



ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia Civil



Colapsos de pontes: Lições aprendidas

HUGO ALBINO PIQUER BRANCO
Licenciado em Engenharia Civil

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Civil na Área de Especialização em Estruturas

Orientador:

Doutor Luciano Jacinto, Prof. Adjunto (ISEL)

Júri:

Presidente: Mestre Cristina F. X. de Brito Machado, Prof. Coordenadora (ISEL)

Arguente: Eng.º Armando António Marques Rito (ARITO)

Dezembro de 2013



ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia Civil

Colapsos de pontes: Lições aprendidas

HUGO ALBINO PIQUER BRANCO

Licenciado em Engenharia Civil

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Civil na Área de Especialização em Estruturas

Orientador:

Doutor Luciano Jacinto, Prof. Adjunto (ISEL)

Júri:

Presidente: Mestre Cristina F. X. de Brito Machado, Prof. Coordenadora (ISEL)

Arguente: Eng.º Armando António Marques Rito (ARITO)

Dezembro de 2013

COLAPSOS DE PONTES: LIÇÕES APRENDIDAS

RESUMO

Durante o desenvolvimento do projecto de uma ponte, uma das principais preocupações do engenheiro responsável é certificar-se de que as acções às quais a sua estrutura venha a estar sujeita não excedam a sua capacidade resistente, nem durante a sua execução, nem durante o seu período de vida. Ainda assim é impossível garantir que tal não venha a acontecer, quer devido à aleatoriedade das acções, quer devido à ocorrência de erros humanos graves, como comprovam os colapsos de pontes ocorridos no passado.

Uma vez que os colapsos de pontes têm normalmente consequências extremamente graves, é nossa obrigação tentar reduzir ao máximo a sua ocorrência. Para atingir este objectivo, uma das formas mais naturais é colher lições de acidentes ocorridos no passado, de modo a evitar a sua repetição no futuro.

Assim sendo, neste trabalho enumera-se uma lista de acidentes em pontes, quer ocorridos durante a construção, quer ocorridos durante o serviço, analisa-se as causas e o modo em como tais acidentes poderiam ter sido evitados.

BRIDGE COLAPSES: LESSONS LEARNED

ABSTRACT

During the development of a bridge project, one of the major concerns of the engineer in charge is to make sure that the actions to which the structure will be subject doesn't exceed the load capacity during construction or during their period of life. Yet it is impossible to guarantee that this won't happen, either due to the randomness of actions, either due to the occurrence of serious human error, as evidenced by the collapses of bridges occurred in the past.

Once the collapses of bridges usually have extremely serious consequences, it is our obligation try to minimize their occurrence. One way to achieve it is to learn with lessons from accidents in the past, in order to prevent their recurrence in the future.

Therefore, in this work we intend to enumerate a list of accidents on bridges occurring during construction and during service, and to analyze the causes and the way how these accidents could have been avoided.

PALAVRAS-CHAVE

Pontes

Colapsos

Lições aprendidas

KEYWORDS

Bridges

Collapses

Lessons Learned

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, quero agradecer ao Eng.^o Luciano Jacinto por toda a disponibilidade e pelo apoio incondicional para a execução deste trabalho final de mestrado. O seu conhecimento e experiência como engenheiro foram fundamentais para o desenvolvimento desta dissertação.

Gostaria de agradecer também à minha irmã, Tatiana Piquer Branco, pelo apoio nos momentos mais difíceis e por se prestar sempre a ajudar. Aos meus pais, João Piquer Branco e Isabel Piquer Branco, pela pessoa que sou hoje, sem eles era impossível concluir esta etapa da minha vida.

Aos meus amigos por toda a força e confiança ao longo destes anos, e por todas as histórias e momentos que partilhamos juntos.

ÍNDICE GERAL

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento do tema.....	1
1.2 Objectivos do trabalho	2
1.3 Metodologia	2
1.4 Estrutura do trabalho.....	3
2. COLAPSOS DE PONTES - VISÃO GERAL	5
2.1. Abordagem Histórica.....	5
2.2. Comissões de inquérito.....	8
2.2.1. Metodologia das comissões de inquérito	8
2.3. As Causas.....	10
2.3.1. Infra-escavação	10
2.3.2. Falhas durante a construção.....	14
2.3.3. Colisões de barcos, navios e de gelo flutuante	18
2.3.4. Colisões de comboios	21
2.3.5. Colisões de veículos	22
2.3.6. Incêndios e actos de vandalismo	23
2.3.7. Sismos	25
2.3.8. Ventos fortes e furacões	27
2.3.9. Falta de manutenção	28
3. COLAPSOS DE PONTES - CASOS PARTICULARES	31
3.1. I-35W Highway Bridge, Minneapolis, Minnesota (2007).....	31
3.1.1. Breve história	31
3.1.2. O acidente.....	32
3.1.3. Descrição da ponte	34
3.1.4. Após o colapso	36
3.1.5. As causas do colapso	43
3.1.6. Sequência do colapso.....	44
3.1.7. Impacto Socioeconómico do colapso.....	47
3.2. Sgt. Aubrey Cosens V.C. Memorial Bridge (2003)	48
3.2.1. Breve história	48
3.2.2. O acidente.....	48
3.2.3. Descrição da ponte	49
3.2.4. As causas	51

3.2.5. Sequência do colapso.....	53
3.3. Ponte Hintze Ribeiro (2001).....	56
3.3.1 Breve história	56
3.3.2. O Acidente	57
3.3.3. Descrição da ponte	58
3.3.4. Após o colapso	61
3.3.5. As hipóteses de colapso	62
3.3.6. As causas	63
4. LIÇÕES APRENDIDAS.....	67
5. CONCLUSÕES	71
BIBLIOGRAFIA	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Colapso da ponte Silver (1967). [3].....	6
Figura 2 – Colapso da ponte Walnut Street (1996). [http://en.wikipedia.org/wiki/Walnut_Street_Bridge_%28Harrisburg,_Pennsylvania%29]	12
Figura 3 – Colapso durante a construção da ponte I-70 em Denver, Colorado (2004). [http://www.boston.com/news/nation/gallery/020807_bridge2?pg=6] ..	15
Figura 4 – Colapso da ponte I-40 em Oklahoma (2002). [http://swtimes.com/sections/news/lavaca-family-killed-2002-bridge-collapse-remembered.html]	19
Figura 5 – Incêndio na ponte I-95 na Pennsylvania (2004) [http://www.ops.fhwa.dot.gov/publications/ar_handbook/arh2.htm]	24
Figura 6 - Colapso da ponte I-5 em Los Angeles (Califórnia) causado por um sismo de magnitude 6.7 na escala de Richter (1994). [http://www.fhwa.dot.gov]	26
Figura 7 - Colapso da ponte Tacoma Narrows (1940). [http://www.nwrain.com/~newtsuit/recoveries/narrows/gg.htm]	27
Figura 8 - Colapso da ponte Daman na Índia por falta de manutenção. (2003) [http://lumq.com/01/collapse_of_bridges/]	28
Figura 9 - Ponte I-35W no ano de 2003. [5].....	31
Figura 10 - Imagem do colapso da ponte I-35W. [5].....	33
Figura 11 - Modelo da ponte I-35W. [6]	34
Figura 12 - Exemplo de um aparelho de apoio à base de roletes utilizado na ponte I-35W. [6].....	35
Figura 13 - Perfil transversal da ponte I-35 W. [7]	36
Figura 14 - Um nó típico da ponte I-35W constituído por placas <i>gusset</i> . [6] ...	36
Figura 15 - Identificação dos nós na ponte I-35W. [7]	37
Figura 16 - Ponte I-35W após o colapso. [6]	37
Figura 17 - Ponte I-35W (zona Sul) após o colapso. [6]	38
Figura 18 – Colapso da zona Sul da ponte I-35W. [5].....	39
Figura 19 – Secção central da ponte I-35W após o colapso. [5]	40
Figura 20 – Parte central da ponte I-35 W. [6].....	40
Figura 21 – Secção Norte da ponte I-35W após o colapso (parte 1). [5].....	41
Figura 22 – Secção Norte da ponte I-35W após o colapso (parte 2). [5].....	42

Figura 23 - Obras no dia do colapso da ponte I-35W. [6]	44
Figura 24 – Capacidade de carga do nó U10. [5].....	45
Figura 25 – Capacidade de carga do nó L11. [5].....	46
Figura 26 - Ponte I-35W <i>Saint Anthony Falls</i> . [http://www.gti-usa.net/Saint-Anthony-Falls-Replacement-Bridge.shtml]	47
Figura 27 – Ponte Sgt. Aubrey Cosens V.C. Memorial Bridge. [9]	48
Figura 28 – Comprimento da Ponte. [10].....	49
Figura 29 – Desenho esquemático da ligação dos pendurais ao arco da ponte. [10].....	50
Figura 30 – Posicionamento dos pendurais após o acidente. [9]	51
Figura 31 – Flexão não uniforme. [10].....	52
Figura 32 – Abertura de fendas devido aos esforços. [10]	52
Figura 33 - Análise da <i>fast fracture</i> do pendural 1. [9].....	53
Figura 34 - Pendural 1 depois de ter fracturado. [10]	54
Figura 35 – Colapso parcial da ponte. [10].....	55
Figura 36 - Ponte Sgt. Aubrey Cosens V.C. Memorial Bridge após a sua reconstrução. [10].....	55
Figura 37 - Ponte Hintze Ribeiro durante uma cheia nos anos 60. [http://fotosdotempo.blogspot.pt/2011/03/entre-os-rios-recordando-tragedia-de-4.html]	56
Figura 38 - Ponte Hintze Ribeiro no dia do colapso. [http://fotosdotempo.blogspot.pt/2011/03/entre-os-rios-recordando-tragedia-de-4.html]	57
Figura 39 - Representação esquemática da ponte Hintze Ribeiro com a altura dos pilares a ser arbitrária (variável entre 15 e 30 m).	59
Figura 40 - Ponte Hintze Ribeiro no ano 2000. [http://fotosdotempo.blogspot.pt/2011/03/entre-os-rios-recordando-tragedia-de-4.html]	60
Figura 41 - Ponte Hintze Ribeiro no dia 4 de Março de 2001. [http://fotosdotempo.blogspot.pt/2011/03/entre-os-rios-recordando-tragedia-de-4.html]	62
Figura 42 - Ponte Hintze Ribeiro durante o verão de 1970. [http://fotosdotempo.blogspot.pt/2011/03/entre-os-rios-recordando-tragedia-de-4.html]	64

Figura 43 - Construção da <i>Newton Navarro Bridge</i> , Brasil. [http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=463633].....	68
Figura 44 - Obras de manutenção da Ponte 25 de Abril (parte 1). [http://blogcatim.blogspot.pt/2013/06/plataforma-inovadora-para-manutencao-na.html]	69
Figura 45 - Obras de manutenção da Ponte 25 de Abril (parte 2). [http://blogcatim.blogspot.pt/2013/06/plataforma-inovadora-para-manutencao-na.html]	69

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Numero de mortes provocadas pela queda de pontes. [3]	5
Quadro 2 – Numero da queda de pontes entre 1970 e 2009. [1]	6
Quadro 3 - As principais causas das quedas de pontes entre 1970 e 2009.[1].	7
Quadro 4 – tabela baseada em dados fornecidos pelo <i>Hennepin County</i>	33
Quadro 5 - Deslocamento aproximado dos aparelhos de apoio nos pilares 5, 6 e 8. [6]	43
Quadro 6 - Cotas aproximadas da base dos caixões.	60

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento do tema

Num projecto de uma ponte o projectista procura que as acções a que a estrutura venha a estar sujeita durante a sua construção e durante a sua vida não excedam a sua capacidade resistente. No entanto está implícito nos próprios critérios de segurança que tal acontecimento pode ocorrer. E a prova disso é que acidentes graves, incluindo colapsos estruturais, têm ocorrido no passado. [12]

É amplamente aceite que os colapsos estruturais devem-se em geral a erros humanos graves [14], quer os ocorridos durante a fase de projecto, quer os ocorridos durante a construção e durante a vida da estrutura (falta de manutenção).

Embora seja muito difícil garantir que tais erros não possam acontecer, temos a obrigação de aprender com os erros do passado, procurando-se evitar, na medida do possível, que se repitam no futuro.

Este aspecto assume particular importância atendendo a que colapsos estruturais têm normalmente consequências extremamente gravosas, não só económicas, mas também sociais e até políticas, especialmente se os acidentes forem acompanhados de perda de vidas humanas.

Existe uma enorme necessidade de entender as condições que dão origem a esses erros de forma a evita-los, para que no futuro a perda de vidas humanas seja minimizada.

Acontecimentos históricos e alguns casos particularmente estudados demonstram as causas de cada tipo de falha/erro. Por isso, os projectos futuros podem fazer uso dessas mesmas deficiências que foram identificadas e que ocorreram no passado, com o objectivo de desenvolverem directrizes para uma prática segura.

Os erros/falhas ocorrem na sua grande maioria durante a fase de construção da obra e não apenas depois da sua construção. As lesões e

potenciais mortes em trabalhadores da construção civil são de longe superiores ao número de mortes dos utentes após a sua construção.

Assim, julga-se de extrema utilidade a investigação de acidentes graves ocorridos. O tema do trabalho que agora se propõe reside justamente nas lições aprendidas com colapsos de pontes.

1.2 Objectivos do trabalho

Este trabalho pretende apresentar uma lista de acidentes em pontes, quer ocorridos durante a construção quer ocorridos durante o serviço. Depois de apresentada essa lista, descreve-se a causa, ou causas, para tais acontecimentos e como se poderiam ter evitado. Um dos objectivos principais do trabalho consiste em colher lições de acidentes do passado de modo a minimizar a sua ocorrência no futuro.

Depois de uma análise feita a várias pontes, este trabalho incidirá principalmente em acidentes ocorridos recentemente em todo o mundo [13], não esquecendo os ocorridos em Portugal.

1.3 Metodologia

A metodologia do desenvolvimento deste trabalho consiste numa análise detalhada de vários colapsos de pontes em todo o mundo.

Para cada colapso seleccionado serão desenvolvidos os seguintes tópicos:

- 1) Descrição da estrutura
- 2) Descrição do acidente e suas causas.
- 3) Como se poderia ter evitado o acidente.
- 4) Lições aprendidas.

1.4 Estrutura do trabalho

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos. No primeiro é realizada uma introdução ao tema do trabalho juntamente com os objectivos e a sua metodologia.

No capítulo 2, é feita uma abordagem ao tema de uma forma geral. Para tal, é apresentada uma lista com as causas de colapso e exemplos de acidentes para cada uma delas.

No terceiro capítulo são analisados três casos particulares ao pormenor. É feita uma descrição de cada um dos acidentes e a sequência de cada colapso, e apresentadas as causas que estiveram na sua origem.

O capítulo 4 faz uma análise geral sobre as causas que estão na origem dos acidentes ocorridos, exemplificados anteriormente, e o que fazer para evitá-las. O intuito é no futuro ter em consideração tais causas, de forma a ser possível prolongar ao máximo o tempo de vida de uma ponte.

Por fim, no capítulo 5, apresentam-se as principais conclusões.

2. COLAPSOS DE PONTES - VISÃO GERAL

2.1. Abordagem Histórica

A construção de pontes tem evoluído significativamente nos últimos anos, quer em materiais, quer em processos construtivos. No entanto acidentes e colapsos continuam a ocorrer, normalmente com consequências extremamente gravosas (figura 1), agravados muitas vezes com perdas de vidas humanas, como ilustrado no quadro 1.

Ano	Ponte	País	Mortes
1994	Seongsu Buolge	Coreia	32
1999	Qi River Pedestal Bridge	China	40
2001	Hintze Ribeiro Bridge	Portugal	70
2003	Daman Bridge	India	25
2005	Spain Bridge	Espanha	6
2006	Ulta Pul Bridge	India	33
2007	Tuo River Bridge	China	34

Quadro 1 – Numero de mortes provocadas pela queda de pontes. [3]

Uma grande variedade de soluções estruturais e métodos construtivos têm sido usados ao longo dos anos. A qualidade dos materiais e as técnicas utilizadas hoje em dia em nada tem a ver com as que eram usadas em outros tempos, mas no entanto os acidentes continuam a ocorrer.

Antes de construir uma ponte é importante estabelecer uma boa compreensão entre os pontos críticos do projecto da ponte e as razões para potenciais fracassos da mesma. Este conhecimento permite fazer com que as inspecções sejam realizadas com mais atenção nesses locais.

As pontes prestes a colapsar normalmente apresentam alguns sintomas que podem ajudar a prever a situação. Por isso é muito importante uma

inspeção regular para verificar se a ponte está segura e que nenhum material que a constitui se deteriorou. [1]



Figura 1 - Colapso da ponte Silver (1967). [3]

Ano	Estados Unidos e Canadá	Europa	Resto do mundo	Total
1970 - 1975	1	3	3	7
1976 - 1980	1	2	2	5
1981 - 1985	3	0	1	4
1986 - 1990	4	2	2	8
1991 - 1995	2	1	2	5
1996 - 1999	1	1	3	5
2000 - 2005	7	2	7	16
2006 - 2009	5	2	14	21
Total	24	13	34	71

Quadro 2 – Numero de quedas de pontes entre 1970 e 2009. [1]

O quadro 2 apresenta um resumo do número de pontes que colapsaram desde 1970 até 2009. Pode-se concluir que ao longo dos anos houve um aumento do número de quedas. Este aumento pode dever-se a três factores:

- O número de pontes aumentou em todo o mundo;
- As pontes construídas vão envelhecendo;
- Muitas das pontes tem falta de manutenção.

Durante o período de 2006 a 2009 foi onde houve um maior número de quedas de pontes. Os dados constantes no quadro 2 correspondem a uma média de 1,8 colapsos por ano em todo o mundo.

Principais causas	Estados Unidos e Canadá	Europa	Resto do mundo	Total
Atingida por um comboio	1	2	4	7
Atingida por um barco	6	1	2	9
Infra-escavação	1	2	1	4
Colapso durante a construção	1	1	9	11
Colapso durante a reconstrução	1	0	1	2
Excesso de carga	2	0	9	11
Corrosão	2	0	2	4
Erro de projecto	1	1	0	2
Cheia	1	1	1	3
Desconhecido	1	0	2	3
Outra	7	5	3	15
Total	24	13	34	71

Quadro 3 - As principais causas das quedas de pontes entre 1970 e 2009.

[1]

O quadro 3 apresenta o número de colapsos de pontes de acordo com as suas principais causas. O maior número de colapsos ocorre durante a fase de construção mas também devido à sobrecarga presente em muitas das pontes. Outra das causas muito recorrente é o colapso provocado pela colisão de barcos.

Em última instância, a maioria das causas mencionadas podem resumir-se a uma única causa: erro humano.

2.2. Comissões de inquérito

Quando ocorre um acidente grave numa ponte, é normalmente nomeada uma comissão de inquérito. As comissões de inquérito procuram encontrar explicações para os fracassos das pontes fazendo uma análise rigorosa para descobrir as suas principais causas.

A seguir ao colapso, o engenheiro que é chamado ao local desempenha um papel fundamental no decorrer da investigação. As suas decisões vão afectar a sequência da mesma. Este profissional é a pessoa mais qualificada para o caso. Os engenheiros responsáveis pela investigação vão até à raiz do problema no sentido de apurarem todas as responsabilidades pelo acidente. Com os conhecimentos adquiridos em erros passados, o engenheiro está melhor preparado tecnicamente para enfrentar desafios futuros sabendo que se o critério de reconstrução for bem implementado, o erro pode ser evitado. [2]

2.2.1. Metodologia das comissões de inquérito

As primeiras medidas a serem tomadas após o colapso de uma ponte são fundamentais. As questões que um engenheiro se depara após a queda da ponte são várias, por isso é necessário recolher provas, ter acesso a toda a documentação relativa à ponte e fazer entrevistas a vários trabalhadores. Todas estas informações levam o engenheiro a tirar várias conclusões sobre as potenciais causas do acidente.

Por vezes ocorrem acidentes no local de trabalho que podem provocar mortes e feridos graves devido a várias situações como a quedas de andaimes, electrocussões, mau funcionamento de máquinas, mau manuseamento de

instrumentos mecânicos, entre outros. Se no colapso da ponte estiver envolvido um acidente de trabalho, a investigação deve verificar se o plano de saúde, higiene e segurança foi cumprido.

De seguida apresenta-se uma lista de potenciais deficiências que um engenheiro poderá encontrar no local onde a investigação será feita: [2]

“1. Inability to define loads accurately, such as magnitude and unpredictable level of stress distribution from settlement;

2. Limited redundancy in the structural system;

3. Inability to fully include plastic behavior or composite action between the concrete deck slab and repeated beams, arching action, creep and shrinkage strain distribution in the deck slab;

4. Lack of information on fracture mechanics in general and lack of understanding of fracture of new materials, in particular;

5. Inelastic behavior of connections and joints, splices, gusset plates, bolts, and welds;

6. Complex behavior as a unified assembly of uncombined multiple components of mixed (old and new) materials and structural systems, resulting from rehabilitation or widening methods;

7. Delamination and reduction in strength of the concrete deck due to deicing salts (as observed from chain drag test);

8. Malfunction and locking of old bearing assemblies due to lack of maintenance, freezing of expansion bearings, large thermal forces causing compression, and local buckling of truss members and flanges;

9. Inability to prevent scour at pile top;

10. Inability to fully incorporate different types of soil interaction at abutments;

11. Lack of drainage behind abutments and pressure build-up behind abutments;

12. Inadequacy of Rankine, Coulomb, or Mononobe-Okabe theories for non-homogenous soil conditions for wing walls and stub abutments resulting in unstable design.”

As causas que estarão na origem do fracasso da ponte irão ser mencionadas no relatório de investigação (relatório judicial).

2.3. As Causas

As causas mais comuns de acidentes nas pontes são:

- Infra-escavação;
- Fadiga;
- Falhas durante a construção;
- Colisões de barcos, navios e gelo flutuante;
- Colisões de comboios;
- Colisões de veículos;
- Explosões;
- Incêndios;
- Sismos;
- Tornados, ventos fortes;
- Falta de inspeção/manutenção.

De seguida fala-se em algumas destas causas com mais pormenor onde é apresentada uma lista de pontes para cada causa e também algumas medidas preventivas para as mesmas não se voltarem a repetir.

2.3.1. Infra-escavação

A infra-escavação é uma enorme ameaça para as estruturas das pontes. A erosão é induzida pela acção das ondas mas também devido às fortes correntes de rios. Entre os diferentes factores que provocam a erosão estão as variações de velocidade das correntes, a localização da ponte e o efeito das várias ondas. As pontes situadas nos rios são as mais afectadas.

Erosão das margens

A erosão nas margens, na sua grande maioria, pode ser identificável pelo tipo de solo que as constitui. Este solo pode ser fraco, carente em vegetação e com barrancos de elevada inclinação. Quando tal acontece, poderá ser necessário recorrer a algum tipo de estabilização.

Uma das estabilizações mais utilizadas é o uso de gabiões e *rip raps* que podem ser colocados tanto a montante como a jusante da ponte ou até junto da mesma. [4]

Erosão do fundo

Existem três tipos de erosão do fundo do rio que podem ocorrer:

A erosão generalizada - Onde existe um rebaixamento do leito do rio, quer a jusante, a montante ou sob a ponte.

A erosão de contracção - Um tipo de erosão muito idêntico à generalizada, mas que apenas pode ocorrer sob a ponte, entre os encontros.

A erosão localizada - Aquela que está limitada ao material adjacente aos pilares e aos encontros. [4]



Figura 2 – Colapso da ponte Walnut Street (1996).

[http://en.wikipedia.org/wiki/Walnut_Street_Bridge_%28Harrisburg,_Pennsylvania%29]

Lista de acidentes de pontes devido à Infra-escavação: [2]

- Pontes nos E. U. A.
 - *Interstate 29 West Bridge, Sioux City, IA (1962)*
 - *Bridge near Charleston, SC Cooper River, SC (1965)*
 - *Interstate 17 Bridge Black Canyon, AZ (1978)*
 - *Schoharie Creek Bridge Near Fort Hunter, NY (1987)*
 - *Twin I-5 Bridges (Arroyo Pasajero River), Coalinga, CA (1995)*
 - *Tennessee River Bridge Clifton, TN (1995)*
 - *Walnut Street Bridge, Harrisburg, PA (1996)*
 - *Hatchie River Bridge Near Covington, TN (1999)*

- *Interstate 20 bridge on Salt Draw River, Near Pecos, TX (2004)*
- *Lee Roy Selmon Expressway Tampa Bay, FL (2004)*
- *Rural Bridge (Beaver Dam Creek) Near Shelby, NC (2004)*

- Pontes no Canadá
 - *Bridge over a river British Columbia (1981)*

- Pontes na Alemanha
 - *Bridges over Weser River Bremen (1947)*
 - *Bridge over Mosel River Near Koblenz (1947)*
 - *Esslingen Bridge Esslingen (1969)*
 - *Bridges in Germany South and East Germany (2002)*

- Pontes no Reino Unido
 - *Drimsallie Bridge Inverness, Scotland (1973)*
 - *Glanrhyd Railway Bridge over River Towy Near Llandeilo, Wales (1987)*
 - *Multispan masonry arch Ness viaduct Inverness, Scotland (1989)*
 - *Five-span bridge at Forteviot, (May River), 10 km south of Perth, Scotland, (1993)*

- Pontes na Austria
 - *Motorway Bridge Near Salzburg (1959)*
 - *Traun River, Between Linz and Selzthal (1982)*
 - *bridge over Inn River, Near Kufstein (1990)*
 - *Bridge in Braz Braz, Vorarlberg (1995)*
 - *Bridges in Austria Various locations (2002)*

- Pontes em Portugal
 - ***Hintze Ribeiro, Castelo de Paiva, Portugal (2001) (Será analisada mais à frente nesta dissertação)***

- Pontes na Índia
 - *Bridge between Jabalpur and Gondia, Madhya Pradesh (1984)*
 - *Bridge (Nalgonda district) Near Veligonda (2005)*
 - *Railway bridge India (2005)*
 - *Long span suspension bridge over river, Daman (2003)*
- Pontes na China
 - *Two bridges Central China (2002)*
- Pontes na Coreia do Sul
 - *Bridge over river Seoul (2004)*
- Pontes na Austrália
 - *River bridge 40 km west of Charters, Towers Queensland (2005)*

Prevenções que se devem tomar contra a Infra-escavação [2]:

- Devem ser feitas inspeções subaquáticas com regularidade, de maneira a prever eventuais desgastes de pilares.
- Repor os materiais erodidos sempre que necessário.

2.3.2. Falhas durante a construção

Sabendo que é nesta fase em que uma ponte está mais vulnerável a erros, e que é durante esta etapa inicial que ocorre um maior número de falhas, é necessário ter um cuidado elevado com todos os processos construtivos. A falta de controlo da qualidade dos materiais, uma construção excessivamente rápida e a fadiga do pessoal poderão ser alguns dos factores que estão na origem do erro. Durante a construção existem vários itens que devem ser verificados de forma a prevenir possíveis falhas.

Alguns erros comuns incluem [2]:

1. Inadequada colocação do cimbre ou a sua remoção prematura;
2. Contraventamento insuficiente;
3. Sequencia impropria de betonagem;
4. Sequencia construtiva inadequada;
5. Traçado incorrecto do traçado dos cabos de pré-esforço;
6. Deficiências de soldadura;
7. Espessura insuficiente das chapas *gusset*;



Figura 3 – Colapso durante a construção da ponte I-70 em Denver, Colorado (2004).

[http://www.boston.com/news/nation/gallery/020807_bridge2?pg=6]

Lista de acidentes de pontes devido a erros durante a construção: [2]

- Pontes nos Estados Unidos:
 - *Hinton truss bridge West Virginia (1949)*
 - *Sullivan Square Viaduct motorway bridge Boston, Massachusetts (1952)*
 - *Buckman Bridge Jacksonville, Florida (1970)*

- *Motorway bridge (Arroyo Seco River) Near Pasadena, California (1972)*
- *Concrete 5-span box girder bridge near, Near Rockford (1979)*
- *Multiple span box girder bridge East Chicago, Indianapolis (1982)*
- *Prestressed concrete precast box girder bridge Saginaw, Michigan (1982)*
- *Walnut Street Viaduct over I-20 Denver, Colorado (1985)*
- *El Paso bridge El Paso, Texas (1987)*
- *Motorway bridge Near Seattle, Washington (1988)*
- *Box girder bridge Los Angeles, California (1989)*
- *Baltimore bridge Baltimore, Maryland (1989)*
- *Truss bridge Concord, New Hampshire (1993)*
- *3-span 3-girder composite bridge Near Clifton, Tennessee (1995)*
- *Marcy bridge (Utica-Rome Expressway project) Marcy, New York (2002)*
- *Imola Avenue Bridge Napa, California (2003)*
- *Bridge near Pawnee City Near Pawnee City, Nebraska (2004)*
- *I-70 Bridge Denver, Colorado (2004)*

- Pontes no Canadá
 - *Dawson Creek suspension bridge (Peace River) British Columbia (1957)*
 - *Second Narrows Bridge (Gerber hinge) Vancouver (1958)*
 - *Arch bridge over Rideau River Ottawa (1966)*
 - *3-span arch bridge Elwood (1982)*
 - *Composite bridge near Sept-Iles Near Quebec (1984)*

- Pontes na Alemanha
 - *Motorway bridge Near Frankenthal (1940)*
 - *Hindenburg bridge over Rhine River Cologne (1945)*
 - *Motorway composite bridge Near Kaiserslautern (1954)*
 - *Nordbrücke bridge over Rhine River Dusseldorf (1956)*

- *Continuous motorway bridge Near Limburg (1961)*
- *Heidingsfeld motorway composite bridge Heidingsfeld (1963)*
- *Vorland Rees-Kalkar plate girder bridge Between Rees and Kalkar (1966)*
- *Bridge near Wennigsen, Niedersachsen Near Wennigsen, Niedersachsen (1971)*
- *Steel box girder bridge over Rhine River Koblenz (1971)*
- *Continuous Hangbrücke over Laubachtal Near Koblenz (1972)*
- *Steel box girder bridge Zeulenroda (1973)*
- *Bridge over Leubas River Near Kempten (1974)*
- *Brohltal bridge, segmental construction Brohltal (1974)*
- *Timber truss Bad Cannstatt (1977)*
- *13-span Rottachtal bridge Near Oy (1979)*
- *Bridge near Dedensen, Near Dedensen (1982)*
- *Simple span, steel truss bridge Road bridge (1982)*
- *Bridge on DB Lohr-Wertheim railway line Near Kreuzwertheim (1984)*
- *Composite Czerny Bridge Heidelberg (1985)*
- *New (composite) Grosshesselohe bridge Munich (1985)*
- *A3 motorway bridge (Main River) Near Aschaffenburg (1988)*
- *Approach bridge (beam-and-slab) Cologne-Wahn Airport (1995)*

- Pontes no Reino Unido
 - *Barton Bridge Lancashire, England (1959)*
 - *Cleddau Bridge Milford Haven, Wales (1970)*
 - *Loddon Bridge Berkshire, England (1972)*

- Pontes na Austria
 - *Fourth Danube Bridge (plate box girder bridge) Vienna (1969)*
 - *Soboth prestressed concrete bridge Soboth (1970)*
 - *Prestressed concrete bridge over Tauern motorway Gmund (1975)*

- *Rheinbrücke bridge over Rhine River Near Hochst, Vorarlberg (1982)*

- Pontes em Espanha
 - *Highway bridge Southern Spain (2005)*

- Pontes na Índia
 - *Bihar district bridge Bihar (1978)*

- Pontes no Japão
 - *Prestressed concrete bridge Avato, Japan (1979)*
 - *Tokyo West bridge over Tama River Tokyo West (1984)*
 - *Hiroshima bridge Hiroshima (1991)*

- Pontes na Austrália
 - *Westgate Bridge over Yarra River Melbourne (1970)*
 - *Loddon River bridge Near Victoria (1972)*

2.3.3. Colisões de barcos, navios e de gelo flutuante

As pontes, mais especificamente os seus pilares, situadas em rios com nevoeiros e escuridão, são ocasionalmente atingidas por barcos. Os pilares, em regiões muito frias, poderão ser atingidos também por gelo flutuante, provocando por vezes danos extremamente graves nas pontes. [2]



Figura 4 – Colapso da ponte I-40 em Oklahoma (2002).

[<http://swtimes.com/sections/news/lavaca-family-killed-2002-bridge-collapse-remembered.html>]

A solução estrutural para as pontes situadas em águas navegáveis tem que ter em conta a possível colisão destes itens, para tal é necessário adoptar um método construtivo seguro, mas ao mesmo tempo económico. [2]

Lista de acidentes de pontes devido a impactos de barcos, navios e gelo flutuante: [2]

- Pontes nos Estados Unidos:
 - *Swing bridge Boston-Charlestown, Massachusetts (1945)*
 - *John P. Grace Memorial Bridge (Cooper River), South Carolina (1946)*
 - *Bridge near Charleston (Cooper River), South Carolina (1965)*
 - *Chesapeake Bay Bridge Annapolis, Maryland (1970)*

- *Sidney-Lanier Bridge Brunswick, Georgia (1972)*
- *Chesapeake Bay Bridge Annapolis, Maryland (1972)*
- *Lake Pontchartrain bridge Lake Pont (1974)*
- *21-span, Pass Manchac Bridge Louisiana (1976)*
- *Benjamin Harrison Memorial Bridge (James River) Near Hopewell, Virginia (1977)*
- *Bridge over Passiac River Union Avenue, New Jersey (1977)*
- *Southern Pacific Railroad Bridge Berwick Bay, Louisiana (1978)*
- *Sunshine Skyway Bridge Near St. Petersburg, Florida (1980)*
- *Herbert C. Bonner Bridge (Oregon Inlet) North Carolina (1990)*
- *Truss bridge Near Mobile, Alabama (1993)*
- *Queen Isabella Causeway South Padre Island, Texas (2001)*
- *Interstate 40 Bridge over the Arkansas River Webber Falls, Oklahoma (2002)*

- Pontes no Canadá:
 - *Fraser River Swing Bridge New Westminster/Vancouver (1975)*

- Pontes na Austrália:
 - *Tasman Bridge over Derwent River Hobart, Tasmania (1975)*

- Pontes na China:
 - *Bridge over river Southern China (2007)*

- Pontes na Suécia:
 - *Almo Bridge Near Gothenburg, Sweden (1980)*

Algumas acções preventivas a ter em conta: [2]

1. Garantir iluminação adequada na ponte de maneira a evitar acidentes durante a noite e durante períodos de nevoeiros;
2. Melhorar a formação dos capitães e das suas respectivas equipas para as viagens.

2.3.4. Colisões de comboios

O impacto acidental de comboios é outra das causas frequente nos acidentes em pontes. Mais uma vez, pode-se dizer que tal ocorre devido a erro humano.

Lista de acidentes devido a impacto de comboios: [2]

- Pontes nos Estados Unidos:
 - *Alabama Rail Bridge Alabama (1979)*
 - *Turkey Creek Bridge Sharon Springs, Kansas (2002)*
 - *West Grove Bridge Silver Lake, Kansas (2004)*

- Pontes na Alemanha
 - *2-span bridge (over railway line) Near Eschede (1998)*
 - *Wuppertal Schwebebahn bridge over Wupper River, Wuppertal Schwebebahn (1999)*

- Pontes no Reino Unido
 - *St. John's Bridge London (1957)*

- Pontes na Índia
 - *Bridge over Beki River Northeast of India (1977)*

- Pontes na Austrália
 - *Bridge near Granville Station over railway line, Sydney (1977)*

Acções preventivas [2]:

1. Diminuir a velocidade dos comboios de maneira a prevenir possíveis descarrilamentos.
2. Melhorar a coordenação entre os maquinistas e os responsáveis das estações.
3. Os engenheiros deverão estudar as causas dos acidentes e incorporar modificações de modo a prevenir futuras falhas.

2.3.5. Colisões de veículos

O impacto de veículos pode originar danos irreparáveis nas pontes. Nos meses de inverno, a formação de camadas de gelo no alcatrão pode criar uma superfície escorregadia para as rodas dos veículos. O gelo pode provocar a deterioração do alcatrão e criar, desta forma, um maior risco para os veículos.

Lista de acidentes em pontes devido a impacto de veículos: [2]

- Pontes nos Estados Unidos:
 - *Goose River Bridge Rockport, Maine (1947)*
 - *Truss bridge over Milwaukee River Trenton, Wisconsin (1980)*
 - *Truss bridge Shepherdsville, Kentucky (1989)*
 - *Historic Tewksbury Township pony truss bridge Hunterdon County, New Jersey (2001)*
 - *Highway 14 overpass over I-45 60 miles south of Dallas, Texas (2002)*
 - *I-95 bridge Bridgeport, Connecticut (2004)*

- Pontes na Alemanha
 - *2-span bridge over motorway A2 Near Dortmund (1979)*
 - *2-span composite bridge over motorway A3 Near Duisburg (1979)*
 - *2-span continuous composite bridge over motorway A1 Near Sittensen (1979)*
 - *Suspension bridge over Dortmund-Ems Canal Near Munster (1980)*
 - *Bridge over Mittlerer Ring Munich (1981)*

- Pontes no Reino Unido
 - *Bridge over M62 motorway Near Manchester, England (1975)*
 - *Staffordshire, England (2005)*

Acções preventivas [2]:

1. Garantir uma drenagem adequada das plataformas durante as tempestades.
2. Garantir um degelo eficiente após queda de neve e colocar sinais de alerta em pontes cobertas de neve.
3. Melhorar a sinalização de trânsito.
4. Multas pesadas para quem conduz com excesso de álcool.
5. Os condutores não devem estar sob a influência de drogas.

2.3.6. Incêndios e actos de vandalismo

Sabe-se que os actos de vandalismo são fenómenos que saem na maioria das vezes do controlo do Homem. Deve-se sempre ter em conta este tipo de situações. Por isso, algumas medidas deverão ser tomadas de forma a ajudar a prevenir e também a resolver este tipo de situações.

Quando se fala em incêndios, não estamos apenas a referir-nos a fogo posto propositadamente, mas também a fogos causados involuntariamente. O capotamento de camiões e veículos ligeiros originam, por vezes, o derramamento de gasolina e gasóleo que poderão dar origem a graves incêndios em pontes. [2]



Figura 5 – Incêndio na ponte I-95 na Pennsylvania (2004)

[http://www.ops.fhwa.dot.gov/publications/ar_handbook/arh2.htm]

Contudo, existem no local planos de emergência e medidas de prevenção que devem ser tomadas de forma a prevenir potenciais ameaças. No entanto os desastres continuam a acontecer.

Lista de acidentes de pontes devido incêndios: [2]

- Pontes nos Estados Unidos
 - *Two U-section bridges (Floyd River) South of Le Mars, Iowa (1941)*
 - *Notre Dame Bridge Manchester, New Hampshire (2003)*
 - *I-95 bridge Northeast of Philadelphia, Pennsylvania (2004)*
 - *Wooden bridge spanning Rio Hondo flood control channel Pico Rivera, California (2005)*

- Pontes no Reino Unido
 - *Tubular Britannia Bridge Menai Straits, Whales (1970)*
 - *Flyover over A406, Staples Corner London, England (1992)*

Algumas acções preventivas que deverão ser tomadas [2]:

1. Os equipamentos de extinção de fogo devem estar localizados perto das pontes, sobretudo nos casos em que a estação dos bombeiros se localiza a mais de uma hora do local em questão.
2. As pontes de madeira devem ser pintadas com tinta resistente ao fogo e ser regularmente cuidadas com um spray anti-fogo.

2.3.7. Sismos

Os sismos são uma enorme ameaça para as pontes. O impacto dos danos provocados por estes é grande e como tal é necessário dimensionar as estruturas de modo a minimiza-lo.

Os danos causados por um sismo estão classificados em duas categorias: directos e indirectos. Os primeiros são considerados o somatório dos custos de reparação dos elementos da rede que foi afectada. Os segundos (danos indirectos) têm a ver com a forma como a economia é afectada pela ruptura da rede de transportes. Quanto mais a economia estiver desenvolvida na zona afectada pelo sismo, maior serão os custos indirectos. [8]

Os sismos podem provocar danos em qualquer parte da estrutura: fundações, pilares, encontros, apoios.



**Figura 6 - Colapso da ponte I-5 em Los Angeles (Califórnia) causado por um sismo de magnitude 6.7 na escala de Richter (1994).
[<http://www.fhwa.dot.gov>]**

Lista de acidentes de pontes devido a sismos: [2]

- Pontes nos Estados Unidos:
 - *I-5 and Antelope Valley Freeway interchange Near San Fernando, CA (1971)*
 - *Cypress Freeway Oakland, California (1989)*
 - *Section of east span of San Francisco-Oakland Bay Bridge San Francisco, California, (1989)*
 - *Motorway bridge Junction Antelope Valley (1992)*
 - *Interstate 5 Bridge Los Angeles, California (1994)*

- Pontes no Japão:
 - *Showa Bridge Showa (1964)*
 - *Nishinomiya Bridge Nishinomiya (1995)*
 - *Hanshin elevated expressway (Kobe-Osaka highway) Hanshi (1995)*
 - *Bridge in Kashiwazaki City Niigata (2007)*

- Pontes no Paquistão:
 - *Various bridges North of Pakistan and Azad Kashmir (2005)*

2.3.8. Ventos fortes e furacões

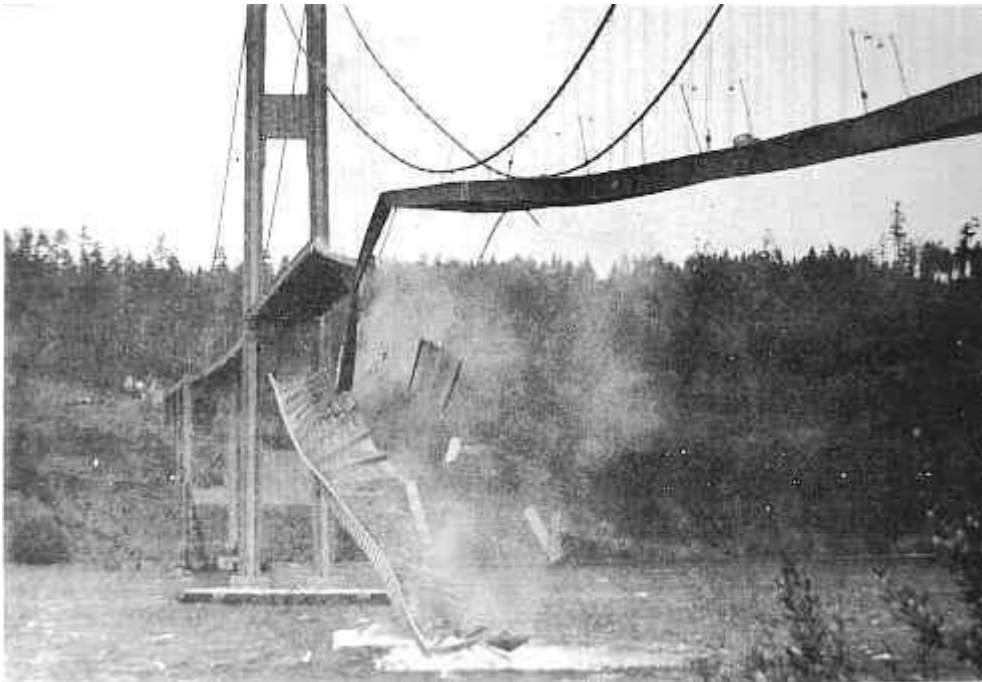


Figura 7 - Colapso da ponte Tacoma Narrows (1940).

[<http://www.nwrain.com/~newsuit/recoveries/narrows/gg.htm>]

Lista de acidentes de pontes provocados por ventos fortes e furacões: [2]

- Pontes nos Estados Unidos:
 - *Tacoma Narrows Bridge (1940)*
 - *2-span truss bridge over Mississippi Chester, Illinois (1944)*
 - *Eric Bridge Cleveland, Ohio (1956)*
 - *Hood Canal Bridge, Washington (1979)*
 - *Interstate 10 Bridge Phoenix, Arizona (1979)*
 - *1900 built Kinzua Viaduct steel bridge North Central Pennsylvania (2003)*
 - *McCormick County bridge (Little River) East of Mount Carmel, South Carolina (2004)*

- *Interstate 10 Bridge Escambia Bay, Pensacola, Florida (2004)*
- Pontes na Alemanha
 - *A1 cable-stayed bridge over Nordelbe River Hamburg (1970)*

2.3.9. Falta de manutenção

A manutenção de todos os meios de transporte é essencial para a segurança pública e deve ser feita de forma regular. Como tal, é necessário tomar as medidas correctas e eficazes para resolver os problemas.

Existem vários factores que implicam a manutenção destes meios [2]:

- A quantidade de camiões que passam diariamente nas pontes faz com que a taxa de deterioração das pontes e dos respectivos pavimentos aumentem;
- O aumento do tráfego nas vias contribui para o aumento da probabilidade de colisão com as pontes;
- Envelhecimento ou falta de sinalização.



Figura 8 - Colapso da ponte Daman na India por falta de manutenção. (2003) [http://lumq.com/01/collapse_of_bridges/]

Lista de acidentes de pontes devido a falta de manutenção: [2]

- Pontes nos Estados Unidos:
 - *Bridge over King's Slough River Near Fresno, California (1947)*
 - *3-span bridge in Lafayette Street St-Paul, Minnesota (1975)*
 - *Point Pleasant Bridge West Virginia (1967)*
 - *Fulton Yates Bridge Near Henderson, Kentucky (1976)*
 - *K&I Railroad Bridge Louisville, Jefferson County, Kentucky (1979)*
 - *Connecticut Turnpike Bridge (Mianus River) Near Greenwich (1983)*
 - ***Sergeant Aubrey Cosens VC Memorial Bridge Latchford, Ontario, Canada (2003) (Será analisada mais à frente nesta dissertação)***
 - *Shannon Hills Drive bridge Shannon Hills, Arkansas (2004)*
 - *Sappa Creek bridge Northwest of Norcatur, Kansas (2004)*
 - *Laurel Mall pedestrian bridge connecting parking and shopping areas Laurel, MD (2005)*
 - *Lakeview Drive Bridge, Interstate 70 Washington County, PA (2005)*
 - ***Interstate 35W over Mississippi River Minneapolis, Minnesota (2007) (Será analisada mais à frente nesta dissertação)***

- Pontes no Canadá
 - *Duplessis bridge, plate girder composite bridge, 2-span, (St. Maurice River) Between Montreal and Quebec (1951)*
 - *Wood trestle bridge Near McBride, British Columbia (2003)*

- Pontes no Reino Unido
 - *Suspension bridge Near Bristol, England (1978)*
 - *Ynys-y-Gwas Bridge West Glamorgan, Wales (1985)*

- Pontes na Áustria
 - *Timber foot bridge Near Zell am See, Pinzgau (1974)*
 - *Reichsbrucke over Danube River Vienna (1976)*
 - *Timber foot bridge Vorarlberg (1976)*

- Pontes na Índia
 - *Damanganga River bridge Daman (2003)*

- Pontes na Austrália
 - *King Street Bridge over Yarra River Melbourne (1962)*

3. COLAPSOS DE PONTES - CASOS PARTICULARES

3.1. I-35W Highway Bridge, Minneapolis, Minnesota (2007)

3.1.1. Breve história

A ponte I-35W situava-se na cidade de *Minneapolis* em *Hennepin County, Minnesota*. O seu projecto foi desenvolvido ao longo de vários anos mas, apenas em 1964 foi dada a aprovação para o início da sua construção. Nesse ano, começou a ser construída pela empresa *Hurcon, Inc.* O projecto final foi certificado pela empresa *Sverdrup & Parcel* no dia 4 de Março de 1965 e aprovado mais tarde no dia 18 de Junho, do mesmo ano, por *Mn/DOT (Minnesota Department of Transportation)*. A ponte foi aberta ao tráfego no ano de 1967. A imagem que se segue (figura 9) mostra como a ponte I-35W era antes do colapso.



Figura 9 - Ponte I-35W no ano de 2003. [5]

De acordo com os dados mais recentes disponíveis (2004), o tráfego médio diário desta ponte era de cerca de 141000 veículos, sendo que 5640 eram veículos pesados. Números que provam um aumento significativo do tráfego na I-35W, já que em 1976 era utilizada por uma média de cerca de 60600 veículos. [6]

3.1.2. O acidente

Passavam apenas cinco minutos das seis horas da tarde, do dia 1 de Agosto de 2007 (quarta-feira), quando uma câmara de vídeo situada no *the Lower St. Anthony Falls Lock and Dam*, a oeste da ponte, gravou a sequência da queda. O vídeo mostra o troço principal da ponte a separar-se do resto da estrutura e a cair inevitavelmente no rio.

Ficou provado que, na altura da queda, 111 veículos estavam situados em cima do troço. Destes 111 veículos, 25 pertenciam a trabalhadores e 1 deles era um autocarro com cerca de 63 estudantes e o motorista. Durante as operações de busca e salvamento, chegou-se à conclusão que 17 dos veículos envolvidos no acidente estavam submersos no rio.

No relatório do acidente, concluiu-se que 139 metros do vão principal cederam. É de salientar que, deste vão, 33 metros caíram ao rio, chegando a atingir os 15 metros de profundidade (Figura 10). [6]



Figura 10 - Imagem do colapso da ponte I-35W. [5]

Estimou-se ainda que, na altura do acidente, cerca de 190 pessoas estariam a atravessar a ponte, ou perto da mesma. Os registos médicos obtidos na investigação indicaram que cerca de 145 pessoas foram transportadas e tratadas em 12 unidades de saúde distintas (quadro 4). [6]

Danos	Total
Mortes	13
Feridos graves	34 (documentados)
Feridos ligeiros	111 (70 documentados)
Desconhecido	32
Total	190

Quadro 4 – tabela baseada em dados fornecidos pelo *Hennepin County*.

3.1.3. Descrição da ponte

A ponte I-35W tinha um comprimento total de cerca de 581 metros com oito vias, quatro em cada sentido. A sua parte treliçada tinha um comprimento de cerca de 324 metros e era suportada por quatro pilares. A figura 11 ilustra o *design* da ponte em questão:

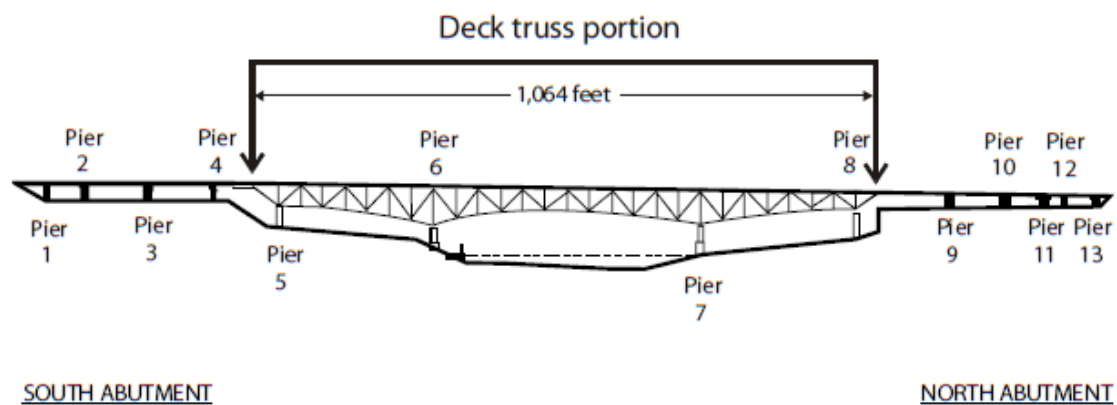


Figura 11 - Modelo da ponte I-35W. [6]

A ponte era constituída por 13 pilares de betão armado e 14 vãos numerados de sul para norte. Onze dos catorze vãos da estrutura serviam de acesso à ponte principal. [6]

O tabuleiro da ponte, nos vãos de acesso, era apoiado por vigas metálicas de alma cheia contínuas. Na zona sul, os vãos de acesso à ponte principal eram apoiados nos pilares 1, 2, 3, e 4 e na ponte principal. Já na zona norte, os vãos de acesso eram apoiados nos pilares 9, 10, 11, 12, 13 e também na ponte principal. [6]

Relativamente aos aparelhos de apoio, foram utilizados três tipos: Apoios fixos, deslizantes e deslizantes à base de roletes. Os aparelhos de apoio fixos foram colocados nos pilares 1, 3, 7, 9, 12, e 13. Os deslizantes foram postos nos pilares 2, 4, 10, e 11. Já os aparelhos de apoio à base de roletes foram instalados nos pilares 5, 6 e 8 (figura 12). [6]



Figura 12 - Exemplo de um aparelho de apoio à base de roletes utilizado na ponte I-35W. [6]

O tabuleiro da ponte consistia em duas lajes de betão armado, separados por cerca de 15 centímetros e continha 11 juntas de dilatação. A sua largura total era de cerca de 34 metros. As faixas de rodagem norte e sul (quatro em cada sentido) tinham cerca de 16 metros de largura com um separador central de 1,22 metros. Quando a ponte foi aberta ao tráfego, em 1967, a laje de betão moldada *in-situ* tinha uma espessura mínima de 16 cm. [6]

A parte treliçada da ponte consistia em duas treliças paralelas do tipo *Warren* (Este e Oeste) concebida por *the 1961 American Association of State Highway Officials (AASHTO), Standard Specifications for Highway Bridges (NTSB, 2008)*. As cordas superiores e inferiores eram ligadas por braços verticais e por membros diagonais que compunham a estrutura da treliça, exceptuando no final do tabuleiro. [6]

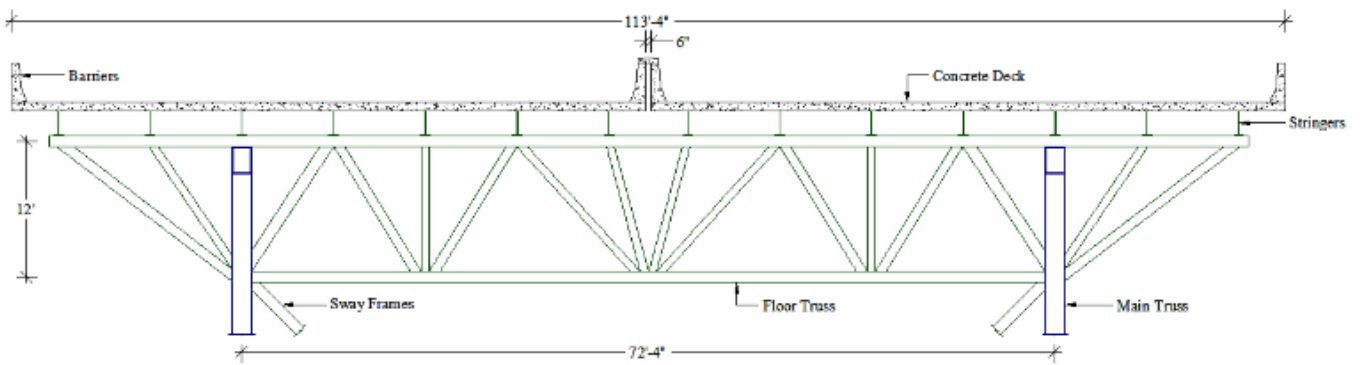


Figura 13 - Perfil transversal da ponte I-35 W. [7]

Foram colocadas nos 112 nós, existentes da estrutura, placas metálicas do tipo *gusset* de forma a ligar os membros da treliça. Todos os nós tinham, pelo menos, duas placas *gusset*, uma de cada lado. Na figura abaixo, é visível um dos nós típicos da estrutura. [6]



Figura 14 - Um nó típico da ponte I-35W constituído por placas *gusset*. [6]

3.1.4. Após o colapso

A figura abaixo (figura 15), onde são numerados os nós, ajuda a ilustrar, de alguma forma, a descrição pormenorizada deste colapso e as suas consequências.

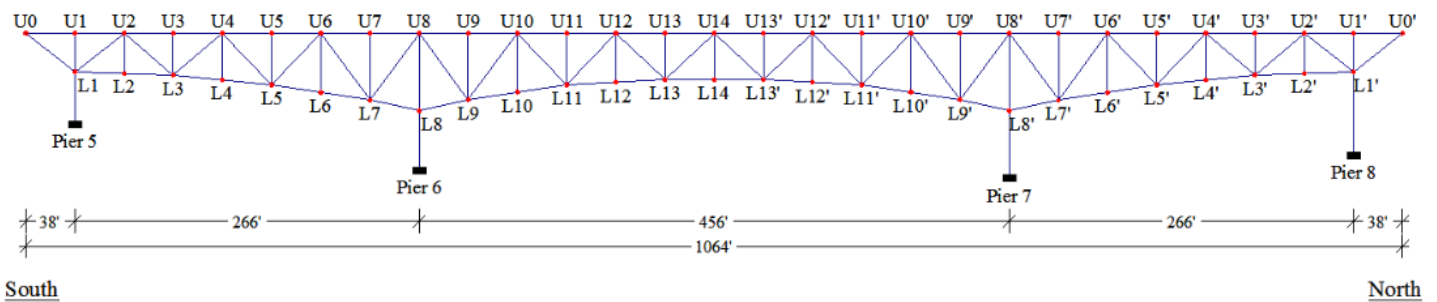


Figura 15 - Identificação dos nós na ponte I-35W. [7]

Durante a sequência do colapso, a parte principal da ponte separou-se em três grandes secções (figura 16).

A maioria do vão central, entre os pilares 6 e 7, separou-se das restantes e caiu ao rio. A secção sul, entre o pilar 5 e 6, caiu em terra. O mesmo se passou com a secção norte da ponte, entre o pilar 7 e 8.



Figura 16 - Ponte I-35W após o colapso. [6]

Zona Sul

Segundo o relatório final do colapso [6], “os nós L1 foram encontrados a norte do pilar 5 e os nós L8 a norte do pilar 6, indicando que, no geral, toda a secção sul se deslocou um pouco para norte do rio (figura 17). Relacionado a este movimento está o facto dos braços L7/L8 (este e oeste) apresentarem danos causados pelo contacto com os apoios à base de roletes e, também, com a superfície superior do pilar 6. Tal pode confirmar a teoria de que a

estrutura se terá movido para norte. Para além disso, a barra L7/L8E separou-se dos nós L7E e L8E”.

Foram várias as observações feitas na secção sul após o colapso. Entre elas, pode destacar-se o facto das cordas superiores terem ficado intactas, entre os nós 1 e 8, e a parte sul da ponte, entre os nós 4 e 8, ter caído para Este. Já o braço inferior L7/L8W e o nó U8W permaneceram ligados ao pilar 6.

A figura 17 mostra o colapso da zona sul da ponte com algumas indicações relativamente aos seus constituintes. [6]

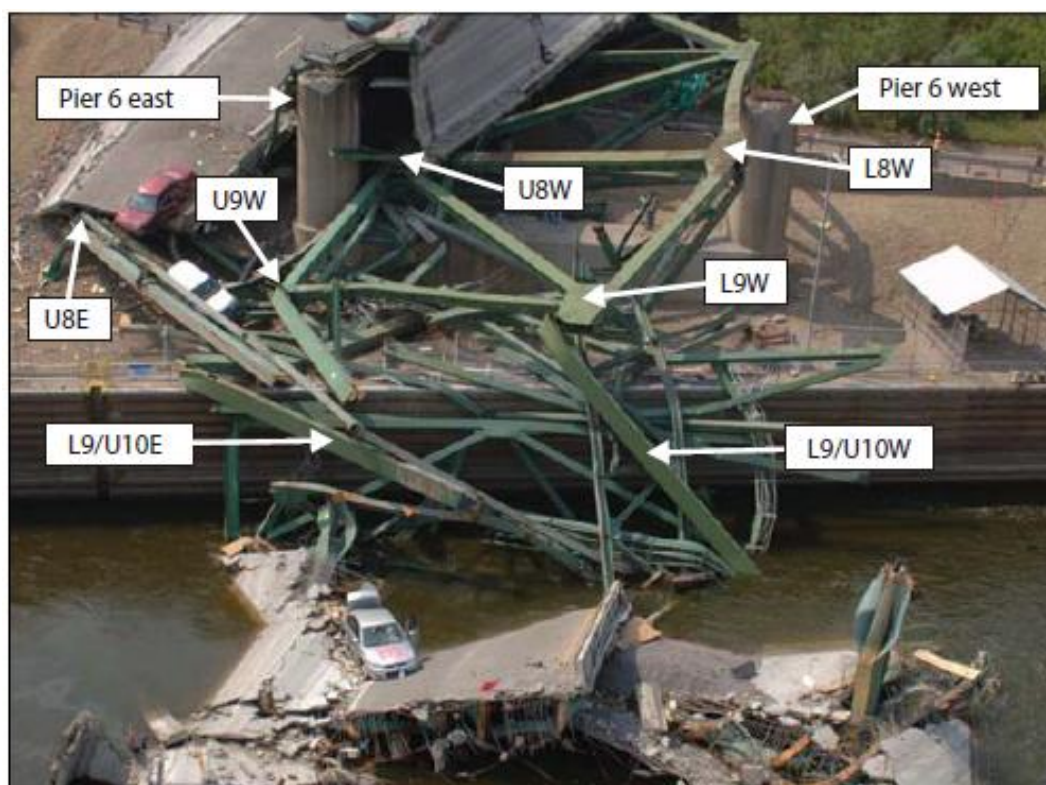


Figura 17 - Ponte I-35W (zona Sul) após o colapso. [6]



Figura 18 – Colapso da zona Sul da ponte I-35W. [5]

Secção central

Um vídeo capturado por uma câmara de vigilância nas proximidades mostrou que *“a extremidade sul da secção central caiu antes da extremidade norte, e que a secção central manteve-se relativamente nivelada de Este a Oeste, exactamente como caiu. Muitos dos veículos permaneceram nas mesmas posições em cima da ponte, provando que tanto a Este como a Oeste a ponte fracturou ao mesmo tempo”* [6] (figura 19).

O relatório também evidencia outros aspectos observados. A parte superior da treliça, entre os nós 12-12', tal como o nó L11W, terá permanecido intacto e em cima de água. O vídeo não mostrou nenhuma falha ou deformação dos braços inferiores, entre os nós L12E e L12'E, e entre os nós L11W e L12'W. As cordas inferiores, barras de contraventamento e estabilizadoras da secção central da ponte foram encontradas, de forma geral, debaixo de água. [6]

A figura 20 identifica alguns dos nós da parte central da ponte.



Figura 19 – Secção central da ponte I-35W após o colapso. [5]

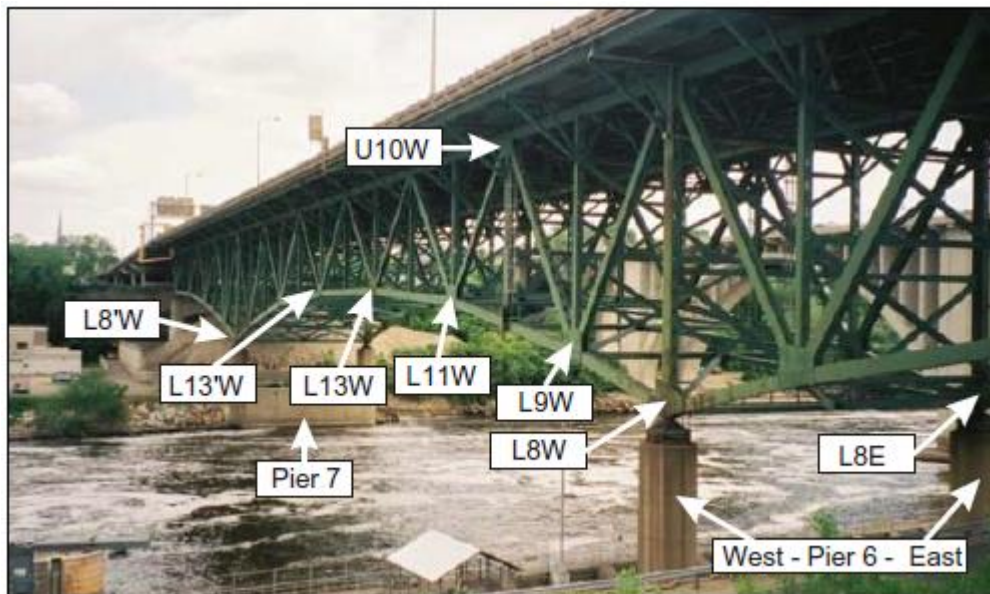


Figura 20 – Parte central da ponte I-35 W. [6]

Zona Norte

Em relação à secção norte da ponte, “*uma grande parte da treliça junto ao pilar 7 terá girado para norte como uma unidade rígida. Essa parte incluía o tabuleiro, os braços superiores, desde o nó U8’ até ao nó U6’, os braços inferiores, desde o nó L9’ até ao L7’, e os braços diagonais e verticais entre esses nós. As cordas inferiores, L7’/L8’ Este e Oeste, após o colapso, estavam em contacto com o lado norte da extremidade superior do pilar 7*” [6] (Figura 21 e 22).



Figura 21 – Secção Norte da ponte I-35W após o colapso (parte 1). [5]



Figura 22 – Secção Norte da ponte I-35W após o colapso (parte 2). [5]

Pilares e aparelhos de apoio

Relativamente aos pilares e aos aparelhos de apoio, foram observados vários factos que serviram para retirar algumas conclusões sobre a queda. No relatório, consta que os pilares 5 e 6 não apresentaram sinais de terem sofrido assentamentos ou deslocamentos, estando portanto em bom estado, sem qualquer tipo de danos. Relativamente aos pilares 7 e 8, este relatório indica que ambos se movimentaram cerca de 9° para sul. As medições feitas após o colapso evidenciaram que este movimento (no pilar 7) decorreu apenas durante a queda, tendo sido causado através força exercida pelos braços da treliça, quando se deslocaram para norte. No entanto, não existiram evidências suficientes para concluir que as sapatas dos pilares se tivessem deslocado. [6]

Alguns aparelhos de apoio não resistiram ao colapso, acabando por se soltar. Foi o caso dos apoios à base de roletes nos pilares 5 e 6, que caíram para o lado norte, à excepção de um que se manteve no lado Oeste do pilar 5, e outro que foi encontrado na zona sul do lado Este do pilar em questão. No pilar 8, estes aparelhos foram encontrados no lado sul. Contudo, várias marcas

existentes nas chapas destes aparelhos de apoio provaram que estes se foram movendo anualmente. [6]

A tabela seguinte exhibe os deslocamentos destes aparelhos ao longo dos anos (valores aproximados retirados do relatório *NTBS*).

Aparelhos de apoio à base de roletes	Deslocamento aproximado (anual)
Pilar 5	12,7 cm
Pilar 6	6,4 cm
Pilar 8	6,8 cm

Quadro 5 - Deslocamento aproximado dos aparelhos de apoio nos pilares 5, 6 e 8. [6]

3.1.5. As causas do colapso

A equipa de peritos considerou uma serie de possíveis teorias para o colapso da ponte I-35W, antes de encontrar a verdadeira causa. Entre elas estava a corrosão das placas *gusset* nos nós L11; as fracturas preexistentes no tabuleiro da parte treliçada, ou até mesmo nos vãos de acesso; os efeitos da temperatura; e por último o suposto movimento dos pilares. Teorias estas, que não se mostraram correctas quando foi encontrada a verdadeira causa para o colapso.

Após uma exaustiva investigação, esta equipa concluiu que a causa do colapso prendia-se com o facto da capacidade de carga das placas *gusset* nos nós U10 ser inadequada. Ao que parece, estas placas tinham metade da espessura do que era necessário. Infelizmente, não se sabe ao certo o que poderia ter levado a que tal acontecesse, mas alguns factores foram apontados para tal contribuição [6]:

- *“Procedimentos de controlo de qualidade insuficientes por parte das firmas de projecto e procedimentos insuficientes de revisão e aprovação de projectos por parte dos donos de obra;*

- *Falta de recomendações com respeito à colocação de cargas construtivas durante trabalhos de manutenção e reparação;*
- *Exclusão das chapas gusset nas recomendações relativas à avaliação das capacidades de carga das pontes existentes;*
- *Falta de recomendações com respeito à inspeção da condição das chapas gusset;*
- *Uso inadequado de tecnologias para uma avaliação precisa da condição das chapas gusset em tabuleiros de pontes em treliça.”*

Outra situação ocorrida no dia do colapso, que se deduz que poderá ter ajudado a acelerar o processo de fractura das placas *gusset* nos nós U10, foi o facto de o pavimento estar a ser alcatroado. A combinação do peso próprio com as cargas, devido ao tráfego e aos equipamentos de construção, aumentou consideravelmente a probabilidade da ocorrência. Estes equipamentos estavam colocados directamente sobre os nós U10, isto é, a zona onde ocorreu a fractura inicial da treliça (Figura 23). [7]



Figura 23 - Obras no dia do colapso da ponte I-35W. [6]

3.1.6. Sequência do colapso

Foi possível prever a sequência do colapso da ponte I-35W com base nos danos, nas deformações e no vídeo disponível. Segundo este último, a fractura inicial deu-se na zona sul, visto que é evidente, no vídeo, que esta

zona começou a cair um pouco antes da norte. As inspecções feitas após o acidente, revelaram que as quatro placas *gusset* presentes nos nós U10 fracturaram em vários pedaços e que, juntamente com as fracturas apresentadas nas cordas inferiores, entre os nós L9 e L10, quebraram a treliça provocando a queda da zona central da ponte. [6]

Com base neste tipo de evidências dos constituintes da treliça, analisando todas as deformações, fracturas e danos na ponte, uma equipa de peritos determinou a possível sequência do colapso [6]:

1 – Inicialmente as placas *gusset* nos nós U10 deformaram-se e fracturaram, como foi já referido anteriormente, fazendo com que a treliça perdesse o equilíbrio de forças. A figura seguinte demonstra que, na altura do colapso, a carga aplicada nos nós U10 era superior ao que estes eram capazes de suportar (figura 24).

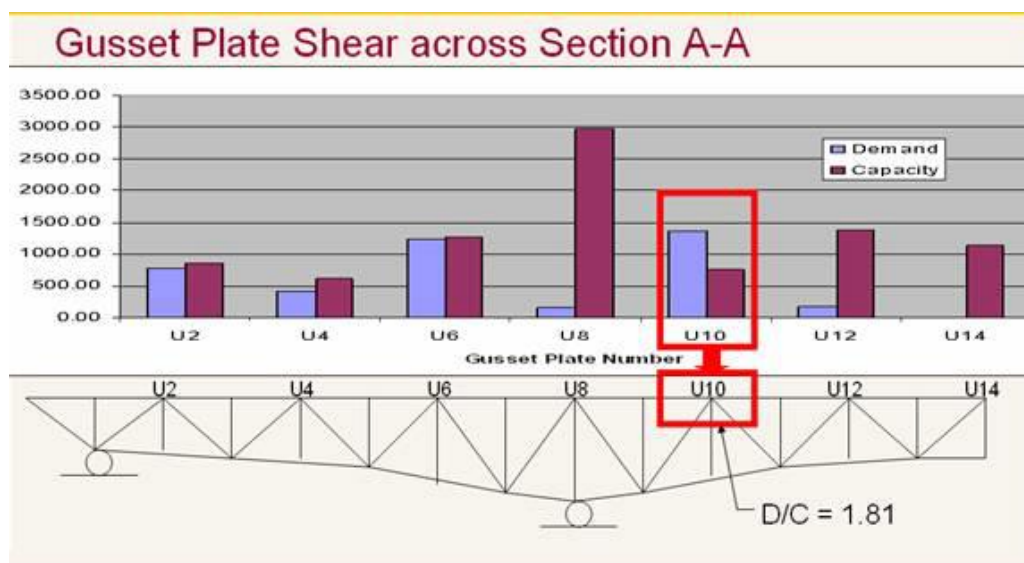


Figura 24 – Capacidade de carga do nó U10. [5]

2 – Com a queda das placas *gusset* nos nós U10, a barra vertical U10/L10 sofreu uma enorme força de compressão obrigando os nós L9 e L11 a um esforço superior ao suportado. (figura 25)

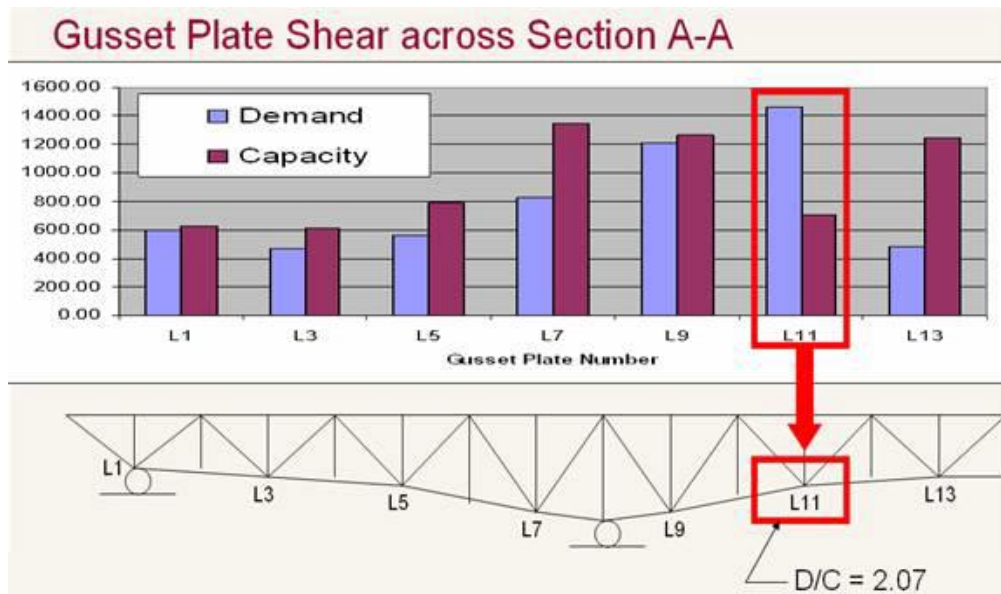


Figura 25 – Capacidade de carga do nó L11. [5]

3 – Devido a estes esforços, a corda inferior L9/L10 fracturou adjacente ao nó L9. Nos pilares 5 e 6 os apoios à base de roletes soltaram-se dos respectivos pilares.

4 – Nesta fase, esta parte da treliça estava completamente suspensa. A separação da zona sul com a extremidade sul da parte central estava completa, enquanto esta continuava em queda em direcção ao rio.

5 – No lado norte, de modo similar ao que ocorreu no lado sul, as placas *gusset* dos nós U10' deformaram e fracturaram, criando grandes esforços de compressão nas barras adjacentes (entre os nós L11' e L9').

6 - Os membros da corda superior entre os nós U8' e os nós U10' flectiram adjacente aos nós U8'. Os membros da corda inferior L9'/L10' fracturaram, igualmente, adjacente aos nós L9'.

7 - Nesta altura, a separação da zona norte estava completa e a parte central da ponte a cair totalmente no rio.

3.1.7. Impacto Socioeconómico do colapso

A queda da ponte I-35W teve um impacto negativo sobre a economia local. Como foi referido anteriormente, esta ponte transportava uma média de cerca de 141000 veículos por dia. Com a queda e consequente ausência da ponte, a economia local ressentiu-se, e todas as empresas localizadas em *Minneapolis* foram afectadas com a ausência de fluxo de tráfego que se fazia sentir diariamente. Algumas destas empresas relataram perdas de receita na ordem dos 50%. Muitos clientes deixaram de frequentar vários estabelecimentos que existiam na cidade. Em Junho de 2008, a economia de *Minnesota* apresentava uma perda de aproximadamente \$60 milhões de dólares. “Um estudo feito por parte do departamento de transportes de *Minnesota* concluiu que os custos que os passageiros tiveram para encontrar uma nova maneira de chegar ao centro de *Minneapolis* foram de cerca de 400 mil dólares por dia.” [8]. Para além de tudo, ainda foram gastos cerca de \$38 milhões de dólares em indemnizações para as pessoas que estiveram presentes na ponte no dia do sinistro.

Foi entretanto construída uma ponte de substituição, a *St. Anthony Falls*, que foi aberta ao público a 18 de Setembro de 2008, com um custo estimado entre os \$300 e os \$350 milhões de dólares.



Figura 26 - Ponte I-35W *Saint Anthony Falls*. [http://www.gti-usa.net/Saint-Anthony-Falls-Replacement-Bridge.shtml]

3.2. Sgt. Aubrey Cosens V.C. Memorial Bridge (2003)

3.2.1. Breve história

Em outubro de 1960, uma ponte localizada na cidade de *Latchford*, entre *Temagami* e *New Liskeard*, na província de Ontário, destinada a transpor o rio de Montreal no Canadá, foi aberta ao público. Mais tarde, já no ano de 1986 e em honra ao soldado *Sergeant Aubrey Cosens* de *Latchford* que participou na Segunda Guerra Mundial, foi-lhe dada este nome (Figura 27). A ponte foi reabilitada em 1992 e a estrutura de aço pintada em 1998. Depois do acidente, em 2005, esta voltou ao serviço após o tabuleiro ter sido reconstruído.



Figura 27 – Ponte Sgt. Aubrey Cosens V.C. Memorial Bridge. [9]

3.2.2. O acidente

Passavam 45 minutos das duas horas da tarde do dia 14 de janeiro de 2003, quando um camião atravessou a ponte *Sergeant Aubrey Cosens* em *Latchford*. Ao que parece, o motorista sentiu que algo de estranho se passava quando, por instantes, ouviu uns barulhos fora do comum e percebeu que o seu reboque estava a sofrer uma mudança de direcção. O som que ele ouviu era a ruptura dos pendurais do arco da ponte. Felizmente, o motorista saiu ileso e a estrada foi imediatamente cortada ao tráfego. É importante assinalar

que nessa semana do acidente, no nordeste de Ontário, esta região registou temperaturas na ordem dos -30°C , o que poderá também ter ajudado ao colapso.

3.2.3. Descrição da ponte

A ponte era constituída por um tabuleiro de betão de cerca de 107 metros de comprimento, apoiado por 12 pendurais em cada lado e que estavam ligados a 12 transversinas (figura 28). Entre transversinas, a ponte continha 6 longarinas. Os esforços causados pelo tráfego eram transmitidos para estas longarinas que, por sua vez, os enviavam para as transversinas, e de seguida para os pendurais. Dos pendurais, os esforços eram enviados para o arco e, finalmente, para os apoios. Cada pendural, no seu topo, tinha um varão nervurado que se estendia até à placa inferior do arco de aço e que eram segurados por duas porcas (figura 29).

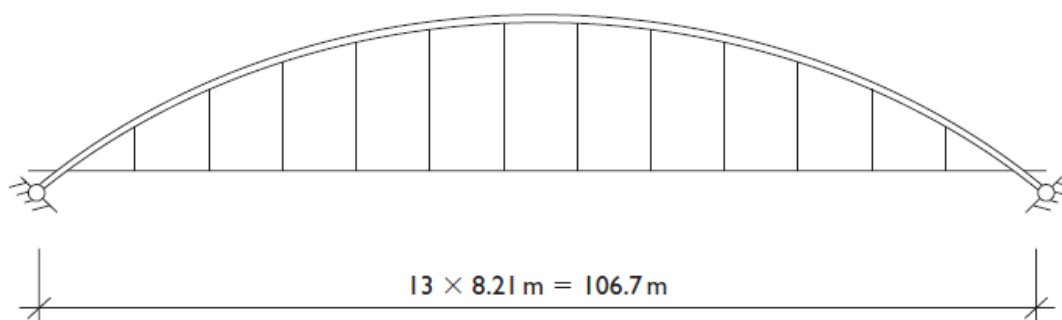


Figura 28 – Comprimento da Ponte. [10]

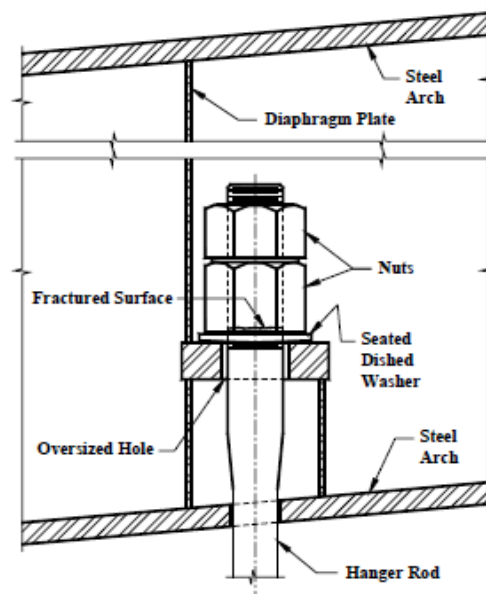


Figura 29 – Desenho esquemático da ligação dos pendurais ao arco da ponte. [10]

A ligação dos pendurais ao tabuleiro era realizada através de um olhal e ao arco superior através da ligação esquematizada na figura 30. O projectista modelou os pendurais como barras bi-articuladas, determinando assim apenas esforços normais. Acontece, porém, que a ligação superior não permite a libertação do momento, o que originou o aparecimento de momentos flectores durante os movimentos horizontais do tabuleiro. Estes momentos flectores originaram, por sua vez, um acréscimo de tensões na ligação, a que se juntaram fenómenos de fadiga que acabaram por acelerar a deterioração da ligação.

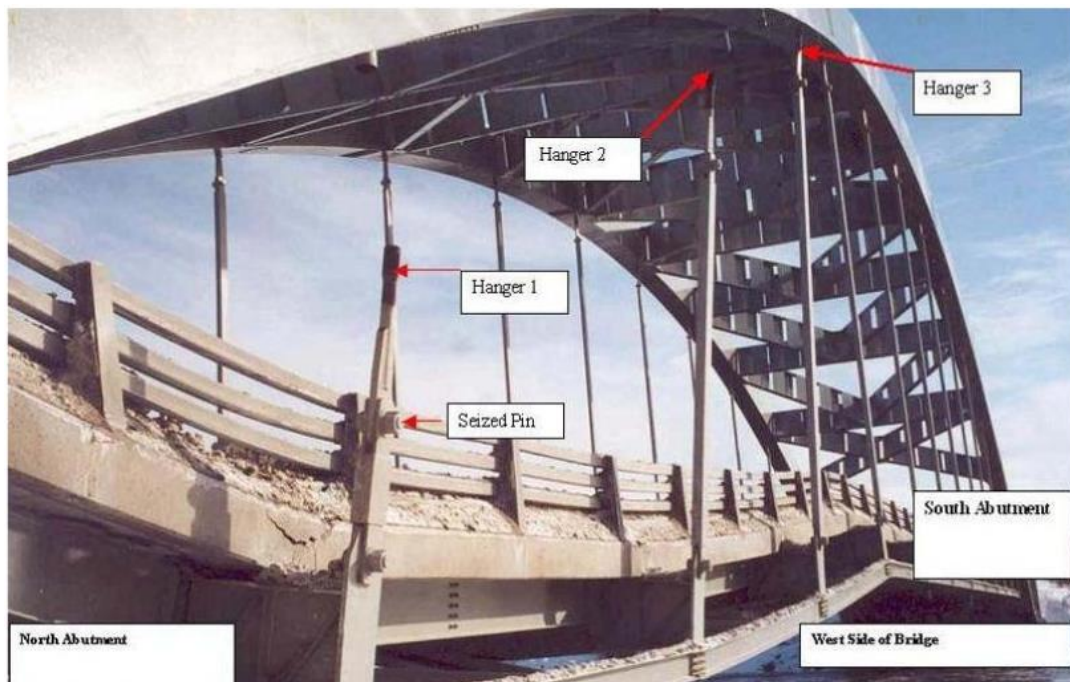


Figura 30 – Posicionamento dos pendurais após o acidente. [9]

3.2.4. As causas

Durante vários anos, a ponte não demonstrou quaisquer tipos de indicação de que algo poderia estar a falhar. Esse facto levou a que houvesse uma falta de manutenção ou vigilância por parte dos responsáveis. Os pendurais, supostamente contendo duas rótulas, faziam querer que nenhum problema pudesse existir, ou seja, rodavam sem produzir qualquer tipo de flexão. Mesmo quando as ligações se foram apresentando gradualmente com alguma ferrugem, ninguém foi capaz de descobrir este problema de funcionalidade. [10].

A função dos pendurais era de transferir a carga vertical ao arco. Os movimentos longitudinais do tabuleiro, obrigaram os pendurais a flectir, uma vez que a suposta rótula superior não estava a funcionar efectivamente como uma rótula. Esta flexão, por sua vez, gerou uma distribuição não uniforme de esforços na rótula superior, o que contribuiu para a sua deterioração (figura 31).

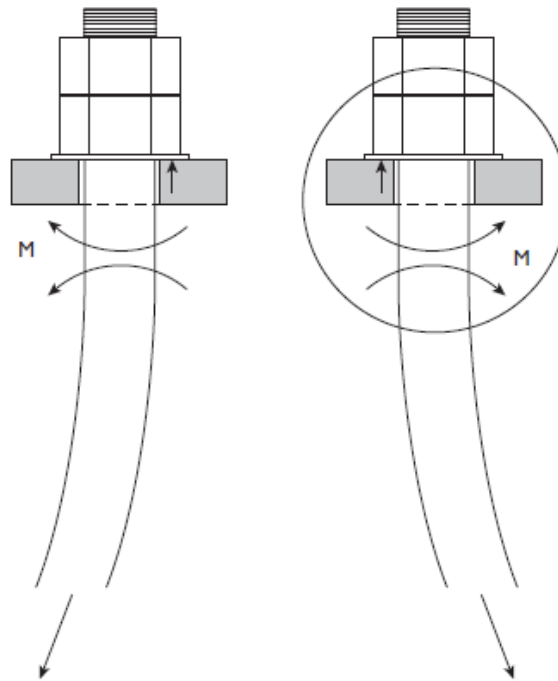


Figura 31 – Flexão não uniforme. [10]

Na conexão perto do arco, a rigidez dos pendurais aumentava consideravelmente. As deformações devido às flexões secundárias (na direcção longitudinal) eram bastante pequenas, no entanto, a longo prazo, estas deformações poderiam causar problemas como a abertura de fendas devido a fadiga, como foi o caso (figura 32) [10]. Este tipo de fendas viriam a ser fundamentais para o colapso dos pendurais.

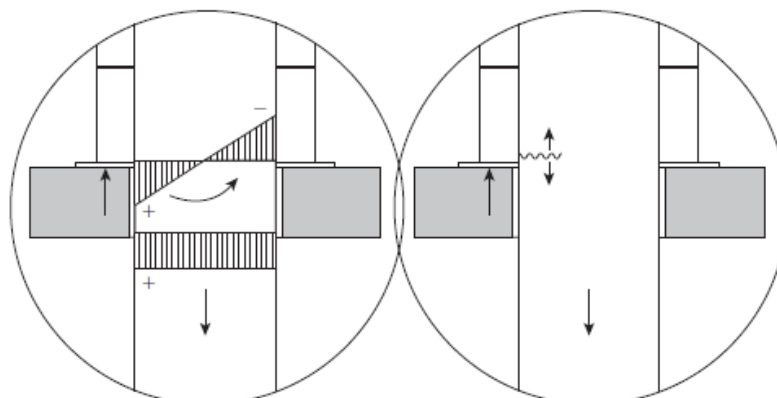


Figura 32 – Abertura de fendas devido aos esforços. [10]

3.2.5. Sequência do colapso

O pendural 1, da zona noroeste da ponte, foi o primeiro a fracturar. Uma análise metalúrgica da corrosão feita no pendural 1, na parte da *fast fracture* (define-se *fast fracture* como sendo a fractura final que resulta na separação em duas secções do varão do topo do pendural), indicava que este teria fracturado uns 5 a 7 anos antes do colapso, em 2003 (Figura 33) [9]. O que significaria que, por volta do ano de 1997, este pendural teria caído mas, após ter descido cerca de 75 milímetros, parou devido ao facto de ter sido segurado pela viga junto do tabuleiro da ponte (Figura 34). O pendural manteve-se visualmente intacto e na sua posição vertical habitual, o que levou a crer que estivesse a funcionar correctamente, permanecendo assim durante vários anos. [10]



Figura 33 - Análise da *fast fracture* do pendural 1. [9]

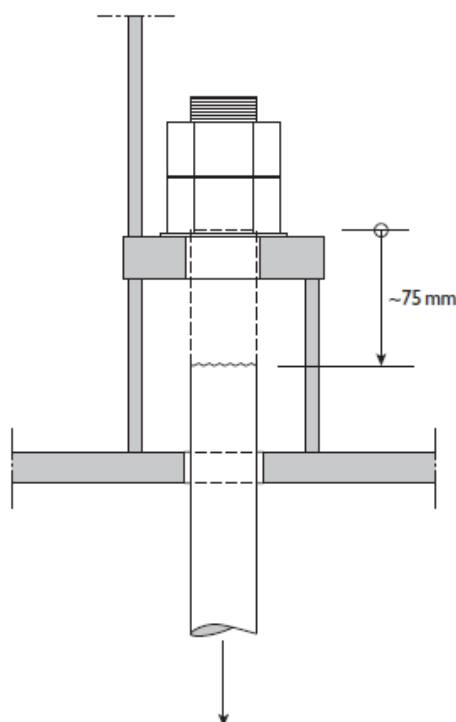


Figura 34 - Pendural 1 depois de ter fracturado. [10]

Depois da fratura do pendural 1, todas as cargas devido ao tráfego e ao peso próprio da ponte, naquela zona, passariam agora a centrar-se no pendural 2. A mesma análise metalúrgica da *fast fracture*, mas agora para o pendural 2, provou que o varão se teria fracturado na sua totalidade 1 a 3 anos antes de 2003 [9]. Tal como no primeiro pendural, permaneceu na sua posição vertical. Nesta fase, a ponte permanecia sem dar sinais de que poderia estar eminente um colapso parcial, no entanto, algo de muito perigoso aproximava-se.

Seria de esperar que, após a fratura total do pendural 2, todas as cargas estariam agora a ser impostas ao pendural 3. O resultado foi o que se esperava, este pendural ficou muito tenso e chegou também a fracturar, mas, ao contrário dos outros, acabou por quebrar totalmente no dia 14 de Janeiro de 2003, por volta das três horas da tarde, aquando da passagem de um camião (figura 35). O facto de nessa altura estar a passar uma onda de frio com temperaturas a rondar os -30°C , contribuiu ainda mais para que o colapso

parcial se desse, mas mesmo assim, a ponte mais tarde ou mais cedo acabaria por ceder devido aos factores mencionados anteriormente.



Figura 35 – Colapso parcial da ponte. [10]

A ponte acabaria por ser reparada e aberta ao tráfego no ano de 2005. Desta vez, optou-se pela utilização de quatro cabos em substituição de um pendural. (figura 36)

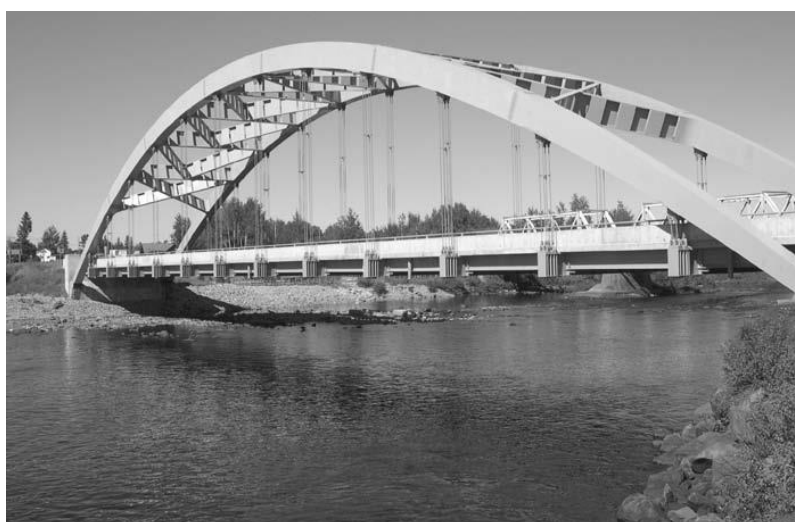


Figura 36 - Ponte Sgt. Aubrey Cosens V.C. Memorial Bridge após a sua reconstrução. [10]

3.3. Ponte Hintze Ribeiro (2001)

3.3.1 Breve história

A construção da ponte Hintze Ribeiro, em Entre-os-rios, foi iniciada em Fevereiro de 1884 e aberta ao tráfego em Setembro de 1888. O Eng.^o Luciano de Carvalho foi o director da construção que, em 1895, publicou uma memória técnica sobre a obra.

Mais tarde, em 1919, na altura da revolta monárquica do norte, a ponte foi dinamitada, tendo sofrido danos num dos pilares e no tramo extremo do tabuleiro, junto da margem esquerda (Castelo de Paiva). A sua reparação foi iniciada estando concluída em Março de 1928, depois de ter sido elaborado em Março de 1926 o caderno de encargos. No ano de 1959 terá sido realizada uma obra de alargamento da faixa de rodagem. A figura 37 mostra um retrato da ponte nos anos 60 durante uma cheia.



Figura 37 - Ponte Hintze Ribeiro durante uma cheia nos anos 60.
[<http://fotosdotempo.blogspot.pt/2011/03/entre-os-rios-recordando-tragedia-de-4.html>]

Esta ponte situa-se a cerca de 500 m a jusante da confluência do rio Tâmega, afluente da margem direita do rio Douro.

3.3.2. O Acidente

Aproximadamente das 21h10 do dia 4 de Março de 2001, a ponte de Entre-os-Rios sobre o rio Douro (Ponte Hintze Ribeiro), que fazia a ligação do concelho de Penafiel com o concelho de Castelo de Paiva, colapsou parcialmente, originando a queda de um autocarro de passageiros no rio e de, possivelmente, três viaturas ligeiras. O colapso da ponte envolveu um pilar, os dois tramos do tabuleiro que nele se apoiavam e, também, um terceiro tramo de tabuleiro, contíguo (Figura 38). [11]

Em consequência deste desastre, o número de pessoas mortas aproximou-se das setenta, a grande maioria residente no concelho de Castelo de Paiva.



Figura 38 - Ponte Hintze Ribeiro no dia do colapso

[<http://fotosdotempo.blogspot.pt/2011/03/entre-os-rios-recordando-tragedia-de-4.html>].

Após o sinistro, e por despacho do Ministro do Equipamento Social, a 4 de Março de 2001, decidiu-se criar uma Comissão de Inquérito com o objectivo de identificar as principais causas deste acidente.

Esta Comissão de Inquérito era constituída pelo Director do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, pelo Inspector-Geral da Obras Públicas, Transportes e Comunicações e pelo representante do Instituto das Estradas de Portugal, a designar pelo respectivo Conselho de Administração. Quem passou a integrar também esta Comissão a partir do dia 8 de Março de 2001, foi o Bastonário da Ordem dos Engenheiros. [11]

3.3.3. Descrição da ponte

O comprimento total da ponte Hintze Ribeiro era de 336 m que estavam divididos em cinco tramos intermédios, de 50 m de vão em viga contínua; dois tramos extremos, de 25 m de vão simplesmente apoiados; e dois encontros, um de 12,5 m, na margem direita, e um de 23,5 m, na margem esquerda. A plataforma destinada a tráfego rodoviário (plataforma superior) tinha uma largura total de cerca de 5,9 metros, incluindo os passeios.

No que diz respeito à superestrutura da ponte Hintze Ribeiro, esta era constituída por um tabuleiro metálico de ferro pudelado. Nela assentava uma laje de betão e duas vigas principais de alma rota, contraventadas entre si. Cada uma destas almas era constituída por uma treliça múltipla com diagonais e contra-diagonais de 45°. Já os tramos intermédios do tabuleiro, encontravam-se apoiados em seis pilares, com uma altura entre 15 a 30 metros, de alvenaria de granito, sendo que cada um destes pilares era ainda revestido a cantaria desta mesma rocha. Por sua vez, os tramos extremos estavam apoiados em encontros de pedra, também de granito, e em pilares adjacentes. [11]

Na descrição que se segue, adoptam-se as designações P1 a P6 para os pilares da ponte, com contagem crescente a partir da margem direita (lado de Entre-os-Rios) (Figura 39).

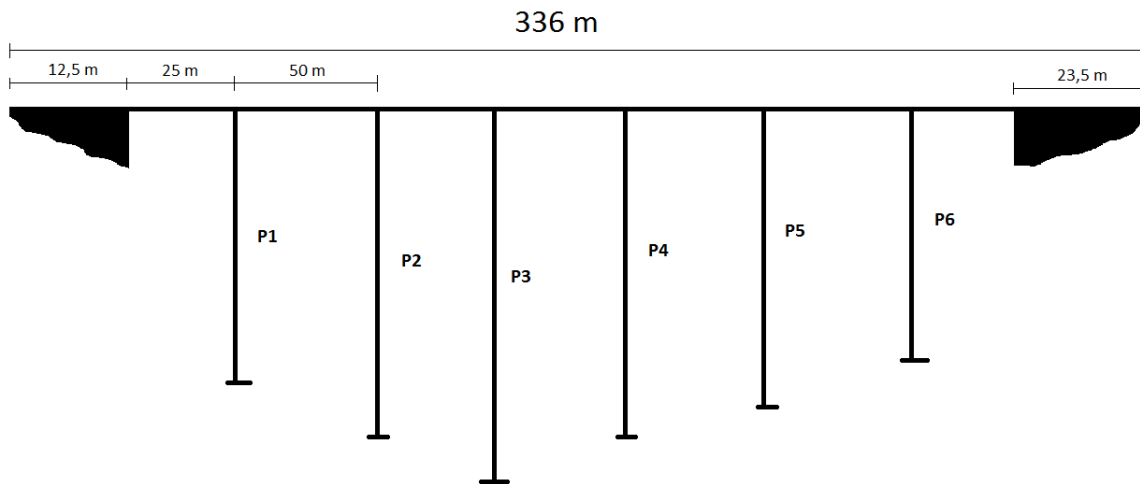


Figura 39 - Representação esquemática da ponte Hintze Ribeiro com a altura dos pilares a ser arbitrária (variável entre 15 e 30 m).

Em 1913, foi realizado um levantamento onde se pode observar que os tramos intermédios do tabuleiro nos pilares assentavam em apoios móveis, excepto o pilar P4 que tinha características de apoio fixo. Contudo, a inspecção realizada em 2001 concluiu que o pilar P3 também possuía características de apoio fixo. Já o P1, P2 e P6 eram materializados roletes cilíndricos sobre chapas metálicas, o que vinha a confirmar as conclusões do levantamento de 1913. Relativamente aos pilares P4 e P5, foi impossível detectar o tipo de apoio neles sustentado.

No que se refere às fundações directas, pode-se dizer que o pilar P1 e ambos os encontros da ponte estavam assentes em substrato rochoso (maciço granítico). Nos restantes pilares, as fundações foram realizadas em caixões de involucro metálico, preenchidos com alvenaria de granito argamassada.

No colapso desta ponte estiveram envolvidos os dois tramos do tabuleiro suportados pelo pilar P4, o próprio pilar P4, e o tramo do tabuleiro sustentado pelos pilares P5 e P6.

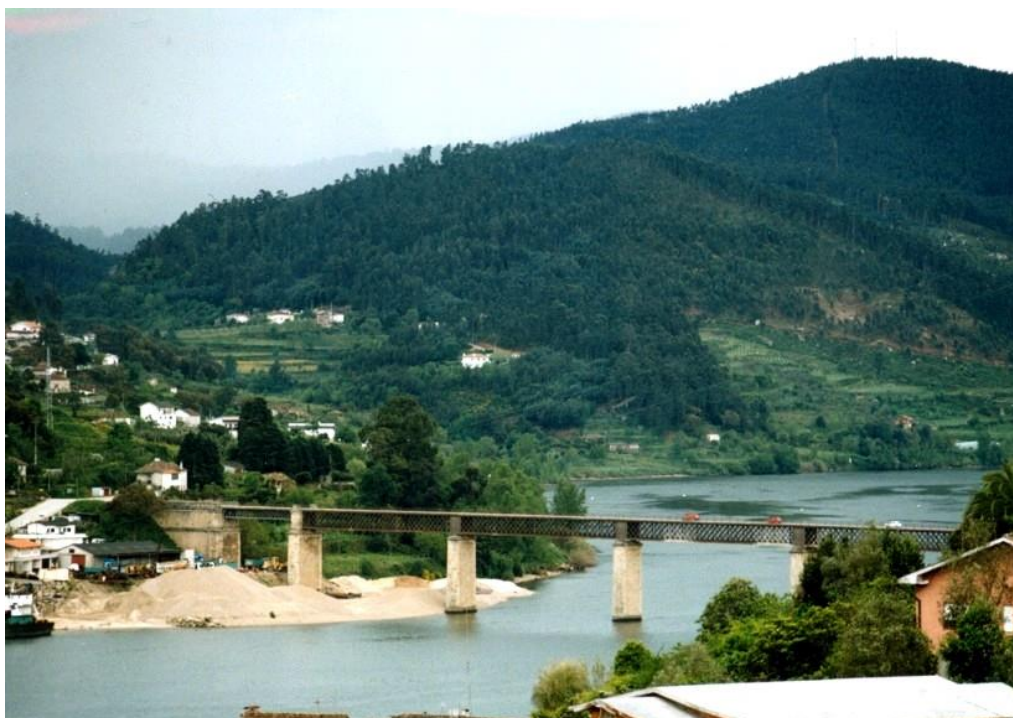


Figura 40 - Ponte Hintze Ribeiro no ano 2000.

[<http://fotosdotempo.blogspot.pt/2011/03/entre-os-rios-recordando-tragedia-de-4.html>]

Resultados de sondagens realizadas em 1988 permitiram determinar as cotas da base dos caixões e identificar o tipo de terreno que se encontra por baixo dos mesmos.

	Levantamento de 1913	Sondagens (CÊGÊ, 1988)
P2	-10,5 m	-8,0 m
P3	-14,5 m	-14,0 m
P4	-9,5 m	-10,0 m
P5	-7,0 m	-6,5 m
P6	+1,0 m	-2,0 m

Quadro 6 - Cotas aproximadas da base dos caixões. [11]

De P3 a P5, as diferenças foram muito pequenas, o mesmo já não se pode dizer dos pilares P2 e P6. O tipo de terreno em que o caixão do pilar P6 assentava, era um terreno do tipo rochoso granítico. Já os pilares P2, P3, P4 e P5 assentavam num material aluvionar incoerente com calhaus rolados. [11]

3.3.4. Após o colapso

A comissão de Inquérito conseguiu obter, através do Instituto Hidrográfico, informações importantes para o estudo do acidente. A partir dessas informações, pode-se chegar a algumas conclusões.

Segundo estes dados, concluiu-se que o pilar P4 *“caiu segundo um movimento de rotação em torno da base de fundação do caixão, de forma tal que os deslocamentos se processaram no sentido de jusante para montante e no sentido da margem esquerda para a margem direita.”* [11]

Através de imagens obtidas com sonda multifeixe, é possível identificar os vários destroços. O caixão de fundação do pilar P4 parecia estar fracturado numa secção transversal que se situava a cerca de 8 metros da base. Os restantes destroços deste pilar estavam no fundo do rio dispostos segundo uma direcção que fazia um angulo de aproximadamente 30 graus com o alinhamento da ponte. O tramo do tabuleiro que fazia a ligação entre o pilar P3 e P4 não se desmembrou na queda, mas separou-se do tramo que lhe era contíguo, ou seja do tramo que se apoiava entre os pilares P4 e P5. Este tramo, que se apoiava nos pilares P4 e P5, *“ficou muito fragmentado e, possivelmente, alguns dos destroços estarão presentemente cobertos, total ou parcialmente, com material aluvionar.”* [11] Em relação ao tramo que estava apoiado nos pilares P5 e P6, caiu praticamente na vertical, ficando parcialmente submerso.



Figura 41 - Ponte Hintze Ribeiro no dia 4 de Março de 2001.

[<http://fotosdotempo.blogspot.pt/2011/03/entre-os-rios-recordando-tragedia-de-4.html>]

3.3.5. As hipóteses de colapso

Depois da queda da ponte, e conhecidas as partes que colapsaram, foram colocadas duas hipóteses em cima da mesa para o mecanismo de colapso.

Uma delas seria o pilar P4 ter caído e conseqüentemente o tabuleiro ter colapsado. A outra hipótese resulta da teoria de o tabuleiro ter colapsado em primeiro lugar e, devido aos esforços que este introduzia no pilar, naturalmente o pilar P4 colapsasse.

A segunda hipótese foi rejeitada devido a vários argumentos que a contradiziam [11]:

- Resultados de análises estruturais efectuadas antes do colapso, mostraram a ausência de defeitos graves no tabuleiro da estrutura. O que

indicava que esta permitia suportar com segurança o peso próprio e as elevadas cargas resultantes do tráfego rodoviário na ponte.

- O facto de os pilares estarem em bom estado de conservação e serem robustos, afastava ainda mais a ideia de que a queda do tabuleiro tivesse provocado o colapso do pilar.
- O relato de uma pessoa que diz ter visto como o colapso ocorreu, acabava por confirmar a primeira hipótese.

Através dos resultados das análises dinâmicas efectuadas pode-se concluir que *“com a perda brusca de apoio no pilar P4, a rotura estrutural do tabuleiro se terá dado numa secção próxima do meio vão do tramo de 100 m (...)”*

Depois de confirmada a primeira hipótese (colapso do pilar P4 e consequente colapso do tabuleiro), existiam duas hipóteses que poderiam ter causado a queda do pilar P4: [11]

1. Existência de falta de suporte do terreno ao nível da base do caixão de fundação;
2. Esforços internos excessivos no corpo do pilar ou no caixão de fundação.

Depois de várias análises efectuadas, concluiu-se que não fazia sentido considerar a segunda hipótese, ficando então provado que o pilar P4 teria colapsado devido à perda de suporte do terreno ao nível da base do caixão de fundação, levando ao colapso posterior do tabuleiro.

3.3.6. As causas

De seguida iremos identificar as causas que determinaram a incapacidade do terreno para suportar as cargas transmitidas pelo caixão de fundação do pilar P4.

As fundações do pilar P4 estavam assentes num material aluvionar incoerente, o que, com o abaixamento do leito do rio, apresenta duas ameaças extremamente perigosas para a segurança da estrutura.

Uma delas assenta na erosão do material que se encontra sob o elemento de fundação, caso o abaixamento for muito intenso, podendo resultar

assentamentos e rotações incontrolláveis levando ao colapso da estrutura. A outra ameaça consiste na perda de resistência ao carregamento do terreno de fundação devido à redução em modo progressivo da altura do material acima da base. Se esta perda de resistência se igualar à carga aplicada acaba por originar a rotura do terreno de fundação. Além disso, poderá ter ocorrido uma combinação destes dois fenómenos e não apenas um deles.

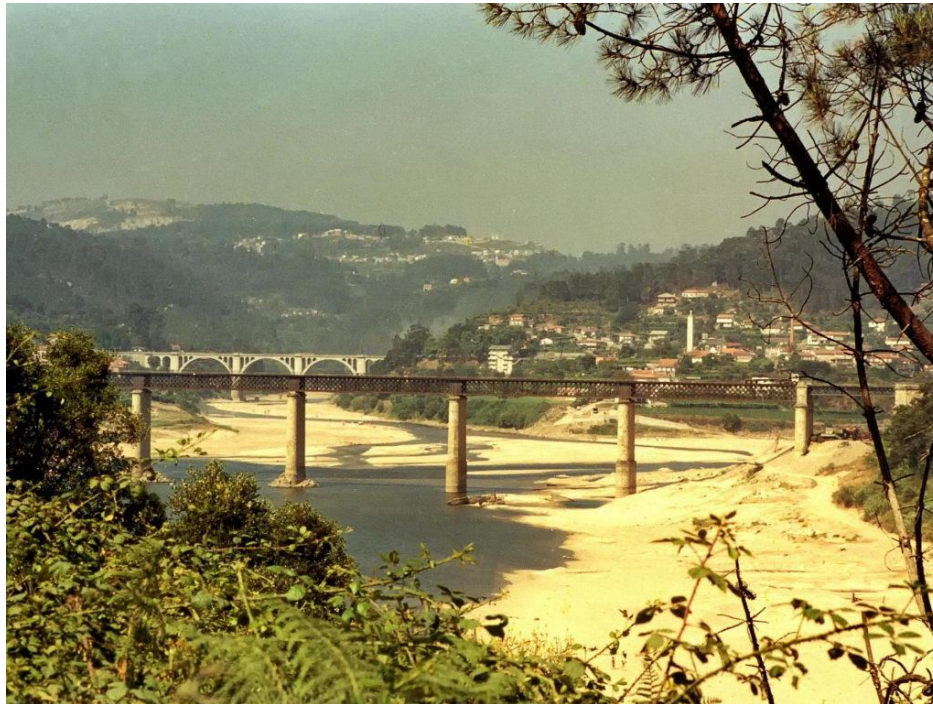


Figura 42 - Ponte Hintze Ribeiro durante o verão de 1970.

[<http://fotosdotempo.blogspot.pt/2011/03/entre-os-rios-recordando-tragedia-de-4.html>]

Dados referentes a uma inspeção subaquática executada em 1986 mostravam que nessa altura o pilar P4 não reunia as condições de segurança necessárias, ou seja, o leito situava-se a cerca de 7 metros acima da base do caixão. Para agravar a situação, um levantamento batimétrico realizado em fevereiro de 2000, indicava que o leito do rio na vizinhança do pilar P4 estava cerca de 6 metros acima da base do caixão de fundação, o que significava um grande risco para a estabilidade do pilar.

Uma das provas de que o houve erosão sob o elemento de fundação foi o facto de a profundidade atingida por esta ter sido mais elevada a montante do que a jusante (típico dos efeitos de erosão local). Este facto foi confirmado porque houve rotação para montante (local onde se iniciou a erosão).

“No caso vertente há condições (baixa profundidade e compacidade média a elevada) para, a haver rotura do terreno de fundação, ela se processar segundo um modo conhecido como rotura geral por corte, ao qual está associado geralmente um colapso súbito (como parece ter-se verificado o colapso do pilar em causa) e um levantamento do terreno do lado oposto àquele para onde roda a fundação (...)” [11].

Depois de analisados todos os dados existentes e ter reunido todas as provas, pode-se chegar à conclusão de que a principal causa que esteve na origem do colapso da ponte Hintze Ribeiro foi a descida do leito do rio na região do pilar P4. Esta descida causou a perda de suporte do terreno situado sob o caixão de fundação (por erosão ou por redução da resistência ao carregamento) que provocou o colapso do pilar P4.

4. LIÇÕES APRENDIDAS

O ciclo de vida de uma ponte pode ser subdividido em três fases: fase de projecto, fase de construção e fase de exploração.

Na fase de projecto, é da máxima importância que todos os gabinetes de consultadoria disponham de pelo menos um engenheiro sénior com experiência significativa que acompanhe os engenheiros mais novos. Além disso, todos os projectos, ou pelo menos os mais importantes, deveriam ser sempre objecto de uma revisão por engenheiros com reconhecida experiência. Como exemplo disso, temos a ponte I-35W em *Minneapolis* (mencionada anteriormente), que como foi possível constatar, a causa principal do colapso deveu-se essencialmente a um erro de projecto. As placas *gusset* foram mal dimensionadas, o que levou ao desastre descrito no terceiro capítulo.

Durante a fase de construção, a organização é de extrema importância. Numa ponte sabe-se que as equipas tem um elevado número de trabalhadores, por isso a coordenação entre estas é vital para que tudo corra com a maior das normalidades evitando ao máximo a ocorrência de acidentes (figura 43). É necessário haver uma comunicação eficiente e garantir que os trabalhadores têm um repouso normal, pois o cansaço acumulado poderá ter um efeito negativo na obra. A execução dos cimbres deve ser acompanhada por uma fiscalização com larga experiência. Contudo, como foi possível observar no capítulo 2, os acidentes continuam a ocorrer e é nesta fase que acontecem com maior frequência.



Figura 43 - Construção da *Newton Navarro Bridge*, Brasil.
[<http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=463633>]

Após a construção de uma ponte é muito importante realizar uma manutenção adequada, o que inclui o agendamento de inspecções periódicas, acompanhadas se necessário de pequenas reparações.

As inspecções têm de ser feitas por pessoas altamente qualificadas, se não, vejamos o que se passou com a *Sgt. Aubrey Cosens V.C. Memorial Bridge*, onde apesar de terem sido feitas pinturas na estrutura e realizadas algumas inspecções periódicas, não conseguiram detectar que os pendurais estavam a ceder e que até dois deles já tinham mesmo fracturado alguns anos antes. Durante as inspecções deve dar-se especial atenção aos riscos de infra-escavação, o que implica inspecções subaquáticas. Sempre que essas inspecções detectem a existência de infra-escavação, os materiais devem ser repostos (restaurados). A manutenção é das fases mais importantes, pois é a que permite prolongar o tempo de vida de uma ponte. Esta tem como objectivo principal garantir a integridade e a segurança estrutural (figura 45 e 46).



Figura 44 - Obras de manutenção da Ponte 25 de Abril (parte 1).
[<http://blogcatim.blogspot.pt/2013/06/plataforma-inovadora-para-manutencao-na.html>]



Figura 45 - Obras de manutenção da Ponte 25 de Abril (parte 2).
[<http://blogcatim.blogspot.pt/2013/06/plataforma-inovadora-para-manutencao-na.html>]

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho analisou-se uma série de colapsos de pontes. Os colapsos de pontes têm normalmente consequências extremamente graves e não são tão raros como se poderia pensar à partida. De facto nos últimos 40 anos verificou-se uma média de dois colapsos por ano em todo o mundo.

Alista-se de seguida as cinco causas mais comuns, ordenadas por ordem de importância (da maior para a menor):

1. Erros cometidos durante a construção;
2. Capacidade de carga da ponte insuficientes;
3. Colisões de barcos;
4. Colisões de comboios;
5. Infra-escavação.

Como se constata, a maior parte dos acidentes ocorrem durante a construção, o que reforça a necessidade de ter equipas de fiscalização altamente treinadas, e idealmente com independência e autonomia relativamente ao poder político, de modo a evitar estabelecer prazos dependentes de calendários eleitorais, cumpridos muitas vezes à custa de construção demasiado rápida e de má qualidade. Alguns directores de obra, quando interrogados a respeito da data de início da construção da sua ponte, respondem com frequência: “Não sabemos quando começa, sabemos apenas quando termina”.

Todas as causas mencionadas podem reduzir-se a uma única: erro humano. Embora seja impossível eliminar o risco de ocorrência de erros humanos, temos a obrigação de eliminar os que resultam de negligências graves. Tal será possível se em todas as fases de vida de uma ponte, cada tarefa desempenhada seja devidamente supervisionada.

BIBLIOGRAFIA

- [1] - *IEEE Reliability Society (2009) Annual Technology Report, Major Bridge Collapses in the US, and Around the World*, James McLinn.
- [2] - *Bridge and Highway Structure, Rehabilitation and Repair*, DR. MOHIUDDIN A. KHAN.
- [3] - *SAFEGUARDING OUR NATION'S BRIDGE INFRASTRUCTURE, IBTTA FACILITIES MANAGEMENT WORKSHOP, April 29, 2008*, Raymond ,J. McCabe, PE
- [4] - *Manual de inspeção rodoviária*, Rio de Janeiro, 1980
- [5] – Tom Everett, P.E., *I-35W Bridge Collapse Investigation*, US Department of transportation, Federal Highway Administration.
- [6] - NTSB. (2008). *Collapse of I-35W Highway Bridge*. Highway Accident Report, National Transportation Safety Board, Washington, DC.
- [7] - Miguel A. Robles Lora (2013), *STUDY OF THE I-35W HIGHWAY BRIDGE COLLAPSE MECHANISM*.
- [8] - Jack Przywara, University of Notre Dame, *Failure in Structural Steels and Overview of I-35W*, Bridge Collapse.
- [9] - *Sgt. Aubrey Cosens V.C. Memorial Bridge: Final Report* – December 1, 2003.
- [10] – AKESSON, B. (2008). *Understanding Bridge collapses*. Taylor & Francis Group, London, UK.

[11] - Relatório final sobre as causas do sinistro ocorrido na ponte Entre-os-Rios em 4 de Março de 2001.

[12] - YANEV, B. (2007). *Bridge Management*. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey.

[13] - SCHEER, J. (2010). *Failed Bridges*.

[14] - SCHNEIDER, J. (2006). *Introduction to Safety and Reliability of Structures*. IABSE, Document 5, 2nd edn.