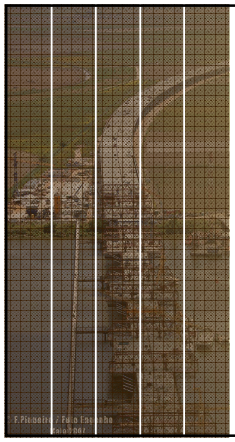


A utilização de sensores em fibra óptica na monitorização de estruturas

2º ENCONTRO NACIONAL DE GEODESIA APLICADA
LNEC
12 E 13 de Outubro de 2009

Carlos Félix
Joaquim Figueiras

A utilização de sensores em fibra óptica na monitorização de estruturas

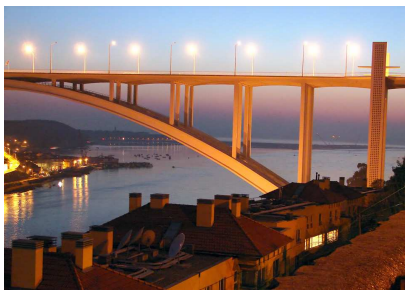
1. Introdução
   - Objectivos da monitorização das estruturas
   - Sistemas de monitorização de estruturas
2. Sensores ópticos
3. Sensores de Bragg em fibra óptica
   - Introdução
   - Princípio de funcionamento
   - Vantagens
   - Desenvolvimentos laboratoriais
4. Casos de obra
   - Ponte de Trezói
   - Ponte Luiz I
   - Ponte da Lezíria
5. Considerações finais

INTRODUÇÃO – Objectivos da monitorização das estruturas

Aumento do período de vida útil das obras em condições de economia e de segurança

Economia

Segurança



INTRODUÇÃO – Objectivos da monitorização das estruturas

Aumento do período de vida útil das obras - Economia

As infraestruturas têm sofrido degradação acelerada, sendo necessário

- Gestão e manutenção mais eficaz
- Intervenções de reabilitação mais eficientes

Intervenção tardia significa → custo da reparação = custo da substituição

Monitorização permanente para prevenção é essencial na gestão das infra-estruturas

É uma questão de economia

INTRODUÇÃO – Objectivos da monitorização das estruturas

Aumento do período de vida útil das obras - Segurança

- Pontes que necessitam de urgente intervenção não são identificadas
- Pontes que não necessitam de o ser são reforçadas

Monitorização permanente das obras de arte é essencial

É uma questão de segurança

INTRODUÇÃO – Objectivos da monitorização das estruturas

Controlo da execução / reparação / reforço

- No caso de grandes obras
- Projectos inovadores
- Uso de novos materiais
- Processos construtivos avançados

Responsabilidade acrescida e maiores riscos para os Engenheiros;

Responsabilidades são assumidas se houver informação contínua sobre o desempenho das estruturas.

É uma questão de responsabilidade

INTRODUÇÃO – Objectivos da monitorização das estruturas

Controlo da execução

Monitorização de um viaduto metálico durante a construção

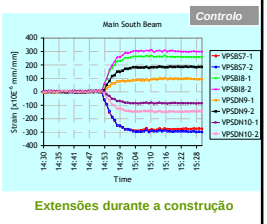
Objectivo: Controlo da fase de construção e calibração do modelo

Monitorização permanente durante a fase construtiva e exploração.
Sistema estático de base eléctrica (60 sensores).

INTRODUÇÃO – Objectivos da monitorização das estruturas

Controlo da execução

Transporte do viaduto até à sua posição final



Extensões durante a construção

INTRODUÇÃO – Sistemas de monitorização das estruturas

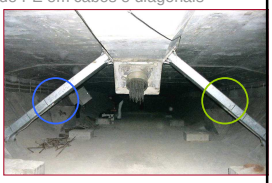
Controlo da execução

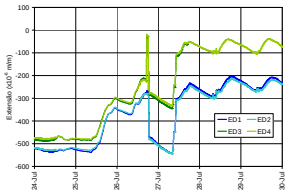
Viaduto sobre a VCI - observação durante a construção e a fase de exploração

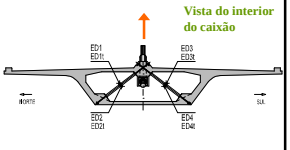
- Entrada Este da cidade do Porto;
- Viaduto assimétrico com 3 planos de tirantes e mastro com forma especial para contrabalançar a assimetria dos dois vãos principais
- Tabuleiro em caixão e mastro monitorizados, durante a construção/exploração

INTRODUÇÃO – Sistemas de monitorização das estruturas

Acompanhamento da fase de aplicação de PE em cabos e diagonais

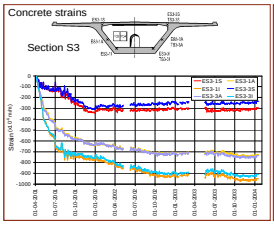


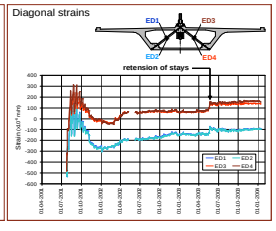




INTRODUÇÃO – Sistemas de monitorização das estruturas

Monitorização durante a fase de serviço (3 anos)





Benefícios da monitorização

- Acompanhamento dos processos construtivos e vigilância permanente da obra
- Informação em tempo real de qualquer incidente permite um conhecimento mais profundo para tomar as decisões mais adequadas

INTRODUÇÃO – Objectivos da monitorização das estruturas

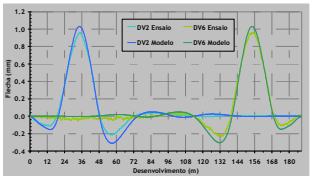
Verificação da conformidade da estrutura executada

Análise dos valores medidos em obra
com base nos previstos no projecto

Validação do modelo do projecto;
Verificação do comportamento da estrutura face às condições ambientais (temperatura) e a acções estáticas e dinâmicas.

Verificação da conformidade da estrutura executada

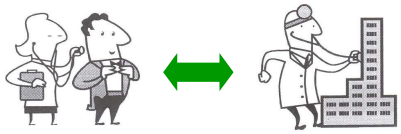
Traçado de linhas de influência - Efeito nas secções instrumentadas da estrutura quando atravessada por veículos a velocidade reduzida e constante



Linhas de influência das flechas DV2 e DV6 (experimental *vs* numérico)

Analogia – Corpo humano / Estrutura

SHM – Structural Health Monitoring
– Monitorização da Integridade Estrutural



Médico/Paciente — Engenheiro SHM/Estrutura

Cuidados preventivos de saúde → aumento da esperança de vida

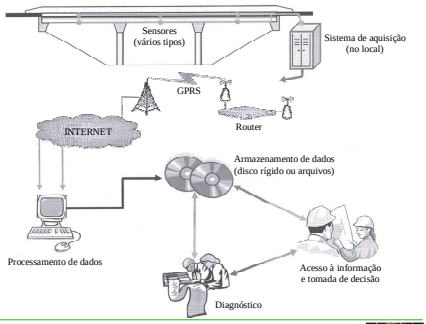
Monitorização estrutural → prolongará a vida das obras de arte

Grandezas em observação

Condições ambientais	Temperatura ambiente e das estruturas Humidade relativa Pluviosidade Insolação
Deslocamentos	Flechas Movimentos de juntas de dilatação
Rotações	
Deformações	
Acelerações	Da estrutura e do solo
Durabilidade	Corrosão das armaduras Potencial de corrosão
Infraescavação	Em fundações de pontes

Componentes de um sistema de monitorização

- **Sensores**
- **Equipamento de alimentação e de aquisição**
- **Sistema de transmissão de dados**
- **Sistema de processamento e de armazenamento de dados**
- **Sistema de gestão de dados e de apoio à decisão**



Sensores

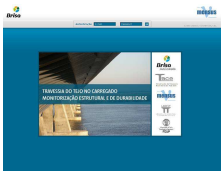
Termómetros	Sensores de HR (…)
Extensómetros	Transdutores de deslocamento
Inclinómetros	Sensores de corrosão
Acelerómetros	Sonares

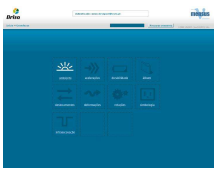
Transdutor de deformação em material compósito

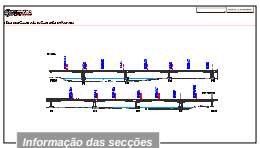
Transdutor de flechas

Transdutor de deformação em varão de aço inox

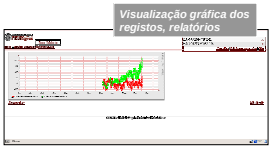
Sistema de gestão de dados







Informação das secções instrumentadas



Visualização gráfica dos registos, relatórios

INTRODUÇÃO – Actividades do LABEST em SHM

LABEST

Unidade de I&D da Faculdade de Engenharia
Universidade do Porto

- Tem um grupo dedicado à Monitorização de Estruturas

Website
www.fe.up.pt/labest

Projectos de investigação e contratos com a indústria têm fornecido os meios para o desenvolvimento e aplicação de novos sistemas de monitorização.

SENSORES ÓPTICOS

Famílias de sensores em sistemas automáticos

Eléctricos

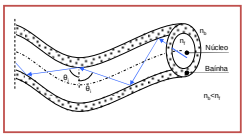
Cordas vibrantes

Resistência eléctrica

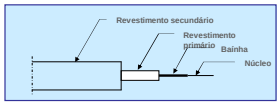
Ópticos

- Sensores baseados na modulação do comprimento de onda (sensores de Bragg)
- Sensores baseados na modulação da fase (sensores de Fabry-Perot)
- Sensores baseados na modulação da intensidade (sensores de microcurvatura)

SENSORES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA – Introdução



Luz reflectida no interior de uma fibra óptica



Sistema de protecção de uma fibra óptica
(8µm + 125 µm + 245 µm)

Fibra óptica reforçada com Kevlar®

Fibra óptica com e sem revestimento primário

SENSORES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA – Introdução

Modulação periódica do índice de refracção

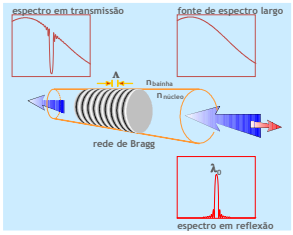
Espelho selectivo em comprimento de onda

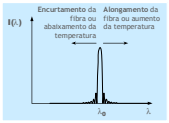
$$\lambda_0 = 2\, n_0\, \Lambda$$

n_0 – índice efectivo de refracção
Λ – período espacial de modulação

$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = G_\varepsilon\, \Delta\varepsilon + G_T\, \Delta T$$

G_ε – factor de ganho para a deformação
G_T – factor de ganho para a temperatura



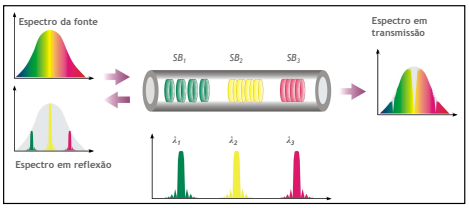


Efeito da deformação num sensor de Bragg

SENSORES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA – Multiplexagem

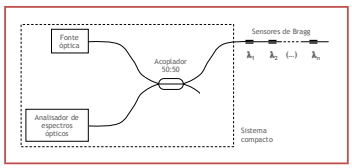
São dispostos em série, sensores com comprimentos de onda central distintos (assinatura do sensor)

No espectro em reflexão é possível identificar a resposta de cada sensor

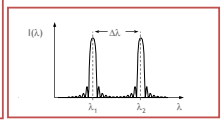


Principal vantagem: distribuição numa mesma fibra de diversos sensores

SENSORES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA – Sistemas de interrogação

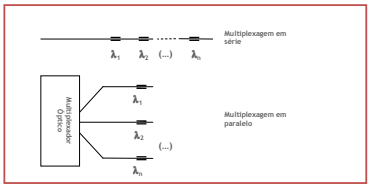


Representação esquemática de um sistema de interrogação de redes de Bragg

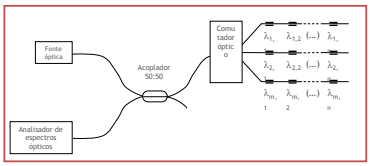


Afastamento em comprimento de onda entre dois sensores de Bragg

SENSORES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA – Técnicas de multiplexagem



Representação esquemática de multiplexagem em série e em paralelo de redes de Bragg

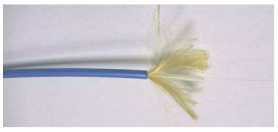


Sistema híbrido de multiplexagem

SENSORES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA

Grandezas físicas:

- Deformação
- Rotação
- Deslocamento
- Temperatura
- PH
- Humidade



Fibra óptica

Principais vantagens:

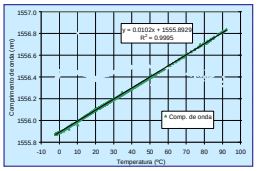
- Imunidade aos campos electromagnéticos
- Reduzida perda de sinal
- Facilitadas as técnicas de multiplexagem
- Elevada precisão sem perda da referência

Algumas desvantagens:

- Maiores cuidados na instalação tendo em vista a robustez
- Menor disponibilidade de equipamentos de aquisição

SENSORES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA – Sensores de temperatura

SFO usado como sensor de temperatura



$$\frac{\lambda-\lambda_0}{\lambda_0} = G_\varepsilon\,\Delta\varepsilon + G_T\,\Delta T$$

$\lambda_0 = 1556$ nm

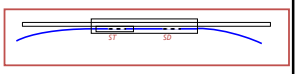
$S_T = 10.2\text{pm}/°C$

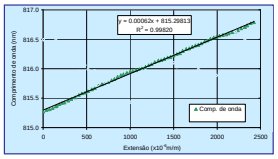
$G_T = 6.56\times10^{-6}/°C$

Relação linear entre o sinal óptico e a variação de temperatura

SENSORES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA – Sensores de deformação

SFO aplicado por colagem a varão de aço nervurado





Variação linear entre o sinal óptico e a deformação do aço, até à rotura

$$\frac{\lambda-\lambda_0}{\lambda_0} = G_\varepsilon\,\Delta\varepsilon + G_T\,\Delta T$$

$\lambda_0 = 816$ nm

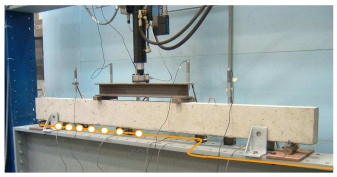
$S_\varepsilon = 0.62\ \text{pm}/\mu\varepsilon$

$G_\varepsilon = 0.76\times10^{-6}/\mu\varepsilon$

SENSORES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA – Sensores de deformação

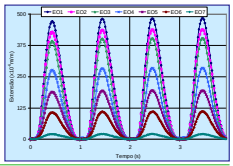
Viga reforçada com um laminado de CFRP

Observação durante um ensaio de flexão com ciclos de carga/descarga



Viga reforçada durante o ensaio

Aplicação da fibra óptica



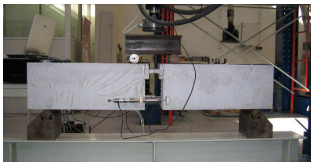
⇨ **Frequência dos ciclos de carga/descarga – 1Hz**

⇨ **Frequência de aquisição do sinal – 50Hz**

Resultados da medição

SENSORES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA – Sensores de deformação

- Varão de aço inox liso na parte central com estrias em hélice de profundidade crescente até à extremidade
- Aderência variável pode acomodar fendas até 2.5mm de abertura sem plastificação do varão



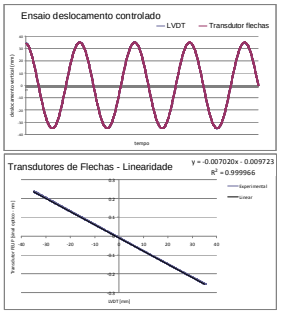
Transdutor óptico de flechas

Foi lançado o desafio de dotar a nova ponte sobre o Tejo – Ponte da Lezíria – de um sistema de monitorização permanente das flechas com base na tecnologia de fibra óptica.

O resultado foi o desenvolvimento de um novo transdutor de flechas.

- Sistema de nivelamento hidrostático
- Princípio activo – sensores de Bragg em fibra óptica
- Sensibilidade da ordem dos 0.1mm
- Imune às variações térmicas
- Instalados 11 destes sensores na ponte principal

Transdutor óptico de flechas



Testes de laboratório evidenciaram excelente estabilidade e robustez

Sensor alvo de um processo de pedido de patente

Sensores de Bragg em fibra óptica aplicados em obra (LABEST)

Obra	*ano*	*Número e tipo de sensores*	*Objectivo da selecção/opção*
Ponte sobre o Rio Sorraia na A10 – Projecto SMARTE	(2004)	30 sensores de deformação 10 sensores de temperatura (embebidos no betão)	Comparação da eficiência dos sistemas eléctricos e ópticos de interrogação e aquisição de sinal.
Ponte Luiz I	(2006)	118 sensores de deformação 10 sensores de temperatura 8 sensores de deslocamento	Sistema permanente e durável aplicado a estrutura metálica.
Ponte da Lezíria	(2007)	60 sensores de deformação 6 sensores de temperatura (embebidos no betão) 11 sensores de flecha 4 sensores de temperatura	Sistema inovador para medição de curvaturas e flechas nos tramos da ponte.
Ponte Eiffel em Viana do Castelo (Reabilitação)	(2007)	60 sensores de deformação (colados à superfície do aço)	Redução do ruído e eliminação das interferências de campos electro-magnéticos.
Casa da Música no Porto (Reforço de casca)	(2008)	10 sensores de deformação 4 sensores de temperatura (colados a compósito CFRP)	Não intrusivo. Possibilidade de leituras periódicas com equipamento portátil sem perder referência inicial.
Ponte ferroviária de Trezói Projecto: POCTI/ECM/57286/2004 (Fadiga)	(2008)	6 sensores de deformação (colados à superfície do aço)	Avaliação dos níveis de tensão em serviço. Comparação do desempenho de sensores ópticos com eléctricos.

Casos de obra que ilustram a aplicação de SFO na monitorização estrutural:

Ponte de Trezói – Ponte metálica ferroviária na linha da Beira Alta

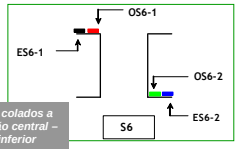
Objectivo: Avaliação dos níveis de tensão em serviço (POCTI/ECM/57286/2004).
Comparação do desempenho de SFO com eléctricos.

Monitorização estática e dinâmica baseada em sensores eléctricos e na tecnologia de fibra óptica.

Extensómetros eléctricos versus SFO

Vista geral

Vista do interior do tabuleiro



Sensores colados a meio do vão central – corda inferior

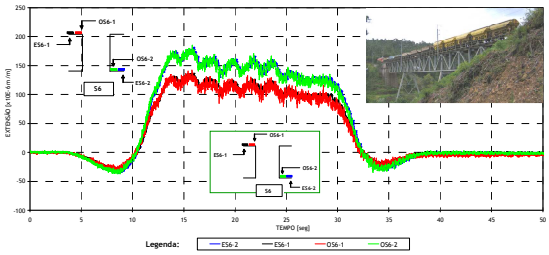
Extensómetros eléctricos versus SFO

Caracterização do tráfego

Deformações registadas na corda inferior

Passagem de um comboio de mercadorias

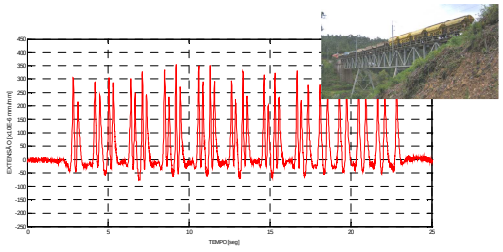
Leituras a 100Hz



Extensómetros eléctricos versus SFO

Caracterização do tráfego

Deformações registadas na secção de um dos carris



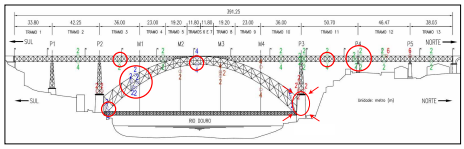
Ponte Luiz I – Ponte metálica centenária no Porto

Objectivo: Avaliação do comportamento antes, durante e após a reabilitação
Sistema de monitorização permanente da obra (vigilância)

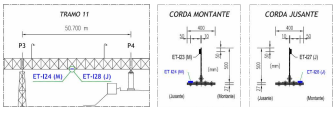
Monitorização estática e dinâmica baseada na tecnologia de fibra óptica (136 sensores).

Arquitectura do sistema instalado em obra

- 59 pares de extensómetros observaram as deformações de outras tantas peças:
  - ✓ 32 no tabuleiro superior;
  - ✓ 14 no arco;
  - ✓ 6 em pilares metálicos;
  - ✓ 9 em montantes de suspensão;
- 10 sensores de temperatura:
  - ✓ 6 em cordas do arco;
  - ✓ 4 no tabuleiro superior;



Obtenção dos efeitos das sobrecargas - longarina



Análise qualitativa dos resultados:

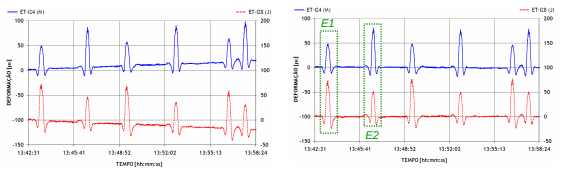
E1 – metro na direcção Porto – Gaia

E2 – metro circula na direcção Gaia – Porto

A periodicidade da passagem foi de cerca de 7 minutos

O peso de cada composição é aproximadamente o mesmo

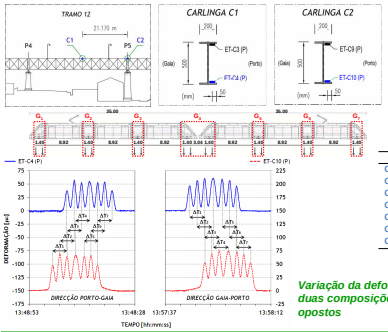
O efeito da acção também o é.



Variação da deformação sem correcção do efeito da temperatura

Variação da deformação corrigida do efeito da temperatura

Obtenção dos efeitos das sobrecargas - carlinga



Algoritmos de pós-processamento permitem a obtenção de informação relevante

Cargas por grupo de eixos (kN).

	Em vazio	Estimativa
G_1	84.9	104.4
G_2	116.0	126.5
G_3	110.6	138.4
G_4	172.0	200.7
G_5	110.6	134.1
G_6	116.0	125.3
G_7	84.9	103.7

Variação da deformação para a passagem de duas composições que circulam em sentidos opostos

Projecto TACE (2006/08)

- Monitorização estrutural e de durabilidade – Ponte da Lezíria;
- Maior projecto de monitorização realizado em Portugal (500 sensores).

Objectivos:

- Avaliação do comportamento da estrutura durante a construção;
- Sistema de monitorização permanente com acesso remoto em tempo real da Ponte Principal e Viadutos de Acesso.

SHM – Ponte da Lezíria – Projecto inovador

Parte integrante do projecto de execução da ponte – Nova especialidade

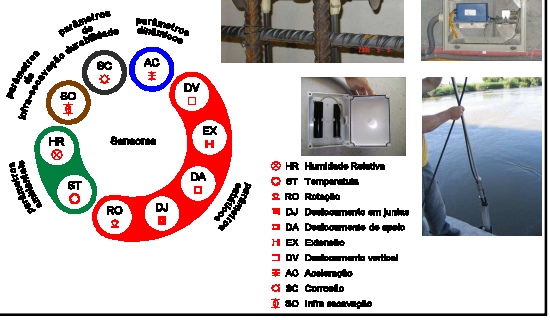
Vol. dedicado – Plano de monitorização estrutural e de durabilidade

NewMENSUS - spin off do LABEST - Unidade de Investigação da FEUP

- *Monitorização de estruturas*
- *Inspecção e diagnóstico*
- *Avaliação da integridade e da durabilidade estrutural*
- *Consultoria*

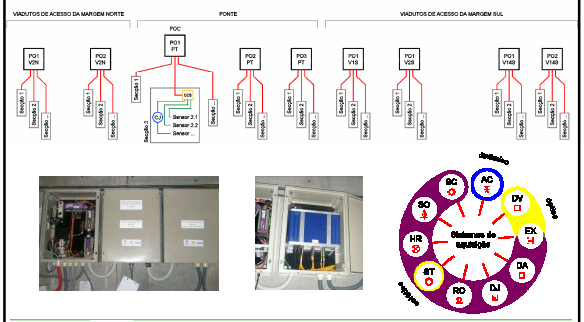
Rede de sensores

(eléctricos e ópticos)

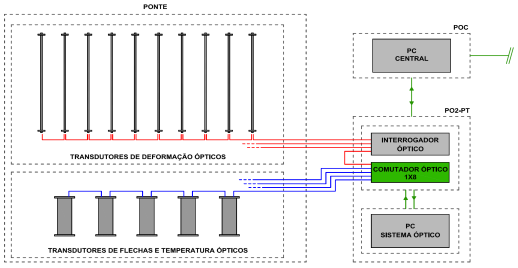


- HR Humidade Relativa
- ST Temperatura
- RO Rotação
- DJ Deslocamento em juntas
- DA Deslocamento de apoio
- EX Extensão
- DV Deslocamento vertical
- AC Aceleração
- SC Corrosão
- SO Infra vermelho

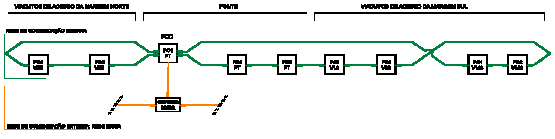
Rede de sensores



Rede de sensores em fibra óptica



Integração de todos os sistemas de aquisição numa rede de comunicação única

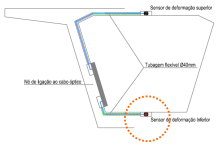


MONITORIZAÇÃO DA PONTE DA LEZÍRIA - concepção

Sistema de monitorização óptico

Novo transdutor de deformação desenvolvido no LABEST

Sensor com caixa de ligação

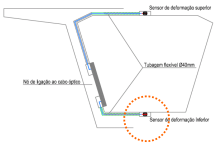


MONITORIZAÇÃO DA PONTE DA LEZÍRIA - instalação

Sistema de monitorização óptico

Instalação do transdutor de deformação

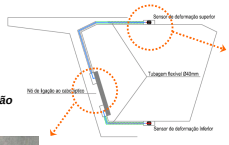
Posicionamento antes da betonagem



MONITORIZAÇÃO DA PONTE DA LEZÍRIA - instalação

Sistema de monitorização óptico

Instalação do transdutor de deformação



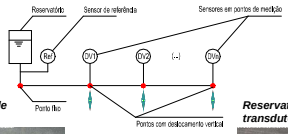
Caixa de derivação no interior do caixão da ponte

Acesso às ligações para manutenção

MONITORIZAÇÃO DA PONTE DA LEZÍRIA - instalação

Sistema de medição de flechas

Sistema baseado no sistema de nivelamento hidrostático no qual se utilizaram os novos transdutores de flechas desenvolvidos no LABEST



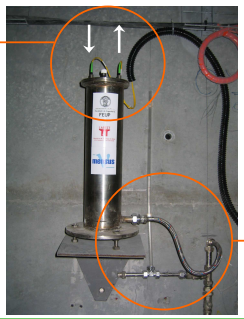
Transdutor em ponto de medição

Reservatório e transdutor de referência

MONITORIZAÇÃO DA PONTE DA LEZÍRIA - instalação

Sistema de medição de flechas – pormenor da instalação

Ligação à rede de sensores em fibra óptica



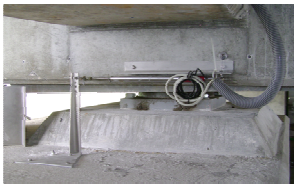
Ligação ao circuito hidráulico

MONITORIZAÇÃO DA PONTE DA LEZÍRIA - instalação

Instalação de outros equipamentos, cablagens e acessórios

Armários no passadiço técnico

Condução de cabos no interior do caixão da ponte

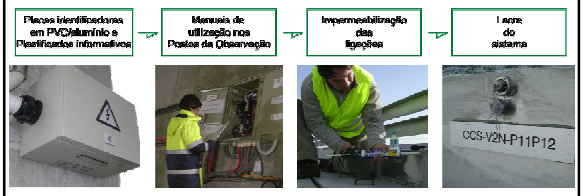


Transdutor de deslocamento em aparelho de apoio

MONITORIZAÇÃO DA PONTE DA LEZÍRIA - instalação

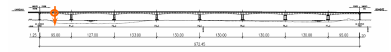
Testes e verificações finais do sistema

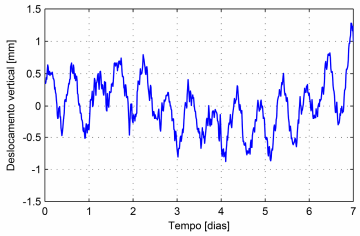
Manual de imagem, impermeabilizações e lacre



MONITORIZAÇÃO DA PONTE DA LEZÍRIA - registos

Monitorização da evolução das flechas



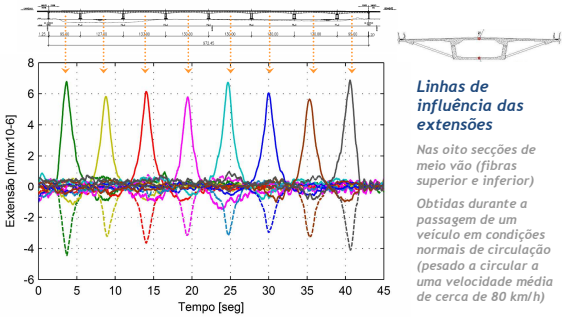


Evolução das flechas no 1º vão

Condicionadas pela acção da temperatura

MONITORIZAÇÃO DA PONTE DA LEZÍRIA - registos

Monitorização das extensões



Linhas de influência das extensões

Nas oito secções de meio vão (fibras superior e inferior)

Obtidas durante a passagem de um veículo em condições normais de circulação (pesado a circular a uma velocidade média de cerca de 80 km/h)

CONSIDERAÇÕES FINAIS

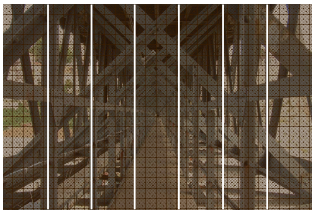
Considerações finais

- A importância dos novos Sistemas de Monitorização de Estruturas tem sido crescente – Responsabilidade, Economia, Conhecimento.
- A fiabilidade e a robustez dos sistemas de monitorização é um aspecto essencial.
- Os sensores em fibra óptica têm demonstrado as suas potencialidades para integrarem os sistemas de monitorização – possuem inúmeras vantagens quando comparados com os de base eléctrica.
- É necessário desenvolver novos transdutores e equipamentos mais robustos e mais competitivos – a tecnologia óptica é o futuro dos sistemas de monitorização estrutural.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos

À restante equipa LABEST, à FCT, à NewMENSUS, ao Metro do Porto, à REFER, à construtora TACE e à BRISA S.A.



Obrigado pela atenção