

# APURAMENTO DAS CAUSAS DA FISSURAÇÃO OCORRIDA NA CORDA SUPERIOR DA TRELIÇA TRANSVERSAL SUPERIOR DA VIGA DE RIGIDEZ DA PONTE 25 DE ABRIL



Pedro Abegão

Gestor Operacional  
IP

Almada, Portugal  
pedro.abegao@

infraestruturasdeportugal.pt



Francisco Godinho

Diretor Departamento  
IP

Almada, Portugal  
francisco.godinho@

infraestruturasdeportugal.pt



Carlos Horta

Diretor Direção  
IP

Almada, Portugal  
santinho.horta@

infraestruturasdeportugal.pt

## SUMÁRIO

Nas ações de inspeção regulares à Ponte 25 de Abril foram detetadas fissuras na corda superior da treliça transversal superior da viga de rigidez, elementos localizados nos “*panel points*” pares e ímpares.

As fissuras, ocorridas no metal base (aço) e em soldaduras que ligam os perfis “C” à chapa superior que funciona como espaçador destes perfis, ambos pertencentes à corda superior da treliça, registaram uma evolução rápida, em termos de número, extensão e propagação pelos “*panel points*” da viga de rigidez.

Em resultado desta realidade a então Estradas de Portugal (EP) implementou um conjunto de medidas, uma das quais o apuramento das causas para esta fissuração com o duplo intuito de, por um lado, impedir a sua continuidade no tempo e, por outro, conceber a solução técnica de reparação mais adequada às situações que, irremediavelmente, não foi possível impedir que acontecessem.

**Palavras-chave:** Fissuras, causas, corda superior, treliça transversal superior, Ponte 25 de Abril.

## 1. INTRODUÇÃO

A Ponte 25 de Abril, entendida como o conjunto da ponte suspensa e o viaduto de acesso norte, liga as cidades de Lisboa e Almada, atravessando o estuário do rio Tejo na sua parte final e mais estreita.

A ponte suspensa define-se como uma ponte pênsil, metálica, que na sua configuração atual, decorrente dos trabalhos de instalação da via-férrea, alargamento do tabuleiro rodoviário e beneficiação geral da estrutura, nos anos 90, destina-se ao tráfego rodoferroviário, o que lhe confere o título de ponte mista.

Estruturalmente, é composta por seis amarrações, construídas desfasadamente no tempo (anos 60 e 90), sete pilares, dois em betão armado, agregados às amarrações dos cabos de suspensão primários, e cinco em estrutura metálica, dos quais, dois deles, os principais, encontram-se fundados no leito do rio Tejo (torres norte e sul) e outros dois, são de desvio dos cabos de suspensão secundários. Acresce uma viga de rigidez e os dois cabos de suspensão, primários e secundários, igualmente construídos desfasadamente no tempo (anos 60 e 90).

A distância entre amarrações é de 2.277,65 metros, que corresponde também ao comprimento total da viga de rigidez, elemento triangulado espacial com quatro cordas longitudinais e diagonais formando as triangulações de cada uma das faces.

Com 21,00 metros de largura e 10,65 metros de altura, a viga de rigidez é contínua em toda a sua extensão e com apoio em todos os pilares da ponte suspensa, repartindo-se assim em seis tramos.

O vão central mede 1.012,88 metros, os vãos adjacentes, 483,42 metros cada e os vãos de margem, um do lado sul e dois do lado norte, 98,64 metros, no primeiro caso, e 99,64 metros cada, no segundo caso.

Sobre a viga de rigidez apoia-se o tabuleiro rodoviário, formado por um conjunto de longarinas e carlingas em aço, que servem de suporte aos painéis em grelha, também eles em aço, que constituem o pavimento rodoviário.

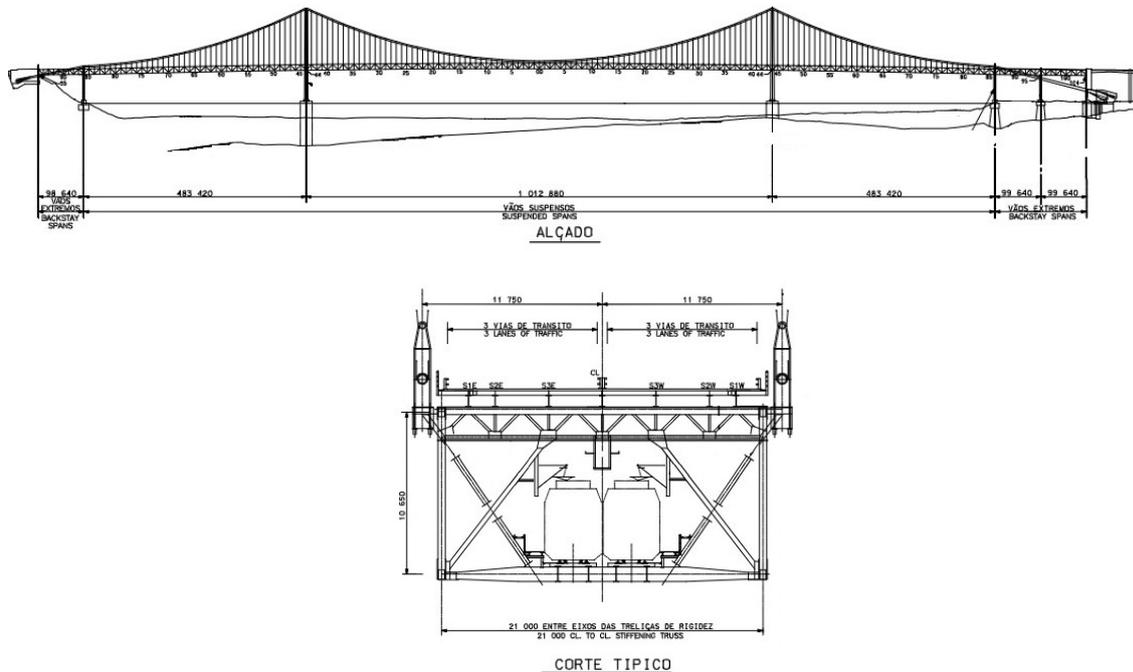
O tabuleiro ferroviário, em contrapartida, encontra-se integrado na viga de rigidez, no mesmo plano das cordas inferiores.

As torres, até aos anos 90, exibiam uma altura de 190,47 metros, data em que a altura total aumentou para 194,17 metros, em virtude do alteamento efetuado para apoio dos cabos de suspensão secundários.

A suspensão da viga de rigidez é assegurada pelos cabos pendurais, componentes que têm por função interligar alternadamente a viga de rigidez aos cabos de suspensão primários e secundários, ou seja, os pendurais respeitantes aos cabos de suspensão primários estão ancorados nos “*panel points*” pares e os pendurais respeitantes aos cabos de suspensão secundários estão ancorados nos “*panel points*” ímpares.

O termo “*panel point*” foi o adotado para designar as secções transversais da viga de rigidez, existindo duzentas unidades ao todo, noventa e cinco do lado sul e cento e quatro do lado norte, tomando como referência o “*panel point*” zero, localizado a meio do vão central e que acresce aos acima descritos na contabilização do seu número total.

As características acima descritas estão referenciadas na figura seguinte [Figura 1]:



**Figura 1. Alçado e secção transversal da ponte suspensa**

Foi através das ações de inspeção regulares à Ponte 25 de Abril, conduzidas em conjunto com os inspetores do Instituto de Soldadura e Qualidade (ISQ), que se detetaram fissuras na corda superior da treliça transversal superior da viga de rigidez, mais concretamente no troço entre a longarina exterior do tabuleiro rodoviário e a corda superior da viga de rigidez, quer do lado de montante, quer do lado de jusante da ponte suspensa.

As fissuras assumem diferentes formas tendo-se procedido ao agrupamento das mesmas pelas tipologias seguidamente enumeradas:

- I. Fissuras radiais com origem nas únicas aberturas de acesso ao interior da corda superior da treliça. [Figura 2];



**Figura 2. Exemplo de fissuras do tipo I.**

- II. Fissuras nos banzos superiores dos perfis “C”, intercetando-os parcial ou totalmente na direção da sua largura. [Figura 3];



Figura 3. Exemplo de fissuras do tipo II.

- III. Fissuras nas almas dos perfis “C” da corda superior da treliça transversal superior da viga de rigidez. [Figura 4].



Figura 4. Exemplo de fissuras do tipo III.

- IV. Soldaduras fissuradas na ligação entre os banzos superiores dos perfis “C” e a chapa superior da corda superior. [Figura 5].

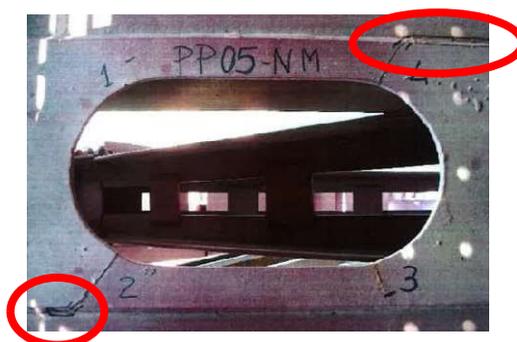


Figura 5. Exemplo de fissuras do tipo IV.

Relativamente a estas tipologias realçaram-se de imediato algumas particularidades como a predominância do tipo I. e, no caso do tipo III., a localização cingir-se única e exclusivamente à parte da alma dos perfis “C” sob as longarinas exteriores do tabuleiro rodoviário, a montante e/ou a jusante de um mesmo “panel point”.

## 2. PRIMEIRAS FISSURAS E MEDIDAS E RESPETIVOS RESULTADOS

As primeiras fissuras foram observadas em janeiro de 2011, conforme registo no relatório de inspeção referente àquele mês, elaborado pelo ISQ, que se transcreve:

*“No PP95SE, a chapa do banzo superior, da viga superior transversal, próximo do assentamento da 1ª longarina do tabuleiro rodoviário, existem 4 fissuras com aproximadamente 40, 70, 70 e 100 mm respectivamente”.*

A reparação verificou-se num curto espaço de tempo.

No mês seguinte, fevereiro de 2011, conforme relatório de inspeção, foi reportada nova fissura no mesmo *“panel point”* 95 sul (PP95S), neste caso do lado de jusante (oeste).

A reparação verificou-se também num curto espaço de tempo.

Novo relato de fissuras só surgiu no relatório de inspeção de dezembro de 2011. Três ao todo, no mesmo *“panel point”* 95 sul e igualmente do lado de jusante.

O ISQ relatou ainda que todas estas fissuras estavam concentradas unicamente a este *“panel point”* 95 sul. Nenhum outro *“panel point”* continha fissuras, deste ou outro género.

Em abril de 2012, o inesperado aconteceu. A disseminação destas fissuras por praticamente todo o comprimento da viga de rigidez, embora sempre circunscritas à corda superior da treliça transversal superior e ao troço entre a longarina rodoviária exterior e a corda superior da viga de rigidez, lado montante e/ou jusante.

Três meses depois, em julho de 2012, o ISQ reportou uma progressão das fissuras conhecidas, prova de que o problema persistia e agravava-se.

Tratou-se de motivos suficientes para justificar uma consulta ao projetista americano Parsons, que em resposta transmitiu que as fissuras mereciam preocupação, mas não punham em causa a curto prazo as condições de segurança e estabilidade da Ponte 25 de Abril.

Recomendou, contudo, um conjunto de medidas a implementar imediatamente, em concreto:

- Execução de furos para travar o avanço das fissuras;
- Continuar a monitorização das fissuras;
- Registrar o tráfego ferroviário na Ponte 25 de Abril.

Complementarmente, perante a informação disponível, o projetista Parsons veiculou a possibilidade de a fissuração ser consequência das extremidades das longarinas rodoviárias se encontrarem *“presas”* à treliça transversal superior, impedindo-as assim de se movimentar livremente, como é entendido acontecer.

Perante esta suspeição, solicitou que se confirmasse com a passagem do tráfego ferroviário pela ponte a existência ou não de movimento nas extremidades das longarinas rodoviárias.

Na sequência, a então EP tomou a decisão de:

1. Proceder à execução dos furos nas extremidades das fissuras;
2. Implementar um acompanhamento permanente e em contínuo das fissuras, através de ações de inspeção específicas;
3. Informar a então Rede Ferroviária Nacional (REFER) e o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) da existência de fissuras e seu estado;
4. Solicitar ao LNEC a instrumentação da Ponte 25 de Abril para recolha de dados originados pela passagem do tráfego ferroviário;
5. Solicitar à REFER informação sobre o tráfego ferroviário na Ponte 25 de Abril;
6. Facultar ao projetista Parsons a informação requerida em termos de tráfego ferroviário na Ponte 25 de Abril e toda a informação disponível sobre as fissuras.

Para habilitar o projetista da informação relevante que o permitisse apurar as causas responsáveis pela fissuração, foram apresentados dois relatórios, um da autoria do LNEC e outro da autoria do ISQ.

No caso do LNEC, o relatório [1] versa sobre o trabalho de medição de extensões entre os “*panel points*” 79 sul e 81 sul, ocorridos nos dias 17 e 18 de julho de 2012, conforme solicitado pela então EP.

Por ser objeto de uma apresentação autónoma nestas Jornadas Portugueses de Engenharia de Estruturas 2022, este relatório não será desenvolvido no presente documento.

No caso do ISQ, o relatório [2] versa sobre a inspeção detalhada às treliças transversais superiores da viga de rigidez, realizada entre os meses de maio e julho de 2012.

A inspeção detalhada consistiu numa inspeção visual a todas as treliças transversais superiores para apuramento com rigor do número de fissuras existentes, a distribuição ao longo da viga de rigidez e as dimensões. Os resultados obtidos permitiram estabelecer a seguinte realidade e evidenciar a magnitude e outras particularidades do problema:

- Número de inspeções realizadas: 390, correspondendo a 97% das zonas com previsibilidade de conterem fissuras (400);
- Quantidade de zonas com fissuras: 129, correspondendo a 33% das zonas inspecionadas (cerca de 1/3);
- Número de fissuras registadas: 355;
- Maioria das zonas com fissuras (lado montante e/ou lado jusante dos “*panel points*” pares e ímpares) correspondem a “*panel points*” pares, ou seja, ao apoio das extremidades das longarinas rodoviárias: 78%;
- Quantidade de zonas que, para além das fissuras radiais à volta da abertura na chapa superior da corda superior da treliça, exibem fissuras nos perfis “C”: 12;
- Número de “*panel points*” ímpares (apoio fixo intermédio das longarinas rodoviárias) com soldaduras fissuradas: 5

Retém-se, portanto, que à data de julho de 2012 confirmava-se a existência de um elevado número de fissuras, com a predominância das fissuras radiais na chapa superior de ligação (classificadas neste documento como tipologia I.) e a respetiva distribuição dispersa ao longo da viga de rigidez.

Resultados obtidos no que concerne à distribuição das fissuras na viga de rigidez:

▪ Relativamente à orientação cardinal da Ponte 25 de Abril:

- Quantidade de zonas com fissuras do lado de montante (este): 68, correspondendo a 53% das zonas inspeccionadas com fissuras e a 17% do total de zonas inspeccionadas;
- Quantidade de zonas com fissuras do lado de jusante (oeste): 61, correspondendo a 47% das zonas inspeccionadas com fissuras e a 16% do total de zonas inspeccionadas;
- Quantidade de zonas com fissuras do lado norte: 60, correspondendo a 47% das zonas inspeccionadas com fissuras e a 15% do total de zonas inspeccionadas;
- Quantidade de zonas com fissuras do lado sul: 69, correspondendo a 63% das zonas inspeccionadas com fissuras e a 18% do total de zonas inspeccionadas;

Retém-se, portanto, que à data de julho de 2012 constatava-se uma distribuição praticamente uniforme das fissuras pelos quatro pontos cardiais (norte, sul, este e oeste).

▪ Relativamente aos tramos da Ponte 25 de Abril:

- Quantidade de zonas com fissuras num determinado tramo comparativamente à quantidade total de zonas existentes nesse mesmo determinado tramo:
  - ❖ P1 – P2: 56%
  - ❖ P2 – T3: 29%
  - ❖ T3 – T4: 41%
  - ❖ T4 – P5: 23%
  - ❖ P5 – P6: 6%
  - ❖ P6 – P7: 0%
- Quantidade de zonas com fissuras num determinado tramo comparativamente à quantidade total de zonas com fissuras:
  - ❖ P1 – P2: 35%
  - ❖ P2 – T3: 19%
  - ❖ T3 – T4: 27%
  - ❖ T4 – P5: 15%
  - ❖ P5 – P6: 4%
  - ❖ P6 – P7: 0%

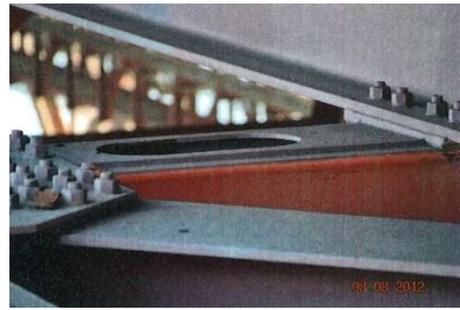
Retém-se, portanto, que à data de julho de 2012 verificava-se uma maior concentração das fissuras do lado sul da Ponte 25 de Abril.

▪ Relativamente à numeração estabelecida para identificar os “panel points”:

A [Figura 6] tipifica as zonas situadas em “panel points” pares (ZP) e “panel points” ímpares (ZI), com previsibilidade de conterem fissuras.



(ZP)



(ZI)

**Figura 6. Tipificação das zonas propícias ao aparecimento das fissuras**

- Quantidade de zonas em “*panel points*” ímpares com fissuras: 100, correspondendo a 78% das zonas inspecionadas com fissuras e a 25% das zonas com previsibilidade de conterem fissuras.
- Quantidade de zonas em “*panel points*” pares com fissuras: 29, correspondendo a 22% das zonas inspecionadas com fissuras e a 7% das zonas com previsibilidade de conterem fissuras.

Retém-se, portanto, que à data de julho de 2012 as fissuras ocorrem maioritariamente nos “*panel points*” ímpares, que são as secções transversais da viga de rigidez onde ancoram os pendurais dos cabos de suspensão secundários e onde as longarinas rodoviárias têm o seu apoio fixo intermédio.

Por último, no que respeita à verificação da movimentação das extremidades das longarinas, as observações efetuadas pelo ISQ, por amostragem, aquando da passagem do tráfego ferroviário, foram consideradas inconclusivas quanto a correlacionar o aparecimento das fissuras e a inexistência de movimentos nas extremidades das longarinas.

### **3. ESTUDOS ESPECÍFICOS REALIZADOS E RESPETIVOS RESULTADOS**

#### **3.1. Análise da fissuração na viga superior da treliça dos painéis da viga de rigidez da Ponte 25 de Abril]**

No âmbito de um contrato então em vigor e após solicitação da então EP, o ISQ procedeu a uma análise aprofundada dos resultados obtidos da inspeção detalhada realizada entre maio e julho de 2012.

O objetivo deste estudo era a apresentação da análise e distribuição da fissuração ocorrida, a medição dos deslocamentos diferenciais e das extensões e a determinação do tipo de esforços relevantes para a fissuração e sua magnitude.

A metodologia usada, as premissas consideradas, os resultados conclusões obtidas encontram-se vertidas no relatório [3] de abril de 2013.

### 3.1.1. Análise da distribuição da fissuração

Procedeu-se ao tratamento e análise da informação obtida em 2012, atualizada, entretanto para a realidade em 2013, numa perspetiva de detetar um ou mais padrões que auxiliassem a determinação das causas da fissuração, sucedida por fadiga.

Para alcançar este fim o ISQ realizou um conjunto de cálculos com base na seguinte informação:

- Somatório dos comprimentos medidos em todas as fissuras: 17 metros;
- A distribuição da fissuração nos “*panel points*” ímpares e nos “*panel points*” pares era de 90% e 10% do comprimento total de fissuras, respetivamente;
- A distribuição da fissuração entre montante e jusante era de 55% e 45%, respetivamente, e entre norte e sul era de 40% e 60%, respetivamente.

Transposta esta informação apenas para os “*panel points*” ímpares foi obtida a distribuição espacial da intensidade de fissuração representada na figura abaixo [Figura 7]:

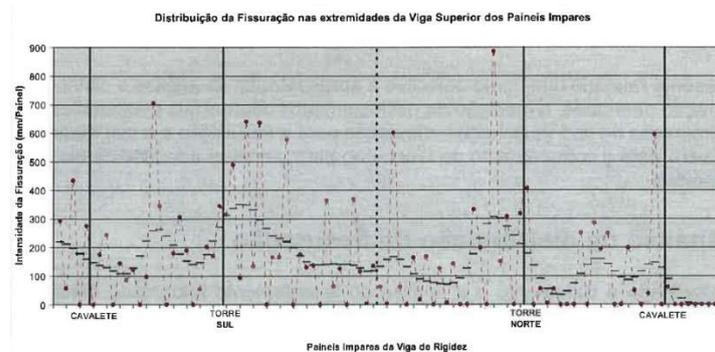


Figura 7. Distribuição espacial da intensidade da fissuração nos “*panel points*” ímpares

Com base nestes resultados, evoluiu-se para a distribuição espacial da intensidade média da fissuração. [Figura 8]:

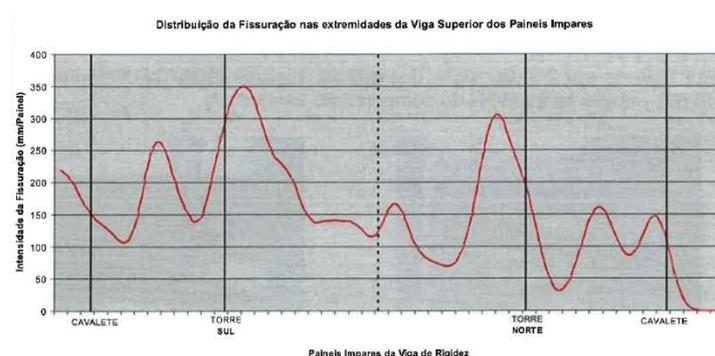


Figura 8. Distribuição espacial da intensidade média da fissuração nos “*panel points*” ímpares

Para confirmar a existência ou não de um ou mais padrões na fissuração, o ISQ referenciou as fissuras da forma abaixo indicada e determinou as intensidades em duas situações distintas. [Figura 9], [Figura 10] e [Figura 11]:



Figura 9. Referenciação das fissuras existentes nos “panel points” ímpares



Figura 10. Distribuição espacial da intensidade da fissuração (b+d) e (a+c) nos “panel points” ímpares

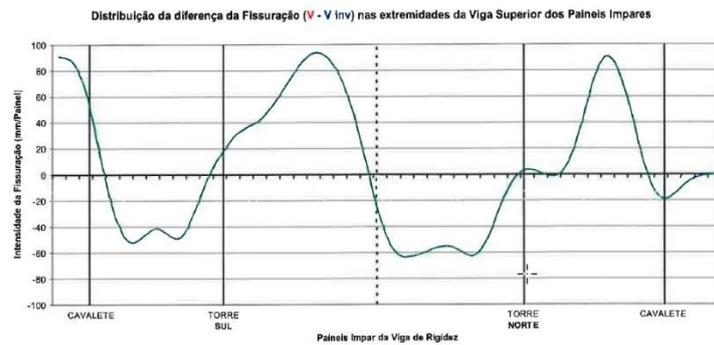


Figura 11. Distribuição espacial da diferença da intensidade da fissuração (b+d) e (a+c) nos “panel points” ímpares

Estas iterações conduziram à identificação do seguinte padrão de fissuração ao longo da ponte. [Figura 12]:

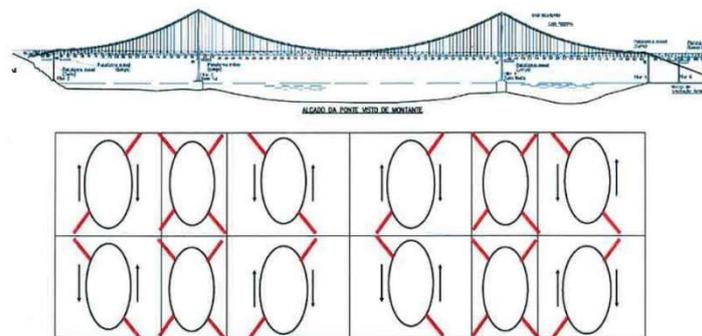


Figura 12. Padrão da fissuração nos “panel points” ímpares

As setas indicam o sentido dos esforços dominantes na chapa superior que interliga os dois perfis “C” da corda superior da treliça transversal superior, responsáveis pela fissuração.

Concluiu o ISQ que o padrão identificado era um importante auxiliar na identificação dos esforços globais dominantes que levam à fissuração por fadiga.

### 3.1.2. Medição e análise de extensões e deslocamentos

Para a medição das extensões e deslocamentos o ISQ selecionou o “*panel point*” 39 sul, por apresentar uma intensidade forte de fissuração. [Figura 13]:

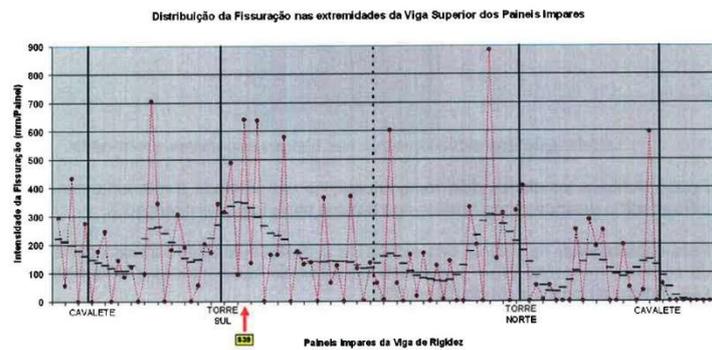


Figura 13. Localização do “*panel point*” 39 sul, selecionado para instrumentar

Os instrumentos foram colocados nos banzos dos dois perfis “C” que integram a corda superior da treliça transversal superior.

No total foram usados dezasseis extensómetros elétricos, colocados próximo da extremidade da corda e do apoio da longarina do tabuleiro rodoviário, e ainda dois transdutores, na extremidade a montante e a jusante, para medição dos deslocamentos relativo dos banzos superiores dos perfis “C” na direção “X”. [Figura 14].

Para correlacionar os valores das extensões e dos deslocamentos relativos com a posição do comboio na ponte foram instaladas duas células fotoelétricas a uma distância de seis metros a norte e sul do “*panel point*” 39 sul.

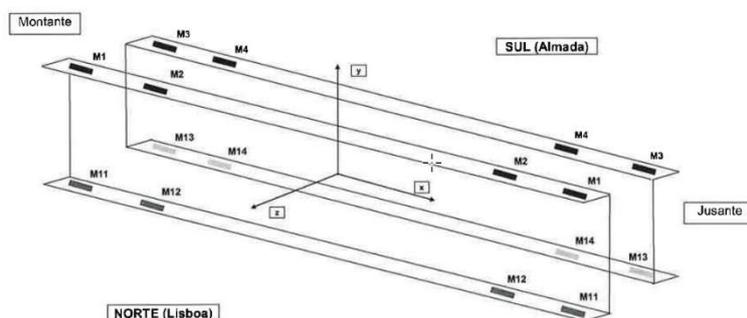


Figura 14. Localização dos extensómetros no “*panel point*” 39 sul

Os dados adquiridos referem-se à passagem de um comboio, de norte para sul, com um comprimento total de cerca de 220 metros, às 16h45m do dia 30 de janeiro de 2013.

Os resultados foram os seguintes:

- Grande amplitude do deslocamento relativo dos banzos superiores, de aproximadamente 2,5 mm. [Figura 15]:

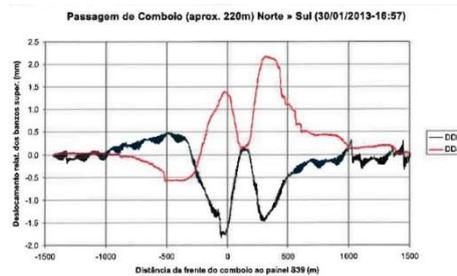


Figura 15. Deslocamento relativo dos banzos superiores na direção “X”

- Amplitudes de tensão muito elevadas, principalmente nos banzos superiores, face aos valores medidos entre 150 MPa e 240 MPa. [Figura 16] e [Figura 17]:

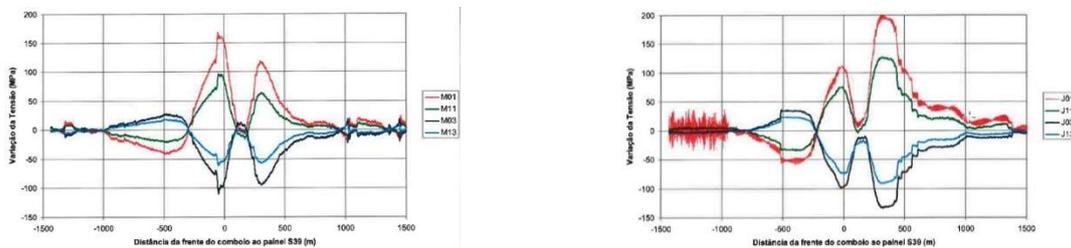


Figura 16. Variação da tensão a montante e a jusante, nos extensómetros exteriores

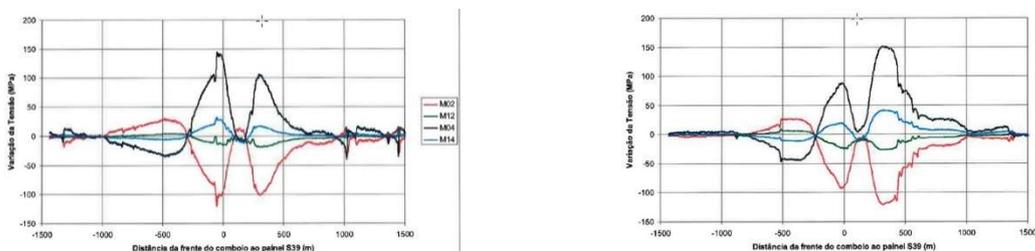


Figura 17. Variação da tensão a montante e a jusante, nos extensómetros interiores

Assumindo que a variação da tensão em cada secção transversal da viga é composta por:

- $S_x (F_x)$  – Variação da tensão uniforme em toda a secção;
- $S_x (M_x)$  – Variação da tensão decorrente da torção e inibição do “warping”;
- $S_x (M_y)$  – Variação da tensão decorrente da flexão no plano horizontal;
- $S_x (M_z)$  – Variação da tensão decorrente da flexão no plano vertical.

Os resultados obtidos para estes componentes foram os indicados na [Figura 18]:

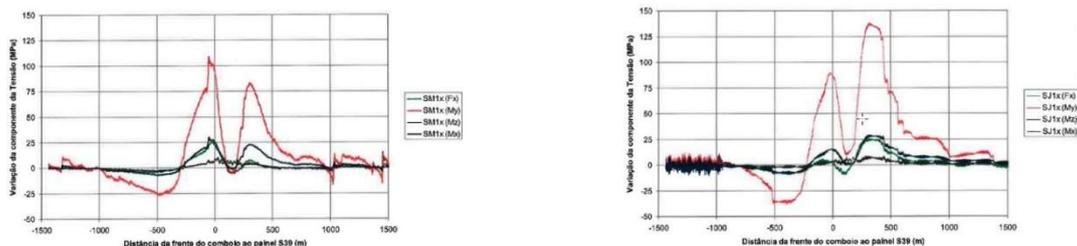


Figura 18. Componentes da variação da tensão na direção “X”, em M1 e em J1

Concluiu-se que a elevada amplitude de tensão provém fundamentalmente da flexão no plano horizontal e torção (inibição de “*warping*”), aquando da passagem de comboios de maior carga.

### 3.1.3. Conclusões

Confirma as conclusões do estudo de julho de 2012, [2], nomeadamente:

1. A fissuração ocorre maioritariamente nos “*panel points*” ímpares, secções transversais da viga de rigidez onde ancoram os pendurais dos cabos de suspensão secundários e onde as longarinas rodoviárias têm o seu apoio fixo intermédio;
2. As fissuras ocorrem maioritariamente na chapa superior de interligação dos perfis “C” (tipologia I.);
3. A distribuição espacial da fissuração não é no geral uniforme ao longo da viga de rigidez. A maior intensidade da fissuração ocorre próximo dos pilares no leito do rio Tejo (torres sul e norte).

E acresce duas outras conclusões:

5. A causa da fissuração por fadiga é a elevada amplitude de tensão nas extremidades da corda superior da treliça transversal superior da viga de rigidez, com a passagem de tráfego ferroviário, principalmente o de maior carga. Esta elevada amplitude é originada pela flexão no plano horizontal e torção (inibição de “*warping*”) nas extremidades da corda superior da treliça transversal dos “*painéis ímpares*”.
6. A flexão horizontal e a torção resultam da interação no plano horizontal entre a viga de rigidez e a estrutura do tabuleiro rodoviário (extremidades das longarinas impedidas de se movimentar).

### 3.2. Ponte 25 de Abril – Relatório para as Estradas de Portugal sobre a avaliação das fissuras por fadiga na treliça transversal superior e nas longarinas ferroviárias [4]

No âmbito de um contrato celebrado com a então EP, o projetista Parsons realizou uma avaliação das fissuras por fadiga observadas na corda superior da treliça transversal superior da viga de rigidez e, simultaneamente, uma outra questão, relacionada com defeitos de fabrico de longarinas ferroviárias, assunto que não será abordado neste artigo por manifesta ausência de relevância.

A Parsons, como já referido neste documento, afixou, face à informação disponível, a possibilidade desta fissuração ser consequência das extremidades das longarinas rodoviárias se encontrarem presas à treliça transversal superior impedindo-as assim de se movimentar livremente, como é suposto.

Neste sentido, o foco da Parsons na análise às causas da fissuração foi a interação do tabuleiro rodoviário na treliça transversal superior da viga de rigidez e os seus efeitos em determinadas circunstâncias.

### **3.2.1. Sistema do Tabuleiro Rodoviário**

O pavimento rodoviário é composto por uma combinação de grelha aberta e grelha preenchida com betão, suportado por carlingas em aço.

Estas carlingas, por seu turno, são suportadas por longarinas contínuas de dois tramos que têm nas suas extremidades furos alongados para permitir deslocamentos longitudinais sobre os “*panel points*” pares da viga de rigidez. Nos “*panel points*” ímpares a longarina está fixa.

O pavimento tem juntas transversais em cada troço de dois “*panel points*” pares, ou seja, na mesma localização das extremidades das longarinas, a fim de se evitar a interação pavimento / viga de rigidez e assim, impedir a participação do tabuleiro rodoviário aquando da deformação global da viga de rigidez pela ação das cargas variáveis e temperatura.

Para que o tabuleiro funcione como previsto no projeto, as extremidades das longarinas, nas juntas transversais, precisam deslizar à medida que a viga de rigidez se deforma, sendo esse deslizamento conseguido à custa de uma superfície de contacto de aço sobre aço.

Esta conceção era a típica da construção de pontes suspensas à data em que a Ponte 25 de Abril foi construída (anos 60).

Representa o que os americanos designam por “*state of the art and the best practice at the time*”.

Esta forma de deslizamento das extremidades das longarinas tem, contudo, uma desvantagem que se pode tornar num problema. É bastante suscetível a bloqueios porque se trata de duas superfícies de aço em contacto, material que não é propriamente o mais indicado quando se pretende movimentos livres e sem grandes atritos.

Para a Parsons, com o passar dos anos, desenvolveu-se corrosão nas extremidades das longarinas e a consequência foi a gradual redução da capacidade das longarinas se movimentarem que, em algumas situações, culminou na inibição por completo de qualquer movimento.

Sem esta capacidade, o tabuleiro rodoviário começou a interagir com as deformações da viga de rigidez, tornando-se num elemento participativo no comportamento estrutural da viga de rigidez.

Com a passagem frequente de comboios, a viga de rigidez deforma-se longitudinalmente e, consequentemente, os “*panel points*” também.

Caso os “panel points” se encontrem fixos às longarinas rodoviárias, por deficiente ou inexistente movimento das extremidades destas últimas, provocam flexão transversal nas treliças transversais superiores da viga de rigidez e conseqüentemente, tensões de fadiga na corda superior daquelas treliças, sendo a zona mais fragilizada para isso acontecer as aberturas existentes na chapa superior de ligação dos dois perfis “C”.

### 3.2.2. Medição das tensões com recurso a extensómetros

Para a avaliação das causas da fissuração, o projetista Parsons solicitou à então EP a disponibilização de valores reais das tensões nas zonas onde ocorreu a fissuração, originados pela passagem de comboios, para serem confrontadas com os resultados das simulações que foram efetuadas nos modelos de cálculo da ponte.

A medição das tensões foi realizada pelo LNEC que, para o efeito, instrumentou os “panel points” 79 sul e 81 sul. [Figura 19]:

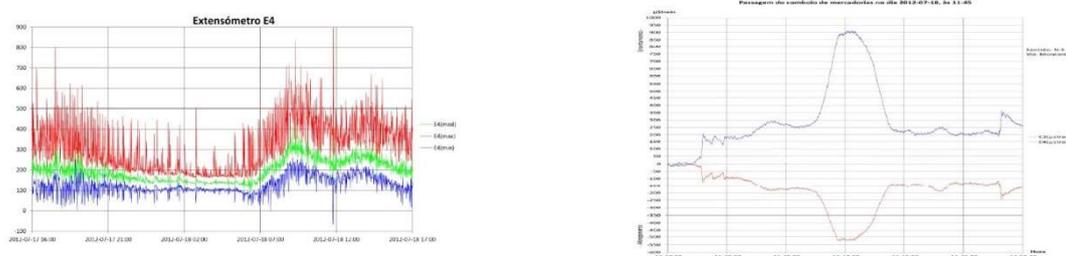


Figura 19. Tensões mínimas e máximas registadas num dos extensómetros na corda superior da treliça transversal superior (imagem esquerda); Pico de tensão em dois extensómetros na corda superior da treliça transversal superior (imagem direita)

As figuras acima mostram tensões elevadas induzidas pela passagem de um comboio de grande carga.

### 3.2.3. Simulações em computador

As simulações em computador foram realizadas usando o modelo global da ponte e um modelo local, detalhado, da zona com fissuração. [Figura 20], [Figura 21]:

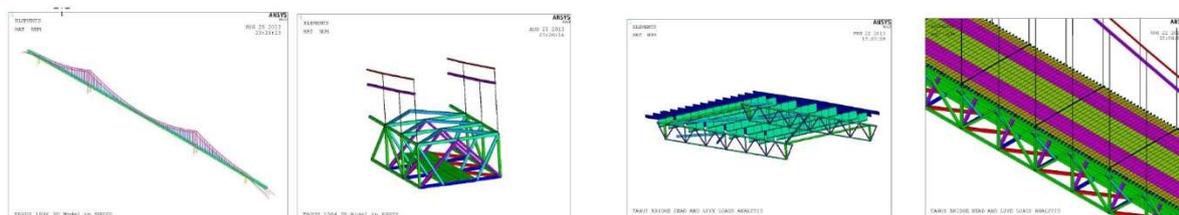


Figura 20. Modelo global da ponte suspensa

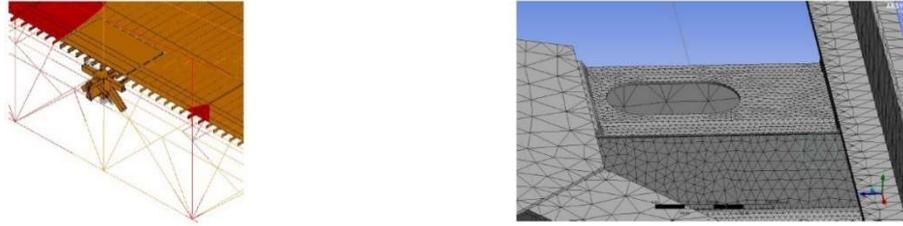


Figura 21. Modelo local da zona com fissuração

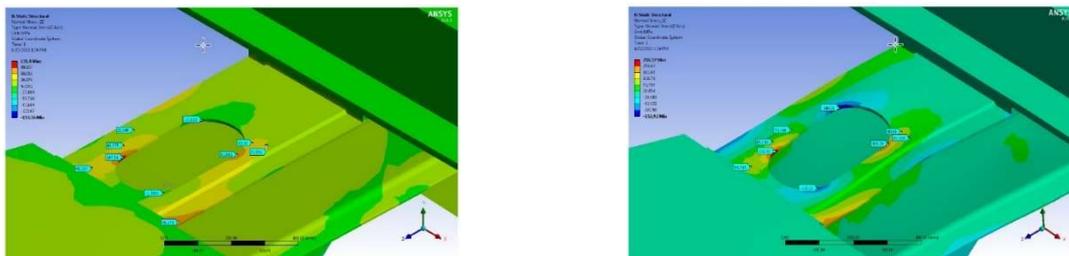
Para as simulações foi recriado o comboio que originou as tensões reais medidas no local e posicionado no ponto mais favorável para a obtenção das tensões máximas na zona com fissuração em estudo, correspondente ao “*panel point*” 81 sul.

A escolha deste “*panel point*” visou permitir comparar os valores teóricos com os valores reais das tensões.

Foram efetuadas duas simulações com base nos seguintes pressupostos:

- Cenário 1 – movimento das extremidades das longarinas permitido;
- Cenário 2 – movimento das extremidades das longarinas impedido.

Os resultados obtidos foram os abaixo ilustrados [Figura 22]:



Cenário 1

Cenário 2

Figura 22. Tensão máxima registada junto à abertura – 107 MPa, cenário 1; tensão máxima registada junto à abertura – 247 MPa, cenário 2

### 3.2.4. Comparação entre os resultados das simulações em computador e os resultados da medição das tensões com recurso a extensómetros

A comparação entre as medições reais de tensões na zona com fissuração no “*panel point*” 81 sul e os resultados dos dois cenários simulados nos modelos global e local mostra-se no quadro seguinte [Quadro 1].

Quadro 1. Comparação entre os valores medidos e calculados das tensões na zona com fissuração do “*panel point*” 81 sul (em MPa)

Location	Strain Gage	Global Model Scenario 2	Local Model Scenario 2	As-Built Scenario 1
E3	110	283	161	25
E4	186	392	206	49
Cut out	N/A	N/A	251	107

Face aos valores indicados no quadro acima, a Parsons concluiu que existia uma muito boa correlação entre os valores da tensão medidos e os valores calculados no cenário 2 e que esta conclusão evidenciava o seguinte:

1. As extremidades das longarinas estão presas e não se movimentam como previsto no projeto original;
2. A inibição das extremidades das longarinas se movimentarem livremente é o fator decisivo para o desenvolvimento de fissuras por fadiga na corda superior da treliça transversal superior.

#### **4. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Com o presente artigo pretendeu-se mostrar duas abordagens diferentes, mas com o mesmo resultado, usadas para o apuramento das causas da fissuração na treliça transversal superior da viga de rigidez.

#### **AGRADECIMENTOS**

Os autores prestam agradecimento à organização das JPEE 2022, pela oportunidade de divulgação do presente artigo, ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), ao Instituto de Soldadura e Qualidade (ISQ) e à Parsons Corporation – New York, pelos contributos decisivos para o apuramento das causas da fissuração generalizada observada na Ponte 25 de Abril, e em especial aos autores dos estudos, nomeadamente:

Eng.º Paulo Silveira, Investigador Principal, Chefe do NOE (LNEC);

Eng.º João Santos, Bolseiro de Doutoramento (LNEC);

Eng.º André Oliveira (LNEC);

Eng.º João B. Luís, Gestor de Projetos, Direção de Serviços Industriais de Engenharia (ISQ);

Eng.º Luís P. dos Santos, Responsável pelo Núcleo Autónomo de Cálculo (ISQ);

Eng.º Kenneth P. Serzan, Vice President (Parsons);

Eng.º Dyab A. Khazem, Senior Engineering Manager, Technical Director (Parsons).

#### **REFERÊNCIAS**

- [1] A. Oliveira, J.P. Santos, P. Silveira – *Medições de extensões entre os painéis 79 e 81, do tramo lateral sul da Ponte 25 de Abril – 17 a 18 julho de 2012*. Relatório 186/2012 – DE/NOE, LNEC, 2012, 43 p.
- [2] J.B. Luís – *Relatório de inspeção detalhada às treliças transversais superiores da viga de rigidez*. Relatório 002 2012, ISQ, 2012, 43 p.
- [3] L.P. dos Santos – *Relatório da análise da fissuração na viga superior da treliça dos painéis da viga de rigidez da Ponte 25 de Abril*. Relatório 09.00204.67.01/01, ISQ, 2013, 108 p.
- [4] D. Khazem, K.P. Serzan – *April 25<sup>th</sup> Bridge – report to Estradas de Portugal (EP) on fatigue crack evaluation of floor truss and railway stringers*. PARSONS, 2013, 32 p.