Análise de modos e efeitos de falha (FMEA) em estruturas de concreto pré-fabricado

Failure mode and effect analysis (FMEA) in precast concrete structures

Ricardo Augusto dos Santos Horta
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais | Belo Horizonte, Minas Gerais | ricardocivil92@gmail.com

Flávia Spitale Jacques Poggiali
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais | Belo Horizonte, Minas Gerais | flaviaspitale@gmail.com

RESUMO

A Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA) é uma ferramenta de gestão de riscos amplamente utilizada para identificar e analisar potenciais falhas em processos, produtos ou sistemas. Esta pesquisa consiste em uma revisão bibliográfica e apresenta como objetivo o levantamento e análise dos modos e efeitos de falha em estruturas de concreto pré-fabricado, considerando os estágios de fabricação, transporte, içamento e execução. Os elementos de concreto pré-fabricado têm ganhado destaque em diversas aplicações, especialmente em habitações de interesse social. Sua produção em um ambiente controlado permite um controle de qualidade alto, resultando em um menor consumo de materiais e em menores emissões, fatores que fazem deste um sistema construtivo de baixo carbono. Os resultados obtidos mostram modos de falha críticos, como defeitos de cura do concreto e falhas na fixação das estruturas durante o içamento, sendo propostas ações ao longo do desenvolvimento para a mitigação destes riscos.

Palavras-chave: Análise dos modos e efeitos de falha; Concreto pré-fabricado; Estruturas pré-moldadas; FMEA; Gestão de riscos.

ABSTRACT

Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) is a risk management tool widely used to identify and analyze potential failures in processes, products or systems. This research consists of a literature review and aims to survey and analyze the modes and effects of failure in prefabricated concrete structures, considering the stages of manufacturing, transportation, lifting and execution. Prefabricated concrete elements have gained prominence in several applications, especially in social housing. Its production in a controlled environment allows for high quality control, resulting in lower consumption of materials and lower emissions, factors that make this a low-carbon construction system. The results obtained show critical failure modes, such as concrete curing defects and failures in the fixing of structures during lifting, and actions are proposed throughout the development to mitigate these risks.

Keywords: Failure mode and effect analysis; Prefabricated concrete; Precast structures; FMEA; Risk management.

1 INTRODUÇÃO

A Análise dos Modos de Falha e Efeitos (FMEA - *Failure Modes and Effects Analysis*) é uma ferramenta de gestão fundamental para avaliação de riscos em diversos setores da indústria, incluindo o setor automotivo, o setor aeroespacial, o segmento de manufatura e a construção civil. Essa metodologia permite identificar e analisar potenciais falhas em processos, produtos ou sistemas, auxiliando na avaliação dos riscos envolvidos e no desenvolvimento de estratégias para a mitigação destes riscos. Especificamente na construção civil, a FMEA pode ser utilizada para prever modos de falha críticos em sistemas construtivos e implementar medidas preventivas, aumentando a confiabilidade e a segurança dos processos, reduzindo custos e desperdícios, melhorando a percepção e a satisfação dos clientes e promovendo a melhoria contínua (Stamatis, 2003).

As estruturas de concreto pré-fabricado apresentam um baixo impacto ambiental comparativamente às construções realizadas in loco, devido à racionalização dos materiais e processos de produção, possibilidade de reutilização e reciclagem dos componentes ao final de sua vida útil. Além disso, o rigoroso controle de qualidade em um ambiente fabril reduz o desperdício de insumos e minimiza emissões, contribuindo para práticas mais sustentáveis na construção civil. Por tais motivos, as construções pré-fabricadas são consideradas soluções ecoeficientes para a construção civil (Batista e Sales, 2020). No entanto, ainda há espaço para melhorias dos processos visando reduzir ainda mais os seus impactos ambientais.

Esta pesquisa consiste na análise dos modos e efeitos de falha de estruturas de concreto pré-fabricado. O propósito desta análise é reconhecer e avaliar as potenciais falhas associadas aos processos de fabricação das estruturas, transporte, içamento e montagem no canteiro de obras. Ao final do trabalho, um conjunto de ações preventivas e corretivas para a melhoria dos processos é proposto, subsidiando a tomada de decisão para a promoção de um ambiente de trabalho mais seguro, eficiente e de menor impacto ambiental, tanto na fábrica quanto nas transportadoras e nos canteiros de obras.

2 METODOLOGIA

Neste trabalho foi utilizado o método da FMEA para realizar uma análise dos modos e efeitos de falha de estruturas de concreto pré-fabricado. A primeira etapa consistiu na definição do escopo do estudo. Foram definidos os estágios do processo produtivo a serem considerados, fronteiras do estudo, formação da equipe FMEA, setores de produção envolvidos e clientes beneficiados.

Na segunda etapa, foi formalizada a composição da equipe de trabalho, responsável por conduzir a análise FMEA. O estudo baseou-se no processo produtivo da empresa X, especializada na produção de estruturas pré-moldadas de concreto para o programa “Minha Casa, Minha Vida”. Optou-se, neste estudo, por manter a identidade da empresa em anonimato para não expor dados do seu processo produtivo.

A equipe de trabalho foi composta por cinco profissionais: o engenheiro responsável pela manufatura das peças pré-moldadas, o analista de qualidade, o gerente de panejamento e logística de transportes, o engenheiro responsável pelo recebimento das estruturas e o autor principal deste estudo. Em seguida, foi realizada uma reunião destes profissionais para a análise de todos os estágios considerados no processo, principalmente através da construção de um fluxograma.

A terceira etapa consistiu na coleta de dados. A partir da análise dos registros da empresa X e de relatos das pessoas envolvidas em acidentes de trabalho, foram levantados todos os modos de falha dos quatro estágios do processo: fabricação, transporte, içamento e montagem das estruturas de concreto pré-fabricado. Em seguida, foram relacionados os efeitos, causas e meios de detecção de cada modo de falha, aproveitando-se da experiência dos profissionais da equipe de trabalho. Tais informações foram levantadas em um ambiente de brainstorming.

Na quarta etapa foi calculado o risco associado a cada um dos modos de falha. A equipe se reuniu novamente e, em consenso, foram definidos os valores para Severidade, Ocorrência e Detecção de cada um dos modos de falha identificados na etapa anterior, conforme gradação apresentada nas Tabelas 1, 2 e 3. Para a avaliação da Severidade, existe uma escala Likert de 5 pontos (mínima, baixa, moderada, alta ou muito alta), que classifica o grau de severidade das falhas observadas nos processos. A avaliação da severidade gradua como 1 o efeito mínimo sobre o cliente e 10 um grave impacto da falha sobre o cliente, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1: Escala de classificação de severidade do modo de falha.

Severidade do efeito do modo de falha		S
Mínima	Mínimo efeito no desempenho, provavelmente não será percebido pelo cliente.	1
		2
Baixa	Provoca leve insatisfação, com apenas leve queda de desempenho.	3
		4
Moderada	Provoca insatisfação devido à perda de desempenho ou mau funcionamento.	5
		6
Alta	Provoca alta insatisfação do cliente.	7
		8
Muito Alta	Compromete segurança da operação ou envolve infração a regulamentos.	9
		10

Fonte: Adaptado de Fogliatto e Ribeiro (2009).

Para a avaliação da Ocorrência das falhas, também existe uma escala Likert de 5 pontos (remota, muito baixa, baixa, moderada, alta ou muito alta). O valor para este indicador é obtido pela Tabela 2, sendo que o valor 1 representa a mínima frequência de ocorrência e o valor 10 uma falha praticamente inevitável.

Tabela 2: Escala de classificação da ocorrência do modo de falha.

Ocorrência do modo de falha		O
Remota	(1 em 1500000)	1
Muito Baixa	(1 em 15000)	2
	(1 em 5000)	3
Baixa	(1 em 2000)	4
	(1 em 400)	5
Moderada	(1 em 80)	6
	(1 em 20)	7
Alta	(1 em 8)	8
	(1 em 3)	9
Muito Alta	(1 em 2)	10

Fonte: Adaptado de Fogliatto e Ribeiro (2009).

Para a avaliação do grau de Detecção das falhas, também existe uma escala Likert de 5 pontos (muito alta, alta, moderada, baixa ou muito baixa). O valor para este indicador é obtido conforme a Tabela 3, sendo que o valor 1 representa um modo de falha que quase certamente é detectado a tempo, enquanto o valor 10 representa situações em que não há controle para detectar o problema.

Segundo Fernandes (2005), o risco relativo aos modos de falha identificados nos processos é o produto dos três indicadores descritos anteriormente: Severidade (S), Ocorrência (O) e Detecção (D). Logo, o valor máximo do risco pode chegar a 1000. Fernandes (2005) esclarece que 1 representa um baixíssimo risco ao cliente e 1000 um risco supercrítico. Este é o método mais utilizado para se medir o risco associado às falhas, além de permitir a priorização dos processos que obtiveram um índice de risco elevado e buscar ações para reduzir a severidade, ocorrência ou não-detecção (Fernandes, 2005). Multiplicando-se as pontuações obtidas para os indicadores de Severidade (S), Ocorrência (O) e Detecção (D), foi encontrado o fator de risco (R) para cada um dos modos de falha identificados (R = S x O x D).

Tabela 3: Escala de classificação da detecção do modo de falha.

Detecção pelo meio de controle		D
Muito Alta	Praticamente certo que o modo de falha será detectado	1
		2
Alta	Alta probabilidade de o modo de falha ser detectado	3
		4
Moderada	O modo de falha pode ser detectado	5
		6
Baixa	Baixa probabilidade de detectar o modo de falha	7
		8
Muito Baixa	Provavelmente o modo de falha não será detectado	9
		10

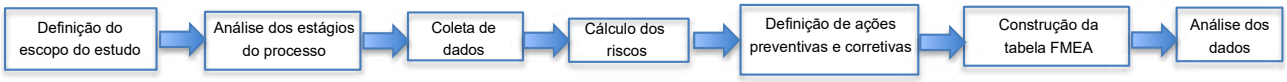
Fonte: Adaptado de Fogliatto e Ribeiro (2009).

Na quinta etapa, realizou-se uma última reunião da equipe de trabalho para o detalhamento das ações recomendadas para a mitigação das falhas identificadas em cada um dos processos. A ordem de prioridade para a execução destas ações seguiu o índice de risco identificado, do maior para o menor risco. As ações

propostas basearam-se em estratégias para atenuação dos indicadores de severidade e ocorrência, bem como melhoria da detectabilidade, de forma a reduzir o índice de risco.

Na sexta etapa foi realizada a elaboração e o preenchimento da planilha FMEA, onde foram listadas todos as etapas dos processos, modos de falha, efeitos, causas, índices de severidade, probabilidade de ocorrência e de detecção, risco associado e ações preventivas e corretivas recomendadas. A sétima e última etapa consistiu na análise e discussão dos dados obtidos. A Figura 1 apresenta o fluxograma representativo destas etapas.

Figura 1: Fluxograma da metodologia.



3 RESULTADOS E ANÁLISES

3.1 ESCOPO

Na análise FMEA foram considerados os estágios de fabricação, transporte, içamento e montagem das estruturas de concreto pré-fabricado. As fronteiras do estudo são a fabricação das armações e a montagem das estruturas de concreto pré-fabricado. A equipe responsável por implementar a análise FMEA foi composta por cinco profissionais: o engenheiro responsável pela manufatura, o analista de qualidade, o gerente de panejamento e logística de transportes, o engenheiro responsável pelo recebimento das estruturas pré-moldadas de concreto e o autor principal deste estudo.

3.2. FLUXOGRAMA DOS PROCESSOS

A Figura 2 apresenta o fluxograma dos processos de produção associados às estruturas de concreto pré-fabricadas.

3.3 TABELA FMEA E ANÁLISE DOS DADOS

A Tabela 4 apresenta a planilha FMEA elaborada a partir de informações reunidas pela equipe de trabalho.

A partir dos resultados encontrados (Tabela 4), identificou-se que os principais modos de falha associados às estruturas de concreto pré-fabricado são aqueles com um índice de risco igual ou superior a 100. De acordo com a Tabela 4, temos, por ordem decrescente de risco: (i) Aço de reforço faltando durante a montagem das formas (R = 224); (ii) insuficiência ou mau posicionamento de espaçadores plásticos durante a montagem das formas (R = 120); (iii) defeitos de cura do concreto no estágio de fabricação (R = 108); (iv) flambagem lateral das peças estruturais durante o içamento (R = 108); (v) excesso de carga no içamento das estruturas (R = 108); (vi) falha na fixação de ganchos durante o içamento (R = 100).

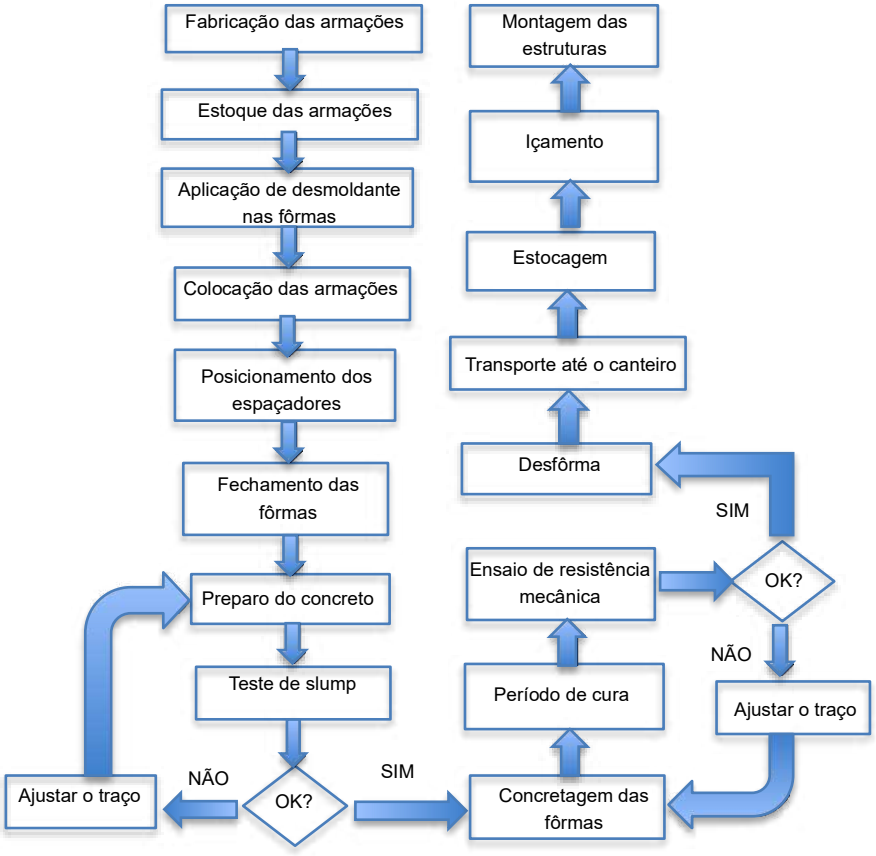
Dessa forma, as seguintes ações para a prevenção dos riscos associados a esses modos de falha devem ser priorizadas: Fixação de lista de verificação e marcação do aço no gabarito das fôrmas; padronização e marcação no gabarito de locais a serem fixados os espaçadores plásticos; implementação de controle de qualidade nas etapas de mistura e cura do concreto; verificação da capacidade de carga dos equipamentos de elevação e do peso próprio das estruturas; mudança no ponto de pega/ reforço provisório nos membros comprimidos durante o içamento; treinamento das equipes de montagem e uso EPI's.

3.4 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Dentre as limitações da ferramenta de FMEA, destaca-se a dificuldade em se chegar a um consenso quanto aos valores (pesos) em cada etapa do processo de identificação dos riscos (severidade, ocorrência e detecção). Isso se deve ao fato de que os profissionais da equipe de trabalho possuíam formações técnicas bem distintas e diferentes percepções sobre a gravidade de cada um dos modos de falha identificados.

Além disso, para o monitoramento dos processos analisados neste estudo, foram realizadas visitas de campo em apenas uma unidade fabril e em um único canteiro de obras. Este fato limitou o alcance e a generalização dos resultados obtidos neste estudo.

Figura 2: Fluxograma dos estágios considerados na análise FMEA.



5 CONCLUSÃO

Por meio da FMEA realizada neste trabalho, foi possível identificar os modos de falha críticos associados às estruturas de concreto pré-fabricado. A implementação das ações preventivas e corretivas recomendadas pode ajudar a reduzir a severidade e a probabilidade de ocorrência, bem como melhorar a detecção das falhas, resultando em processos mais seguros, eficientes e de menor impacto ambiental.

A FMEA realizada neste trabalho pode servir de base para auxiliar as construtoras na tomada de decisão quanto aos riscos a serem monitorados em relação às estruturas de concreto pré-fabricado, a fim de otimizar processos e reduzir a ocorrência de falhas.

Como proposta para pesquisas futuras, propõe-se a realização das ações preventivas e corretivas identificadas neste trabalho nas fábricas de elementos pré-moldados de concreto, transportadoras e nos canteiros de obras, possibilitando assim a verificação dos efeitos práticos da implementação destas medidas sobre a eficiência dos processos e sobre a segurança no ambiente de trabalho. Ao final, recomenda-se o cálculo do índice de risco dos itens modificados com sucesso e a retroalimentação da planilha FMEA, visando a melhoria contínua.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte técnico e financeiro fornecido para o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa.

Tabela 4: Planilha FMEA para a produção de estruturas de concreto pré-fabricado.

Etapa do Processo	Modo de Falha	Efeito da Falha	Causa da Falha	Severidade (S)	Ocorrência (O)	Detecção (D)	Risco (R) = SxOxD	Ações Recomendadas
Fabricação	Aço de reforço faltando	Redução da resistência estrutural	Erro do armador	7	4	8	224	Fixação de lista de verificação e marcação do aço no gabarito das fôrmas
Fabricação	Insuficiência ou mau posicionamento de espaçadores plásticos	Exposição do aço	Erro do armador	5	8	3	120	Padronização e marcação no gabarito de locais a serem fixados os espaçadores
Fabricação	Defeitos de cura do concreto	Redução da resistência à compressão do elemento estrutural	Mistura inadequada, tempo de cura insuficiente, exposição atmosférica	9	4	3	108	Implementar controle de qualidade rigoroso nas etapas de mistura e cura do concreto
Fabricação	Erros de dimensionamento	Incompatibilidade com o projeto estrutural	Falha na leitura de projeto	7	3	4	84	Realizar revisão sistemática dos projetos
Transporte	Danos físicos durante o transporte	Deformações e fissuras nos elementos	Falta de proteção contrachoques mecânicos	9	3	2	54	Capacitar a equipe sobre manuseio e embalagem. Utilização de peças de isopor para proteção contra choques mecânicos
Transporte	Atraso na entrega	Impacto no cronograma da obra	Condições climáticas, tráfego intenso	4	5	4	80	Estabelecer um planejamento logístico rigoroso
Içamento	Falha na fixação de ganchos	Queda do elemento durante o içamento	Instalação incorreta de ganchos	10	2	5	100	Treinamento de equipe e uso de dispositivos de segurança
Içamento	Excesso de carga	Fissuras ou quebra do elemento durante o içamento	Uso inadequado de equipamentos de içamento	9	4	3	108	Verificação de capacidade de carga dos equipamentos de içamento e do peso próprio das estruturas
Montagem	Falta de alinhamento na montagem	Comprometimento da estrutura final	Falta de treinamento da equipe de montagem	7	4	3	84	Treinamento da equipe e uso de ferramentas de alinhamento
Montagem	Erros de fixação dos elementos	Instabilidade na estrutura	Falta de controle de qualidade	9	2	4	72	Inspeções regulares durante a montagem

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto. Rio de Janeiro, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9062**: Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Pré-Moldado. Rio de Janeiro, 2017.

AMIT, R.; SCHOEMAKER, P. J. H. Strategic Assets and Organizational Rent. **Strategic Management Journa*l***, v.14, n.1, p.33-46, 1993.

AUTÊNTICA. **Especialistas em lajes e pré-fabricados.** Disponível em: https://www.auteticalajes.com.br. Acesso em 20 de novembro de 2024.

BATISTA, F.; SALES, R. Sustentabilidade na construção: impactos ambientais e benefícios do concreto pré-fabricado. **Revista Engenharia e Sustentabilidade**, v. 8, n. 2, p. 45-56, 2020.

BERTOLINI, L. **Durabilidade do Concreto: Teoria e Prática.** São Paulo: Editora Blucher, 2012.

CARMICHAEL, J. A Systematic Approach to FMEA for Industrial Precast Concrete Frameworks. **Procedia Structural Integrity**, v.29, p.1045-1050, 2020.

COUTO, A. R. Análise de Risco no Içamento de Estruturas Pré-moldadas. **Revista Brasileira de Engenharia e Construção**, v.14, n.2, p.120-135, 2019.

FERNANDES, José Márcio Ramos. **Proposição de abordagem integrada de métodos da qualidade baseada no FMEA.** 2005. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2005.

FERREIRA, J. A.; SILVA, J. G. Reliability of Precast Concrete Beams. **International Journal of Structural Stability and Dynamics**, v.19, n.8, 2019.

FOGLIATTO, Flávio Sanson; RIBEIRO, José Luís Duarte. **Confiabilidade e manutenção industrial**. São Paulo: Elsevier, 2009.

FREITAS, M. A. Durabilidade do Concreto Pré-Fabricado: Uma Revisão. **Revista Brasileira de Construção Sustentável,** v.3, n.2, p.25-34, 2018.

GOMES, J.; SILVA, M. Aplicação do FMEA na construção civil: um estudo de caso em estruturas pré-fabricadas. **Revista Engenharia Sustentável**, v. 10, n. 2, p. 45-58, 2022.

GONÇALVES, M. Monitoramento Estrutural e Manutenção de Concreto Pré-moldado. **Revista de Materiais de Construção**, v.11, n.4, p.200-210, 2019.

HARRIS, C. M. **Failure Mode Effects Analysis: FMEA - A Practical Approach to Risk Assessment**. Quality Press, 2009.

ISO 31000: International Organization for Standardization. **Risk management – Principles and guidelines.**

JARDIM, C. A.. Importância da Revisão de Projetos em Obras de Concreto Pré-moldado. **Anais do Congresso Brasileiro de Estruturas,** v.3, n.1, p.55-60, 2020.

KUMAR, Ramesh. Innovative FMEA Methodology for Performance Optimization in Precast Concrete**. International Journal of Structural Integrity**, v.14, p.103-112, 2019.

LIMA, J. P. A Importância das Inspeções de Qualidade na Montagem de Estruturas. **Revista de Construção Civil,** v.12, n.3, p.80-90, 2018.

MELO, T. R. Segurança em Operações de Içamento: Práticas e Procedimentos. **Jornal de Engenharia Civil**, v.9, n.2, p.45-56, 2017.

Ministério do Trabalho e Emprego. Norma Regulamentadora. **NR-18:** Segurança e saúde no trabalho na indústria da construção. Brasília, 2020.

MOTA, C. R. Manuseio e Transporte de Concreto Pré-moldado: Diretrizes de Segurança. **Revista Brasileira de Materiais**, v.10, n.4, p.200-210, 2018.

PEREIRA, R. Treinamento de Equipes em Montagem de Estruturas Pré-moldadas. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v.11, n.1, p.15-30, 2020.

SILVA, F. L. Logística e Transporte na Construção Civil. **Revista de Gestão da Construção**, v.8, n.3, p.100-115, 2021.

STAMATIS, D.H. **Failure Mode and Effect Analysis**. 2ª ed. Milwaukee: ASQC Quality Press, 2003.

STAMATOPOULOS, H.; MITROPOULOS, P. Risk Assessment of Precast Concrete Structures. **Journal of Constructional Steel Research**, v.99, p.80-87, 2014.