

ENGENHARIA CIVIL FORENSE: PRINCIPAIS CAUSAS DE INCIDENTES EM OBRAS DE ENGENHARIA CIVIL E PROCEDIMENTOS DE INVESTIGAÇÃO

Tullio Barros Silva Bomtempo

Engenheiro Civil pela Universidade de Brasília (UnB).

Especialista em Ciências Forenses IFAR/LS

E-mail: tullibomtempo@gmail.com

Resumo

A engenharia forense é a aplicação dos princípios e metodologias da engenharia para solucionar questões factuais com desdobramentos jurídicos. No âmbito da engenharia civil, existem diversos casos de incidentes em obras que necessitam de uma visão especializada para se chegar ao entendimento conclusivo das causas e circunstâncias do ocorrido. A proposta deste estudo é trazer informações, baseadas em publicações científicas e livros relacionados à área, que contribuam para a persecução penal e solução desses litígios. O trabalho traz como problema central a determinação das principais causas de incidentes em obras civis provocados por erro humano, classificados como erros de projeto ou erros de execução. Além disso, discutem-se técnicas e procedimentos utilizados no âmbito da engenharia civil forense na investigação dessas causas.

Descritores: Engenharia Forense, Colapso Estrutural, Perícia de Acidentes em Obras, Sinistros na Construção Civil.

FORENSIC CIVIL ENGINEERING: MAIN CAUSES OF INCIDENTS IN CIVIL ENGINEERING WORKS AND INVESTIGATION PROCEDURES

Abstract

Forensic engineering is the application of engineering principles and methodologies to solve factual issues with legal unfoldings. In the field of civil engineering, there are several cases of incidents in works that require a specialized view to arrive at a conclusive understanding of the causes and circumstances related to the event. The purpose of this study is to provide information, based on scientific publications and books related to this subject, in order to contribute to the criminal prosecution and resolution of these litigations. The central problem of this work is the determination of the main causes of incidents in civil works caused by human error, classified as errors of design or errors of execution. In addition, techniques and procedures used in forensic civil engineering in the investigation of these causes are discussed.

Keywords: Forensic Engineering, Structural Collapse, Construction Accident Investigation, Civil Construction Disasters.

INTRODUÇÃO

De acordo com dados do IBGE, a indústria da construção civil no Brasil cresceu 74% nos últimos 20 anos. Esse crescimento ocasionou, também, o aumento do número de sinistros em obras de engenharia civil por diferentes motivos, muitas vezes com vítimas fatais ou danos patrimoniais relevantes. Além disso, a construção civil é o segmento mais letal para os trabalhadores, com 450 mortes ao ano no Brasil, segundo dados do Ministério do Trabalho e Emprego (MTE).

Entre os motivos de incidentes em obras, podem-se destacar erros de projeto e erros de execução, causados por imperícia, negligência ou imprudência de alguns profissionais que atuam nessa área. Entretanto, ocorrem também sinistros em que os profissionais envolvidos na concepção da obra não tiveram nenhuma responsabilidade; foram aqueles gerados por condições adversas e fatores imponderáveis, como os ocorridos em cataclismos naturais (MARCELLI, 2007). Vários exemplos de incidentes em obras civis, por diversos fatores, podem ser encontrados na literatura especializada: Cunha (1996), Souza (1996), Cunha (1998) e Souza (2001). No entanto, este estudo tem uma abordagem específica, voltada para determinação das causas dos incidentes provocados por erro humano.

Nesse contexto, o perito criminal especializado em engenharia civil, desempenha importante papel de investigação e garantia da imparcialidade nos processos judiciais desses casos. Ele poderá avaliar as causas de um acidente, como o desmoronamento de um edifício por falha estrutural, patologias, anomalias ou qualquer desempenho insatisfatório da edificação decorrente de má execução, erro de projeto ou problemas com material (GEROLLA, 2011).

O presente trabalho concentra-se nas razões científicas do problema e busca uma visão geral da prática e desafios da engenharia civil forense, além de trazer referências que corroboram a compreensão dos conceitos e fatores que contribuem para ocorrência

de sinistros em obras de engenharia civil. Desse modo, este estudo concorrerá com uma pequena parcela na construção do conhecimento científico necessário para uma maior eficiência da persecução penal nesses casos e, portanto, na aplicação adequada do *jus puniendi* do Estado.

METODOLOGIA

O presente artigo foi baseado em publicações científicas nas áreas de engenharia forense. As pesquisas serão feitas por meio de sítios eletrônicos especializados em bases de dados científicos, como Scielo, Science Direct, Portal de Periódicos da Capes e Google Scholar de. A busca nos bancos de dados foi realizada utilizando terminologias específicas da engenharia forense em língua portuguesa e inglesa. As palavras-chave utilizadas na busca foram: Engenharia Legal; Perícia de Engenharia Civil; Falhas Estruturais em Obras; Forensic Engineering; Forensic Science; Case Reports in Civil Engineering.

Foram utilizados livros que abordam questões relativas à investigação no âmbito da engenharia civil. Além disso, serão analisadas reportagens de incidentes em obras civis, buscando maior compreensão da teoria estudada aplicada ao caso concreto.

RESULTADOS

Na pesquisa inicial foram encontrados 63 artigos, desses foram escolhidos 25, os quais continham exemplos, ilustrações e estudos de caso de interesse dessa revisão e foram referenciados nesse artigo.

DISCUSSÃO

A Engenharia Forense

Segundo Katz (2015), o termo ciência forense diz respeito à aplicação do conhecimento científico a problemas legais. As ciências forenses abrange diferentes campos de estudos, como por exemplo, a química, física, medicina, computação, materiais etc., os quais podem estar presentes na engenharia forense. Para o autor, enquanto métodos utilizados nas ciências naturais podem ter alguma flexibilidade para interpretações questionáveis, a adaptação à ciência forense requer invariabilidade em termos de interpretação dos resultados: a evidência não é apenas uma questão

científica, mas legal. Portanto, os métodos utilizados na aplicação dessa ciência exigem não apenas padrões científicos rigorosos, mas também elevados padrões éticos, fornecendo interpretação dos resultados obtidos de modo a minimizar influências subjetivas.

De maneira específica, a engenharia forense estrutural, como definido por Noon (2001), divide-se em duas áreas: análise da falha e análise das causas. A primeira diz respeito a determinar como um componente específico do objeto falhou ou rompeu; a segunda, por outro lado, está relacionada a identificar os fatores que levaram à ocorrência do evento, desde a fase de elaboração e execução do projeto.

O entendimento desses conceitos é importante para se compreender as causas que podem estar associadas aos incidentes em obras. Em seguida serão apresentados os principais fatores que levam a ocorrência desses sinistros, baseado em publicações científicas relacionadas à área de estudo.

Principais Causas De Incidentes Em Obras De Engenharia

Fator Humano

Para Vykopalová (2013), a maioria dos acidentes é causada por falhas e erros decorrentes da ação humana. Portanto, a atenção do perito engenheiro civil deve estar voltada, principalmente, para os erros causados pelo homem. Como nenhuma atividade técnica, mesmo com auxílio de equipamentos mecânico, pode ser realizada sem interação humana, a eficácia dessas atividades são influenciadas principalmente por fatores pessoais (traços de personalidade - física e mental) ou fatores externos (ocasionais, ambientais, sociais e técnicos), que interferem na ação antrópica.

Erros de Execução

De acordo com Pereira (1985), a falha ou descuido cometido no decorrer, ou no desenvolvimento de uma obra, chama-se erro de execução. Algumas falhas podem ocasionar danos à estrutura, levando-a ao colapso total ou parcial. O perito, especialista em engenharia civil, caracteriza o erro de execução como fator determinante para o sinistro, quando é verificada a divergência entre o serviço executado e o que foi

projetado. A seguir são apresentados erros frequentes que levam à ocorrência de sinistros em obras civis, baseado em Marcelli (2007) e Thaguna (2014).

- Compactação inadequada do solo

Em geral, o solo é base de sustentação para as obras de engenharia. A falta de resistência do solo pode levar a ocorrência de recalques diferenciais (afundamento desigual da estrutura), que são extremamente prejudiciais para a integridade da edificação, devido à adição de elevados esforços, não previstos no dimensionamento estrutural, após o recalque. A compactação inadequada ou insuficiente do solo pode levar a perda da capacidade de suporte da fundação, ocasionando movimentação do solo e conseqüente colapso da estrutura. Pode-se encontrar, por exemplo, um estudo detalhado das conseqüências do recalque diferencial e um estudo de caso sobre o assunto em Anastasopoulos (2013).

- Falhas na execução de estacas

Os problemas observados com mais frequência na execução de fundações com estacas, e que podem provocar recalques ou até mesmo a ruptura do elemento estrutural, foram descritos por Marcelli (2007), são eles: estacas fora da posição correta, erros de cravação, falhas na execução da estaca moldada no local. Estudos sobre colapsos em edificações devido à ruptura de estacas podem ser encontrados em Souza (2003) e Srivastava (2002).

- Adensamento e cura inadequados do concreto

O adensamento inadequado ou não realizado deixa grandes vazios na estrutura, denominados brocas. A presença de brocas é indício de que a estrutura é pouco resistente aos esforços solicitantes em razão da elevada concentração de tensões no interior do elemento estrutural. Além disso, um processo de cura (molhagem e endurecimento) inadequado pode levar ocorrência de trincas e rachaduras na estrutura. Essas situações, além de diminuir a área resistente da peça, podem levar a infiltração de água nos componentes estruturais e conseqüentemente corrosão da armadura do concreto. Um exemplo de ruptura de pilares devido à corrosão de armadura pode ser encontrado em

Téchné (2011) e casos decorrentes de adensamento e/ou cura inadequados do concreto podem ser vistos em Cunha (1998).

- Traço do concreto diferente do especificado

Traço do concreto é a mistura, realizada de forma técnica, de componentes como areia, cimento, água, agregados e aditivos. A mudança de percentual de algum componente poderá fazer com que a estrutura não suporte os esforços solicitantes. Muitas vezes pode ocorrer modificação do traço no momento da concretagem, de forma arbitrária e sem avaliação técnica prévia. Gonçalves (2015) apresenta estudo sobre a composição do concreto armado e os problemas decorrentes de materiais com especificações inadequadas.

- Aço insuficiente na estrutura de concreto

No momento da execução, a distribuição das ferragens pode não ficar de acordo com o projetado. Nesses casos, a estrutura poderá entrar em colapso lentamente, deformando-se de forma plástica, ou romper subitamente. O colapso do viaduto Batalha dos Guararapes, na cidade de Belo Horizonte, em 2014, ocorreu pela falta de armadura em um dos sentidos do bloco do pilar central, faltando 90% da ferragem para garantir a rigidez necessária para o bloco de fundação transferir as cargas para todas as estacas. A falta das armaduras tornou o bloco flexível transferindo as cargas apenas para as duas estacas centrais da fundação, o que levou a ruptura do bloco e afundamento das estacas de forma abrupta. Um estudo detalhado pode ser encontrado em Full Estruturas (2016).

Erros de Projeto

O erro de projeto ocorre no momento da concepção da obra, normalmente, é de difícil detecção, devido a grande quantidade de cálculos, especificações e materiais indicados (PEREIRA, 1985). A seguir são apresentadas as principais causas de sinistros em obras associadas a erro de projeto e exemplos de casos estudados no Brasil e no mundo.

- Revisão de Projeto Negligenciada

É comum ocorrerem mudanças de utilização e aumento de cargas em edificações, entretanto, muitas vezes isso acontece sem uma revisão adequada do

projeto. No estudo de caso realizado por Park (2011), o fator de maior relevância sobre o colapso do edifício *Sampoong*, em junho de 1995, na cidade de Seul, foram principalmente as mudanças de projeto e de utilização do edifício, sem estudo prévio nem respaldo técnico de profissionais qualificados. Foram adicionadas elevadas cargas extras à edificação e reduzidas as seções dos pilares de sustentação de modo arbitrário.

- Projeto Subdimensionado

O desabamento da ciclovia Tim Maia no Rio de Janeiro, no dia 21 de abril de 2016, no qual morreram duas pessoas é exemplo de falha que ocorreu devido a uma série de irregularidades, entre elas, erro no dimensionamento do projeto. Segundo informações do laudo emitido pelo Instituto de Criminalística Carlos Éboli (ICCE), o projeto estrutural foi subdimensionado e ignorou a força do choque das ondas de baixo para cima na plataforma da ciclovia, definindo como causa principal do colapso, consistindo em erro de projeto. (PORTAL CREA-RJ, 2016)

Outro caso que está bem documentado no trabalho de Souza (2009) é o colapso progressivo de 15 varandas de edifício, em Maringá, Paraná. Um projeto de sistema hidráulico ineficiente (gasoduto ou de escoamento) levou a ocorrência do sinistro. Devido à infiltração de água, para o interior da estrutura de sustentação das varandas, as armaduras principais das vigas em balanço foram corroídas, o que levou ao desabamento em série das varandas.

- Cálculo Estrutural Equivocado

Segundo Marcelli (2007), o erro de cálculo acontece muitas vezes por inexperiência do engenheiro civil, os quais não tiveram tempo de adquirir a noção intuitiva do comportamento estrutural, e lançam dados incorretos ou imprecisos nos programas de computador para realização dos cálculos. Essa situação pode provocar graves erros de dimensionamento e a possível ruptura dos componentes estruturais. Alguns exemplos de colapso progressivo em decorrência de erro de cálculo estrutural estão disponíveis em Laranjeiras (2011).

Procedimentos De Investigação Em Obras Sinistradas

Para se proceder à investigação em obras sinistradas, o perito especializado em engenharia civil deve obter o máximo de informações possíveis como plantas, *layouts*, croquis, planilhas, memoriais etc. Algumas vezes, devido ao alto grau de complexidade do projeto ou da execução, a detecção da falha pode ficar difícil, o que reforça a necessidade de peritos que tenham formação específica na área e treinamento especializado.

Como descrito por Fang (2011), a investigação começa pela inspeção *in-situ* da aparência externa da edificação: por exemplo, colunas, vigas, pisos, paredes, cobertura. Em seguida, procede-se à medição da dimensão dos componentes estruturais, distância entre vãos, inspeção de espaçamento entre barras e espessura da camada externa de concreto. Após relatar todas as observações feitas em campo, devem-se realizar as análises laboratoriais: resistência de materiais, profundidade de carbonatação no concreto, grau de eflorescência etc.

Análise de Integridade Estrutural

Entre os procedimentos de investigação de falhas estruturais, pode-se destacar a “análise de integridade estrutural”, uma ferramenta de engenharia que permite analisar estruturas e componentes danificados em decorrência de fenômenos como fratura, fadiga, fluência e corrosão. De modo geral, a análise de integridade estrutural é baseada em técnicas de mecânica da fratura, portanto, é um exemplo claro de interdisciplinaridade e aplicação das ciências de materiais e engenharia mecânica na prática da engenharia forense, levada a cabo por perito engenheiro civil. Além disso, esse tipo de metodologia utiliza análises laboratoriais (para caracterização de materiais), como técnicas de microscopia eletrônica, e ferramentas numéricas (modelação em elementos finitos), (GUTIÉRREZ-SOLANA, 2009).

Como exemplo, a Fig. 1 e Fig. 2 são imagens obtidas por microscopia eletrônica de superfícies fraturadas em uma análise de integridade estrutural, para um material frágil e um dúctil, respectivamente, apresentadas por Gutiérrez-Solana (2009).

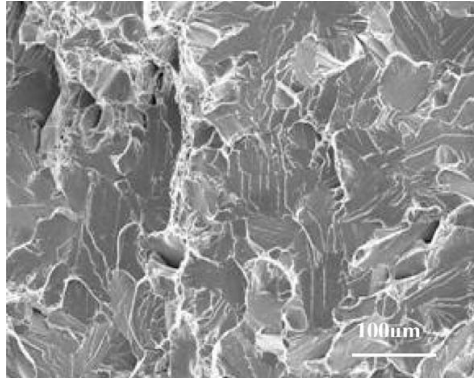


Fig. 1. Superfície de fratura frágil, associada à presença de clivagens.

(Fonte: GUTIÉRREZ-SOLANA 2009)

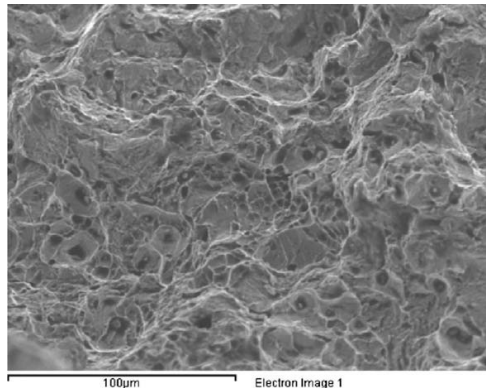


Fig. 2. Superfície de fratura dúctil, associada à presença de micro poros.

(Fonte: GUTIÉRREZ-SOLANA 2009)

Fluxograma de Investigação

Muitas vezes a investigação em campo, onde ocorreu o sinistro, pode ser muito perigosa e de difícil acesso. Entretanto é extremamente importante na medida em que este é o momento em que se realiza o recolhimento de provas e dados para determinação da causa do colapso, motivo pelo qual o perito criminal, acercando-se das medidas de segurança necessárias, deve sempre periciar a cena do crime.

Como a tarefa mais urgente (usualmente levada a efeito por equipes do Corpo de Bombeiros e Defesa Civil) é sempre remover os escombros da edificação a fim de resgatar as pessoas que podem ter sido vitimadas, pois a vida é o bem jurídico mais importante a

ser salvaguardado, é praticamente impossível o isolamento e a preservação da cena do acidente, tal qual ele ocorreu, para investigação pericial criminal.

Segundo Park (2011), os procedimentos devem ser realizados com agilidade e eficiência, de modo que todas as informações sejam analisadas criteriosamente. Com esse objetivo, Park elaborou um fluxograma de investigação para edifícios colapsados, o qual apresenta o passo a passo que deve ser seguido pelo perito na investigação de obras sinistradas. O fluxograma divide-se em três blocos: *check-up* de dados e documentos, inspeção em campo e análise das informações para elaboração da conclusão. A Fig. 3 traz o fluxograma (adaptado) de investigação para edifícios colapsados de forma detalhada.

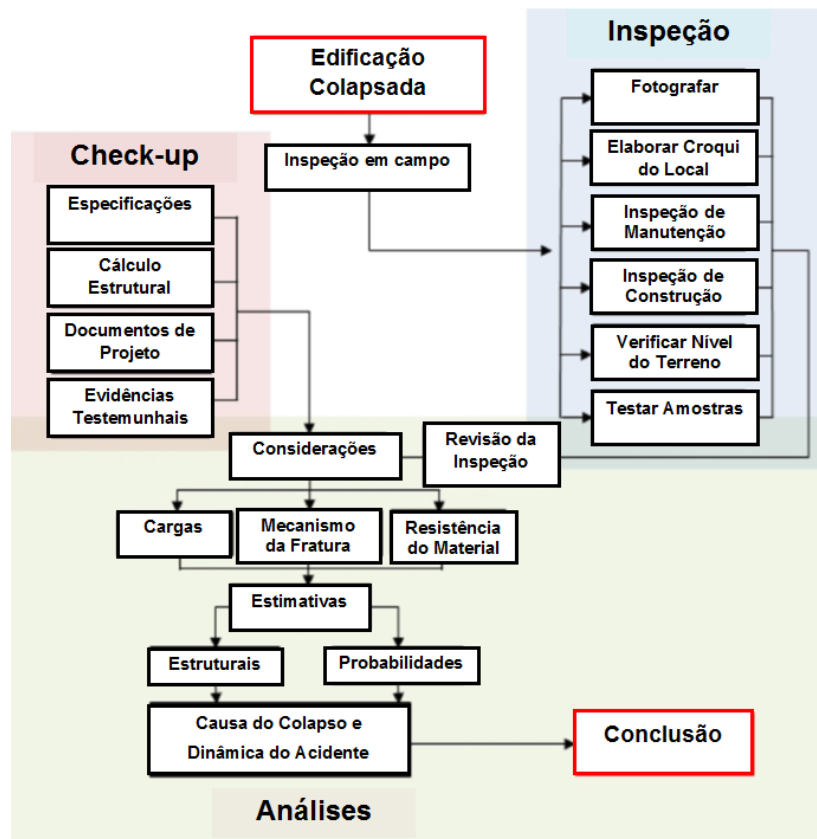


Fig. 3 – Fluxograma, adaptado, de investigação para edifícios colapsados.

(Fonte: PARK 2011)

Após a realização de todos os procedimentos, os peritos especializados podem expressar as seguintes conclusões possíveis: identificação de uma única causa, identificação de múltiplas causas, eliminação de uma causa ou de um conjunto delas ou

conclusão pela insuficiência de vestígios que corroborassem a identificação de uma causa. (BROSZ, 2012).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou diferentes fatores associados à imperícia, negligência ou imprudência de profissionais da construção civil que podem contribuir, ou são determinantes, para a ocorrência de sinistros em obras de engenharia civil. A causa do ocorrido pode se iniciar em qualquer etapa do projeto, como: concepção, *design*, cálculos, fundação, estrutura e utilização. Apesar de existirem diversas variáveis que podem contribuir para a ocorrência de uma falha estrutural ou para o colapso de uma edificação, a grade parte das causas desses incidentes esta relacionada a erros de projeto e/ou execução da obra, como exemplificado nas referências.

Além disso, discutiram-se técnicas de análise de falhas e procedimentos sequenciais, os quais podem ser aplicados pelo perito engenheiro civil, e apresentou-se sugestão de fluxograma de procedimentos na tarefa de reconstrução da dinâmica do incidente, buscando mais eficiência e eficácia da investigação pericial criminal.

REFERÊNCIAS

- [1] ANASTASOPOULOS, I. **Structural Damage of a 5-Storey Building: Differential Settlement Due to Construction of an Adjacent Building or Because of Construction Defects?** International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. Paper 7. 2013.
- [2] BROSZ, H.; ELLISON, K.; MAHER, M.; PORTER, D.; PUPULIN, D. **Guideline for Professional Engineers providing Forensic Engineering Investigation.** 2012.
- [3] CUNHA A. J. P.; Lima N.A.; Souza V. C. M. **Acidentes Estruturais na Construção Civil – Volume I.** Editora Pini, São Paulo. 1996.
- [4] CUNHA J. C. **Palace II – A Implosão Velada da Engenharia.** Editora Autêntica, Belo Horizonte; 1998.

- [5] DELATTE, N. and RENS, K.V. **Forensics and Case Studies in Civil Engineering Education: State of the Art.** J.Perform.Constr.Facil. 16(3), 98-109.2002.
- [6] FANG, Z.X. **Progress and Challenges of Forensic Structural Engineering—Focus on Mainland China.** Open access under CC BY-NC-ND license. 2011.
- [7] **FULL ESTRUTURAS. Acidente Viaduto de BH.** Disponível em: <<http://fulestruturas.com.br/acidente-viaduto-de-bh/>> Acesso em: 05 de Novembro de 2016.
- [8] GEROLLA, G. **Profissional alia formação técnica em engenharia civil e conhecimentos do mercado imobiliário e do direito.** Técnica - Artigos. Edição Nº 182 – Dezembro de 2011. Disponível em: < <http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/182/artigo285931-1.aspx>> Acesso em: 20 de Outubro de 2016.
- [9] GONÇALVES, E. A. B. **Estudo das patologias e suas causas nas estruturas de concreto armado de obras de edificações.** Rio de Janeiro: UFRJ/ ESCOLA POLITÉCNICA, 2015.
- [10] GUTIÉRREZ-SOLANA, F; CICERO, S. **The knowledge and its application: Materials Engineering and Structural Integrity. Brief review of the Spanish case and contributions from Prof. Elices.** Elsevier Ltd.2009
- [11] KATZ, E. ; HALÁMEK, J. and BAKSHI, S.. **Forensic Science - Multidisciplinary Approach.** Forensic Leg Investig Sci, 2015.
- [12] LARANJEIRAS, R. C. A. **Colapso progressivo dos edifícios - breve introdução.** TQS - TQS News - Artigos. Edição Nº 33 - Agosto de 2011. Disponível em: < <http://www.tqs.com.br/tqs-news/consulta/58-artigos/1009-colapso-progressivo-dos-edificios-breve-introducao>> Acesso em: 05 de Novembro de 2016.
- [13] MARCELLI, M. **Sinistros na Construção civil: causas e soluções para danos e prejuízos em obras /** Maurício Marcelli, São Paulo: Pini. 2007.
- [14] MOURA, B.F. **Avaliação patológica de estrutura de concreto armado (estudo de caso).** UDF, Graduação, Engenharia Civil, 2014.
- [15] NOON, Randall K. **Forensic engineering investigation.** Washington, D.C: Crc Press, 451p. 2001.

- [16] PARK W. T. **Inspection of collapse cause of Sampoong Department Store**. Republic of Korea. 2011.
- [17] PEREIRA, A. F. **A eterna discussão – Erro de Execução x Erro de Projeto**. Boletim Informativo Fenaseg nº 814. 1985.
- [18] **PORTAL CREA-RJ. Resultados Sobre Desabamento da Ciclovía Tim Maia**. Disponível em: <<http://www.crea-rj.org.br/blog/crea-rj-apresenta-resultados-sobre-desabamento-da-ciclovía-tim-maia/>> Acesso em: 10 de Setembro de 2016.
- [19] SOUZA, E. G. **Colapso de edifício por ruptura de estacas: estudo das causas e da recuperação**. São Carlos. 115p. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2003.
- [20] SOUZA, R. A.; ARAÚJO, S.J.M.; **The progressive failure of 15 balconies and the engineering techniques for their reconstruction**. Elsevier Ltd. 2010.
- [21] SOUZA R. A. **Ruínas Recentes de Edifícios no Brasil**. In: **II Encontro Tecnológico da Engenharia Civil e Arquitetura de Maringá**; 2001.
- [22] SRIVASTAVA, A. **Review of causes of foundation failures and their possible preventive and remedial measures**. Madhya Pradesh, Guna, India. 2002.
- [23] THAGUNNA, C. **Building cracks – causes and remedies**. Department of Civil Engineering. Western Region Campus, Tribhuvan University, Nepal. 2014.
- [24] **TÉCHNE. Colapso estrutural: ruptura brusca de pilar**. Téchne – Artigos – Edição Nº 172 – Julho de 2011. Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/172/artigo286838-1.aspx>> Acesso em: 05 de Novembro de 2016.
- [25] VYKOPALOVÁ, Hana; CUPAL, Martin. **Forensic engineering and the importance of the human factor**. WCES 2013.

AGRADECIMENTOS

Ao professor MSc. Charles Albert Andrade pelas contribuições ao conteúdo deste trabalho.

Não foram declarados conflitos de interesse associados à publicação deste artigo.