

MATRIZ DE CRITICIDADE EM ELEMENTOS DE CONCRETO ARMADO PRÉ-FABRICADOS

H. D. ALVES^{1*}, C. E. L. MELO²

*Autor de Contato: hisadutra@gmail.com

¹ Grupo de pesquisa Sustentabilidade, Desempenho e Reabilitações de Edificações, Laboratório de Tecnologia em Estruturas e Construção Civil na Arquitetura (LATEC), Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.

² Grupo de pesquisa Sustentabilidade, Desempenho e Reabilitações de Edificações, Laboratório de Tecnologia em Estruturas e Construção Civil na Arquitetura (LATEC), Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma aplicação de metodologia de inspeção para avaliações da degradação de elementos de concreto armado pré-fabricados, tendo como referência o FMECA – Análise dos Modos de Falha, Efeitos e Criticidade. Os indicadores são: ninhos de concretagem; fissuras/trincas; bolor/manchas de umidade; eflorescências e corrosão das armaduras. O método foi aplicado em 6 pilares de concreto armado pré-fabricados do Instituto Central de Ciências (ICC) da Universidade de Brasília. Foram identificados os graus de criticidade e modos de falha dos danos com base nas severidades e frequências. A análise da matriz de criticidade possibilita a hierarquização dos riscos, auxiliando planejamentos de ações de manutenção através da representação gráfica e numérica da prioridade das falhas identificadas.

Palavras-chave: Métodos de avaliação; FMECA; Manifestações patológicas; Concreto armado; Pré-fabricados.

Abstract

This article presents an application of inspection methodology for evaluating the degradation of prefabricated reinforced concrete elements, having as reference the FMECA - Analysis of Failure Modes, Effects and Criticality. The indicators are: concreting nests; cracks / cracks; mold / moisture stains; reinforcement efflorescence and corrosion. The method was applied to 6 prefabricated reinforced concrete pillars from the Central Institute of Sciences (ICC) of the University of Brasilia. The degrees of criticality and damage failure modes were identified based on severity and frequency. The analysis of the criticality matrix makes it possible to prioritize risks, helping to plan maintenance actions through the graphical and numerical representation of the priority of the identified failures.

Keywords: Assessment methods; FMECA; Pathological manifestations; Reinforced concrete; Precast.

Resumen

El presente trabajo presenta una aplicación de metodología de inspección para evaluar la degradación de elementos prefabricados de hormigón armado, teniendo como referencia el FMECA - Análisis de Modos de Falla, Efectos y Criticidad. Los indicadores son: hormigonado de nidos; grietas / grietas; manchas de moho / humedad; refuerzo de eflorescencia y corrosión. El método se aplicó a 6 pilares prefabricados de hormigón armado del Instituto Central de Ciencias (ICC) de la Universidad de Brasilia. Los grados de criticidad y los modos de falla del daño se identificaron en función de la gravedad y la frecuencia. El análisis de la matriz de criticidad permite priorizar riesgos, ayudando a planificar las acciones de mantenimiento a través de la representación gráfica y numérica de la prioridad de las fallas identificadas.

Palabras llave: Métodos de evaluación; FMECA; Manifestaciones patológicas; Concreto armado; Prefabricado.

1. INTRODUÇÃO

Acidentes no âmbito da construção civil como o desabamento de três edifícios no centro de Marselha, no sudeste da França, (Figura 1 A), o desabamento de parte da rodovia DF – 002, Eixo Rodoviário de Brasília (Figura 1 B) e o desabamento da laje do subsolo de uma edificação residencial na região da Asa Norte, Brasília (Figura 1 C) ocasionaram desastres irreversíveis como mortes (desabamento em Marselha) além de terem causado grandes prejuízos econômicos.



Figura 1 – Desabamentos na construção civil.

Fonte: a) <<https://www.noticiasaoiminuto.com.br/mundo/684828/edificios-desabam-no-centro-de-marselha-na-franca>>, acessado em 12 de fevereiro de 2021;

- b) <<https://www.metropoles.com/distrito-federal/asfalto-cede-no-eixo-monumental-no-viaduto-da-galeria-dos-estados?amp>>, acessado em 14 de fevereiro de 2021;
- c) <<https://cbn.globoradio.globo.com/media/audio/157833/laje-de-garagem-de-predio-desaba-em-brasilia-e-des.htm>>, acessado em 14 de fevereiro de 2021.

Essas ocorrências de desabamentos alertam para as falhas na conservação, condições de uso e falhas na manutenção as quais obras civis estão submetidas. Agentes fiscalizadores da construção civil, como o Conselho Regional de Engenharia e Agronomia (CREA) e Conselho de Arquitetura e Urbanismo (CAU), estão utilizando normas e guias para realizações de inspeções técnicas em construções, sejam públicas sejam privadas. Têm-se o propósito de certificar as condições de segurança, estabilidade e conservação das construções (Vervloet, 2018).

O conhecimento sistematizado de metodologias de inspeção ainda é precário, inexistindo um conhecimento sólido das práticas de avaliação e muito menos conhecidos seus resultados por ausência de divulgação ampla (Blumenschein et al., 2015).

É esperado que através de instrumentos de monitoramento e avaliação os quais possam ser disseminados e replicados em nível nacional, existirá assim o fortalecimento das práticas de avaliação de resultados confiáveis (Blumenschein et al., 2015).

O método FMECA - Análise dos Modos de Falha, Efeitos e Criticidade é um método de inspeção caracterizado como sendo um procedimento sistematizado para análise com foco na identificação de modos de falhas potenciais, suas causas e efeitos (danos) (Military Standard, 1980; Lima, 2019). Assim sendo, a partir da detecção das falhas presentes, são identificadas as causas (agentes patológicos) e assim os efeitos destes na estrutura (consequências ou outros danos ao elemento) (Silva et al., 2006).

A partir da obtenção número de prioridade de risco (NPR) é obtido como produto a matriz de criticidade, a qual caracteriza-se como ferramenta visual que possibilita de forma sucinta e clara comparações entre avaliações de diferentes elementos inspecionados (Military Standard, 1980; Zanoni e Buson, 2015; Lima, 2019).

Nas pesquisas sobre a avaliação da qualidade da habitação de interesse social, a adaptação e aplicação do método de inspeção FMECA – Análise dos Modos de Falha, Efeitos e Criticidade, tendo sido utilizada para o programa Minha Casa, Minha Vida – PMCMV não se restringe somente ao programa e sim pode ser aplicada em outras circunstâncias tendo como principal característica o uso de matrizes de criticidade para avaliação de degradações de elementos pela umidade (Blumenschein et al., 2015; Zanoni e Buson, 2015).

Seguindo a prerrogativa de que no Brasil ainda não existe uma normativa técnica de referência unificada e nacional sobre inspeções técnicas, este artigo tem como objetivo aplicar o método FMECA para avaliar o estado de degradação de elementos de concreto armado pré-fabricados.

2. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

O método FMECA – Análise dos Modos de Falha, Efeitos e Criticidade é uma extensão do método FMEA – Análise dos Modos de Falha e Efeito. Avalia-se o grau de criticidade dos modos de falha e sua respectiva relação com o grau de confiabilidade na edificação.

O modo de falha é a maneira como o defeito se apresenta e os modos de falha são representados como as manifestações patológicas vistoriadas *in loco* (ABNT, 2013; Zanoni e Buson, 2015).

As consequências de algum vício construtivo ou falha técnica na produção dos elementos pré-fabricados são percebidos pelos usuários da edificação como sendo os danos presentes (manifestação dos modos de falhas) (Zanoni e Buson, 2015; ABNT, 2018).

O FMECA considera além dos modos das falhas e seus danos, como também a frequência de ocorrência e o nível da gravidade ou o grau de risco (Sakurada, 2001; Machado, 2013).

Os índices de severidade e ocorrência variam entre 1 a 5 e tem como classificação a gravidade do dano (severidade) além da quantificação de cada dano (ocorrência).

O Número de Prioridade de Risco (NPR) define qual o grau de criticidade da degradação do elemento pré-fabricado encontra-se durante a vistoria. O NPR é obtido através da multiplicação entre o Índice de Severidade pelo Índice de Ocorrência. O Número de Prioridade de Risco é determinado pela equação (1):

$$\text{NPR} = \text{Índice de Severidade} \times \text{Índice de Ocorrência} \quad (1)$$

O cálculo do Número de Prioridade de Risco (NPR) possibilita a construção da Matriz de Criticidade de cada dano, a qual avalia-se cada exemplar da amostra através da severidade e frequência da falha (Military Standard, 1980; Sakurada, 2001; Silva et al., 2006; Blumenschein et al., 2015; Zaroni e Buson, 2015).

A partir dos exemplares da amostra torna-se possível identificar o grau de risco dos elementos e a necessidade de tomadas de ações para suas reabilitações.

Com o objetivo de se identificar os danos causados pela degradação estrutural, durante a realização das vistorias técnicas procurou-se observar as manifestações patológicas listadas:

- Ninhos de concretagem;
- Fissuras/Trincas;
- Bolor/Manchas de umidade;
- Eflorescências;
- Corrosão das armaduras.

A Tabela 1 e Tabela 2 apresentam as classificações dos índices e seus critérios a serem utilizados para avaliar a degradação dos elementos estudados, os quais devem se encontrar na fase de uso, operação e manutenção da edificação. Este critério de classificação baseia-se na recomendação da ABNT NBR15575-1:2013, a qual recomenda a realização de avaliações de campo após o período mínimo de dois anos da construção ou instalação (ABNT, 2013).

Tabela 1– Classificação do Índice de Severidade (S)

Categoria de Risco	Índice de Severidade (S)	Critério de Classificação do Índice de Severidade
Desprezível	1	Riscos que não provocam nenhum dano, prejuízo ou impactam na segurança. Geralmente são reversíveis.
Mínimo	2	Riscos os quais podem provocar algum tipo de prejuízo ao usuário visualmente.
Médio (moderado)	3	Riscos que interferem diretamente na perda parcial de desempenho do sistema. Podem evoluir.
Crítico	4	Riscos de provocarem danos contra a segurança. Provocam perda de desempenho e funcionalidade do sistema.
Elevada Criticidade	5	Riscos que comprometem mais de um elemento, sendo necessária a intervenção imediata.

Tabela 2 – Classificação do Índice de Ocorrência (O)

Frequência da Falha	Índice de Ocorrência (O)	Critério de Classificação do Índice de Ocorrência	Intervalos de áreas
Muito Baixa	1	Ocorrência nula ou muito baixa, a qual gera baixo impacto em manutenções.	$0\% \leq O < 0,5\%$
Baixa	2	Ocorrência baixa a qual demanda acompanhamento somente em ações pontuais.	$0,5\% \leq O < 1\%$
Moderada	3	Ocorrência moderada a qual demanda um acompanhamento planejado em manutenções.	$1\% \leq O < 3,5\%$
Alta	4	Ocorrência alta a qual demanda intervenção o mais brevemente possível.	$3,5\% \leq O < 5\%$
Muito Alta	5	Ocorrência muito alta a qual demanda ações de manutenção corretivas imediatas.	$O > 5\%$

A fim de se experienciar o procedimento metodológico abordado, foram selecionados 6 pilares de concreto armado pré-fabricados do Instituto Central de Ciências (ICC) Norte da Universidade de Brasília. As inspeções *in locu* serviram de coletas de dados.

Em relação ao recorte de estudo, o ICC da Universidade de Brasília teve sua construção finalizada no ano de 1975. Assim sendo, a edificação em estudo encontra-se na fase de pós-ocupação. A Figura 2 mostra a planta baixa do ICC, com destaque em vermelho para o ICC Norte.

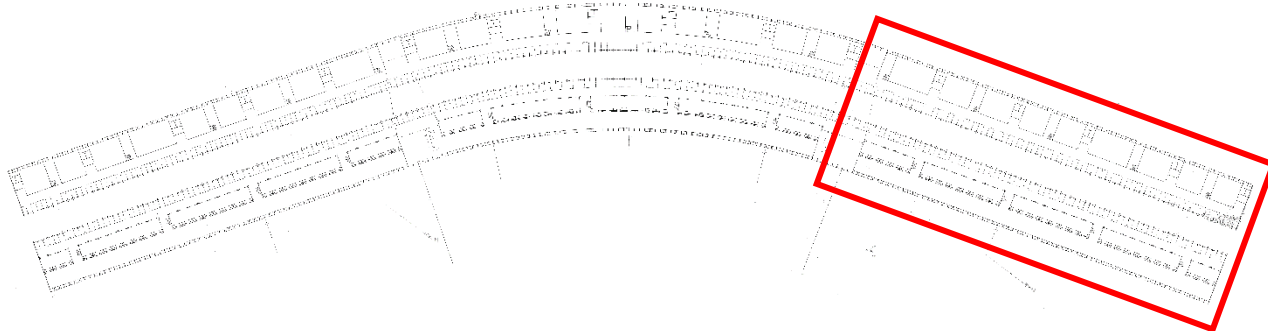


Figura 2 – Planta baixa do ICC, com destaque em vermelho da localização do ICC Norte.

Fonte: <https://ceplan.unb.br/index.php?option=com_phocadownload&view=category&id=3&Itemid=684&limitstart=0>, acessado em 01 de abril de 2021.

Os pilares selecionados do ICC foram fabricados em série e posteriormente inseridos no sistema estrutural existente: sapatas as quais possuem cavidades pré-estabelecidas onde os pilares foram encaixados e ficaram apoiados. Cada pilar é retangular e possui dimensões de projeto de 0,20 m x 1,50 m cada com altura de 10 m (Figura 3) (Fonseca, 2007).



Figura 3 - Cavidades nas sapatas com o intuito de receberem os pilares pré-moldados.

Fonte: Fonseca (2007)

Determinou-se a seleção dos 6 pilares da fachada externa leste do bloco A do ICC Norte, devido à maior exposição dos elementos à agentes de degradação. Ademais, o critério de seleção de cada pilar, ou seja, o parâmetro de comparação entre eles, baseou-se em suas diferentes condições de exposição, além de terem sido verificados como elementos que estavam mais degradados visualmente.

Assim, na linha de pilares da fachada externa leste do Bloco A do ICC Norte, foram selecionados 3 pilares sem vegetação próxima e 3 pilares com vegetação próxima.

Para melhor análise e identificação das posições de cada elemento, cada pilar foi enumerado de tal forma que sua nomenclatura expusesse a numeração referente à ordem de cada um a partir da localização do início da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (FAU). Ou seja, a nomenclatura P1, por exemplo, significa que o pilar analisado é o primeiro pilar da fachada externa do bloco A do ICC Norte.

A Figura 4 mostra a planta baixa do recorte de estudo com as nomenclaturas adotadas dos pilares e suas localizações.

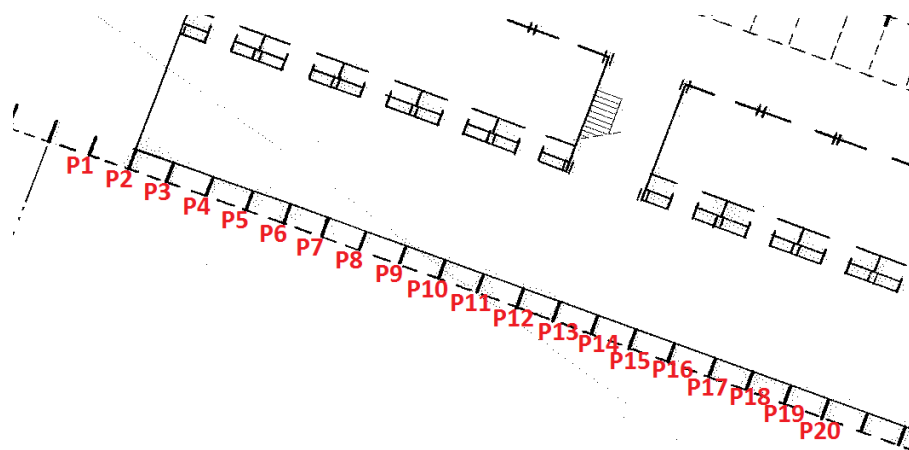


Figura 4 – Recorte e numeração dos pilares da fachada externa – Ala leste do Bloco A.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a finalidade da aplicação dos procedimentos metodológicos, foram selecionados elementos de concreto armado construídos a partir da mesma linha de produção construtiva: pré-fabricados (pré-moldados).

Por meio das vistorias, verificou-se que todo o sistema estrutural da edificação não apresenta sistema de vedação, onde os pilares como outros elementos (vigas, lajes, mezanino) estão expostos diretamente ao ambiente - sistema de concreto armado aparente.

Através das inspeções *in locu* dos 6 pilares, foram identificadas as manifestações patológicas existentes (danos), os sintomas (modo de falha potencial), as causas prováveis dos danos e seus possíveis efeitos (efeito potencial da falha).

Foram atribuídos os Índices de Severidade e Ocorrência para o cálculo do Número de Prioridade de Risco. A partir dos dados obtidos, foi elaborada uma Matriz de Criticidade além da possibilidade de se determinar o grau de criticidade das amostras analisadas. As Figuras 5 a 11 mostram a fachada de referência e os pilares vistoriados além das principais manifestações patológicas observadas nas vistorias.



Figura 5 – Linha de pilares da fachada externa sem vegetação próxima(esquerda) e com vegetação próxima (direita)– Ala leste do Bloco A.



Figura 6 - Pilar 6: ninho de concretagem e corrosão das armaduras.



Figura 7- Pilar 8: ninho de concretagem.



Figura 8 - Pilar 10: ninho de concretagem e corrosão das armaduras.



Figura 9 - Pilar 13: ninhos de concretagem e corrosão das armaduras.



Figura 10 - Pilar 15: ninhos de concretagem, bolor/manchas de umidade e corrosão das armaduras.



Figura 11 - Pilar 17: ninhos de concretagem, bolor/manchas de umidade e corrosão das armaduras.

Em relação a amostra composta por 6 pilares de concreto armado pré-fabricados, 100% dos pilares apresentam ninhos de concretagem, 83% apresentam sinais de corrosão em suas armaduras e 33% apresentam bolor/manchas de infiltração.

A Tabela 3 apresenta os danos vistoriados em cada pilar e a Tabela 4 apresenta a porcentagem dos danos sobre a amostra total dos pilares analisados.

Tabela 3 – Danos vistoriados nos pilares.

Pilar	Danos vistoriados
P6	Ninho de concretagem e corrosão das armaduras.
P8	Ninho de concretagem.
P10	Ninho de concretagem e corrosão das armaduras.
P13	Ninho de concretagem e corrosão das armaduras.
P15	Ninho de concretagem, corrosão das armaduras e bolor/manchas de umidade.
P17	Ninho de concretagem, corrosão das armaduras e bolor/manchas de umidade.

Tabela 4 – Porcentagem dos danos vistoriados na amostra.

Danos	Porcentagem sobre a amostra
Ninho de concretagem	100%
Corrosão das armaduras	83%
Bolor/Manchas de umidade	33%

Ademais, foi verificado também que os sinais de corrosão em armaduras estão diretamente associados ou com a presença de ninhos de concretagem ou com o deslocamento do concreto. Nos pilares 6, 10, 13 e 17 (Figuras 6, 8, 9 e 11) foi possível observar que a reação expansiva do processo de corrosão já acarretou perda de seção das armaduras.

Provavelmente, as principais causas que justificam as condições insatisfatórias vistoriadas são de que os ninhos de concretagem, ocasionados por um lançamento, adensamento e dosagem inadequados, formam falhas na estrutura, existindo assim vazios e porosidades na pasta de cimento onde tornam-se pontos de entrada para agentes de degradação.

As manchas de umidade/bolor, causados por elevada umidade na estrutura e presença de organismos vivos, podem acarretar uma biodegradação pela vegetação que cresce através de pequenas fissuras além de poder acarretar manifestações patológicas mais graves como a corrosão de armaduras.

E em relação à corrosão de armaduras, processo eletroquímico o qual ocasiona a expansão das armaduras, a corrosão pode acarretar fissurações, deslocamento da camada superficial do concreto, redução da seção da barra, perda de aderência entre a armadura e o concreto, além de em casos mais elevados, até mesmo o colapso da estrutura.

Realizada a análise, a Figura 12 apresenta os valores dos índices de cada pilar selecionado. A Figura 13 apresenta a matriz de criticidade dos pilares. A Figura 14 apresenta o gráfico da proporção das classificações de riscos sobre a totalidade da amostra.

PILAR	S	O	NPR
P6	4	3	12
P8	3	2	6
P10	4	3	12
P13	4	3	12
P15	4	2	8
P17	4	4	16

Critério de classificação de risco (NPR)

Grau de risco mínimo ≤ 3 

$3 < \text{Grau de risco médio} \leq 12$ 

$12 < \text{Grau de risco crítico} \leq 25$ 

Figura 12 – Valores dos índices dos pilares e critério de classificação de risco.

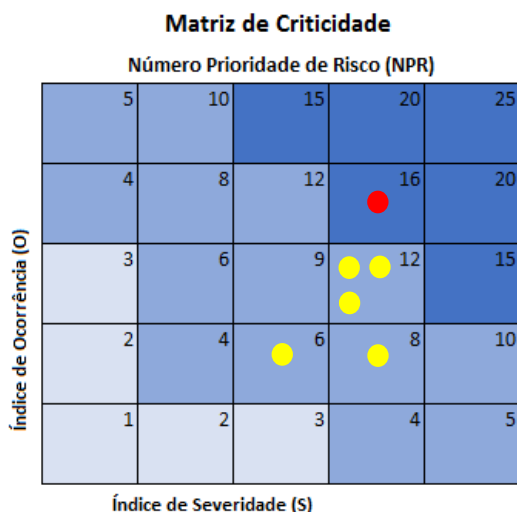


Figura 13 – Matriz de criticidade.

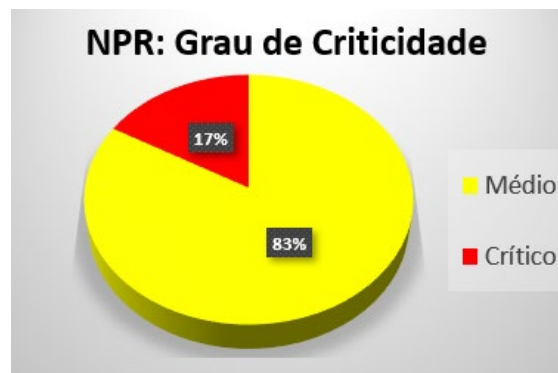


Figura 14 – Proporção dos resultados dos graus de criticidade da amostra total.

Em relação à quantificação dos Números de Prioridade de Risco (Figura 12), teve-se como resultado 5 pilares com grau de criticidade médio e 1 pilar com grau de criticidade crítico. Os pilares sem vegetação próxima (pilares 6, 8 e 10) obtiveram somente grau de criticidade médio, já os pilares próximos à vegetação (pilares 13, 15 e 17) obtiveram tanto grau de criticidade médio como crítico. Esse maior grau de criticidade dos pilares próximos à vegetação possivelmente está relacionado às condições de exposição diretamente interligadas à maior presença de umidade. Analisando a matriz de criticidade (Figura 13) gerada sobre a amostra, torna-se possível a avaliação de que todos os pilares contêm certo nível de deterioração estrutural. Ademais, a tendência é que esses danos evoluam com o passar do tempo, elevando assim o grau de deterioração dos elementos. No tocante da classificação dos danos de acordo com o grau de criticidade (produto da matriz de criticidade), avaliando-se os índices de ocorrência e de severidade, a amostra analisada apresenta 17% de grau de risco crítico e 83% de grau de risco médio (Figura 14).

4. CONCLUSÕES

Os resultados da análise da degradação dos pilares aqui expostos não representam uma análise da totalidade do sistema estrutural da edificação do Instituto Central de Ciências da Universidade de Brasília. A amostra do presente trabalho fora constituída de 6 pilares de concreto armado pré-fabricados, os quais foram escolhidos a partir de parâmetros de condições de exposição (vegetação) em uma edificação de sistema estrutural de concreto armado. A análise teve como objetivo realizar uma aplicação do método FMECA em elementos de concreto armado pré-fabricados.

A classificação de cada dano através dos índices de severidade e ocorrência obteve êxito na aplicação da amostra, pois os produtos gerados, tanto a matriz de criticidade como os respectivos graus de criticidade podem servir como base de dados e referências para se guiar tomadas de ações necessárias a fim de se preservar o estado de conservação dos elementos estruturais analisados.

Os números de prioridade de risco quanto a matriz de criticidade proporciona uma análise qualitativa e quantitativa dos danos nos elementos. Assim sendo, para elementos de concreto armado pré-fabricados o procedimento metodológico FMECA possibilita a hierarquização dos riscos além de permitir uma melhor visualização da evolução dos efeitos das falhas e danos com os anos de uso da edificação.

A matriz de criticidade torna-se então uma ferramenta viável para avaliação do estado de conservação e planejamentos para ações de manutenções e intervenções. No tocante a elementos

de concreto armado pré-fabricados, esse procedimento metodológico pode ser aplicado a outros componentes estruturais (lajes e vigas) ou não estruturais (escadas e rampas).

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho faz parte do grupo de pesquisa Sustentabilidade, Desempenho e Reabilitações de Edificações e ao Laboratório de Tecnologia em Estruturas e Construção Civil na Arquitetura (LATEC), dentro da linha de pesquisa Estruturas e Arquitetura da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília.

6. REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). “*PROJETO 02:140.02-001*”, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013). “*NBR 15575-1: Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 1: Requisitos gerais*”. Rio de Janeiro.
- Blumenschein, R. N. et al. (2015). “*Habitação de interesse social – projetos urbanístico e arquitetônico e qualidade construtiva*”. 1ª edição. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília. Brasília.
- Fonseca, R. P. (2007). “*A estrutura do Instituto Central de Ciências: Aspectos históricos, científicos e tecnológicos de projeto, execução, intervenções e propostas de manutenção*”. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da UnB. Brasília.
- Lima, B. B. (2019). “*Sistema de Revestimento em Mármore nas Fachadas do Congresso Nacional – Cenários do Estado de Conservação*”. Dissertação (Mestrado). Departamento de Arquitetura e Urbanismo da UnB. Brasília.
- Machado, M. P. N. M. (2013). “*Manutenção Preventiva de um Edifício Hospitalar*”. Dissertação (Mestrado). Engenharia Civil do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa.
- Military Standard. (1980). MIL-1629. “*Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*”. US Department Defense. Washington, DC.
- Sakurada, E. Y. (2001). “*As técnicas de Análise dos Modos de Falhas e seus Efeitos e Análise da Árvore de Falhas no desenvolvimento e na avaliação de produtos*”. Dissertação (Mestrado). Engenharia Mecânica da UFSC. Florianópolis.
- Silva, S. R. C.; Fonseca, M.; Brito, J. (2006). “*Metodologia FMEA e sua aplicação à construção de edifícios*”. LNEC.
- Vervloet, S. (2018). “*Análise de indicadores para execução de inspeção predial regular obrigatória e diretrizes para o corpo técnico*”. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória.
- Zanoni, V.A.G; Buson, M. (2015). “*Matriz de criticidade na avaliação da qualidade construtiva do Programa Minha Casa Minha Vida*”. In: XIII Congresso Latino-Americano de Patologia da Construção, XV Congresso de Controlo da Qualidade na Construção, Congresso Luso-Africano da Construção, 2015, Lisboa. Anais Lisboa: Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.