

Método para análise do risco em estruturas de arrimo em concreto armado

R.B.C. Cruz^{a†}, F.A. Santos^b, J.B. Souza^b, J.A. Khalil^b, R.M.G. Carvalho^b, A.M. Filho^c

^a Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, Brasil

^b Universidade São Judas Tadeu, Curso de Engenharia Civil – São Paulo, Brasil

^c Polícia Civil do Estado de São Paulo – São Paulo, Brasil

[†] Autor para correspondência: castelocruz@uol.com.br

RESUMO

Muros de arrimo são estruturas de contenção utilizadas para corte e aterro em perfis naturais de solos. Eventualmente, há prejuízo em sua capacidade de carga, desempenho em serviço e a durabilidade nestas estruturas, que podem ser associadas à anomalias e falhas decorrentes de manifestações patológicas, que por sua vez estão intrinsecamente ligadas a solicitações, agentes agressivos, deficiências de projeto e execução. A detecção de falhas e sua severidade, bem como a associação de responsabilidades, são objeto de um processo de inspeção, que levarão a elaboração de um laudo ou parecer, e a análise deste laudo com vistas à Análise do Risco requisitando um posicionamento qualitativo e quantitativo do risco em função de sua severidade, ocorrência e detecção. De tal forma que o objetivo deste trabalho é a avaliação de risco em muros de arrimo em concreto armado. Foram evidenciados seis grupos de patologias, do qual foram expandidas em dezoito falhas possíveis, neste cenário, e analisadas sob o método da ferramenta *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA). Assim três falhas apontaram grau de risco alto e muito alto cujos fatores preponderantes nessas falhas foram inerentes à presença de umidade e deficiências no sistema drenante.

Cronologia do artigo:

Recebido a 07 novembro 2017
Corrigido a 22 junho 2018
Aceite a 05 fevereiro 2020
Publicado a 30 abril 2020

Palavras-chave:

Muros de arrimo
FMEA
Análise de risco
Estruturas de concreto

1. Introdução

As estruturas de muros de arrimo são elementos da engenharia utilizados para contenção de encostas, solos, etc., e sua estabilidade é fator preponderante para segurança de construções que necessitam desse tipo de intervenção.

Assim como qualquer outra estrutura, as estruturas de contenção e, particularmente os muros de arrimo, necessitam de um acompanhamento ao longo de sua vida útil, buscando verificar as manifestações patológicas que possam comprometer sua capacidade de carga, desempenho e durabilidade, e com isso em alguns casos colocar em risco construções próximas e, até mesmo, segurança das pessoas, conforme cita pujadas (2014).

Quando se fala em estabilidade em uma estrutura deve-se ter em mente o perigo proporcionado pela sua ruína, nesse contexto se faz necessário um índice que expresse o grau de criticidade a qual se submete a estrutura, para assim, conforme Amaral, Nunes e Amaral (2015), compreender as vulnerabilidades existentes e avaliar as consequências resultantes das possíveis ameaças em função de seu grau de risco.

Segundo Marangon (2006), a estabilidade do muro, deverá ser cuidadosamente estudada e verificada. Dessa forma associar as falhas ocorrentes em um sistema de contenção a uma medida objetiva do risco é relevante, e assim este trabalho com abordagem exploratória, com base em revisão bibliográfica acerca de estruturas de contenção, particularmente muros de arrimo de concreto armado, suas manifestações patológicas, processos de inspeção e classificação do grau de risco com apoio da ferramenta *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) permitirá a concretização do objetivo de avaliar o grau de risco em estruturas de contenção com apoio de metodologia de análise de falha.

Este tema em construção civil, ainda é incipiente aponta Almeida (2005), a adoção das técnicas de gerenciamento e de análise do risco de projeto estão surpreendentemente lentas, se comparadas com a utilização das mesmas nos setores petroquímicos, aeroespacial, de informática e nas indústrias de

defesa.

Este trabalho foi estruturado em pesquisa exploratória com apoio de revisão da literatura, apresentadas em seções, abordando conceitos sobre estruturas de contenções, manifestações patológicas que afetam a capacidade de carga, desempenho e durabilidade de tais estruturas, procedimentos de inspeção e apuração de fatos nas perícias judiciais, bem como conceitos sobre gestão e análise de riscos.

Tendo, a revisão de literatura, fundamentado a problematização da quantificação de risco em estruturas de arrimo este trabalho aborda as questões de gestão e análise de riscos como proposta para avaliação de criticidade de forma quali-quantitativa aplicando a ferramenta FMEA como uma metodologia para avaliação em estudo de caso selecionado para ratificar sua aplicabilidade e replicabilidade.

2. Falhas e patologias em estruturas de contenção

Manifestações patológicas nas estruturas de concreto armado correspondem a danos, falhas, anomalias ou defeitos que determinam um desempenho inadequado de uma parte, ou componente específico da estrutura, ou da estrutura como um todo.

Segundo Souza e Ripper (2009), o surgimento de problema patológico em dada estrutura indica, de maneira geral, a existência de uma ou mais falhas durante a execução de um ou mais etapas da construção. Inúmeras podem ser as categorias de falha inerentes às obras civis, tais como falhas em projetos, falhas na execução, falhas no concreto, falha nas armaduras, no solo e no sistema drenante.

2.1. Falhas de projetos e execução

Segundo Souza e Ripper (2009), os riscos nas estruturas em decorrências de falhas em projetos são diversos, e em muitos casos graves. Um projeto estrutural que não avalie as condições do local de instalação e as variações no local de uso podem acarretar em um acúmulo de cargas sobre a estrutura, o que pode chegar ao nível de colapso e consequente rutura.

Segundo Marcelli (2010), podem existir outros vícios de projeto, tais como escoamento de água ineficiente, impermeabilização inadequada, inexistência de dispositivos de proteção, falta de um programa de manual de uso, deficiências na inspeção e manutenção, que de forma generalizada facilitam a entrada de agentes agressivos, e a incidência de outras patologias na estrutura.

Ainda, segundo Souza e Ripper (2009), as falhas geradas em obras de engenharia permeiam diversas causas, contudo ainda no âmbito de projeto é possível destacar a especificação de elementos de projetos inadequados, a falta de compatibilização entre a estrutura e a arquitetura, a especificação inadequada de materiais, o detalhamento insuficiente ou errado, os detalhes construtivos inexequíveis, a falta de padronização das representações até os erros de dimensionamento.

Neste contexto complexo, inerentes somente, as falhas que possuem como origem o projeto, foram destacadas, todas tendo como origem o projeto, as falhas, a forma de detecção (se possível de forma visual ou se carece de algum ensaio específico), e o método de prevenção todos estes sumarizados na Tabela 1.

Tabela 1 - Quadro resumo de falhas em projetos.

Grupo de origem	Falha	Anomalia	Forma de detecção	Método de prevenção
Projeto	Erros de especificação ou de dimensionamento	Sistema drenante inexistente ou insuficiente	Visual de difícil detecção	- Elaboração de projetos executivos que contemplem a fase de execução e manutenção - Auditoria e fiscalização dos projetos
		Visual ou com apoio de ensaios de campo	Visual ou com apoio de ensaios de campo	- Elaboração de projetos executivos que contemplem a fase de execução e manutenção - Auditoria e fiscalização dos projetos

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a seleção de materiais e dosagens apropriados são passos importantes para produzir um concreto que atenda às especificações de resistência e durabilidade em um elemento estrutural. No entanto, é necessária atenção adequada aos processos de execução do concreto para atingir tal objetivo.

Durante o processo de execução da concretagem da estrutura devem ser tomados alguns cuidados, tais como lançamento, adensamento, acabamento, cura do concreto, desmoldagem, e outros cuidados

executivos. Segundo Mehta e Monteiro (2008), após chegar ao canteiro de obras, o concreto pré-misturado deve ser lançado o mais próximo possível de posição final. Para evitar a segregação o concreto não deve ser movido a distâncias muito longas durante o lançamento nas fôrmas. Segundo Freire (2001), o adensamento tem a função de preencher os espaços vazios do concreto, diminuindo a sua porosidade e aumentando a resistência, consequentemente aumentando a vida útil da estrutura. Atualmente esse processo vem sendo realizado mecanicamente por meio de ferramentas como compactadores, placas vibratórias e vibradores. Assim as falhas inerentes as execuções foram destacadas em função de sua forma de detecção, prevenção e incidência conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Quadro resumo de falhas em execução.

Grupo de origem	Falha	Anomalia	Forma de detecção	Método de prevenção
Execução	Defeitos na estrutura, nichos de concretagem e desaprumos	Inadequações geométricas e desempenho abaixo do esperado	Visual e eventualmente com ensaios	- Seguir as recomendações de execução conforme as normas e projetos - Fiscalização na execução

2.2. Patologias de concreto e armaduras

Segundo Mehta e Monteiro (2008), na reação com os aluminatos de cálcio hidratados do cimento ou com a alumina reativa do agregado, o íon sulfato é responsável pela formação de um composto expansivo (sulfoaluminato de cálcio) que compromete a estabilidade do concreto endurecido. O ataque por sulfato também pode provocar a diminuição progressiva da resistência e perda de massa em virtude da perda de coesão dos produtos de hidratação do cimento.

Para Neville e Brooks (2007), a deterioração geralmente começa nos cantos e arestas seguida de uma fissuração progressiva e lascamento que reduzem o concreto a uma condição friável ou mesmo mole. Com essa expansão, e a criação de trincas e fissuras na superfície do concreto, no primeiro momento, facilita o ataque a elementos da armação da estrutura, o que faz com que perca a função estrutural dessa área do concreto armado.

Segundo Hasparyk (2005), a Reação Álcali – Agregado (RAA) é um termo geral utilizado para descrever vários tipos de reações químicas que podem ocorrer internamente no concreto, envolvendo alguns componentes mineralógicos presentes em rochas e agregados reativos usados em concreto e álcalis da solução de poros.

Como resultado da reação, são formados produtos que, na presença de umidade, na sua maioria, são capazes de expandir e causar tensões internas, fissurações e deslocamentos, podendo levar a um comprometimento das estruturas de concreto e afetar, por conseguinte, sua durabilidade. Portanto, para que essa falha possa ocorrer, são necessários três fatores atuando conjuntamente: fases mineralógicas do agregado consideradas como reativas, hidróxidos alcalinos e umidade.

Os efeitos da dilatação térmica se desenvolvem da seguinte forma: A elevação da temperatura aumenta com o consumo de cimento e com as dimensões da peça e pode originar fissuras extensas e profundas, quando ocorrer um choque térmico originado por um gradiente térmico superior a 25°C, diferença da temperatura no interior da massa do concreto e a temperatura na superfície externa do concreto.

As fissuras são indesejáveis, pois afetam diretamente a durabilidade da estrutura, e os procedimentos para reparo são de difícil execução e elevado custo. Para evitar danos causados por dilatação térmica no concreto devem ser feitas escolha de dosagem e materiais adequados, além de métodos construtivos que facilitem o controle da temperatura, como medição e mapeamento da temperatura durante o estado fresco, e termopares dentro do elemento estrutural que permitirão o mapeamento das temperaturas no interior da peça ao longo do tempo (Mehta e Monteiro, 2008).

Segundo Neville e Brooks (2007), a relação água/cimento determina a microestrutura das pastas, argamassas e concretos. Dessa forma os polos capilares são influenciados diretamente da relação água/cimento, e necessitam de um melhor controle e escolha dos materiais utilizados, pois será por esses caminhos o mecanismo de transporte do anião cloreto.

Eflorescência é vista geralmente em situações em que haja percolação de água através de concreto mal adensado, ou através de fissuras, ou por juntas mal-executadas, ou até em situações onde seja possível ocorrer a evaporação na superfície do concreto (Neville e Brooks, 2007).

O carbonato de cálcio formado pela reação do Ca(OH)_2 com o CO_2 é encontrado na forma de depósito esbranquiçado, e também é possível observar depósitos de sulfato de cálcio. Ainda, segundo

Neville e Brooks (2007), além da questão da lixiviação, a eflorescência somente tem importância em relação a estética da superfície. Para esses casos, ocorrências novas podem ser removidas com escovação e água. Em alguns casos com depósitos maiores podem exigir a limpeza da superfície com ácido, assim as manifestações patológicas inerentes ao concreto foram sumarizadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Quadro resumo de patologias em concreto.

Grupo de origem	Falha	Anomalia	Forma de detecção	Método de prevenção
Concreto	Ataque de Sulfatos	Expansão e fissuração	Primariamente Visual com constatação em ensaios	- Utilização de concretos com baixa relação água cimento -Utilização de concretos com cimentos resistentes a sulfatos
	Reação Álcali Agregado	Expansão, fissuração, trincas e fendas	Primariamente Visual com constatação em ensaios	-Uso de agregado não reativo e/ou cimento com baixo teor de álcalis -Controle do acesso de água -Uso de cimento com escória de alto forno ou cinza volante
	Eflorescência	Manchas superficiais	Visual	-Execução do concreto com baixa relação água cimento - Colmatação da estrutura e tratamento de fissuras - Impermeabilização da estrutura -Utilização de cimentos com baixo calor de hidratação
	Dilatação Térmica	Fissuras, técnicas e fendas	Visual	-Redução do consumo de cimento -Menores restrições impostas pelos vínculo, apoios e base -Concretagem em camadas Redução da Temperatura do concreto

Além das falhas no concreto há de se investigar sua interação com a armadura, e a principal ação deletéria deste conjunto é a corrosão, que se caracteriza como a interação destrutiva de um material com o meio ambiente, como resultado de reações deletérias de natureza química ou eletroquímica, associadas ou não a ações físicas ou mecânicas de degradação. Segundo Helene (1993), a armadura dentro do concreto está protegida contra a corrosão por uma barreira física e preponderantemente devido ao fenômeno da passivação.

Os cloretos podem ser encontrados principalmente em regiões litorâneas, em águas salobras ou excessivamente cloradas, e até mesmo em cimento, pois contribuem para o aumento da resistência inicial (Helene, 1993). Em países de clima tropical é comum cloretos originários de tratamentos superficiais de limpeza com ácido muriático, que é o ácido clorídrico (HCl) comercial.

A carbonatação é um fenômeno natural que ocorre a partir da reação entre o CO_2 presente no ar, e os compostos alcalinos da rede de poros do concreto, reduzindo o pH do concreto de valores iniciais da ordem de 12 a 13, para valores inferiores a 9. Segundo Helene (1993), a carbonatação em si não age diretamente na deterioração do concreto, mas abre caminho para a corrosão de armaduras, destruindo a camada de proteção do aço, chamada de camada de passivação.

Conforme afirma Neville e Brooks (2007), o aço embutido na pasta de cimento hidratada rapidamente forma uma fina camada de passivação. Essa camada de óxido adere fortemente ao aço e provê a ele uma proteção completa contra a reação de oxigênio e a água, ou seja, contra a corrosão da armadura no concreto armado. Quando a frente de carbonatação atinge a armadura provoca o aparecimento de patologias, desde manchas até a perda da seção do aço, pois perde sua condição de passivação, o filme de óxido protetor é removido, possibilitando a ocorrência da corrosão.

A perda dessa proteção ocorre em geral através da ação de elementos agressivos, originários de fontes externas, que reduzem a elevada alcalinidade original ou atingem a superfície da armadura por qualquer dos mecanismos de transporte de massa ou de íons. Segundo Figueiredo, Helene e Andrade (1993), para o caso das armaduras de concreto, a carbonatação e os íons cloreto são os principais agentes iniciadores da corrosão, assim as falhas inerentes ao material foram destacadas em função de sua forma de detecção e prevenção conforme Tabela 4.

Tabela 4 - Quadro resumo de patologias nas armaduras.

Grupo de origem	Falha	Anomalia	Forma de detecção	Método de prevenção
Armadura	Despassivação da armadura por iões de cloreto	Corrosão das armaduras, ocasionando expansão, fissuração, lascamento e perda da aderência do aço com concreto	Primariamente visual com constatação em ensaios	- Espessura de recobrimento adequada ao ambiente agressivo - Limitação do teor de iões de cloreto livre
	Despassivação da armadura por carbonatação	Redução da alcalinidade do concreto e consequente aceleração do processo corrosivo nas armaduras	Primariamente Visual com constatação em ensaios	- Espessura de recobrimento - Controlo da percolação de água e porosidade do concreto

2.3. Patologias de solos e nos sistemas drenantes

Os problemas relacionados aos solos são classificados em dois fundamentos, a deformação e a rutura. No primeiro caso abrange os estudos dos recalques e no segundo são relacionados a capacidade de carga do solo, a estabilidade do maciço e aos empuxos de terra.

Aterros insuficientemente compactados são definidos quando o solo é retirado e transportado para o futuro aterro, fica em um estado relativamente fofo e heterogêneo se tornando pouco resistente e muito deformável. Sua má compactação pode ocasionar grandes recalques e diferenças na estrutura já que o processo de compactação tem objetivo de eliminar os vazios, aumentar rigidez, reduzir permeabilidade e melhorar a resistência.

O processo de compactação depende do tipo de solo e umidade, porém aterros recentes mesmo compactando-os em camadas não atingem seu assentamento definitivo assim, por isso o estudo do solo e seu comportamento se faz necessário (Logeais, 1971). A presença de água de forma fortuita pode ser um inconveniente para alguns tipos de solo, em especiais, os argilosos que em contato com a água resulta em acréscimos de assentamentos causando anomalias às edificações e em terrenos inclinados possíveis escorregamentos (Logeais, 1971).

Outro ponto que devemos considerar são fissuras de tração ocorridas no solo, estas são formadas normalmente em solos de granulometria fina e elas modificam o plano de deslizamento. Isto pode ser agravado se águas preencherem as fissuras, pois efeitos de tensão é imposta sobre o muro ao longo da profundidade da fissura de tração. Budhu (2013) explica que o solo numa condição de instabilidade, próximo a região da fissura perde resistência, podendo desencadear rutura da estrutura, as falhas cuja a gênese é o solo forma sumarizadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Quadro resumo de patologias no solo.

Grupo de origem	Falha	Anomalia	Forma de detecção	Método de prevenção
Solo	Recalque do Solo	Sobrecarga devido a novas ocupações ou mudança de uso	Visual	- Acompanhamento e orientação técnica - Notas de restrição apontadas no projeto
		Infiltração de Água e Carreamento do solo	Visual, mas percepção prejudicada	- Previsão em Projeto de sistemas drenantes - Prospeções geotécnicas confiáveis - Prospeções geotécnicas confiáveis
	Rutura do Solo	Movimentação da massa de solo	Visual	

Após a construção do projeto, uma situação que resulta surgimento anomalias é a alteração de carregamento previsto inicialmente como novas construções ao redor do terreno ou alteração de uso da obra.

Esse incremento nas tensões e assentamento do solo da edificação vizinha podem causar recalques expressivos, inclinação no terreno e problemas nas fundações como superposição do bolbo de pressão

(Milititsky, Schnaid e Consoli, 2005).

Grande parte dos acidentes envolvendo muros de arrimo está relacionada ao acúmulo de água no maciço, (Budhu, 2013) ressalta que muitas rupturas catastróficas em engenharia geotécnica podem ser relacionadas com a instabilidade de massas dos solos devido ao fluxo de água. Vidas são perdidas, infraestruturas avariadas ou destruídas e grandes perdas econômicas.

Para Gerscovich (2010), as falhas provocadas pela deficiência do sistema drenante podem ter um efeito direto, resultante do acúmulo de água junto ao tardo interno do muro, ou indireto, produzindo uma redução da resistência ao cisalhamento do maciço em decorrência do acréscimo das pressões intersticiais.

Quando há falha, ou obstrução, no sistema drenante ocasiona um empuxo adicional no tardo do muro em razão das águas represadas, nestas situações, o muro passa a suportar também o empuxo hidrostático devido à água, que pode motivar seu colapso.

Também é válido adotar solos de granulometria grossa para o reaterro a fim de dissipar rapidamente o excesso de pressões. Pois possuem características superiores de drenagem em relação aos solos de granulometria fina, Budhu (2013).

Vale lembrar que a impermeabilização do muro não isenta a utilização de uma camada drenante em seu tardo, para Geofoco (2014) aplicar somente o método de barreira, ou seja, a impermeabilização pode acarretar sérios danos na estrutura dos arrimos, sendo, portanto, necessário à utilização de método de condução, drenando e conduzindo a água a pontos de saída pré-definidos.

Torna-se conclusivo que o sistema de drenagem deve avaliar tanto a drenagem superficial quanto a drenagem subsuperficial, visto que os danos ocasionados por deficiências nesses sistemas são de grade avalia ao sistema de contenção, incidindo nas questões de segurança de quem faz uso da estrutura. Assim as falhas inerentes ao sistema drenante foram destacadas em função de sua forma de detecção, prevenção e incidência conforme Tabela 6.

Tabela 6 - Quadro resumo de patologias nas armaduras.

Grupo de origem	Falha	Anomalia	Forma de detecção	Método de prevenção
Drenagem	Falha no sistema superficial	Sobrecarga devido acúmulo de água no tardo da estrutura	Visual	- Projeto e dimensionamento de sistemas de drenagem adequados - Inspeção frequente no desempenho dos dispositivos de drenagem
	Falha no sistema subsuperficial	Sobrecarga devido acúmulo de água no tardo da estrutura	Visual, porém de difícil observação	- Projeto e dimensionamento de sistemas de drenagem adequados - Inspeção frequente no desempenho dos dispositivos de drenagem

3. Gestão e análise do risco

Podemos definir a Análise do Risco como um corpo de conhecimento (metodologia) que avalia e deriva uma probabilidade de um efeito adverso de um agente (químico, físico ou outro), processo industrial, tecnologia ou processo natural segundo Molak (1997).

Todo risco tem três componentes: o evento em si, uma probabilidade de ter acontecido e uma consequência aponta Salles (2010). Caso seja avaliado apenas um dos componentes, não se pode avaliar magnitude efetiva do risco e consequentemente não será tomada a melhor decisão para solucioná-lo.

De acordo com PMBOK (2008) na Análise Quantitativa dos Riscos analisam-se o efeito numérico dos riscos nos objetivos dos projetos, servindo para tomada de decisões, focando nas consequências conjuntas e no impacto global dos riscos, realizando a análise somente nos riscos priorizados de impacto substancial.

As análises quantitativas de riscos são usadas para analisar matematicamente o efeito de riscos priorizados através da análise qualitativa aponta Vargas (2013). Com o emprego da matriz de risco, de acordo com a análise quantitativa simplificada, Farias (2008), demonstra que é possível classificar o risco em baixo (B), médio (M) ou alto (A) pela correlação entre sua probabilidade e sua consequência.

Na Análise Qualitativa dos Riscos se avalia a probabilidade de ocorrência e o impacto de cada risco identificado nos objetivos do projeto e os riscos de acordo com seu impacto potencial nos objetivos são priorizados, expressando-os através de sistema de medição regular. Logo se define uma prioridade de riscos para análise ou ação adicional posterior, levando-se em consideração a avaliação e combinação de sua probabilidade de ocorrência e seus possíveis impactos. PMBOK (2008).

Contudo o que se percebe na atualidade é que modelos de análise do risco qualitativa e quantitativa, deve agrupar os eventuais riscos em níveis, que atuem de forma sistêmica após uma avaliação minuciosa dos cenários e introdução de escalas quantitativas para realização de análises da matriz de riscos.

3.1. A ferramenta FMEA

Conceitualmente o FMEA é um procedimento analítico usado para identificar os modos de falha dos componentes de um sistema, e por consequência, o seu efeito na confiabilidade Toledo e Amaral (2006).

Por ser um método, segue um conjunto de procedimentos pré-definidos relacionando todos os tipos de falhas que podem ocorrer descrever uma anomalia, ou um grupo de patologias, a suas possíveis causas e efeitos são vinculadas as medidas de detecção e prevenção das falhas apontam Toledo e Amaral (2006).

Os procedimentos propostos relacionam os procedimentos típicos existentes na FMEA:

- a) Objeto: identificar o objeto em estudo.
- b) Função: identificar as funções que o objeto em causa tem de desempenhar.
- c) Falhas: identificar as potenciais falhas que podem diminuir a capacidade do objeto de desempenhar as suas funções corretamente.
- d) Efeitos das Falhas: identificar os potenciais efeitos que poderão decorrer de cada falha.
- e) Causa de Falhas: identificar as causas de cada falha.
- f) Mecanismos de Controle: examinar os mecanismos de controle a pôr em prática para eliminar ou mitigar probabilidade de ocorrência de eventuais falhas.
- g) Ações Recomendadas: identificar ações corretivas necessárias para eliminar ou mitigar o risco associado a cada modo de falha.
- h) Estabelecer Prioridades: estabelecer prioridades para as ações corretivas de acordo com um conjunto de critérios consistentes. O método mais frequentemente utilizado é o Risk Priority Number (RPN) (número de prioridade de risco).

3.2. Aplicação de análise do risco em estruturas de arrimo ferramenta

Constata-se que as estruturas de contenção, particularmente muros de arrimo em concreto armado, muitas vezes estão sujeitas a ações diversas que podem promover a sua instabilidade, tais como os agentes agressivos, erros de projeto e execução, além de falhas de sobrecarga proporcionadas, muitas vezes, pela mudança de uso.

Com o objetivo de agregar mecanismos de Análise do Risco como abordagem técnica, foi proposto nesse trabalho utilizar a ferramenta de cálculo de risco FMEA. Tal ferramenta permite avaliar níveis de risco a que estão submetidos diversos tipos de situação, a partir de uma avaliação da severidade das consequências de determinadas falhas e anomalias, a probabilidade de sua ocorrência e forma de detecção.

No caso desse trabalho, foi usado como objeto de estudo a análise as estruturas de arrimo em concreto armado, com base nas características e patologias apontadas na revisão bibliográfica. Espera-se avaliar o risco inerente a cada patologia que está submetida uma estrutura desse porte, e assim apontar situações que necessitam de um maior nível de precaução na fase pré-executiva, e de inspeção durante seu uso.

Tais premissas servirão de auxílio no embasamento técnico pois diagnosticará os pontos de risco relevantes, e determinará quais cuidados deveriam ser tomados para evitar que ocorresse o fato.

Isto posto, o cálculo do FMEA nesse trabalho foi dividido em seções que objetivaram o melhor entendimento dos passos necessários para obtenção do grau de risco, já aplicando a ferramenta e assim estabelecer os critérios para cada situação envolvida, que são, grau de severidade, grau de ocorrência, grau de detecção. A associação deste três critério permitira o cálculo e avaliação dos riscos conforme o FMEA. Ainda, destaca-se que o valor obtido pelo produto dessas três variáveis representará o Número de Prioridade de Risco conforme Equação 1.

$$RPN = S \times O \times D \quad (1)$$

3.3. Grau de severidade (S)

Os critérios de severidade apresentados nesse trabalho têm por base a revisão de literatura sobre as manifestações patológicas em muros de arrimo de concreto armado, por onde se evidenciou a origem, falhas, seus locais típicos de ocorrência, bem como as formas de prevenção.

A próxima etapa da análise compete avaliar cada falha identificada pelo estudo exploratório em seus níveis de severidade correspondentes. Pela gama de falhas evidenciadas propôs-se classificar aquelas que representam danos estéticos, sem comprometimento da estrutura, como nível mínimo de severidade. Há aquelas de danos estéticos, que, todavia, comprometem em um menor nível a estrutura, para tais definiu-se o critério de pequena severidade, conforme Tabela 7.

Tabela 7 - Grau de Severidade (S).

Índice	Severidade (S)	Critério	Falha
1	Mínima	Danos estéticos, sem comprometimento da estrutura	Manchas superficiais
2	Pequena	Danos estéticos, com comprometimento mínimo da estrutura	Fissuras
3	Moderada	Danos iniciais da estrutura, mas não em grau definitivo	Trincas Expansão / lascamento do concreto Falha de execução Despassivação da armadura por carbonatação Fendas Recalque do solo
4	Alta	Danos que afetam o desempenho da estabilidade do muro	Despassivação da armadura por ataque de cloretos Corrosão de armaduras Falhas de projeto no sistema estrutural Deficiência no sistema de drenagem superficial Deficiência no sistema de drenagem subsuperficial Movimentação de massa de solo
5	Muito alta	Deterioração definitiva da estrutura	Rotura do solo Colapso da estrutura

Consideraram-se, também, as falhas que afetam a estrutura em um nível inicial de danos estruturais, todavia sem comprometê-la em um grau definitivo. Estes tipos de falhas, quando não tratados com o devido cuidado, tenderão abrir caminho para agentes agressivos. Para estes casos foi considerado nível moderado.

Consideraram-se, também, as falhas que afetam a estrutura em um nível inicial de danos estruturais, todavia sem comprometê-la em um grau definitivo. Estes tipos de falhas, quando não tratados com o devido cuidado, tenderão abrir caminho para agentes agressivos. Para estes casos foi considerado nível moderado.

Existem ainda as falhas que comprometem a estrutura em sua estabilidade, porém não ocasionando danos irreversíveis, e as que a danificam de forma definitiva, chegando ao nível de rutura. Para essas foram subdivididas em dois graus de severidade, alta e muito alta, na qual a alta está inclusa falhas que danificam o elemento, mas com possibilidade de atuação para restauro, evitando a sua ruína. E de nível muito alta, pela qual atingiu grau de severidade não sendo possível atuação na estrutura. As considerações postas, aliadas a revisão de literatura, formou-se a tabela de severidade que será utilizado no cálculo da ferramenta FMEA.

3.4. Grau de ocorrência (O)

O estudo de ocorrências nas estruturas de arrimo de concreto armado, demanda um levantamento probabilístico avaliando a incidência das falhas apontadas como oriundas de sua instabilidade ou ruína, visando a obtenção de dados estatísticos.

A revisão de literatura não constatou estudos probabilístico de casos atuais referente a falhas em estrutura de arrimo, muito embora estas demostram-se recorrente. Uma das poucas fontes identificadas trata-se do trabalho do Professor Costa Nunes, publicado na revista Estruturas, edição 72 de 1975 - Nunes (1975), na qual foi apresentada uma análise de trezentos casos de sinistros em estruturas de arrimo categorizadas em sete grupos diferentes, sendo eles: deficiência de drenagem 33%, dimensionamento de base insuficiente 25%, insuficiência estrutural 19%, falhas de execução durante o aterro 10%, acidentes de trabalho 5% e causas diversas 3%, estes dados associados aos acidentes registrados na Polícia Civil do Estado de São Paulo, sumarizam a incidência de cada tipo de falha dentro de um total de acidentes registrados, a incidência probabilística foi apontada na Tabela 8.

Tabela 8 - Grau de Ocorrência (O).

Índice	Ocorrência (O)	Incidência	Critério	Falha
1	Remota	5.43E-02	Todas as falhas devido a ocorrência a sobrecarga não prevista no projeto	Sobrecarga por mudança de uso Falhas de projeto
2	Pequena	1.16E-01	Falhas devido a execução de aterro e sobrecarga	Execução de aterro Desabamento do solo Recalque por sobrecarga devido à mudança de uso Patologias de concreto
3	Moderada	2.03E-01	Todas as ocorrências devido a falha no sistema estrutural	Corrosão de armadura Falhas em execução do sistema estrutural Falhas em projeto estrutural
4	Alta	2.72E-01	Todas as falhas em decorrência de dimensionamento insuficiente da base da estrutura	Falhas em projeto estrutural
5	Muito alta	3.55E-01	Todas as ocorrências as quais foram causadas por acumulação de água	Deficiência no sistema de drenagem Recalque por influência da água Falhas em projetos de drenagem

3.5. Grau de detecção (D)

O estudo de detecção baseou-se em níveis de dificuldades de avaliação, e a forma como os diferentes tipos de patologias apresentados nesse trabalho podem ser evidenciados.

Detetar a falha e classifica-la de acordo com seu grau de percepção, está diretamente relacionado ao nível de inspeção que uma estrutura necessita diante da apuração dos fatos que a comprometeram, portanto, o índice está submetido ao sentido humano e os equipamentos necessários para constatação.

As formas de análise e os procedimentos de inspeção das falhas apontadas, foram extraídas do estudo de patologias expostos nesse trabalho, e permitiram sua sumarização na Tabela 9.

Tabela 9 - Grau de Detecção (D).

Índice	Detecção (D)	Critério	Falha
1	Muito grande	Visual, certamente será detetado	Eflorescência Falhas no sistema de drenagem superficial Recalque por sobrecarga devido a mudança de uso
2	Grande	Visual por análise minuciosa, grande possibilidade de ser detetado	Dilatação térmica Ruptura de solos Recalque por influência de água
3	Moderada	Visual de difícil definição, necessidade de ensaios específicos	Ataque de sulfatos Falhas de execução Ataque por cloretos Carbonatação
4	Pequena	Detecção apenas com ensaios	Reação álcali-agregado Falhas de projeto de drenagem Falhas de projeto estrutural
5	Muito pequena	Difícil acesso visual, impossibilidade de determinação anterior a ocorrência	Corrosão de armaduras Falha no sistema de drenagem superficial

Dessa forma, os critérios de detecção foram determinados em identificação visual de fácil acesso, até patologias que necessitam de ensaios específicos, e auxílio de um especialista.

4. Resultados

Com o objetivo de aplicar a Análise do Risco nas estruturas de muro de arrimo em concreto armado, foi necessário estudar as patologias típicas desse tipo de estrutura, definir graus de severidade, ocorrência

e detecção, para então ser possível calcular o grau de risco de cada uma dessas falhas.

Para quantificar e qualificar as falhas em graus de severidade, ocorrência e detecção, e definir índices de risco para cada uma delas, foi necessário o estudo de anomalias e patologias inerentes a estruturas de arrimo em concreto armado. Esse estudo das patologias foi dividido em seis itens, do qual cada um aborda um grupo de origem dos sintomas patológicos, que são: i.) falhas de projetos; ii.) falhas na execução, iii.) patologias de concreto, iv.) corrosão de armaduras, v.) patologias de solos, e vi.) deficiências nos sistemas drenantes.

Em cada um desses grupos foi elaborado um quadro para melhor sintetizar os efeitos inerentes cada falha destacada na revisão bibliográfica. Dessa forma, na Tabela 10 são demonstradas as falhas, seus efeitos e causas, já agrupadas.

Tabela 10 - Agrupamento de falhas, por tipo, efeito e causa.

Tipo de Falha	Critério	Falha
Erros de projeto	Sistema drenante inexistente ou mau dimensionado Estrutura insuficiente	Erros de projeto
Erros de execução	Vícios e defeitos aparentes	Erros de concretagem; Erros na execução do aterro; Procedimentos fora de norma técnica.
Patologia no concreto	Fissuras	Ataque de sulfatos
	Expansão	
	Fissuras	
	Trincas	Reação álcali agregado
Patologia na armadura	Fendas	
	Manchas superficiais	Eflorescência
	Fissuras	Dilatação térmica
Patologia na armadura	Trincas	
	Corrosão da armadura	Despassivação da armadura por iões de cloreto Despassivação da armadura por carbonatação
Patologia no solo	Recalque do solo	Sobrecarga por mudança de uso
	Ruptura do solo	Infiltração de água e carreamento de solo Sobrecarga não prevista

O resultado do produto das variáveis severidade, ocorrência e detecção, é o grau de risco, que foi classificado em quatro níveis, sendo baixo, médio, alto e muito alto, e sua pontuação foi definida, conforme Tabela 11.

Tabela 11 - Níveis de risco ($RPN = S \times O \times D$).

Avaliação	Pontuação do risco
Baixo	1 – 25
Médio	25 – 50
Alto	50 – 75
Muito alto	75 – 125

Então para cada grupo de falhas, e seu respetivo efeito é possível hierarquizar os níveis de atenção para cada efeito como resultado da multiplicação do índice de severidade, ocorrência e detecção, com base aos critérios já apresentados neste trabalho.

Neste contexto verificou-se que para os efeitos das falhas, no caso da severidade, 63% dos efeitos existentes em estruturas de arrimo em concreto armado possui um nível de severidade alto ou muito alto conforme figura 1, contudo todas elas com sistemas de prevenção associados a fase de projeto.

A análise do grau de ocorrência apresenta a proporção dos níveis, desde chances remotas até muito alta de ocorrerem. É possível constatar que os percentuais de ocorrência estão equilibrados entre os diferentes níveis. Temos: 31% moderada, 23% pequena, 23 % muito alta, 15% remota e 8% alta, conforme figura 2.

A definição dos índices de detecção lastreou-se na dificuldade de visualização, nível conhecimento para determinação de falhas, e se há necessidade de estudos experimentais. É possível constatar que os percentuais de ocorrência estão equilibrados entre os diferentes níveis, entretanto chama a atenção que 40 % das falhas possuem um nível relevante de dificuldade de detecção (Grande Ou Muito Grande) conforme figura 3.

Para cada grupo de falha, e seus efeitos, apresentados na Tabela 10, foram associados os níveis de severidade, ocorrência e detecção apresentados nas Tabelas 7, 8 e 9 respectivamente. Essa associação permitiu o cálculo do grau de risco para cada efeito.

Para o grupo de patologias do concreto observa-se que o grau de risco baixo falhas de fissuras por ataque de sulfatos, por reação álcali agregado, ou por dilatação térmica, bem como manchas superficiais decorrentes de eflorescência, e seus efeitos tais como as machas superficiais e fissuras, conforme apontados na Tabela 12.

Grau de Severidade

■ Mínima ■ Pequena ■ Moderada ■ Alta ■ Muito Alta

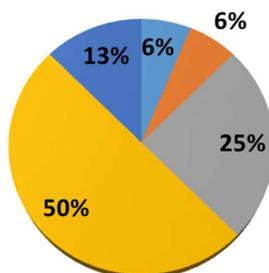


Figura 1 - Distribuição relativa dos níveis de severidade das falhas em estruturas de arrimo.

Grau de Ocorrência

■ Remota ■ Pequena ■ Moderada ■ Alta ■ Muito Alta

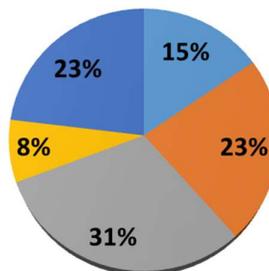


Figura 2 - Distribuição relativa dos níveis de ocorrência das falhas em estruturas de arrimo.

Grau de Detecção

■ Muito Grande ■ Grande ■ Moderada ■ Pequena ■ Muito Pequena

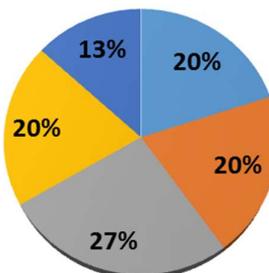


Figura 3 - Distribuição relativa dos níveis de detecção das falhas em estruturas de arrimo.

Também é importante destacar, para avaliação de riscos nestas estruturas, que a eficiência (ou não) do sistema drenante motiva um nível de risco maior do que o próprio dimensionamento da estrutura, isso se deve a enorme sobrecarga que a falha no sistema drenante pode gerar ao permitir que novas solicitações de empuxo atuem na estrutura colocando-a em uma situação de colapso, conforme destaque

na Tabela 13.

Tabela 12 - Níveis de risco (RPN = S×O×D) para patologias no concreto.

Tipo de falha	Efeito da falha	Severidade	Índices		Grau de Risco	
			Ocorrência	Deteção		
Patologia no concreto	Fissuras	2	3	3	18	Baixo
	Expansão	3	3	3	27	Médio
	Fissuras	2	3	3	18	Baixo
	Trincas	3	3	3	27	Médio
	Fendas	4	3	3	36	Médio
	Manchas superficiais	1	3	1	3	Baixo
	Fissuras	2	3	2	12	Baixo
	Trincas	3	3	2	18	Baixo

Tabela 13 - Níveis de risco (RPN = S×O×D) para patologias associadas a erros de projeto.

Tipo de falha	Efeito da falha	Severidade	Índices		Grau de Risco	
			Ocorrência	Deteção		
Erros de projeto	Sistema drenante inexistente ou mal dimensionado	4	5	4	80	Muito alto
	Estrutura insuficiente	4	3	4	48	Médio

As falhas inerentes a execução e a corrosão das armaduras, são menos frequentes e sua severidade, na maioria dos casos moderada, gerando para seus efeitos grau de risco médio, conforme Tabelas 14 e 15.

Tabela 14 - Níveis de risco (RPN = S×O×D) para patologias associadas a erros de execução.

Tipo de falha	Efeito da falha	Severidade	Índices		Grau de Risco	
			Ocorrência	Deteção		
Erros de execução	Desempenho abaixo do esperado	3	3	3	27	Médio

Tabela 15 - Níveis de risco (RPN = S×O×D) para patologias associadas às armaduras.

Tipo de falha	Efeito da falha	Severidade	Índices		Grau de Risco	
			Ocorrência	Deteção		
Patologia na armadura	Corrosão da armadura	4	3	5	60	Médio
		3	3	3	27	Médio

Para patologias no solo, temos um grau de risco médio (40) para a sobrecarga e baixo (8) para infiltração, já para recalque do solo, que varia conforme a ocorrência e baixo (20) para rutura do solo destacam-se como falhas de grau de risco alto, sobrecarga devido a falha no sistema de drenagem sub superficial por inexistência ou mal dimensionamento, conforme Tabelas 16 e 17.

Tabela 16 - Níveis de risco (RPN = S×O×D) para patologias associadas ao solo.

Tipo de falha	Efeito da falha	Severidade	Índices		Grau de Risco	
			Ocorrência	Deteção		
Patologia no solo	Recalque do solo	4	2	1	8	Baixo
		4	5	2	40	Médio
	Ruptura do solo	5	2	2	20	Baixo

Tabela 17 - Níveis de risco (RPN = S×O×D) para patologias associadas ao sistema drenante.

Tipo de falha	Efeito da falha	Severidade	Índices		Grau de Risco	
			Ocorrência	Deteção		
Deficiência no sistema drenante	Sobrecarga devido	4	5	1	20	Baixo
	acúmulo de água no tardo da estrutura	4	5	5	100	Muito Alto

Para erros de projeto, temos um grau de risco muito alto (80) para falhas no sistema drenante e grau de risco médio (48) para estrutura insuficiente. Para patologias no solo, temos um grau de risco médio (40) e baixo (8), para recalque do solo, que varia conforme a ocorrência e baixo (20) para rutura do solo. Para patologia na armadura, bem como erros na execução o risco é médio. Mas para deficiência no sistema de drenagem, o risco quase beira os extremos variando de muito alto (100) para baixo (2).

5. Conclusões

A contextualização de estruturas de contenção e seu comportamento, permitiu diagnóstico das questões relevantes a segurança dessas estruturas, bem como as patologias decorrentes das falhas em projeto e de execução, nas anomalias no concreto e na armadura, nas falhas associadas ao solo contido, e na deficiência do sistema drenante.

As patologias apresentadas com grau risco alto ou muito alto decorrem de falhas que apresentam severidade elevada em função do comprometimento da capacidade de carga e do desempenho que estas provocam na estrutura, caracterizando-se com uma ocorrência muito provável e de difícil detecção, necessitando de procedimentos experimentais específicos e muitas vezes da expertise do profissional investigador.

É importante frisar que a severidade não é fator preponderante para a avaliação de risco, em alguns casos é possível observar falhas com grau de severidade muito alto, tais como o recalque e rutura de solo, que, contudo, são de menor ocorrência e de fácil detecção facilitando o diagnóstico da manifestação patológica, o que resulta em uma avaliação de risco baixo.

Outro destaque é quanto aos índices estabelecidos para cada falha identificada nas variáveis de severidade, ocorrência e detecção que devem ser determinados de forma isolada. Por exemplo, se estamos avaliando o índice de severidade de uma determinada causa cujo efeito é significativo, não podemos colocar um valor mais baixo para este índice somente porque a probabilidade de detecção seja alta.

Portanto será a composição das variáveis severidade, ocorrência e detecção que quantificarão a criticidade da estrutura, definindo a severidade em função do comprometimento da capacidade de carga, desempenho e durabilidade da estrutura frente as manifestações patológicas, a ocorrência como uma medida probabilística, e a detecção em função do nível de inspeção necessário para apuração das causas patogênicas.

Os níveis de severidade também apontam de forma a ratificar que 50% das falhas implicam em um nível de severidade categorizado como alto, as quais resultam em danos que afetam o desempenho da estabilidade do muro, enquanto 62% das falhas implicam em severidades alta ou muito alta, neste tocante conclui-se que uma parcela significativa das falhas contribui para uma severidade alta.

Ressalta-se que este trabalho faz uma abordagem ainda incipiente, apontando de forma específica às contenções em concreto armado, sendo que os demais sistemas devem ter os seus patamares de riscos ratificados em trabalhos futuros, contudo a aplicabilidade do FMEA se mostrou eficaz, para o objeto de estudo desse trabalho.

Referências

- Almeida, E. P. Técnicas de análise de risco aplicadas à planejamento e programação. Niterói: Universidade Federal Fluminense, 2005.
- Amaral, M. M.; Nunes, R. C.; Amaral, E. H. D. Metodologia para Cálculo do Risco por Composição de Métodos. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria (2015).
- Budhu, M. Fundações e Estruturas de Contenção. Rio de Janeiro: LTC (2013).
- Farias, B. V. D. Inferência Bayesiana de Dados de Inspeção de Estrutura de Casco de Navio Plataforma. Rio de Janeiro: UFRJ (2008).
- Figueiredo, E. J. P.; Helene, P. R. D. L.; Andrade, C. Fatores determinantes da iniciação e propagação da corrosão da armadura do concreto. São Paulo: EPUSP (1993).
- Forte, F.; Ferraz, R. M. O que são e Como Devem ser Construídos os Muros de Arrimo? Casas e Imóveis, São Paulo (2011).
- Freire, T. M. Produção de estruturas de concreto armado, moldadas in loco, para edificações: caracterização das principais tecnologias e formas de gestão adotadas em São Paulo. São Paulo: EPUSP (2001).
- GEOFOCO. Drenagem de Muros de Arrimo, 2014. Disponível em: <www.geofoco.com.br/drenagem-muros-de-arrimo>. Acesso em: agosto (2014).
- Gerscovich, D. M. S. Empuxos de Terra & Muros Gravidade. Rio de Janeiro: [s.n.] (2010).
- Hasparyk, N. P. Investigação de concretos afetados pela reação álcali agregado e caracterização

- avançada do gel exsudado. Porto Alegre: PPGEC / UFRGS (2005).
- Helene, P. Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (1993).
- Logeais, L. Patologias das Fundações. [S.l.]: Institut Technique Du Batiment et des Travaux Publiques (1971).
- Marangon, M. Tópicos em Geotecnia e Obras de Terra. Rio de Janeiro: UFJF, 2006.
- Marcelli, M. Sinistros na construção civil. 1ª. ed. São Paulo: PINI (2010).
- Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. M. Concreto. Microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: IBRACON (2008).
- Milititsky, J.; Consoli, N. C.; Schnaid, F. Patologia das Fundações. São Paulo: Oficina dos Textos, 2005.
- Molak, V. Fundamentals of Risk Analysis and Risk Management. [S.l.]: CRC Press Ink (1997).
- Neville, A. M.; Brooks, J. J. Tecnologia do Concreto. São Paulo: Bookman (2007).
- Nunes, A. J. D. C. Acidentes em Estruturas de Arrimo. Revista Técnica das Construções Engenharia e Arquitetura, São Paulo (1975).
- PMI. PMBOK -Project Managemnt Body of Knowledge da Project Management Institute. [S.l.]: [s.n.] (2008).
- Pujadas, F. Z. A. Inspeção Predial - Ferramenta de Avaliação da Manutenção. *II Seminário Nacional de Perícias*, Foz do Iguaçu, Setembro (2014).
- Salles, C. A. C. Gerenciamento de riscos em projetos. [S.l.]: FGV Editora (2010).
- Souza, V. C. M. D.; Ripper, T. Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto. São Paulo: PINI (2009).
- Thomaz, E. Como Deve ser Feita a Impermeabilização de Muros de Arrimo em Contato Direto com Solo? *Revista Técnica*, São Paulo, novembro (2013).
- Toledo, J.C.; Amaral, D.C. FMEA - Análise do Tipo e Efeito de Falha. GEPEQ – Grupo de Estudos e Pesquisa em Qualidade DEP – UFSCar, São Carlos (2006).
- Vargas, R. V. Histórico de Gerenciamento de Risco. São Paulo: Ricardo Vargas (2013).