

Análise de desabamento com vítimas fatais, durante concretagem, devido a ruptura de consolo pré-moldado

J.A. Wissmann ^{a,*}, J.A. Silveira ^b, L.B. Rhunke ^c, J. Leite ^d, D.V. Zini ^b

^{a,b,d} Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel (PR), Brasil

^{a,c,d} Unidade Oficial de Cascavel, Polícia Científica do Paraná – PCP, Brasil

*Endereço de e-mail para correspondência: jorge.wissmann@unioeste.br. Tel.: +55-45-99925-0100.

Recebido em 17/09/2022; Revisado em 28/06/2023; Aceito em 30/06/2023

Resumo

O presente estudo foi estimulado com o desabamento de uma estrutura em concreto armado pré-moldado na cidade de Foz do Iguaçu – PR, onde ocorreu o rompimento do consolo e consequentemente a ruína dos elementos estruturais apoiados nele, vitimando fatalmente dois engenheiros que ali realizavam vistorias. A utilização de estruturas pré-moldadas tem crescido cada vez mais na construção civil, esse fator está diretamente ligado a rapidez e eficiência de prazos na execução, além do controle tecnológico. Devido a frequente utilização desse recurso faz-se necessário estudos para melhor entendimento do funcionamento dessas estruturas. Diante do exposto, tem-se conhecimento que as ligações entre essas estruturas são pontos críticos, uma vez que elas são responsáveis pela transmissão de esforços entre os elementos estruturais. Desse modo, o objetivo principal desse trabalho foi de analisar experimentalmente dois protótipos da estrutura envolvendo os elementos pilar e consolos, aplicando uma carga vertical até a ruptura deles. Os elementos ensaiados se diferenciaram pelo dimensionamento da armadura, sendo um deles com a armadura redimensionada e corretamente executada e o outro com a armadura e execução espelhados na estrutura encontrada *in loco*. Após a realização dos ensaios gerou-se uma análise comparativa entre os protótipos, conclui-se que a armadura presente na estrutura desabada foi erroneamente executada não permitindo a adequada transmissão de esforços entre os consolos e o pilar. Também se determinou os tipos de ruptura que ambos sofreram, observando que o protótipo de armadura *in loco* rompeu de forma frágil não possibilitando chances de fuga para as vítimas.

Palavras-Chave: Engenharia Forense; Acidentes Estruturais; Desabamento, Consolo pré-moldado, Perícia.

Abstract

This paper origins due of a reinforced concrete structure failure (corbel), occurred in Foz do Iguaçu city – Paraná State, and consequently the structural collapse of the elements supported by it, fatally victimizing two engineers who carried out inspections there. The use of precast structures on civil construction has increased due its speed and efficiency, as so of the technological control. Due to the frequent use of this technique, studies are necessary to better understand these structures, between the corbel and the column for example. It is known that the connections are a critical point in design. Thus, the main objective of the experimental study was to create two prototypes in order to simulate the existent vertical load to corbels and their resistance. The prototypes differ in rebars details, one of them with the correct reinforcement by design and the other with the existent details found on the site. After carrying out both experimental tests, it was shown that the erroneous details caused the failure, it does not allow the adequate transmission of the forces from the corbels to the pillar. The failure mechanism was also determined for both prototypes and it was shown that the corbel found in site had a fragile collapse, not leaving any chance of survival for the victims.

Keywords: Forensic Engineering; Structural Failures; Global Collapse, Precast Corbel, Forensic Investigation.

1. INTRODUÇÃO

Essa pesquisa teve início após a ocorrência de um desabamento em uma obra na cidade de Foz do Iguaçu – PR, essa situação resultou na ruptura do consolo do pilar

na ligação pilar-viga e consequentemente a queda da viga e lajes alveolares apoiadas nesta, como mostrado nas Figuras 1 e 2. O acidente vitimou fatalmente dois engenheiros que se encontravam no térreo da região posterior da edificação, as quais realizando vistorias nos próprios, durante a concretagem da capa da laje referente

ao último pavimento (o da cobertura). A dinâmica ocorreu de forma muito rápida, frações de segundos, indicando ruína frágil da estrutura.

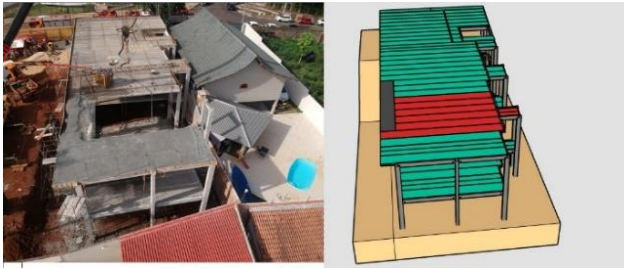


Figura 1. Lajes desabadas *in loco* e ilustração 3D. Fonte: Autores



Figura 2. Detalhes do conjunto consolos-pilar rompido. Fonte: Autores

Ao exame do local, seguindo a filosofia do macro para o micro e auxílio de imagens de segurança foram realizadas as tomadas fotográficas gerais e identificado a posição da obra que se deu o início do desabamento da estrutura, um dos consolos pré-moldados.

Em busca de formas de acelerar o processo construtivo com menor desperdício e maior controle de qualidade, a utilização de estruturas pré-moldadas tem crescido. O emprego dessa técnica construtiva permite que os elementos estruturais sejam moldados em ambiente controlado e depois montados.

Para a produção de estruturas pré-moldadas as etapas são basicamente a moldagem dos elementos estruturais, montagem e execução das ligações, transporte da fábrica para obra. Um dos mais usuais elementos de ligação é o consolo. Estes funcionam como elementos em balanço, projetados de pilares, para apoio de outros elementos, como as vigas através dos dentes Gerber. Possuindo ligações articuladas e por ter um comprimento pequeno de consolo, não valendo a teoria da flexão, os pré-moldados possuem comportamento estrutural bastante distinto das vigas. Segundo a referência [1], o elemento consolo é utilizado com grande repetição em estruturas pré-moldadas, porém a produção desse elemento apresenta dificuldades devido à grande quantidade de armadura em um espaço pequeno.

Caso ocorram irregularidades em processos de construção e projeto, essas podem resultar em sinistros de engenharia no âmbito cível e criminal, neste último o órgão público responsável pela perícia é a Polícia Científica. A Polícia Científica do Estado do Paraná (PCP) é a responsável pelas perícias de criminalística e médico-legais que são fundamentais para o esclarecimento de crimes, seguindo os procedimentos do CPP [2], principalmente quanto ao art. 256 (que trata de desabamentos), assim como da custódia.

Segundo a referência [3], a Engenharia Forense é uma área dentro da Ciência Forense, que trata da relação e aplicação de engenharia/fatos científicos para reconstruir a sequência de eventos que levaram a perdas econômicas e/ou danos associados a um produto da engenharia, a fim de se chegar a uma conclusão sobre responsabilidades e causas.

Segundo a referência [4], o exame pericial de engenharia no local constatou que a concretagem da capa da laje alveolar, por empresa terceirizada, apresentava taliscas (demarcadas com o próprio concreto), indicando um excesso da espessura na execução desta, nas lajes desabadas, fato confirmado em uma laje retirada de sua posição final após o sinistro. Diferindo, portanto, da espessura inicial de 4 cm prevista em projeto estrutural para 10 cm *in loco*, gerando sobrecarga.

Foi então decidido por reproduzir as peças estruturais envolvidas no desabamento, a fim de testar hipótese de ruína frágil, definindo se as causas do sinistro fatal teriam relação ao projeto, a execução, às cargas ou combinação destas.

Seguindo as medições realizadas no local do desabamento pelos Peritos envolvidos no caso e os projetos estruturais originais, bem como o traço utilizado e a carga atuante na estrutura, foi possível replicar em laboratório dois protótipos: um conforme definido em projeto e outro conforme encontrado *in loco*.

Na falta de um POP (Procedimento Operacional Padrão) específico [5] para casos de desabamentos, mas seguindo a formatação da norma de perícias em engenharia [6] e indicações [7], foram realizados os seguintes procedimentos para análise do sinistro de desabamento: Primeiramente uma revisão do dimensionamento destas peças estruturais (os consolos) e a reprodução e experimentação dos protótipos supracitados para melhor entendimento da dinâmica do sinistro.

2. DIMENSIONAMENTO DE CONSOLOS PRÉ-MOLDADOS

Consolos são peças em concreto armado de formato prismático e salientes a pilares, servem de apoio para outros elementos, sendo carregadas na extremidade livre

com forças concentradas, gerando tensões de compressão (biela) e de tração (tirante).

Segundo a referência [8], além do tirante principal é utilizado também estribos verticais e horizontais, porém os tirantes verticais servem somente para enrijecer a armadura, sem transmitir esforços, enquanto os horizontais aumentam a capacidade de resistência das bielas de compressão quando dispostos com pequeno espaçamento, além da função de combater a fissuração na biela.

A norma da referência [9] ilustra o formato e armaduras típicas de um consolo, como mostra a Figura 3.

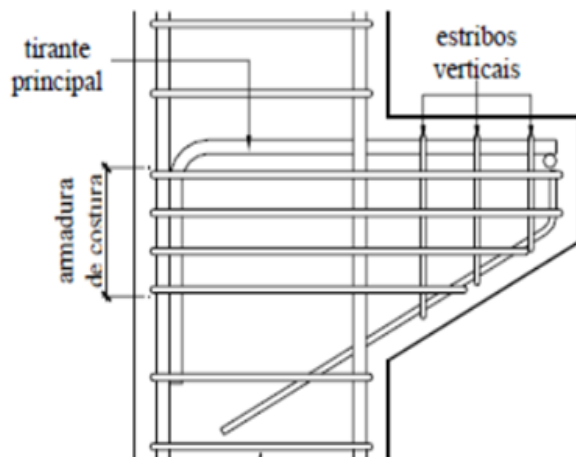


Figura 3. Detalhamento padrão de consolo. Fonte: NBR 6118 [9].

2.1. Método das Bielas e Tirantes

O modelo de biela e tirantes aplicado a consolos foi evidenciado pelos estudos de Franz e Niedenhoff, apud [8], sobre trajetórias de tensões. Esse modelo também é conhecido como modelo de treliça, consiste em idealizar o comportamento do concreto, nos trechos de descontinuidade, através das bielas (zonas comprimidas) e tirantes (zonas tracionadas), com suas respectivas posições determinadas com base no fluxo de tensões na região. Esses elementos são interconectados por nós, o que resulta na formação de uma treliça idealizada e, sendo assim, se tornou o método mais utilizado para cálculo de consolos curtos.

Essa teoria prevê a transmissão de esforços de cisalhamento através de um dado plano utilizando-se uma armadura distribuída que o atravessa. Sendo assim, esse plano pode ser o de uma provável fissura, o da interface de ligação de materiais diferentes ou da superfície entre dois concretos moldados em datas diferentes. O autor também ressalta que a armadura é supostamente distribuída de maneira uniforme ao longo da fissura potencial, desprezando-se a excentricidade da força vertical que ocasionaria em uma armadura mais concentrada na região tracionada.

2.2. Método do Atrito e Cisalhamento

Para consolos muito curtos, um dos modelos de cálculo mais utilizado é o de atrito-cisalhamento, o qual supõe a ocorrência da ruptura por cisalhamento na interface do consolo-pilar. Também, admite-se que por meio das fissuras que se desenvolvem na superfície de transmissão dos esforços cisalhantes, ocorra de início um deslocamento relativo vertical entre o consolo e o pilar.

Diante disso e da irregularidade na superfície, o deslocamento relativo horizontal causa solicitações de tração na armadura distribuída que cruza a interface e, portanto, a superfície de concreto ficará comprimida [10].

2.3. Modos de ruptura

Segundo a referência [11], existem três tipos principais de ruptura em consolos: ruptura por flexão, fendilhamento da biela de concreto, cisalhamento, mostradas pela Figura 4. Segundo [12], também existem outros tipos de ruptura, além desses citados: ruptura por falta de ancoragem, ruptura devido à ocorrência de solicitação horizontal não prevista no dimensionamento e ruptura por esmagamento local.

Conforme a referência [1], a ruptura por flexão é o tipo de fissura se caracteriza por ser bem aberta ao longo da interface do consolo com o pilar, devido ao escoamento do aço do tirante principal. O escoamento das barras da armadura é acompanhado do esmagamento do concreto da biela.

Os autores da referência [11] retratam que ruptura por fendilhamento da biela comprida é determinada por uma fissura a aproximadamente 45°, pelo menos parcialmente, ao longo de uma linha que vai do ponto inferior do consolo com o pilar (sob compressão) ao ponto de aplicação do carregamento.

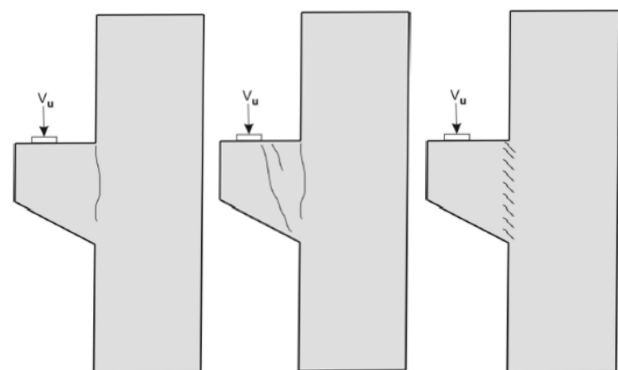


Figura 4. Modos de ruína por flexão, fendilhamento da biela e por cisalhamento respectivamente. Fonte: Costa [1].

Segundo a referência [1], a ruptura por cisalhamento ocorre quando o ponto de aplicação do carregamento é muito próximo ao pilar, e o consolo sofre um escorregamento em relação ao pilar. O autor retrata que a

ruptura é determinada pela ocorrência de múltiplas fissuras de pequena dimensão ao longo da interface consolo-pilar.

Segundo a referência [1] o modo de ruptura do consolo depende essencialmente da quantidade de armadura utilizada, também depende da resistência a compressão do concreto utilizado e da razão a/d . Em alguns casos é difícil se definir entre dois modos de ruptura.

2.4. Ancoragem de barras

Um fator fundamental para a aderência entre o concreto e a armadura de aço, pois ela permite que eles trabalhem em conjunto ao sofrerem a ação de esforços. Com a aderência procura-se garantir que não ocorra escorregamento relativo entre o concreto e as barras de aço. O fenômeno da aderência envolve dois aspectos: o mecanismo de transferência de força da barra de aço para o concreto que a envolve e a capacidade do concreto resistir às tensões oriundas dessa força.

Segundo a referência [13], a transferência de força é possibilitada pela adesão, por atrito e por ações mecânicas, e pode ser estudada considerando diferentes estágios, dependentes da intensidade da força, da textura da superfície da barra de aço e da qualidade do concreto.

3. PROTÓTIPOS REPRODUZIDOS

De posse dos projetos e exame efetuado *in loco* (medições), reproduziu-se o detalhamento do pilar PR4, consolo C6 e consolo C4, conforme visualizável na Figura 5, em dois protótipos para ensaio experimental, a seguir descritos.

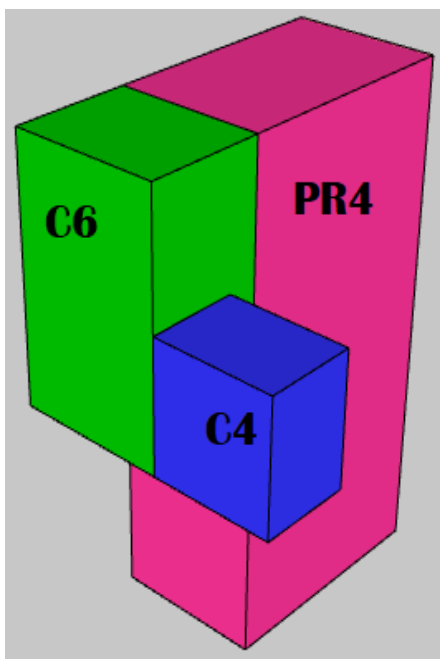


Figura 5. Identificação dos componentes dos protótipos. Fonte: Autores

3.1. Protótipo do projeto

Este protótipo é fiel aos detalhamentos encontrados em pranchas nos projetos fornecido aos Peritos pelos envolvidos e podem ser mais bem apreciados na referência [14].

Obteve-se o projeto estrutural original da obra, assim como o traço do concreto utilizado e a carga atuante na estrutura. Com esses parâmetros tornou-se possível redimensionar a armadura da estrutura, visualizável na Figura 6, assim como seu detalhamento, e dessa forma replicar em laboratório ambas as situações.

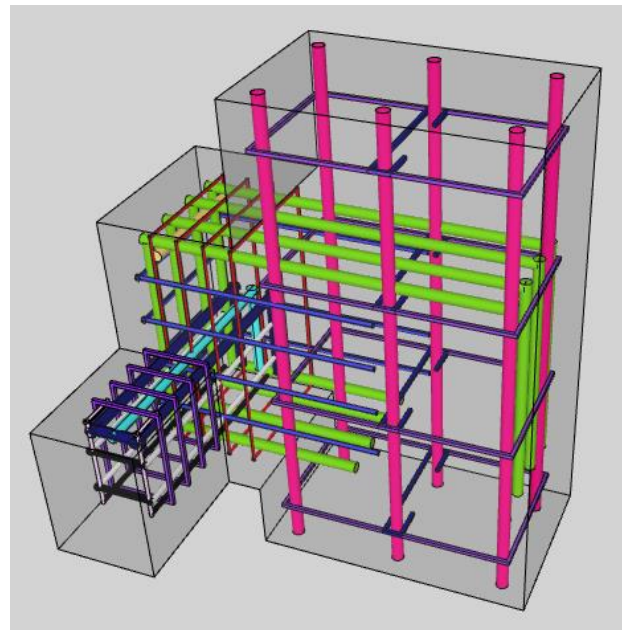


Figura 6. Detalhamento do consolo de projeto. Fonte: Silveira [14].

3.2. Protótipo *in loco*

O mesmo detalhamento foi executado para o protótipo “*in loco*”, porém diferenciando as armaduras do consolo C4 conforme encontrado no momento do exame pericial, reproduzindo soldas e posicionamentos errôneos fidedignamente, conforme mostrado na Figura 7.

Uma chapa metálica também foi encontrada na extremidade da armadura deste consolo, sugerindo sua soldagem na viga, criando um engastamento e transferindo momento torçor da viga gerber para o consolo C4.

As armaduras finais dos dois protótipos podem ser apreciadas conforme mostrado na Figura 8.

Cabe ressaltar que também foram também confeccionados CPs (corpos de prova) em concreto, conforme a referência [15], para monitoramento da resistência até o momento dos ensaios dos protótipos (mesma resistência de projeto: 30 Mpa).



Figura 7. Detalhamento do consolo C4 (*in loco*). Fonte: Autores



Figura 8. Detalhamento da armadura dos protótipos. Fonte: Autores.

4. ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios experimentais seguiram configurações semelhantes às utilizadas pela referência [16], os quais foram realizados em uma mesa de reação, com a carga aplicada por pistões hidráulicos e se utilizando de perfis metálicos para o posicionamento dos protótipos e equipamentos.

Utilizou-se um terceiro pistão com carga aplicada no centro do Pilar PR4 para manter o equilíbrio do mesmo. Foram também utilizados dois pistões (capacidade de 10 ton cada) com carga aplicada no Consolo C4, conforme Figura 9.

Devido à dificuldade encontrada na montagem da caixaria e na produção de um alto volume de concreto, equipamento limitado disponível, para a concretagem do consolo juntamente com o pilar, tornou-se preferível a concretagem de cada protótipo em duas etapas, uma para os pilares e outra para o consolo, a fim também de fidelizar a interface criada na confecção conforme realmente executada.

Primeiro ocorreu a concretagem do PR4 de ambos os protótipos, dessa etapa foram coletados corpos de prova (CPs) cilíndricos para o ensaio da resistência a compressão do concreto, dessa forma tornou-se possível o controle da resistência apresentada pelo material.



Figura 9. Detalhes do ensaio na mesa de reação. Fonte: Autores

Posteriormente ocorreu a concretagem dos consolos C6 e C4 de cada protótipo, quando também ocorreu a produção de CPs para teste da resistência deste concreto.

O traço do concreto utilizado no experimento é oriundo do projeto original, sendo gerado para atingir uma resistência do concreto de 30Mpa. Este foi obtido pelos peritos criminais do caso: **1:0,78:1,82:3,07:0,007:0,53**, sendo definido pela ordem de cimento Portland CII-F40, brita 1, brita 0, areia natural, aditivo superplastificante e água.

Quando o concreto utilizado nas duas concretagens atingiu 30Mpa (resistência utilizada no dimensionamento do projeto original), tornou-se possível o ensaio dos protótipos através da mesa de reações, como apresentado anteriormente.

5. RESULTADOS

Com a análise desenvolvida no estudo da referência [14] pôde-se constatar que o “Protótipo de Projeto” apresentaria uma ruptura dúctil, com grande deformação ao longo da aplicação de carga, porém limitou-se a carga máxima possível pelos equipamentos utilizados e este consolo não rompeu, vide cargas e comportamento no gráfico da Figura 10 e situação pós ensaio na Figura 11 (lado esquerdo). Através do avanço das fissuras, pode-se definir a área de surgimento e a inclinação da fissuração, dessa forma o tipo de ruptura seria por fendilhamento da biela comprimida. Notou-se neste protótipo a propagação

de esforços e fissuras de forma mais generalizada entre seus elementos, consolos C4, C6 e “pilar” PR4.

Após a realização do ensaio do “Protótipo *in loco*” e a análise dos dados, percebeu-se que a ruptura sofrida ocorreu de forma frágil, vide cargas e comportamento no gráfico da Figura 9 e situação pós ensaio na Figura 11 (lado direito), ocorrendo de forma bruta e com rápido avanço. Ao realizar o comparativo da ruptura com os estudos acerca da ruptura por fendilhamento da biela comprida, pode-se admitir que o protótipo sofreu esse tipo de ruína. Notou-se neste protótipo a propagação de esforços e fissuras concentradas entre o consolo C4 para o C6.

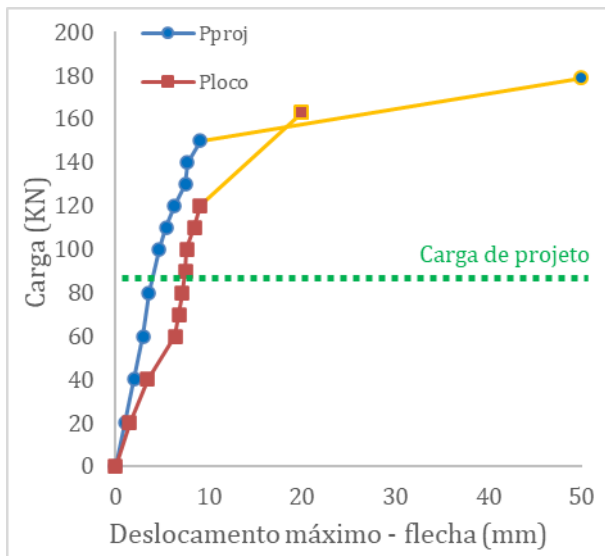


Figura 10. Gráfico Carga vs Deslocamento máximo. Fonte: Autores.

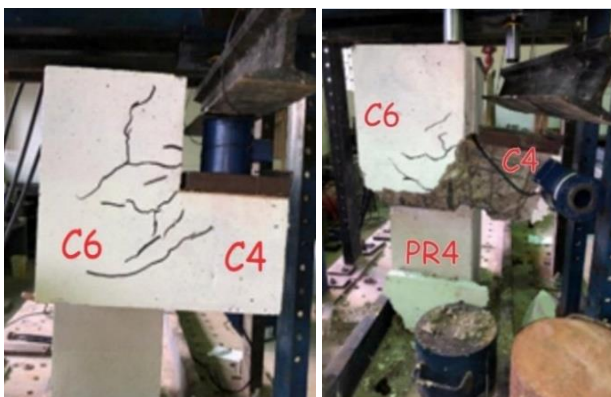


Figura 11. “Pproj” vs “Ploco”, situação pós ensaios. Fonte: Autores.

Este fenômeno de ruptura frágil também fora notado em outra pesquisa sobre ruptura de consolo pré-moldado em sinistro semelhante à da referência [16], realizado neste mesmo laboratório. O que sugere que exista de fato, de forma recorrente entre executores, uma negligência quanto ao detalhamento do elemento consolo somada a falta de controle da sobrecarga durante a concretagem da capa de lajes alveolares.

Diante das informações levantadas, dos dados coletados e analisados, das simulações e ensaios

realizados admite-se que as principais situações que levaram a estrutura pré-moldada romper foram:

- Execução incorreta da armação do consolo C4, não ocorrendo a correta transmissão dos esforços entre os consolos e o pilar (falta de ancoragem);
- Excesso de carga durante a concretagem da capa das lajes alveolares, espessura extra na altura da capa;
- Chapa metálica soldada na extremidade do consolo C4 e a viga, elemento que não foi o foco deste estudo, porém esta soldagem entre consolo e viga resultam em transmissão de momento torçor, não previsto em projeto.

6. CONCLUSÃO

Após análise dos projetos estruturais e dinâmica do sinistro constatou-se uma execução incorreta em relação ao projeto original (método biela e tirante), onde a armação do consolo C4 ocorreu de forma divergente (método do atrito-cisalhamento) e sem a ancoragem adequada, além disso, também foi identificado *in loco*, uma sobrecarga não prevista: peso excessivo oriundo da concretagem da capa das lajes alveolares. Este acúmulo de erros, usual em acidentes graves, contribuiu de forma significativa para as fatalidades

Apesar quantidade de armadura ser suficiente e dos materiais apresentarem características dúcteis, o sistema estrutural criado, em concreto armado, apresentou ruptura frágil, portanto rápida, excluindo possibilidade de fuga para as vítimas.

Pode-se caracterizar o perigo a vida conforme descrito no art. 256 do Código de Penal Brasileiro, neste caso consumado.

Dimensionamentos de sistemas cuja ruptura ocorre de modo frágil devem ser evitados a todo custo, conforme prescreve a bibliografia.

O embasamento proporcionado por esta pesquisa auxiliou na elaboração do laudo pericial de desabamento. A proximidade com a Academia é essencial para o órgão da Polícia Científica.

AGRADECIMENTOS

Este grupo de pesquisa gostaria de agradecer a Academia de Ciências Forenses da Polícia Científica do Paraná - PCP por fornecer os dados para a realização deste trabalho, bem como aos servidores do Laboratório de Estruturas e Materiais de Engenharia - LEME da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Campus Cascavel, por disponibilizar materiais e seus equipamentos que tornaram possíveis os ensaios experimentais e aos julgadores do Congresso Nacional de Criminalística do ano de 2022, realizado em Campinas –

SP, pela premiação do mesmo na trilha de Engenharia Forense.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J.B.A. Costa. Estudo Experimental de Consolos de Concreto com Fibras Moldados em Etapas Distintas dos Pilares. 2009. 124f. Dissertação de Mestrado (Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.
- [2] Decreto de Lei nº 3.689, de 3 de outubro de 1941. CPP - Código de Processo Penal. Inclusões pela lei nº 13.964 de 2019.
- [3] P. Fachote, L. Velho. Ciência forense: interseção justiça, ciência tecnologia. 2007. Pp 139-161. Revista tecnologia e sociedade. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2007.
- [4] Polícia Científica do Paraná - PCP. Laudo pericial 38.771/2021. Instituto de Criminalística, Unidade Oficial de Cascavel - PR, 2022.
- [5] Secretaria Nacional de Segurança Pública - SESP. Procedimento operacional padrão: perícia criminal/ Secretaria Nacional de Segurança Pública. Brasília: Ministério da Justiça, 242p, 2013.
- [6] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13752:1996: Perícias de engenharia na construção civil. Rio de Janeiro, 1996.
- [7] J.A. Wissmann. Curso de Engenharia Forense em Desabamentos e Soterramentos. Disponível em: <<https://lnkd.in/d7tq83Wb>> Acesso em: 23, fevereiro de 2021.
- [8] F. Leonhardt, E. Mönning. Construções de Concreto: Princípios Básicos Sobre a Armação de Estruturas de Concreto Armado. 3. ed. Rio de Janeiro: Ed. Interciência v. 3, 1978.
- [9] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6118:2014: Projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- [10] M.K. El Debs, A.T. Albuquerque. Levantamento dos sistemas estruturais em concreto pré-moldado para edifícios no Brasil. 2005. 13f. Encontro nacional de pesquisa-projeto-produção em concreto pré-moldado. São Carlos, 2005.
- [11] B.P. Hughes, N.I. Fattuhi. Reinforced Steel and Polypropylene Fiber Concrete Corbel Tests. *The Structural Engineer*, **67(4)**, 68-72, 1989.
- [12] F.M. Torres. Análise Teórico-Experimental de Consolos de Concreto Armado.1998. 112f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.
- [13] P.S.S. Bastos. Ancoragem e emenda de armaduras. 2015. 43f. Universidade Estadual Paulista, Bauru/SP, 2015.
- [14] J. Silveira. Análise experimental em consolo pré-moldado em concreto armado reproduzido do encontrado em local de desabamento. 2021. 55 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2022.
- [15] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5739:2016: Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2016.
- [16] M. Mazzuco, J.A. Wissmann. Estudo De Caso De Acidente Com Morte Em Estrutura Pré-Moldada: Análise Experimental De Caso De Ruína De Consolo Pré-Fabricado Em Concreto Armado. *A Barriguda: Revista Científica*, **6**, 475-493, 2016.