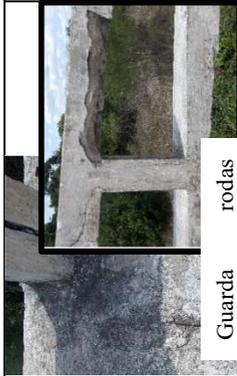




Ferragem principal muito oxidada em pontos localizados / Armadura sem cobrimento



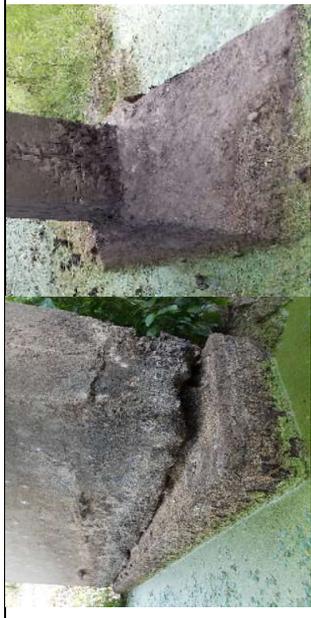
Viga T ou I - Ferragem principal muito oxidada em pontos localizados / Armadura sem cobrimento, concreto desagregado com armadura exposta e oxidada / Infiltração no concreto



Guarda rodas antigo DNER - Fissura superficial



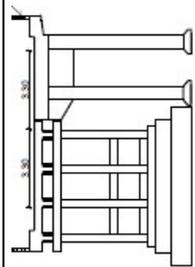
Dente Gerber de concreto armado - Região com concreto esmagado ou rompido, Infiltração no concreto, lixiviação e mancha de carbonatação, armadura exposta oxidada / Armadura sem cobrimento



Bloco ou sapata de concreto armado - Fissura profunda aberta ( $w > 0,3$  mm), deslocamento de concreto com armadura exposta (nicho de concretagem)

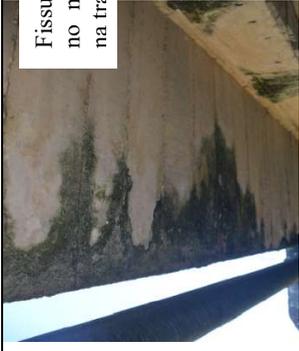


Vista inferior - Concreto desagregado com armadura exposta oxidada / Infiltração



Obs: Foi observado que na 1ª estrutura que os dentes gerber de concreto armado encontra-se com ferragem principal muito oxidada em pontos localizados, corrosão das armaduras, concreto desagregado com armadura exposta oxidada, infiltração no concreto, região com concreto esmagado ou rompido, na infraestrutura o bloco de concreto armado com fissura profunda aberta ( $w > 0,3$  mm) e na 2ª estrutura a laje encontra-se com ferragem principal muito oxidada em pontos localizados, corrosão das armaduras, concreto desagregado com armadura exposta oxidada e armaduras sem cobertura.

OAE 8



Manchas de umidade na laje 3



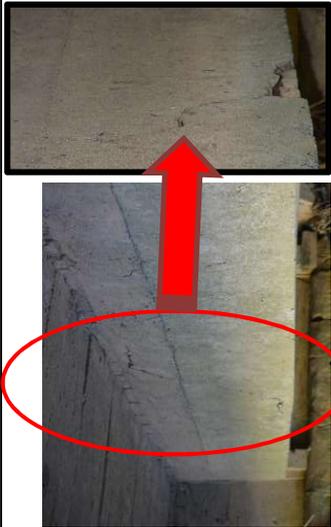
Fissura em linha no meio do vão na travessa 1



Fissura em linha no meio do vão da viga 8



Descalçamento no encontro de pedras 1

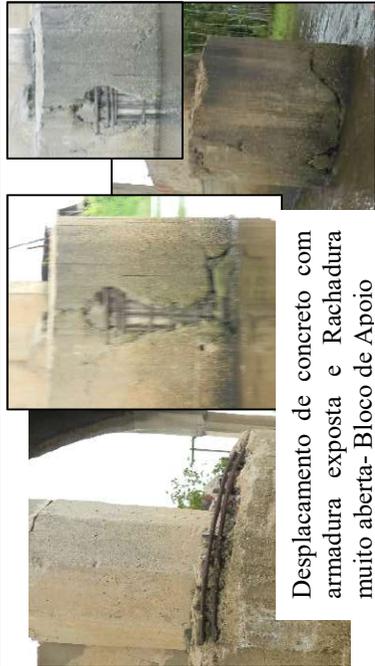
 <p>Fissura em linha a 45° nos cantos na viga 7</p>	 <p>Fissura em linha no meio do vão na viga 4 e corrosão da armadura com deslocamento e rompimento da barra</p>
 <p>Corrosão da armadura com deslocamento e perda de seção na viga 3</p>	 <p>Fissura em linha a 45° nos cantos na travessa</p>  <p>Ausência de passeio em área urbana</p>

Obs: Perda de apoio dos dois encontros em alvenaria de pedra, comprometendo as travessas e vigas. Dano comprovado através das fissuras em 45° ao longo das 8 vigas longitudinais.

OAE 9



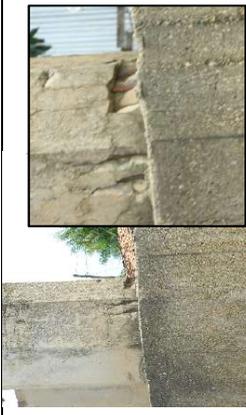
Rachadura ou trinca muito aberta - Proveniente de choque de embarcação



Deslocamento de concreto com armadura exposta e Rachadura muito aberta- Bloco de Apoio



Junta danificada ou inexistente ou expelida com percolação de água

 <p>Desplacamento de concreto com armadura exposta no Pilar</p>	<p>Pavimento asfáltico danificado</p> 	 <p>Desplacamento de concreto com armadura exposta- Laje em Balanço</p>
 <p>Desplacamento de concreto com armadura exposta- Bloco</p>	 <p>Desplacamento de concreto com armaduras expostas na laje e viga</p>	 <p>Desplacamento de concreto com armadura exposta no Pilar</p>

Obs: Devido ao choque de uma embarcação, houve uma trinca na viga principal acima do P6.

OAE 10



Aparelho de apoio

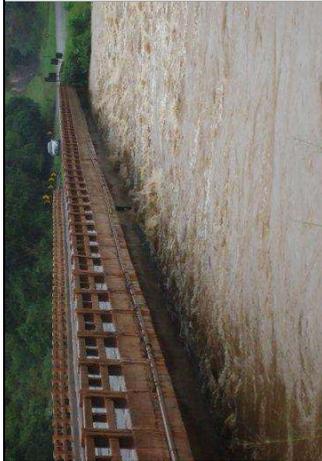


Fundo da laje



Pavimento danificado na entrada da ponte

OAE 11



Obs: A inspeção subaquática observou que as fundações são rasas e algumas já estão com processo de descalçamento.

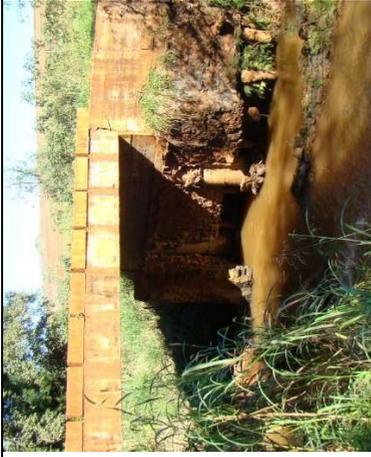
OAE 12



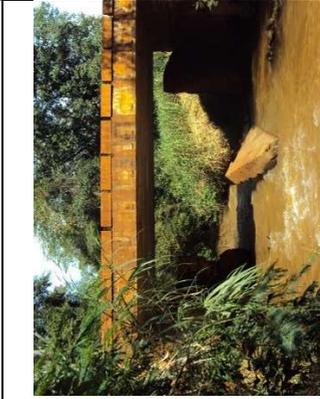
Ausência de guarda-corpo



Vista Lateral



Estacas rompidas



Vista Lateral



Vista do encontro

OAE 13



Vista geral



Vista lateral



Vista inferior



Fissura com armadura exposta e corroída



Vista de pilares



Destaque para defeitos no pilar

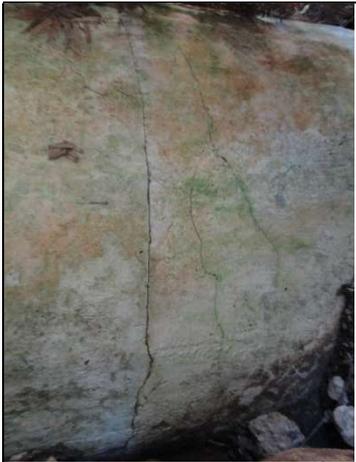
OAE 14



Vista superior da pista



Vista inferior



Fissuras no Pilar



Desagregação do concreto com armadura exposta na laje



Armadura exposta no pilar



Defeito na pista de rolamento

OAE 15



Infiltração no concreto na laje



Deslocamento de concreto com armadura exposta na viga

OAE 16



Fissura profunda aberta ( $w > 0,3$ ) na ponte em laje



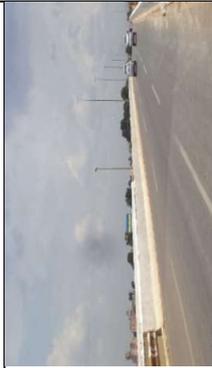
Lixiviação e mancha de carbonatação



Deslocamento de concreto armado com armadura exposta



Travessa de apoio de concreto armado



Pavimento Asfáltico

OAE 17



Junta nos encontros



Infiltração no concreto (Dreno destruído) no balanço lateral direito



OAE 18

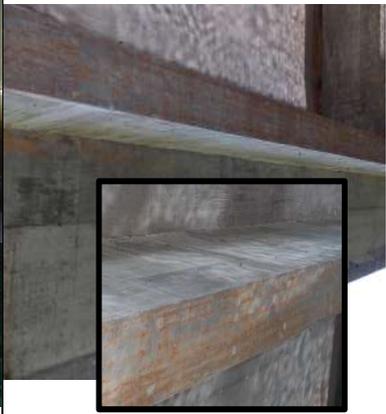


Aparelho de apoio



Eflorescência e fissuras na face inferior e no meio do vão da laje

OAE 19



Corrosão da armadura na longarina

Vista da junta do encontro - Junta

OAE 20



Erosão do talude de aterro -  
Encontro 1 - Lado esquerdo



Vista inferior



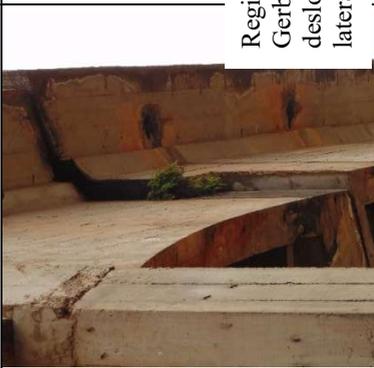
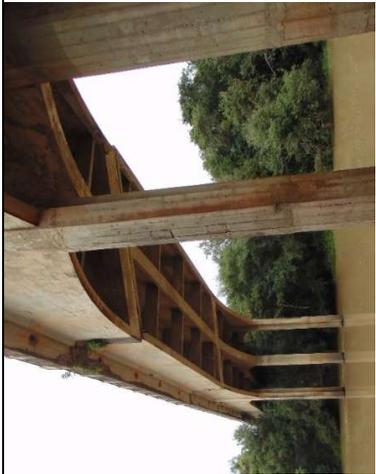
Junta do encontro



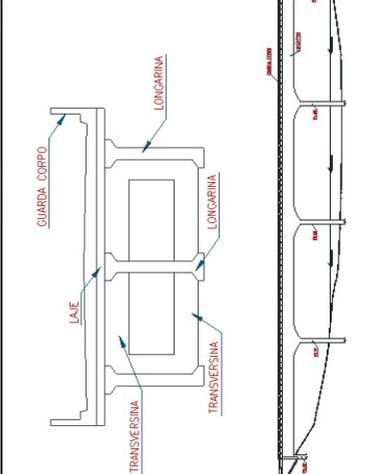
OAE 21



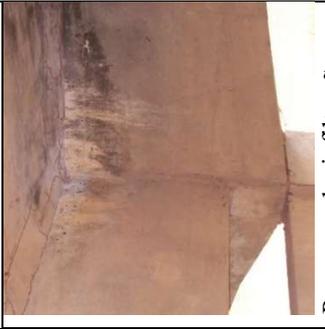
Guarda corpo obsoleto, sem acostamento



Região da viga Gerber com deslocamento lateral

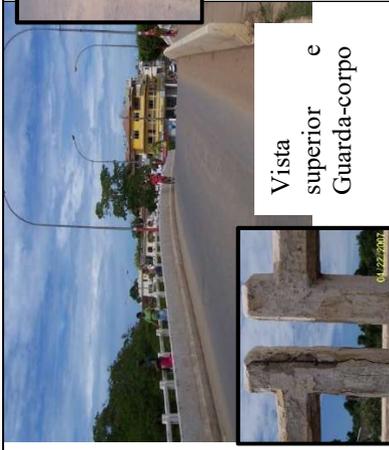


Obs: Obra em região rural.

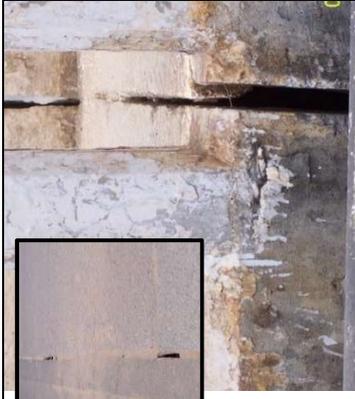
 <p>04/</p> <p>Guarda-corpo obsoleto e ausência de acostamento</p>	 <p>04/</p> <p>Guarda-corpo danificado com ferragem exposta</p>	 <p>04/11</p> <p>Infiltração na laje em balanço</p>	 <p>Armadura exposta na transversina</p>
 <p>04/</p> <p>Cabeça do pilar</p>	 <p>04/</p> <p>Guarda-corpo danificado com ferragem exposta</p>	 <p>Armadura exposta na base da zona molhada do pilar</p>	 <p>Presença de infiltração na superestrutura</p>

Obs : 1) Obra em zona rural; 2) Grande incidência de armaduras expostas na zona molhada dos pilares

OAE 23



Vista superior e Guarda-corpo



Juntas



Fissuras e infiltração na laje



Encontro com cobrimento ineficiente do aço, armadura exposta e oxidada e deslocamento do concreto



Deslocamento do concreto em virtude da corrosão do aço na laje em balanço



Laje – Vista inferior com grande incidência de corrosão e armaduras expostas

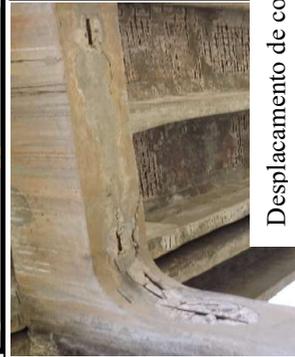


Aparelho de apoio – visualização obstruída por casulo de vespas

OAE 25



Desplacamento de concreto com armadura



Concreto desagregado com armadura exposta e oxidada Geral

Desplacamento de concreto com armadura exposta no

Obs: Laje com concreto desagregado com armadura exposta e oxidada, deslocamento de concreto. Viga de concreto armado com concreto desagregado com armadura exposta e oxidada e deslocamento, e armadura sem cobrimento.

OAE 26



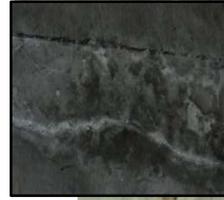
Vista Superior e detalhe de guarda-corpo



Baixo cobrimento



Fissura superficial: Lixiviação e mancha de carbonatação (Eflorescência)



OAE 27



Vista do balanço lateral esquerdo -  
Dreno destruído / Infiltração no balanço



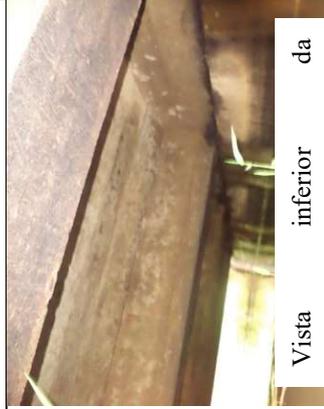
Lixiviação e mancha  
de carbonatação em  
todas as transversinas



Cortina de concreto armado com Lixiviação, mancha de carbonatação e infiltração



Lixiviação, mancha de carbonatação e infiltração no concreto



Vista inferior da superestrutura



Encontro

OAE 29



Fissura em linha no meio do vão da viga 8



Manchas de umidade na laje 3



Fissura em linha no meio do vão na viga 4



Fissura em linha a 45° nos cantos na viga 7

Descolamento no encontro de pedras 1



Nicho de concretagem na travessa 1



Fissura em linha a 45° nos cantos na travessa 1



Fissura em linha a 45° nos cantos na travessa 2



Corrosão da armadura com deslocamento na viga 3



OAE 30

