



Uso práctico do fator de segurança na estratégia de reparo de pilares de um edifício de concreto com valor histórico

J. A. Briceño-Mena¹ , P. Castro-Borges^{1*} 

* Autor de Contato: pcastro@cinvestav.mx

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.569>

Recepção: 09/11/2021 | Aceitação: 21/12/2021 | Publicação: 01/01/2022

RESUMO

Este trabalho apresenta a aplicação prática do fator de segurança (FS) na estratégia de reparo de pilares em um edifício de concreto armado com valor histórico (quase 70 anos). Cerca de 80% de um prédio localizado no centro histórico da cidade de Campeche, no México, declarado Patrimônio da Humanidade pela UNESCO, foi reformado. Estratégias foram utilizadas para um melhor aproveitamento dos recursos materiais, equipamentos e mão de obra na reparação de paredes, pilares, lajes e vigas. Uma das estratégias foi utilizar o FS teórico para calcular a profundidade de reparo sem consequências estruturais, mas cumprindo o propósito de controlar a carbonatação do concreto, e manter a previsão de vida útil desejada.

Palavras-chave: reparo; concreto armado; durabilidade; fator de segurança.

Citar como: Briceño-Mena, J. A., Castro-Borges, P. (2022), “Uso práctico do fator de segurança na estratégia de reparo de pilares de um edifício de concreto com valor histórico”, Revista ALCONPAT, 12 (1), pp. 98 – 109, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.569>

¹Departamento de Física Aplicada, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida, Mérida, Yucatán, México.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, o autor J.A. Briceño-Mena contribuiu com a atividade de experimentação de campo (60%), coleta de dados (50%), redação do trabalho (50%), discussão dos resultados (50%); o autor P. Castro-Borges contribuiu com a ideia original, experimentação de campo (40%), coleta de dados (50%), redação do trabalho (50%), discussão dos resultados (50%).

Licença Creative Commons

Copyright (2022) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2022, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 2022.

Practical use of the safety factor in the column repair strategy of a concrete building with historical value

ABSTRACT

In this paper the practical use of the safety factor (FS) in the column repair strategy of a reinforced concrete building with historical value (almost 70 years) is presented. 80% of a building located in the historic center of the city of Campeche, Mexico, declared a World Heritage Site by UNESCO, was repaired. Strategies were used for a better use of material resources, equipment, and labor in the repair of walls, columns, slabs, and beams. One of the strategies was to use the theoretical FS to calculate the repair depth without structural consequences but fulfilling the purpose of controlling the carbonation of the concrete and maintaining the desired prediction of service life.

Keywords: repair; reinforced concrete; durability; security factor.

Uso práctico del factor de seguridad en la estrategia de reparación de columnas de un edificio de concreto con valor histórico

RESUMEN

En este trabajo se presenta el uso práctico del factor de seguridad (FS) en la estrategia de reparación de columnas en un edificio de concreto reforzado con valor histórico (casi 70 años). Se llevó a cabo la reparación del 80% de un edificio ubicado en el centro histórico de la ciudad de Campeche, México, declarado patrimonio de la humanidad por la UNESCO. Se utilizaron estrategias para una mejor utilización de los recursos materiales, equipamiento y mano de obra en la reparación de muros, columnas, losas y trabes. Una de las estrategias fue usar el FS teórico para calcular la profundidad de reparación sin consecuencias estructurales, pero cumpliendo la finalidad de controlar la carbonatación del concreto, y manteniendo la predicción deseada de vida de servicio.

Palabras clave: reparación; concreto reforzado; durabilidad; factor de seguridad.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

Um dos problemas comuns em reparos de estruturas de concreto é o uso indevido de especificações estruturais para saber a profundidade da intervenção, quando se depara com problemas devido a cloretos ou carbonatação. Isso resulta em um uso mal otimizado de mão de obra, equipamentos e materiais que leva, não só a reparos errados e o retorno do problema, mas também à falta de sustentabilidade em todo o processo.

Pretendia-se a demolição e posterior construção de um novo edifício de 4 pisos, considerando que este edifício tem uma área interna de mais de 600 m² e uma altura aproximada de 20 m. No entanto, este plano foi reconsiderado porque o edifício em questão tinha aproximadamente 70 anos e estava localizado no centro histórico da cidade de San Francisco de Campeche, Campeche, México (Fig. 1), declarado Patrimônio da Humanidade, em 1999 pela Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO). Este local é protegido por autoridades federais como o Instituto Nacional de Belas Artes e Literatura (INBAL) e o Instituto Nacional de Antropologia e História (INAH). Portanto, ao invés de um processo de demolição, teve que ser considerada uma estratégia de reparo que atendesse às condições estabelecidas pelo poder público federal, onde o máximo possível da estrutura fosse preservado (80%). Por esse motivo, foi realizado um amplo estudo sobre a durabilidade do imóvel. Em consequência, foram definidas as partes que permaneceriam de pé antes de uma intervenção que envolvesse a reparação e/ou reforço dos diferentes elementos estruturais, evitando os processos iniciais de demolição e adaptando-se às condições exigidas. Foi proposta a anexação de uma nova estrutura internamente ao edifício já recuperado, mantendo assim a sua arquitetura exterior e modernizando as áreas interiores, num processo também conhecido por retrofit.

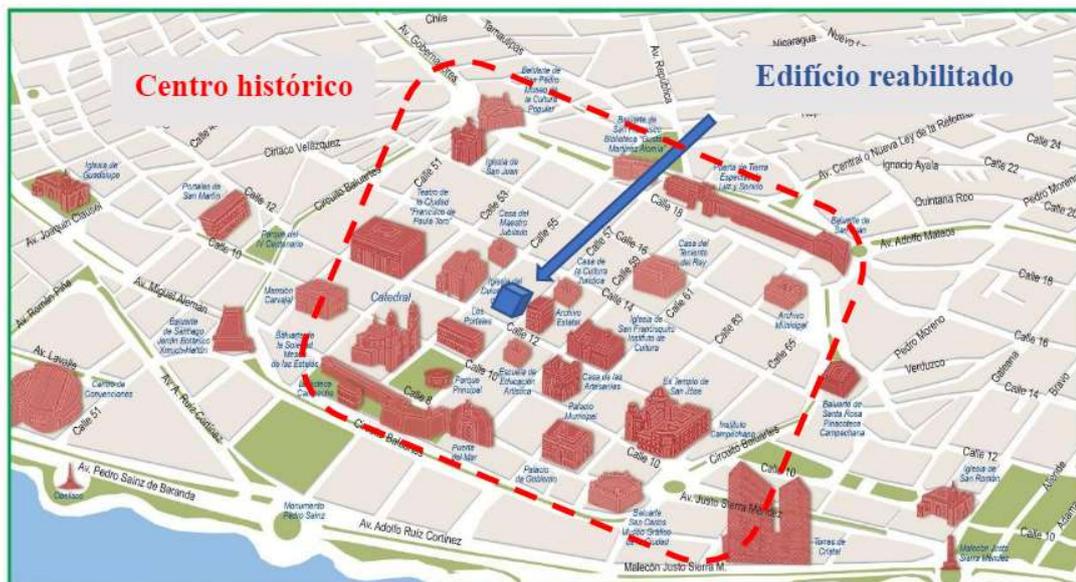


Figura 1. Localização da estrutura dentro da área protegida de Campeche¹

A estrutura em questão tinha como função primordial e inicial ser um cinema, posteriormente funcionou como estacionamento e foi finalmente abandonada. Essas mudanças no uso e abandono foram fatores que potencializaram os danos, conforme parcialmente observado nas fotos da Fig. 2.



Figura 2. Estado da estrutura antes de ocorrer a intervenção

De forma a desenvolver uma ótima reparação, deve ser considerada uma análise estrutural em que sejam considerados os processos construtivos a realizar durante a referida intervenção, visto que, durante este processo, podem ser adicionadas ou retiradas cargas devido à demolição de elementos, vibrações, alterações nas mesmas propriedades dos materiais de reparo, mudanças na resistência, escoramento, entre outros (Ministerio de Vivienda y Urbanismo – Minvu, 2018; Allen, 1991). Portanto, é importante estabelecer os valores com os quais ele irá trabalhar, quais as antigas e novas resistências dos elementos, fquais atores de segurança, entre outros. No presente trabalho é demonstrado, para o caso dos pilares, como foi utilizado o fator de segurança (FS) para a reforma do antigo cinema Selem.

1.1 O fator de segurança como critério para a durabilidade do reparo

Na literatura pode-se encontrar informações sobre a Teoria da Segurança (González Cueto Vila e Quevedo Sotolongo, 2007) que, em geral, consiste em relacionar o nível de segurança (H) (1), definido como $H = 1 - p_f$, onde p_f é a probabilidade de falha. Este nível de segurança depende de todas as variáveis que intervêm no projeto da estrutura e como podem variar. A equação geral que rege a teoria da segurança é:

$$H \geq H^n \quad (1)$$

Onde: H^n é o nível de segurança do projeto
 H é o nível de segurança da obra

Na Engenharia Civil, pode ser entendido como segurança evitar que a estrutura ultrapasse o estado limite ultimo e o de serviço, prescritos em normas, que é onde se considera que o comportamento estrutural é aceitável (Ridell e Hidalgo, 2010). FS é aquele que relaciona a carga ou tensão (C) a ser aplicada à estrutura com a capacidade máxima (R) que ela pode suportar, ou seja, sua resistência

máxima.

$$FS = \frac{C}{R} \quad (2)$$

O FS é considerado no momento em que um elemento estrutural está sendo projetado, mas também deve ser levado em consideração na hora de realizar reparos, pois há uma relação direta com a resistência do próprio material, bem como nas dimensões da seção dos elementos. O FS é baseado em dois coeficientes (ACI 318-19, 2019), um coeficiente de aumento de carga que consiste em aumentar ficticiamente a carga que será aplicada à estrutura quando esta for submetida a cargas reais durante o uso (chamado no Brasil com a notação γ_F , coeficiente de majoração de ações). Ou seja, multiplique a carga real esperada por um fator de segurança de carga aumentado. O outro coeficiente é a redução da resistência do material que compõe o elemento. A resistência dos materiais é reduzida em comparação com as tensões máximas permitidas. Ou seja, dividindo a resistência dos materiais por um fator de segurança que reduz a resistência (conhecido no Brasil com a notação γ_c , coeficiente de minoração da resistência do concreto). Portanto, considerando um elemento que em teoria terá cargas maiores que as reais e com uma resistência menor que a sua, haverá confiança na segurança que o elemento proporciona mesmo em condições muito desfavoráveis ao longo de sua vida útil.

Colocando um exemplo prático fictício, o FS pode ser entendido da seguinte forma: Supondo que você tenha um pilar, que foi projetado para suportar 6 toneladas de carga e 2 vigas irão repousar sobre ele, e cada uma delas irá transferir uma carga de 2 toneladas para o pilar. Portanto, pode-se observar que nosso FS é 1,5 ($FS = 6/4 = 1,5$). Embora neste exemplo tenha sido tratado como um assunto simples, na realidade é algo muito mais complexo. Vários critérios devem ser considerados, como cargas vivas (as pessoas que irão utilizar o edifício), cargas mortas (móveis, por exemplo), cargas acidentais, cargas permanentes e peso próprio, além de fatores ambientais.

2. METODOLOGIA DO PROCESSO DE REPARO

2.1 Inspeção de danos

Antes de realizar qualquer intervenção na estrutura, foi necessária a realização de uma inspeção dos danos, com base na regulamentação mexicana (NMX-C-505-ONNCCE, 2016; NMX-C-520-ONNCCE, 2018), a fim de estabelecer as estratégias de reparo. Essas inspeções já foram publicadas (Briceño-Mena et al, 2021) e podem ser consultadas na literatura para mais detalhes.

Neste caso, essas inspeções tiveram 4 eixos principais:

1. Visual, para ser capaz de identificar as áreas danificadas que requerem uma maior intervenção e possíveis causas de problemas patológicos como áreas com umidade, bem como destacamentos, fissuras, corrosão de armaduras, etc.
2. Mecânica, para conhecer o estado do concreto e do aço, como, por exemplo, sua resistência mecânica e, a partir dela, poder estabelecer a resistência do novo concreto a ser utilizado.
3. Eletroquímica, para saber o estado do aço, quão danificado pode estar devido a problemas patológicos.
4. Química, para determinar os agentes agressores que estão causando danos aos elementos estruturais.

2.2 Estratégias de reparo

Após a vistoria efetuada, constatou-se que os elementos estruturais e arquitetônicos poderiam ser aproveitados para a sua consolidação com a nova estrutura a ser construída no interior do edifício no âmbito da sua mudança de uso. Todas as estratégias de reparo foram estabelecidas de forma a

poder dotar a estrutura de uma nova vida útil e durabilidade contra os problemas patológicos atuais e futuros a que possa estar sujeita, considerando as características mecânicas dos próprios elementos, bem como o uso dos fatores de segurança (NMX-C-530-ONNCCE, 2018; Val e Stewart, 2002; Melchers, 2001). Por sua vez, essas estratégias foram baseadas em experiências anteriores e na literatura como o manual *Rehabilitar* (Helene & Pereira, 2003). O objetivo dessas reparações era remover o concreto danificado ou que apresentasse algum problema patológico como a carbonatação, bem como garantir a estabilidade estrutural com o recálculo e reestruturação da quantidade de aço necessária nos elementos, além de garantir o revestimento adequado de acordo com os requisitos estruturais. A Fig. 3 mostra os processos de deterioração da estrutura. Para definir as estratégias de reparo, foi necessário estabelecer os tipos de reparo a serem utilizados:



Figura. 3. Carbonatação e desprendimento de concreto

2.2.1 Reparo de superfície localizado (RSL).

Este reparo refere-se àqueles elementos que apresentam danos ao concreto com pouca profundidade e extensão em relação às dimensões do elemento estrutural. Portanto, foi estabelecido um reparo em áreas específicas onde se observam fissuras em profundidade não superior a 3 cm ou antes de atingir a armadura.

2.2.2 Reparo de superfície uniforme (RSU).

Esta estratégia de reparo é semelhante ao reparo superficial localizado, pois será realizado em profundidade não superior a 3 cm, ou antes de atingir a armadura, mas contemplando o reparo em extensão relativamente grande de acordo com as dimensões do elemento estrutural, delimitando para as obras uma extensão máxima no elemento de 1,5 m.

2.2.3 Reparo profundo localizado (RPL).

Esta reparação será efetuada nos elementos estruturais onde se identificou avaria de grande extensão em relação às dimensões do elemento estrutural, sendo a sua profundidade superior a 3 cm, afetando o concreto por detrás das armaduras.

2.2.4 Reparo profundo uniforme (RPU).

Como na seção de reparo profundo localizado, o reparo é executado em uma profundidade além do aço. Porém, por ser uniforme, o reparo foi estabelecido em seções máximas de 1,5 m, devido a problemas estruturais.

3. ABORDAGEM E USO DO FATOR DE SEGURANÇA EM REPAROS

As técnicas de reparo propostas foram realizadas com o objetivo de aplicar ferramentas nos processos construtivos que permitam evitar processos desnecessários como demolições, que levariam à geração de entulho e lixo e ainda mais em áreas importantes como patrimônio mundial. Como ponto de partida inicial para a realização da reparação, foi importante analisar cada elemento individualmente, o seu comportamento, a sua carga máxima de suporte, o seu estado, e posteriormente projetá-lo a um nível geral relacionando-o com todos os elementos estruturais, obtendo-se assim um comportamento global. Desta forma, foi possível realizar a intervenção considerando todos os possíveis fatores de afetação e minimizando os danos colaterais do processo de reparação. Isso, por sua vez, leva ao treinamento de pessoal para preparação de reparos, uma vez que, atualmente, tanto os trabalhadores quanto os engenheiros desconhecem essas questões, o que acarreta o uso incorreto de ferramentas, materiais e equipamentos.

Embora uma estratégia de reparo possa ser executada por pessoas treinadas, é sempre importante levar em consideração a segurança e os fatores de risco ao trabalhar.

A teoria do FS foi colocada em prática no processo de reparo da estrutura descrita neste trabalho. Para isso, foi necessário o apoio de manuais, regulamentos, literatura e experiência própria para estabelecer com os melhores critérios a estratégia ideal por elemento. Conforme mencionado anteriormente, graças à inspeção anterior, foi possível estabelecer o grau de dano e com ele a estratégia de reparo. Embora 4 possíveis tenham sido estabelecidos, neste trabalho apenas o que está relacionado ao reparo profundo uniforme será discutido (ver Fig. 4)

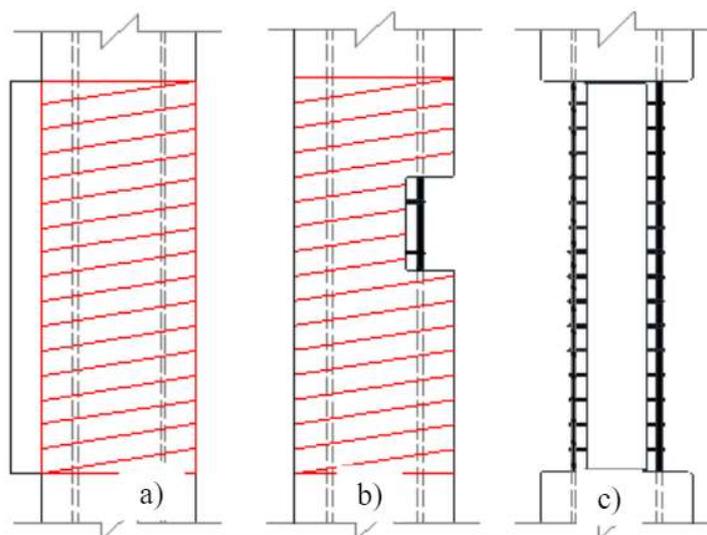


Figura 4. Reparo profundo uniforme: a) Delimitação da área a ser demolida, b) início da escaificação, c) seção final após escaificação

Para a realização das reparações, foi necessário estabelecer os critérios com que seriam realizadas. No caso desta estrutura, existiam elementos de diferentes dimensões, para os quais foram estabelecidos critérios universais de reparação, mas deviam ser verificados antes da sua execução. Um RPU pode ou não ser grande em relação ao tamanho do elemento. Porém, neste caso e para não recorrer a materiais, mão-de-obra e tempo como é o caso da instalação das escoras de estabilização, determinou-se pela praticidade que o melhor era efetuar as reparações em seções de 1,5 metros lineares. A seguir está um exemplo de um pilar do tipo retangular. O pilar típico (ver Fig. 5) tinha seção transversal de 30x35 cm e com o auxílio dos ensaios mecânicos realizados foi possível obter a resistência média à compressão do concreto, que é superior a 200 kgf/cm².

Uso prático do fator de segurança na estratégia de reparo de pilares de um edifício de concreto com valor histórico

Considerando a seção transversal do elemento e a resistência mínima obtida, pode-se deduzir que o pilar é capaz de suportar uma carga axial de 210 t. Agora, se o concreto em mau estado for escarificado, e for reparado além da armadura, lembrando que o reparo profundo uniforme é aquele que ocorre além de 3 cm ou atrás da armadura, a nova seção transversal do elemento é de 25x30 cm. Se for utilizada esta nova seção transversal e a resistência à compressão obtida anteriormente com os corpos de prova extraídos, pode-se determinar que a estrutura, mesmo com a redução da seção de concreto, é capaz de ainda suportar 150 t. Se for considerado que, pelo menos, o elemento foi projetado com FS de 1,5, então a estrutura foi inicialmente projetada para suportar com segurança uma carga de 140 t. Portanto, mesmo após a escarificação, o pilar a ser reparado ainda pode suportar as cargas exercidas, pois é capaz de resistir a até 150 t. Isso não poderia ser totalmente verdade, pois não se trata de uma análise que considere todos os possíveis efeitos que podem existir no momento de fazer os reparos. No entanto, é uma boa estratégia a ser realizada no campo, pois permite uma rápida apreciação de até que ponto é possível intervir sem afetar estruturalmente o elemento e poder continuar com o trabalho de reparo.

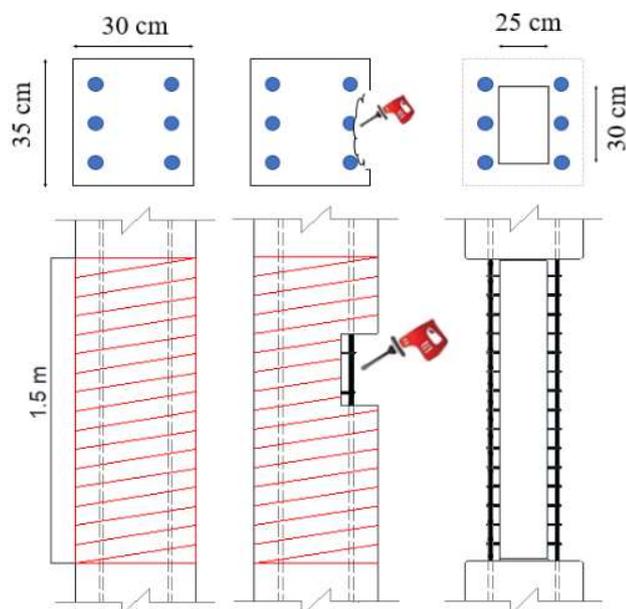


Figura. 5. Critérios para delimitação e escarificação de reparos

Para o processo de reparo, foi feito um guia que poderia ser facilmente seguido pelos trabalhadores e que por sua vez era repetível em vários elementos. Esse processo pode ser visto na Fig. 6. Para efetuar as reparações e de forma a controlar vários problemas como contrações de temperatura, módulo de elasticidade, etc., optou-se por utilizar um concreto com características semelhantes para efetuar a reparação dos elementos.



Escarificação mecânica para remover o concreto em mal estado e descobrir a armadura



Medição do diâmetro da armadura, se a perda de diâmetro foi maior que o permitido, a secção de aço deve ser reposta.



Furos foram feitos para chumbar novas armaduras complementares para compensar o perdido por corrosão. Para sua correta ancoragem, foi utilizada resina epóxi.



Antes de efetuar a concretagem, a base de todos os pilares foi impermeabilizada com produto de base asfáltica, ao redor do piso para evitar a penetração de umidade ou agentes corrosivos.



Com base em experiências anteriores de inspeção, foi recomendado aplicar um conversor de óxido ao aço.



Antes da concretagem, foi aplicada uma ponte de aderência para garantir a união do concreto novo com o antigo, que também tem a função de selador.



Após lançamento e concretagem foi aplicada cura química para garantir durabilidade

Figura. 6. Processo de reparo profundo uniforme

Naturalmente, o trabalho dos operários implicou em alguma ocasião o rompimento da seção de concreto ou a ultrapassagem da seção mínima exigida pelo FS. Nestes casos os cuidados incluíram não apenas escoramentos pontuais, mas também levar em consideração o monolitismo da estrutura na transferência das cargas excedentes do trecho contemplado para os elementos vizinhos. Com este trabalho foi possível demonstrar de forma simples a facilidade e a confiança com que um RPU em pilares pode ser abordado, levando-se em consideração um simples cálculo do FS. A Fig. 7 mostra uma visão noturna do prédio já recuperado.



Figura 7. Vista noturna do edifício após intervenção

4. CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi apresentar o caso prático de reparo de pilares de uma estrutura de concreto armado com 70 anos, que se encontrava em estado de abandono e com previsão de sua demolição total. Por mandato das autoridades, foi realizado um estudo de durabilidade que resultou na mudança do projeto de demolição para um de reparação. Para realizar esta reparação, foi necessário consultar diferentes fontes educacionais, como experiências anteriores que levaram à criação de um manual prático para os trabalhadores. Este manual foi baseado em critérios de durabilidade e também em especificações de projeto que permitem uma operação segura. O FS desempenhou um papel importante na determinação do mecanismo de reparação, o que resultou em uma economia significativa de recursos e tempo. Com estes procedimentos de reparo projetava-se ter uma estrutura durável, capaz de cumprir a vida útil estabelecida com manutenção preventiva.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Coppel SA de CV, UACAM, Cinvestav, INAH e INBA. J.A. Briceño-Mena agradece a bolsa de doutorado Conacyt.

6. REFERÊNCIAS

- American Concrete Institute (2019), *ACI 318-19 Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural*. Primera impresión: junio 2019. ISBN 978-1-64195-060-2
- Allen, D. E. (1991), “Limit states criteria for structural evaluation of existing buildings” *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 18, no. 6, pp. 995–1004, doi: <https://doi.org/10.1139/191-122>
- Briceño-Mena, J. A., Balancán-Zapata, M. G., Castro-Borges, P., Pérez-López, T. (2021), “Extending the Service Life of a Historical Concrete Building”, *Materials Performance*, pp. 1–8, 2021. URL: <https://materialsperformance.com/articles/coating-linings/2021/04/extending-the-service-life-of-a-historical-concrete-building>
- González Cueto Vila, A. V., Quevedo Sotolongo G. (2007), “Aplicación de la teoría de seguridad al diseño de cimentaciones en arenas. Chequeo de linealidad” *Revista Ingeniería de Construcción* Vol. 22 No. 2, pp. 81–88, www.ing.puc.cl/ricvol. <https://scielo.conicyt.cl/pdf/ric/v22n2/art02.pdf>
- Ridell C. R., Hidalgo O. P. (2010), *Diseño Estructural*, Quinta. Pontificia Universidad Católica de Chile. I.S.B.N. 956-14-0463-X
- Helene, P., Pereira, F. (2003), *Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón - reparación, refuerzo y protección*. Red Rehabilitar, Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), 2003.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo - Minvu (2018), *Vol. 4. Manual De Reparaciones Y Refuerzos*

Estructurales. Editor: División Técnica de Estudio y Fomento Habitacional – Ditec, Minvu, ISBN: 978-956-9432-85-9. Gobierno de Chile, febrero de 2018.

Melchers, R. E. (2001), “*Assessment of existing structures—approaches and research needs*” J. Struct. Eng., vol. 127, no. 4, pp. 406–411, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2001\)127:4\(406\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:4(406))

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación S. C. (2016) *NMX-C-505-ONNCCE, Industria de la Construcción – Inspección Preliminar de Daños en Estructuras de Concreto Hidráulico con Criterios de Durabilidad - Procedimientos*.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación S. C. (2018), *NMX-C-520-ONNCCE, Industria de la Construcción-Inspección Detallada de Daños en Estructuras de Concreto Hidráulico con Criterios de Durabilidad-Procedimientos*.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación S. C. (2018) *NMX-C-530-ONNCCE, Industria de la construcción – Durabilidad – Norma general de durabilidad de estructuras de concreto reforzado – Criterios y Especificaciones*.

Val, D. V., Stewart, M. G. (2002), “*Safety Factors for Assessment of Existing Structures*,” J. Struct. Eng., vol. 128, no. 2, pp. 258–265, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2002\)128:2\(258\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:2(258))