

38_42

ESTUDO DE CASO

REFORÇO À FADIGA DE PONTE METÁLICA FERROVIÁRIA COM LAMINADO CFRP PRÉ-ESFORÇADO NÃO ADERENTE

Filipe Dourado e Joana Pereira
S&P – Clever Reinforcement Ibérica

Foi desenvolvido um estudo de aplicação do sistema de reforço à fadiga da Ponte metálica ferroviária de Münchestein, na Suíça, através de um sistema de laminados CFRP pré-esforçado não aderente.

A Ponte de Münchestein localiza-se perto da cidade de Basel, permite a travessia do Rio Birs e foi construída em 1875 por Gustav Eiffel. Em 1891, 15 anos após entrada em serviço, a ponte colapsou aquando da passagem de um comboio de passageiros. O acidente foi investigado pelo Prof. L. Tetmajer, primeiro diretor do EMPA. Desta investigação concluiu-se que a fórmula de Euler para a encurvadura deveria ser modificada para elementos esbeltos. Foi

então construída uma nova ponte em 1892, com um único vão, para restabelecer a ligação ferroviária. O tráfego normal diário inclui comboios de mercadorias e passageiros.

Os métodos de reparação e reforço tradicionais de pontes metálicas envelhecidas envolvem geralmente soluções pesadas com elementos metálicos, também susceptíveis à fadiga.

Os materiais de reforço CFRP têm vindo a ser utilizados em muitas aplicações de reforço por terem um elevado rácio resistência-peso, elevada resistência à corrosão e excelente performance à fadiga. O recurso a pré-esforço permite utilizar maior capacidade resistente do material, o que resulta no aumento das tensões de cedência e capacidade resistente dos elementos estruturais reforçados.

Neste estudo-caso apresenta-se um método inovador de reforço com laminados CFRP, que dispensa a preparação da superfície, diminuindo o tempo de aplicação do sistema em obra. A ponte foi construída em ferro forjado. De acordo com a documentação disponível, o módulo de Young, tensão de cedência e tensão última são 200 GPa, 220 MPa e 320 MPa, respectivamente. Os laminados de carbono são do tipo S&P C-Laminate 150/2000 50/1.2 (50 mm de largura e 1,2 mm de espessura) com $E=167,2$ GPa e resistência à tração de 2710 MPa. Para medir a extensão dos laminados foram colados vários extensómetros – um extensómetro na zona central de cada laminado tipo 6/120 LY16, com fator $k=2,06 \pm 1$ e resistência eléctrica de $120W \pm 0,35\%$. Para medir a extensão das



[a] Ponte sujeita à ação de Comboio S3



[b] Constituição de 10 painéis com comprimento total de 45.2 m, altura de 6.5 m e largura de 5 m, em construção enviesada a 45°

Figura 1 > Ponte de Münchestein – extraído de [5]

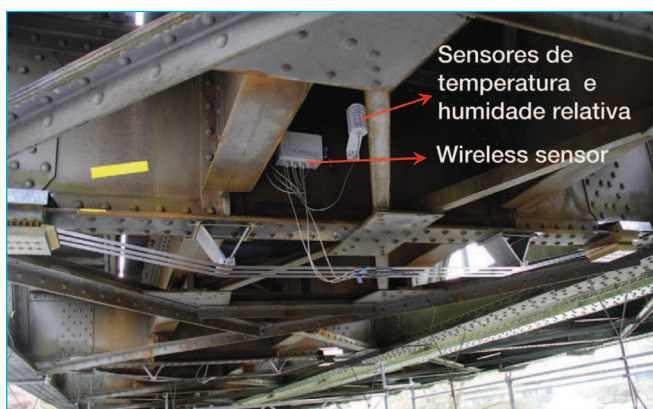


Figura 2 > Sistema de monitorização wireless do reforço - extraído de [5].

vigas metálicas foram colocados extensómetros magnéticos $\sqrt{a}=0,544$ na alma inferior das vigas do tipo FGMH-1 (CBF-6), $k=2,02 \pm 2$ e resistência elétrica de $120W \pm 0,5\%$ [5].

Foi também instalada uma rede de sensores wireless, que agrega os vários equipamentos de medição mencionados, bem como medidores de temperatura ambiente e humidade relativa. A rede de sensores wireless, que inclui sensores de 8 canais e nós das estações base foi fornecida pela Decentlab GmbH [5] – ver Fig 2. Previamente à aplicação do sistema de pré-esforço não aderente na estrutura da ponte foram realizados ensaios laboratoriais com diversos tipos de carregamento, de forma a estudar o comportamento estático e o comportamento à fadiga das vigas metálicas [3]. Os ensaios à fadiga foram realizados de tal forma que o método analítico desenvolvido fosse ensaiado experimentalmente. Foi ensaiado um total de

seis vigas metálicas em duas fases: uma fase inicial de quatro vigas, e duas adicionais em fase posterior. Todas as vigas foram ensaiadas com recurso a um sistema simétrico de quatro pontos de flexão e um vão de 5 m. Em cada uma das vigas, foram abertos dois pequenos orifícios a meio vão do banzo inferior, para criar zona de concentração de tensões e consequente abertura de fissuras por fadiga, bem como simular o efeito das aberturas dos rebites das vigas. A viga de controlo (não reforçada) foi ensaiada para uma carga cíclica de fadiga F entre 2,5 e 68 kN, tendo sido detetada uma fissura no ciclo $N=600\,000$ e o ensaio parado. As outras três vigas reforçadas foram ensaiadas com níveis de pré-esforço de 30% ($N=2\,000\,000$ de ciclos para carga similar à viga de controlo), 22% ($N=4\,000\,000$ sem abertura de fissuras) e 14% respetivamente ($N=1\,200\,000$ com abertura de fissura). Constatou-se correspondência de

resultados entre os ensaios experimentais e a formulação analítica. Por questões de dispersão de resultados, foram ainda ensaiadas mais duas vigas, com procedimento idêntico ao descrito. Maior detalhe sobre o plano de ensaios realizados poderá ser consultado em [3]. No que se refere à estrutura da ponte metálica, as tensões na alma inferior das vigas foram determinadas por via da modelação em elementos finitos, considerando as cargas permanentes e a sobrecarga do comboio de mercadorias D4 (ver Fig. 3), de acordo com as imposições do código Suíço SIA.

O método analítico desenvolvido tem por base o princípio de Constant Life Diagram (CLD) e os critérios de fadiga de Goodman e Johnson modificado. Estes critérios incorporam a variação de tensões, o nível médio de tensões e as propriedades do material – Fig. 4. Com base nestes critérios foram determinados os níveis

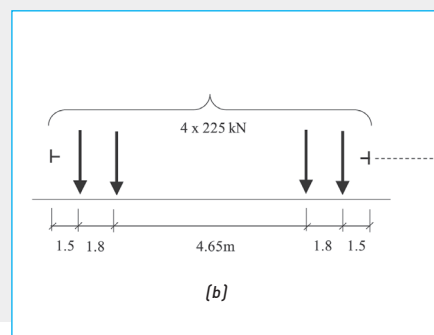
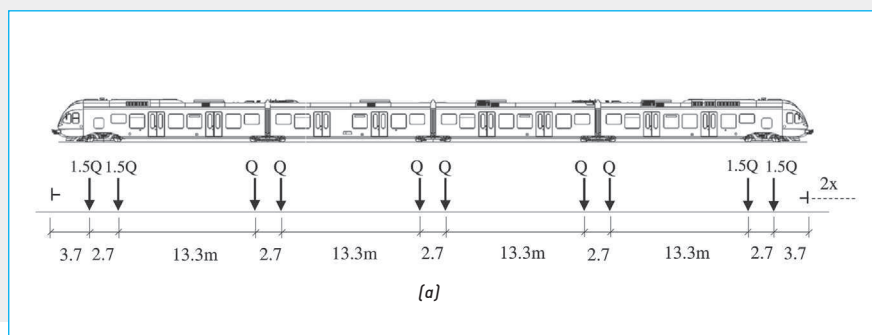


Figura 3 > Modelo de carga de comboio de passageiros S3 (a) e de comboio de mercadorias D4 (b) – extraído de [5].

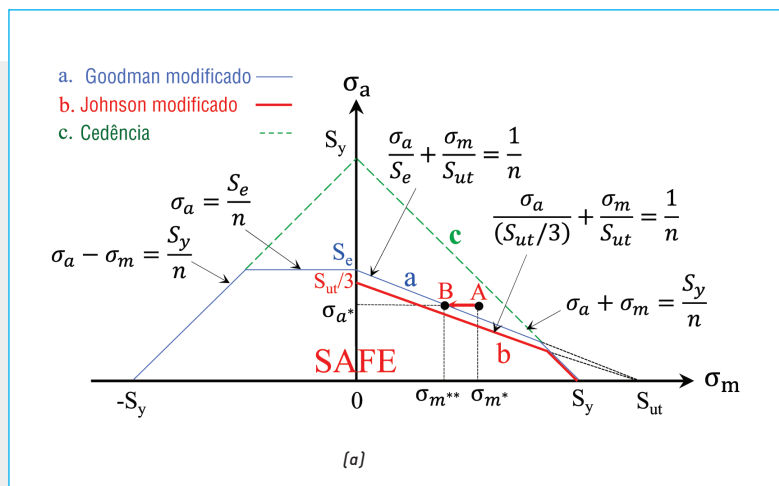
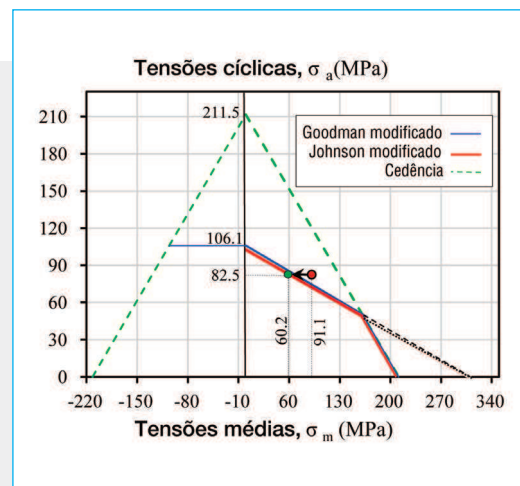


Figura 4 > CLD representativo do critério de Goodman e de Johnson modificado – extraído de [5].



[b]

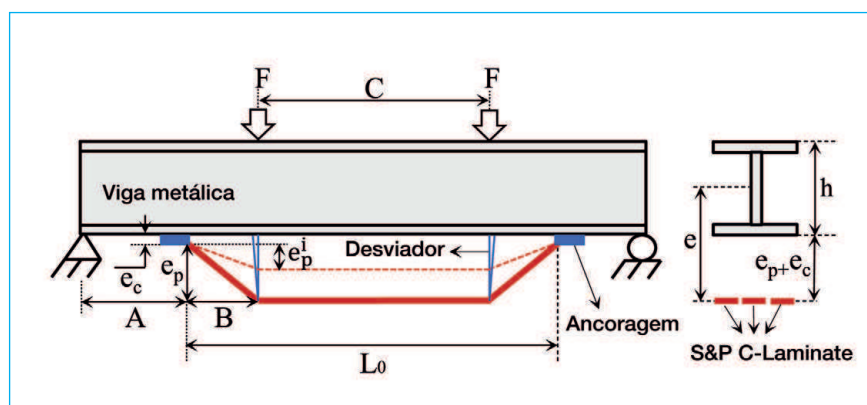


Figura 5 > CLD representativo do critério de Goodman e de Johnson modificado – extraído de [5].

de pré-esforço mínimos para prevenir o início do aparecimento de fissuras por fadiga.

A força de pré-esforço aplicada ao sistema de reforço com laminados CFRP permite reduzir o nível médio de tensões, de forma a que a estrutura metálica, inicialmente sujeita a níveis de tensões elevadas, passe para um regime de tensões seguro e tendencialmente sem fadiga. De acordo com a metodologia analítica desenvolvida, foi também possível determinar os níveis de tensão da viga em análise. Concluiu-se que, para um fator de segurança de $n=1,04$ de acordo com o Critério de Johnson modificado,

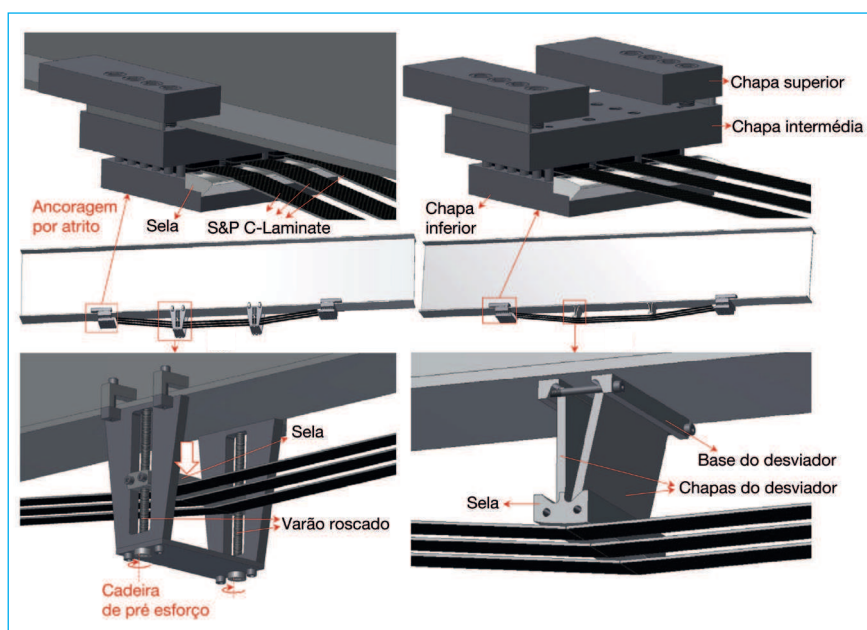
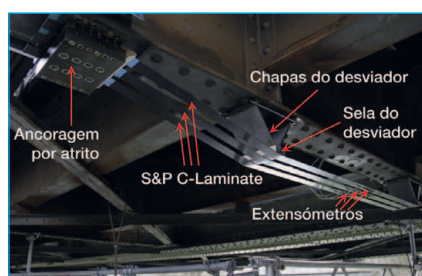


Figura 6 > Componentes do sistema de reforço – extraído de [5].

o nível de pré-esforço do laminado de CFRP é da ordem de 35% [5].

O pré-esforço nas vigas metálicas da ponte é aplicado mecanicamente por meio um sistema temporário, e a ligação entre o sistema de reforço e os elementos estruturais é constituída por dois sistemas de placas de ancoragem e duas selas de desvio. O sistema dispensa a tradicional colagem e, portanto, não está limitado pela aderência do CFRP aos elementos metálicos – ver Figs. 5 e 6.

Ao fixar as ancoragens por atrito foi observada uma excentricidade inicial $e_p = 77\text{mm}$. Para obter o nível de reforço pretendido foi necessária uma excentricidade $e_p = 142\text{mm}$ [5]. A aplicação do reforço foi realizada com recurso a um macaco, e a variação de tensões nos elementos foi medida pelo sistema de monitorização instalado. A operação de aplicação de pré-esforço foi realizada com a estrutura em serviço e demorou cerca de 30 minutos. A Fig. 7. ilustra as medições efetuadas durante esta operação. Os picos assinalados no gráfico referem-se à passagem de dois comboios.

No gráfico da Fig. 8 ilustram-se os níveis de tensão antes e depois da aplicação do sistema. Pode observar-se a passagem de um estado de tensões de tração (antes da aplicação do sistema de reforço) para um estado de tensões de compressão.

A rede wireless de sensores colocada na estrutura permitiu fazer a comparação do nível de tensões obtido no modelo de elementos finitos tridimensional, na zona crítica da ponte – ver Fig. 9.

Em conclusão, foi desenvolvido e aplicado um sistema de reforço à fadiga em ponte metálica ferroviária com 120 anos na Suíça, por meio de sistema de pré-esforço não aderente de laminados CFRP. Esta solução permitiu a redução do nível médio de tensões na estrutura, e a passagem de regime de fadiga para um estado de tensões seguro e fora dos limites de fadiga. Foi desenvolvido um método analítico com base no *constant life diagram* para determinar o nível mínimo de pré-esforço que inibe a abertura de fissuras por fadiga na estrutura metálica da ponte, e permite que esta transite de um regime de vida limitado para um regime infinito no que à fadiga diz respeito [5].



Relés de Controlo de Nível para líquidos condutivos

Série CLD2E/CLP2E:

Uma linha de produtos agora mais competitiva com os dois novos modelos de relés de nível.

Com apenas 17,5mm de largura, o relé de nível modular CLD2EB1BU24 é o modelo ideal para uma poupança de espaço no quadro elétrico.

A série CLP2EB1BXXX com 4 tensões de alimentação diferentes (24VDC, 24VAC, 115VAC e 230VAC) está desenhada especificamente para aplicações de controlo de enchimento/esvaziamento com sensibilidade regulável de 5kΩ a 150kΩ.



Para mais informações

CARLO GAVAZZI UNIP. LDA

Rua dos Jerónimos, 38B 1400-212 Lisboa - Tel. 213 617 060
carlogavazzi@carlogavazzi.pt - www.gavazziautomation.com

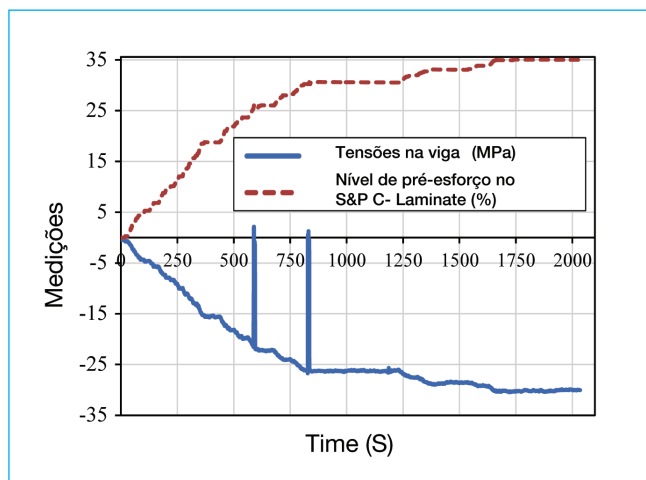


Figura 7 > Monitorização da aplicação do pré-esforço *in situ* – extraído de [5].

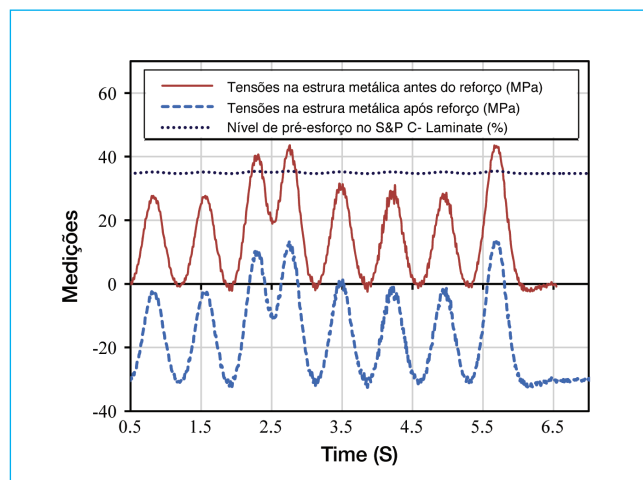


Figura 8 > Tensões na zona crítica da viga n.º 5 sujeita à ação do comboio S3 – extraído de [5].

A aplicação deste sistema tem como vantagens a possibilidade de aplicação em superfícies rugosas; a rápida instalação; a fácil aplicação de pré-esforço sem necessidade de recurso a hidráulicos; a ausência de necessidade de interromper o tráfego; uma intervenção estrutural mínima (dispensa preparação de superfície); a fácil remoção do sistema e um nível de pré-esforço ajustável.

Nesta obra foram aplicados laminados e sistema de pré-esforço desenvolvido pela S&P. A S&P também disponibiliza soluções de laminados CFRP pré-esforçados colados usualmente aplicadas em estruturas de betão armado. A realização deste projeto contou com o envolvimento de parceiros industriais (Swiss

Commission for Technology and Innovation (CTI); S&P Clever Reinforcement Company AG e Swiss Federal Railways (SBB)) e parceiros de investigação (EPFL, Swiss Federal Institute of Technology Lausanne, Steel Structures Laboratory (ICOM); ETHZ, Swiss Federal Institute of Technology Zürich, Institute of Structural Engineering (IBK) e EMPA, Swiss Federal Institute of Material Science and Technology, Structural Engineering Laboratory, Dübendorf).

REFERÊNCIAS

- [1] Ghafoori E., Motavalli M., Botsis J., Herwig A., Galli M., Fatigue strengthening of damaged steel beams using unbonded and bonded prestressed CFRP plates, *International Journal of*

Fatigue, 2012, 44, pp. 303 – 315.

- [2] Ghafoori E., Schumacher A., Motavalli M., Fatigue behavior of notched steel beams reinforced with bonded CFRP plates: Determination of prestressing level for crack arrest, *Engineering Structures*, 2012, 45, pp. 270 – 283.

- [3] Ghafoori E., Motavalli M., Nussbaumer A., Herwig A., Prinz G.S., Fontana, M., Determination of minimum CFRP pre-stress levels for fatigue crack prevention in retrofitted metallic beams, *Eng Struct* 84, 2015, pp. 29 – 41.

- [4] Ghafoori E., Motavalli M., Normal, high and ultra-high modulus carbon fiber-reinforced polymer laminates for bonded and unbonded strengthening of steel beams, *Materials and design* 67, 2015, pp. 232 – 243.

- [5] Ghafoori E., Motavalli M., Nussbaumer A., Herwig A., Prinz G.S., Fontana, M., Design criterion for fatigue strengthening of riveted beams in a 120-year-old railway metallic bridge using pre-stressed CFRP plates, *Composites: Part B* 68, 2015, pp. 1 – 13.

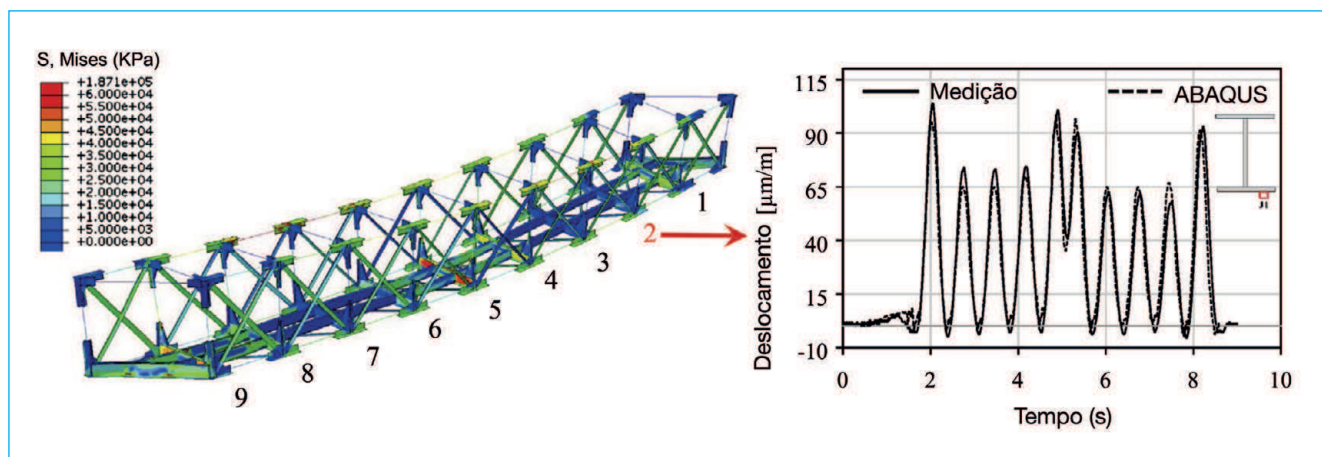


Figura 9 > Comparação de tensões do modelo de elementos finitos e tensões medidas na estrutura devido à passagem de um comboio S3 - extraído de [5].