

# INSPECÇÃO, AVALIAÇÃO E REABILITAÇÃO DA PONTE DA ARRÁBIDA

**Júlio APPLETON**

Eng. Civil

A2P Consult, Lda



## SUMÁRIO

Nesta conferência apresenta-se a metodologia adoptada na inspecção da Ponte da Arrábida e a avaliação do estado de deterioração com particular destaque para a penetração de cloretos do ambiente marítimo. Inclui-se também uma avaliação das bases de cálculo e níveis de segurança considerados no projecto e a verificação da segurança com base na actual regulamentação. Finalmente, descrevem-se os trabalhos de reabilitação realizados.

## 1. INTRODUÇÃO

A Ponte da Arrábida sobre o Rio Douro é uma obra admirável cuja execução foi concluída em 1963, sendo considerada um marco da engenharia de estruturas.

Trata-se de uma ponte com um desenvolvimento total de 493.20 m com um arco de 270 m de corda e 52 m de flecha. O tabuleiro em laje vigada com 12 vigas, tem uma largura de 25 m e vãos de 21.20 m. O tabuleiro apoia em cada alinhamento transversal com 4 pilares através de carlingas. Na zona do Rio as acções são transmitidas pelos pilares a dois arcos gémeos com 8 m de largura cada e secção em caixão bicelular (Fig. 1).

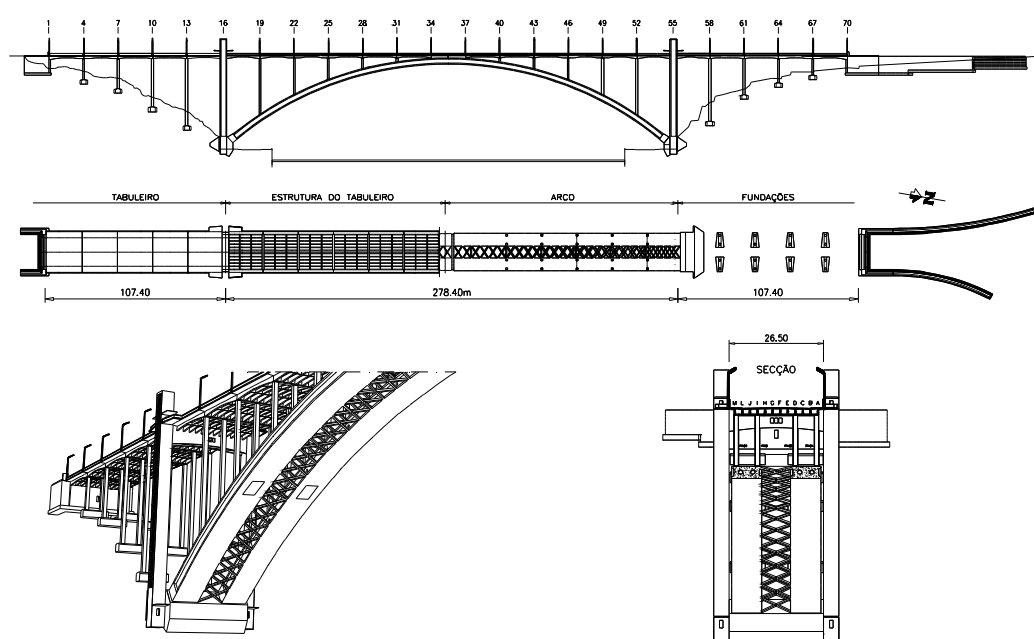


Figura 1

## 2. O PROJECTO E A EXECUÇÃO DA OBRA

Esta obra está muito bem documentada, sendo de realçar o nível extraordinário, pormenor e clareza do projecto, da autoria do Prof. Edgar Cardoso.

O betão e o aço especificados correspondem aos actuais B 40 e A 235. A relação água/cimento adoptada no estudo da composição do betão foi de 0.32.

As superfícies de betão foram objecto de pintura de protecção desconhecendo-se no entanto a especificação da tinta adoptada.

O recobrimento das armaduras não está explicitamente indicado no projecto, decorrendo no entanto das peças desenhadas e cálculos que se terá adoptado um recobrimento de 3 cm para o tabuleiro e 4 cm para o arco e pilares.

O local de inserção da Ponte é bastante agressivo, sendo a zona da Ponte entre pilastras especialmente exposta à acção do vento. A Ponte insere-se na zona atmosférica do ambiente marítimo.

Na Fig. 2 apresentam-se fotos e desenhos relativos à construção dos arcos que constitui o aspecto mais espectacular desta obra. Nessas fotos é visível o atirantamento provisório do cimbra do arco, o fecho central e um desenho ilustrando a ripagem lateral do cimbra para a execução do segundo arco.

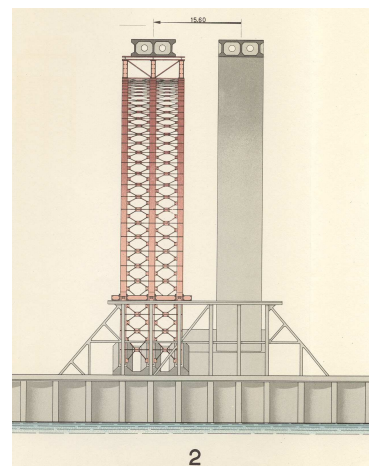
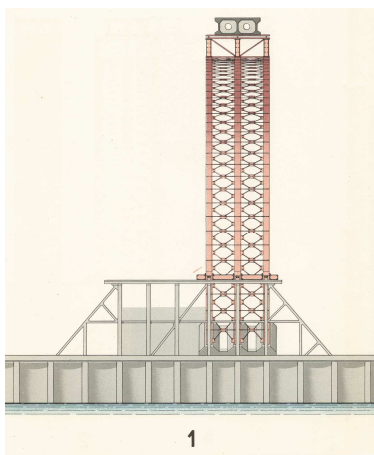
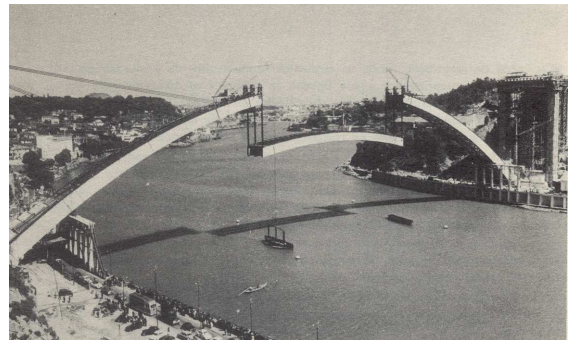
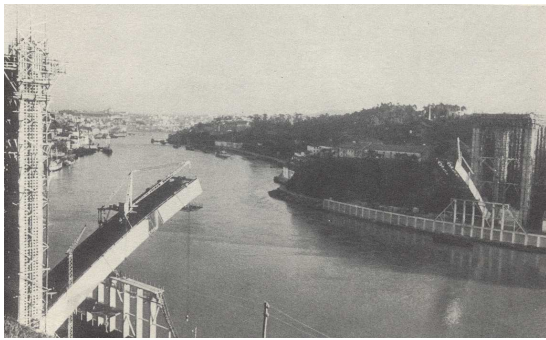


Figura 2

### **3. INSPECÇÃO E ENSAIOS**

#### **3.1. Inspeção Visual**

A inspeção visual teve como objectivo preceder-se a um mapeamento das patologias conforme se ilustra na Figura 3. Em simultâneo com a inspeção visual realizou-se o ensaio de detecção de delaminação, por percussão com martelo nas superfícies de betão.

Uma das principais observações cuja percepção correcta só foi possível com o acesso junto às superfícies do betão da estrutura foi a extensa delaminação do betão e armaduras à vista que se observam nas vigas do tabuleiro, em especial na zona sobre o arco. Esses danos localizam-se com maior incidência junto aos cantos inferiores das vigas conforme se ilustra na Figura 3.

Constatou-se também que grande parte da corrosão de armaduras ocorre em locais de juntas de betonagem ou locais de deficiente colocação e vibração do betão traduzidas por segregação dos inertes e em locais de recobrimento muito pequeno.

**TABULEIRO - VISTA INFERIOR**

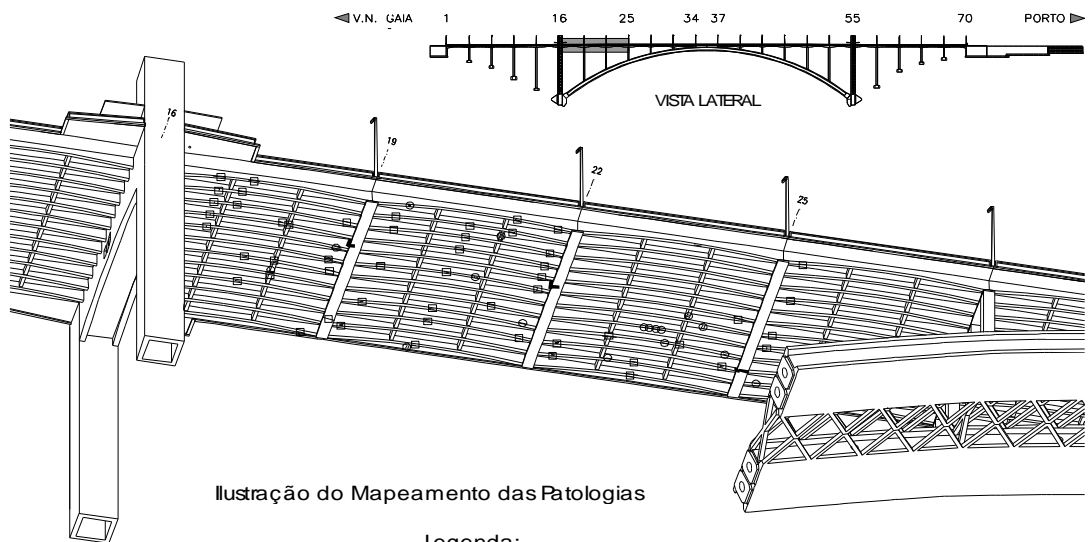


Ilustração do Mapeamento das Patologias

Legenda:

- Fendilhação..... —
- Amadura à vista..... ○
- Delaminação..... □



Figura 3 - Ilustração das Patologias e seu Mapeamento

### 3.2. Observação e Ensaio Efectuados

Numa obra com esta dimensão há que planear antecipadamente os locais onde os ensaios deverão ser realizados. Para o efeito e tendo em conta a diversidade de elementos estruturais, as diferentes condições de exposição e as diferentes condições de acesso definiram-se e seleccionaram-se um conjunto de regiões representativas da totalidade da estrutura (Figura 4). Em cada uma dessas regiões realizaram-se os seguintes ensaios:

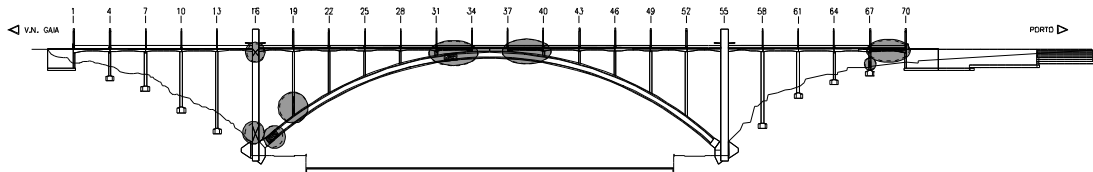


Figura 4 - Localização das Zonas Ensiadas

- a) Observação topográfica da obra para se verificar a sua conformidade dimensional com o projecto, incidindo especialmente no nivelamento geométrico do tabuleiro, configuração e posição dos arcos e observação da verticalidade dos pilares.
- b) Detecção de armaduras e medição do seu recobrimento ( $394\text{m}^2$ , que correspondem a cerca de 0.5% da área exposta de betão) utilizando sensores magnéticos e um microprocessador.
- c) Determinação da profundidade da carbonatação (86 medições) em pequenas carotes, furos e superfícies de fractura, aplicando uma solução alcoólica de fenolftaleína.
- d) Determinação do teor em cloretos (expresso em percentagem da massa do betão) a várias profundidades (44 perfis de cloretos) por recolha de pó de betão obtido por furação com broca e utilização de equipamento standard.

- e)** Ensaio de caracterização do betão, envolvendo
- e.1)** Extração de 16 carotes as quais foram objecto de macro análise e delas se extraíram provetes para realização dos seguintes ensaios:
    - Ensaio de resistência e medição do módulo de elasticidade (7 ensaios)
    - Ensaio de avaliação da qualidade do betão: absorção por imersão (3), absorção por capilaridade (5) e permeabilidade (5)
    - Análise petográfica, mineralógica e microestrutural com vista a avaliar a estrutura interna do betão e eventuais reacções químicas expansivas do betão (3 provetes).
  - e.2)** Ensaio de esclerómetros (83) para avaliar a homogeneidade do betão e a sua dureza superficial.
- f)** Ensaio de avaliação do grau e estado de corrosão das armaduras, envolvendo
- f.1)** Medição do potencial eléctrico (6 malhas)
  - f.2)** Medição da resistividade do betão (6 zonas)
  - f.3)** Medição da resistência de polarização para avaliar a velocidade da corrosão em  $\mu\text{m}/\text{ano}$  (5 locais)
- g)** Ensaio de tracção de varões de aço (6 provetes).
- h)** Avaliação das características dinâmicas da Ponte.

### **3. AVALIAÇÃO DOS ENSAIOS EFECTUADOS E DO ESTADO DE DETERIORAÇÃO**

Destas observações e ensaios extraíram-se as seguintes conclusões:

- O recobrimento das armaduras apresenta uma grande variabilidade (usual em obras antigas) pelo que se tornou necessário proceder a uma interpretação estatística dos resultados obtidos, conforme ilustrado no Quadro 1 e na Figura 5:

	<b>Recobrimento Médio mm</b>	<b>Recobrimento para o Quantil de 25% mm</b>	<b>Número de Medições</b>
Vigas do Tabuleiro	27	22	1 177
Arco	38	29	299
Pilares	37	26	474

Quadro 1

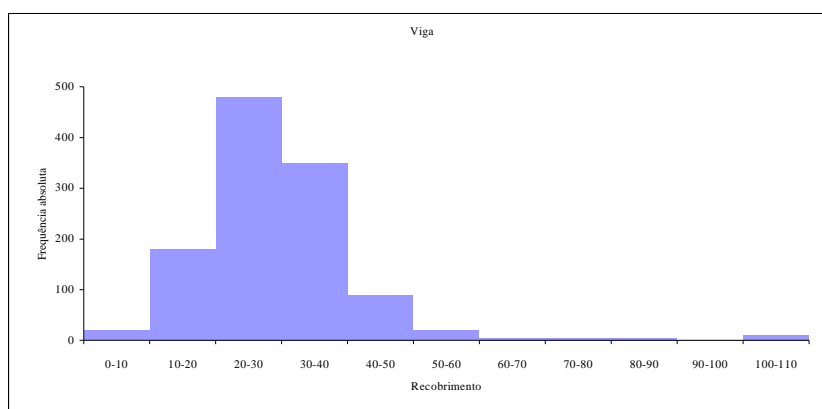


Figura 5

- A profundidade de carbonatação é muito reduzida, da ordem dos 5 mm.
- A penetração de cloretos é muito pequena em geral, com exceção das zonas onde se verificam deficiências de betonagem onde a contaminação por cloretos atinge 0.08% do peso do betão a uma profundidade de 2.50 cm. De referir que um valor de referência do teor crítico em cloretos, valor a partir do qual as armaduras são despassivadas, é de 0.05%.

Com base nestes ensaios foi possível concluir que a corrosão de armaduras associada à carbonatação do betão só ocorre em locais onde o recobrimento for muito pequeno (inferior a 10 mm) e a corrosão de armaduras associada à penetração de cloretos se está a desenvolver na Ponte constituindo o principal mecanismo de

deterioração o qual é já especialmente gravoso nas zonas onde as deficiências de betonagem conduziram a uma qualidade inferior para o betão.

Os ensaios de resistência à compressão conduziram a valores de 52.60 a 78.50 MPa. Os ensaios de avaliação da qualidade do betão revelaram, como era espectável pela composição adoptada, uma muito boa qualidade do betão, e a realização da análise petrográfica revelou uma pasta de cimento muito compacta e a inexistência de reacções expansivas no betão e permitiu identificar a natureza dos inertes.

Apesar de ter sido utilizado na Ponte da Arrábida um betão de alta qualidade e das superfícies do betão terem sido protegidos por pintura, a Ponte apresenta após 35 anos de serviço uma deterioração significativa devida à corrosão de armaduras associada à penetração de cloretos nas zonas onde ocorrem deficiências de betonagem.

Dos perfis de cloretos com a máxima e mínima penetração, realizados nessas zonas, obtiveram-se os seguintes limites para a variação do coeficiente de difusão do betão  $D(t)$  e para a concentração de cloretos à superfície ( $C_S(t)$ ):

$$D = 33 t^{-0.4} \text{ mm}^2/\text{ano} \quad D = 18.5 t^{-0.4} \text{ mm}^2/\text{ano}$$

e

$$C_S = 0.045 t^{0.6} \quad C_S = 0.017 t^{0.6}$$

Estes valores foram obtidos considerando os expoentes para a variação  $D$  e  $C_S$  em função do tempo de  $- 0.4$  e  $+ 0.6$  respectivamente, valores que se revelaram adequados (3) em estudos experimentais realizados em ambiente marítimo.

Destes resultados é possível obter a relação entre a profundidade no interior do betão em que se atinge o teor crítico de cloretos em função do tempo, conforme representado na Figura 6. Desta figura é possível verificar que as armaduras com um recobrimento de 15 mm (localizadas nas zonas de deficiente betonagem) são despassivadas pelo efeito da penetração dos cloretos após um período de 7 a 25 anos, ou seja já estão despassivadas em 1998; para as armaduras com um

recobrimento de 27 mm (o valor médio nas vigas do tabuleiro) tal período varia de 20 a 70 anos. Esta variação resulta da grande variabilidade da qualidade do betão nas referidas zonas de deficiente betonagem.

Importa referir que a avaliação da deterioração apenas pode ser feita com rigor tendo em conta a distribuição estatística das variáveis em jogo. Na Fig. 7 apresenta-se o método de cálculo da probabilidade de ocorrência da corrosão num determinado instante t.

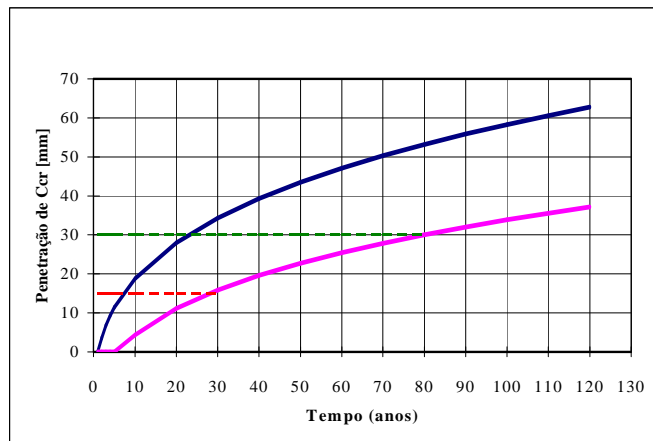


Figura 6

$Z = R - F$   
 R - Distribuição do recobrimento  
 F - Penetração do teor crítico de cloretos F (t)  
 $P_f = \Phi [-\mu_z/\sigma_z] = \Phi (-\beta)$   
 $\mu_z$  - Valor médio de Z  
 $\sigma_z$  - Desvio padrão de Z:  $(\sigma_R^2 + \sigma_F^2)^{1/2}\beta$  - Índice de fiabilidade

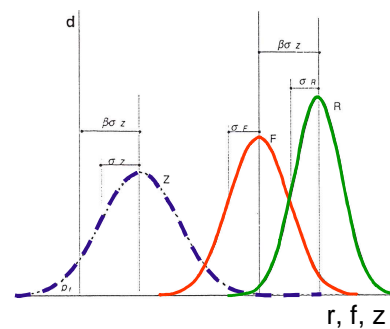


Figura 7

Correlação entre Probabilidade de Corrosão, Z, Resistência, R (Recobrimento) e Carga (Acção-Penetração de Cloretos), F

## 4. AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE SEGURANÇA

### 4.1. Análise da Regulamentação Aplicável a Pontes de Betão

A avaliação das condições de segurança de uma obra existente deve ser realizada à luz da regulamentação aplicável à data da execução do projecto e também para a actual regulamentação.

O Projecto da Ponte da Arrábida é datado de 1955 estando então em vigor a seguinte regulamentação:

- RBA – Regulamento do Betão Armado, Dec. 25948 de 16 de Outubro de 1935.
- RPM – Regulamento das Pontes Metálicas, Dec. 16781 de 10 de Abril de 1929 no qual se definiam as sobrecargas rodoviárias, as quais no entanto não foram adoptadas no presente projecto, tendo sido considerados valores muito superiores.

A título ilustrativo apresenta-se na Fig. 8 um desenho de cálculo do projecto relativo à linha de influência de uma viga longitudinal do tabuleiro onde se indicam os veículos especiais adoptados no projecto.

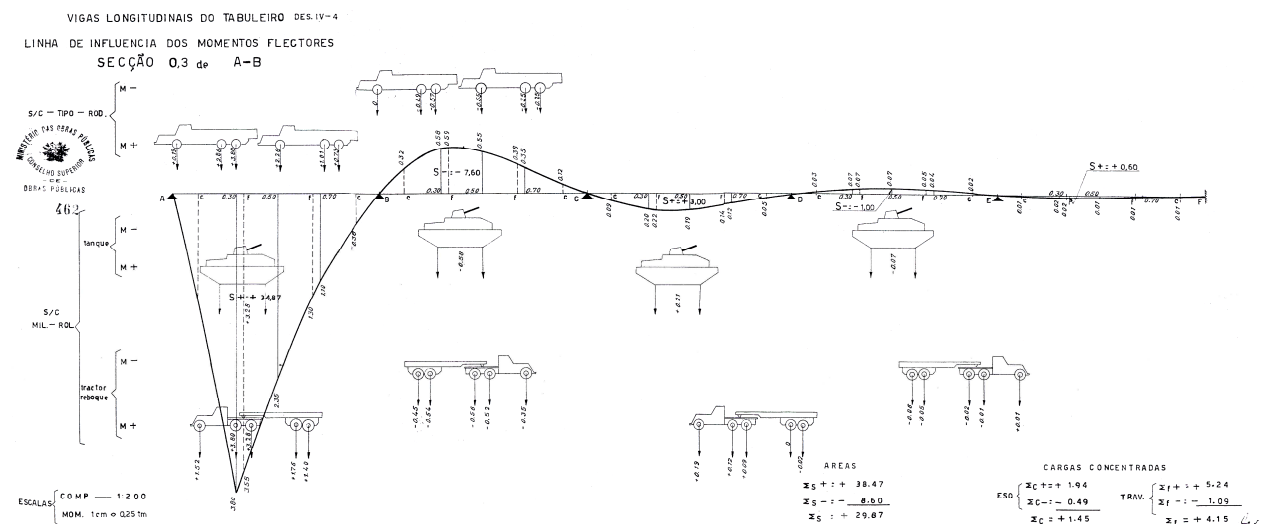


Figura 8

De acordo com esta regulamentação a verificação da segurança era feita comparando as tensões actuantes para as cargas de serviço com valores de tensões admissíveis (tensões limites de fadiga) para o betão e para o aço.

#### 4.2. Verificação da Segurança

Foram adoptados na verificação vários modelos de análise que se descrevem sumariamente:

##### - Modelo de Análise Global

Este modelo corresponde à simulação integrada de toda a estrutura tridimensional discretizada de acordo com os elementos do projecto. O modelo é composto por peças lineares na simulação do comportamento de vigas, pilares, arcos e contraventamentos, por elementos finitos de laje na simulação do comportamento da laje do tabuleiro e elementos finitos de membrana na simulação do comportamento dos pêndulos dos encontros e tímpanos de ligação do tabuleiro ao arco junto ao fecho.

Para aferir este modelo com a obra existente foi feita a comparação entre os modos de vibração e as frequências obtidas com base neste modelo e na avaliação experimental [6] do comportamento dinâmico da ponte, cujos resultados se sintetizam na Fig. 9.

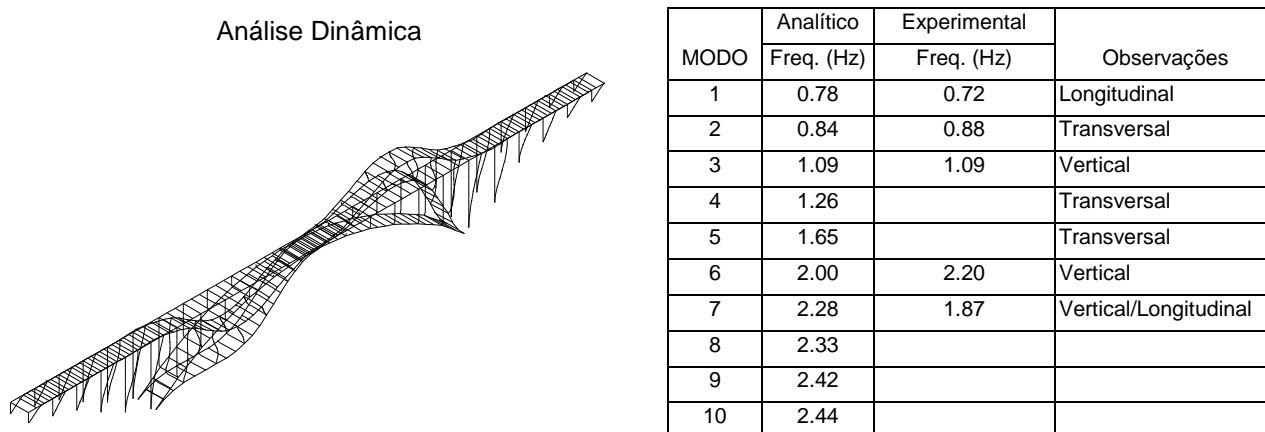


Figura 9

- Modelo para a Análise Sísmica

Para esta análise o modelo é constituído por duas subestruturas correspondentes a cada um dos planos dos arcos. O tabuleiro foi idealizado através de duas vigas longitudinais coincidentes com os planos referidos. Na direcção transversal consideraram-se elementos a unir as duas vigas simulando a rigidez transversal conferida pelas carlingas e pela laje do tabuleiro. Da mesma forma consideraram-se também elementos transversais a unir os dois arcos simulando-se assim os contraventamentos existentes entre os arcos.

- Modelo para a Análise do Tabuleiro

Para a verificação da segurança no tabuleiro adoptou-se um modelo de elementos finitos simulando 3 tramos do tabuleiro, sendo as vigas longitudinais, carlingas e travessas simuladas com elementos de barra e a laje do tabuleiro com elementos planos.

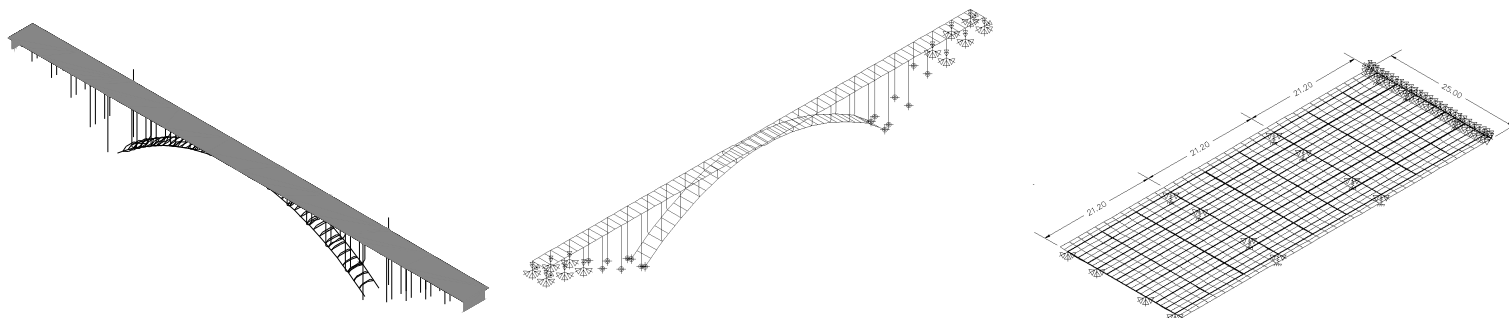


Figura 10

4.2.1. Verificação da segurança no tabuleiro

Dos estudos realizados extraem-se as seguintes conclusões:

- A comparação entre os esforços obtidos no projecto e os da actual verificação apresentam uma diferença muito pequena.

Na Fig. 11 apresenta-se a comparação entre os momentos flectores devidos à carga permanente obtidos na presente verificação e os apresentados no projecto.

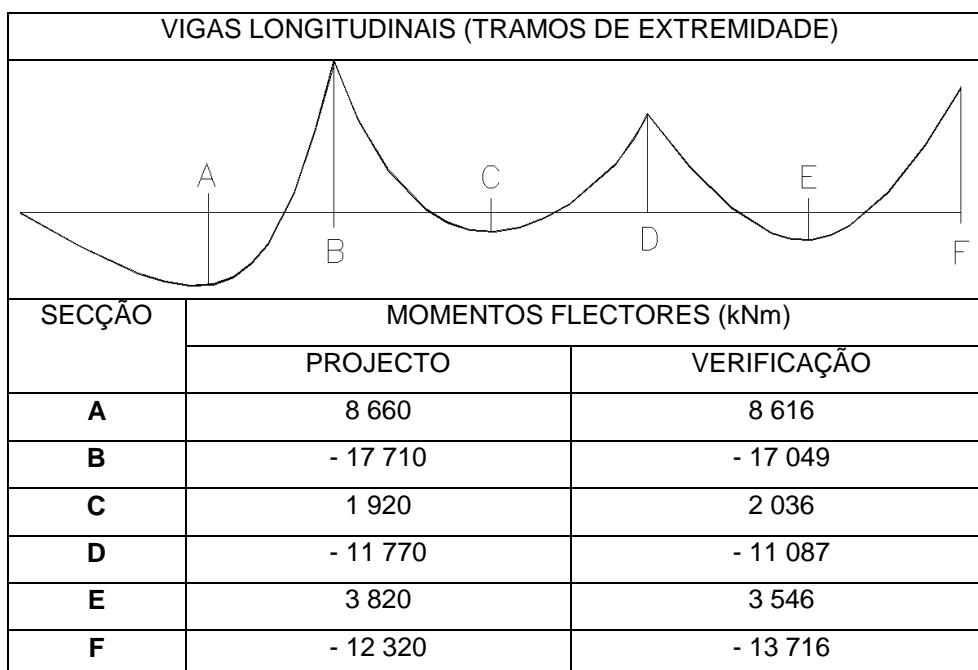


Figura 11 - Comparação entre os Esforços obtidos no Projecto e na Presente Verificação, para a Carga Permanente

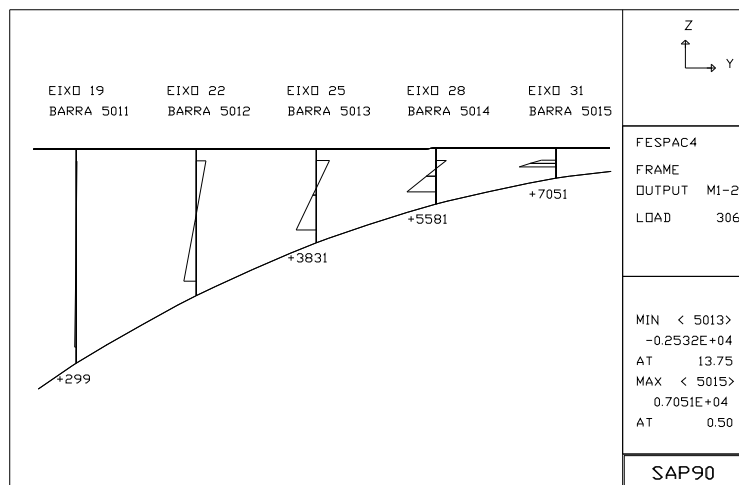
- Para a actual regulamentação constata-se que a verificação da segurança das lajes e vigas do tabuleiro à flexão e ao esforço transversal é satisfeita, o que era expectável tendo em consideração que as acções rodoviárias adoptadas no projecto foram mais elevadas do que as do RBA.
- As vigas e carlingas, em betão armado, apresentam valores dos esforços máximos, para as acções frequentes, que geram tracções normais máximas da ordem de grandeza da resistência do betão à tracção tendo-se estimado que, caso o betão fendilhe, a abertura de fendas é da ordem de 0.15 mm, o que efectivamente se verifica em algumas vigas.

#### 4.2.2. Verificação da Segurança dos Pilares

Recorrendo ao modelo de análise global, foi verificada a segurança dos pilares de acordo com o actual regulamentação.

Apresentam-se na Fig. 12 os esforços de cálculo obtidos para as combinações fundamentais mais desfavoráveis [1.5 carga permanente + 1.5 sobrecarga + 1.5  $\Sigma \psi_0$  x (vento,  $\Delta T_{dif.}$ , retracção)] bem como os diagramas envoltivos dos esforços resistentes para um pilar.

Pilares sobre o arco - Momentos no plano longitudinal da ponte



Pilares do Eixo 19 - Diagramas de esforços actuantes e resistentes  
Plano longitudinal da ponte

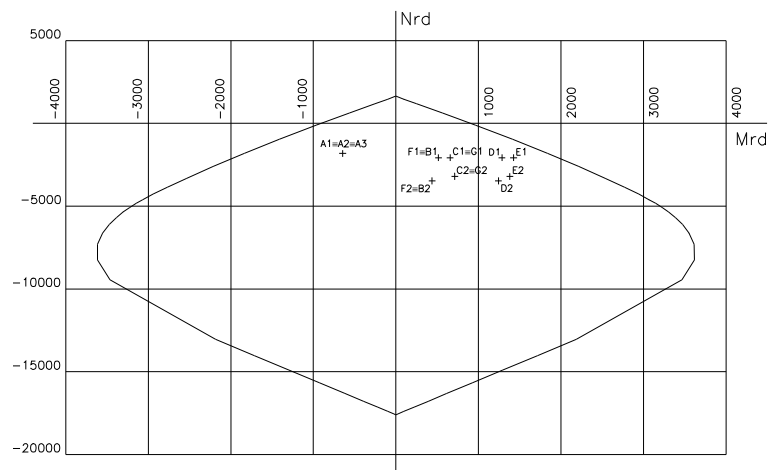


Figura 12

Nos pilares curtos constata-se que os esforços de cálculo obtidos com base num modelo elástico linear ultrapassam a capacidade resistente das secções o que é coerente com a existência de fendas (rótulas plásticas) na base e no topo dos pilares, conforme se ilustra na Figura 3.

#### 4.2.3. Verificação da Segurança dos Arcos

Na verificação foram utilizados os seguintes modelos de análise:

1. Modelo de arco hiperestático isolado, sujeito ao peso próprio do arco
2. Modelo tridimensional completo para obtenção dos esforços devidos às diferentes acções, excepto o peso próprio do arco.
3. Modelo tridimensional "simplificado" para análise dos esforços sísmicos.

De salientar que, tanto no projecto como na presente verificação, se incluiu o faseamento construtivo e analisaram exaustivamente diversas combinações de acções, incluindo os efeitos da acção sísmica, tendo-se constatado que a segurança é satisfeita.

## 5. REABILITAÇÃO DA PONTE

### 5.1. Dispositivos de Acesso e Segurança

Na execução desta obra teve particular relevância o planeamento e execução dos seguintes meios de acesso e segurança da obra (Fig. 13):

- Cimbres e andaimes para reparação e pintura dos encontros, pilares e pilastras
- Plataformas móveis para a reparação e pintura das faces laterais e inferiores dos arcos e seus contraventamentos
- Estruturas móveis apoiadas nos pilares e pilastras para a reparação e pintura da face inferior do tabuleiro
- Elevadores e escadas de ligação entre as margens, onde se localizou o estaleiro, e a parte superior do tabuleiro

- Pórtico de acesso às diferentes frentes de trabalho ao nível do tabuleiro.



Figura 13

A segurança da obra envolveu a adopção de medidas especiais de prevenção e rigorosos sistemas de controlo envolvendo [5]:

- Controlo da admissão de pessoal e da subcontratação
- Instalação de medidas de protecção colectiva, nas estruturas de acesso atrás referidas e na colocação de perfis tipo "New Jersey" para protecção das zonas de trabalho
- Formação e informação dos trabalhadores
- Utilização de diversos equipamentos de protecção individual e disponibilização permanente de equipamento e material de salvamento de afogamento
- Protecção a terceiros envolvendo:
  - definição de um canal de navegação sob a zona onde decorriam trabalhos na ponte
  - construção de túneis de protecção de queda de objectos e materiais
  - instalação de vedações para impedir o acesso de pessoas estranhas à obra.

## 5.2. Protecção Geral

Verificando-se que a pintura original está praticamente destruída pelo desgaste físico e degradação química e constatando-se que a penetração dos cloretos do ambiente marítimo estava a originar a despassivação das armaduras era imperioso voltar a dar uma protecção adequada às superfícies de betão, solução indicada uma vez que a referida penetração de cloretos não é ainda significativa, excepto localmente (Fig. 14).

Tendo em conta as diferentes condições de exposição da Ponte e viadutos concebeu-se um sistema de protecção diferenciado, reforçado nas zonas de deficiências de betonagem (juntas de construção e zonas de deficiente compactação) e com uma espessura superior na zona da Ponte em relação à aos viadutos.



Figura 14

## 5.2. Reparações Locais

As zonas em que as armaduras estão expostas e as zonas em que o betão está delaminado foram objecto de reparação local com substituição do betão com novas argamassas de base cimentícia, repassivando assim as armaduras (Fig. 15).

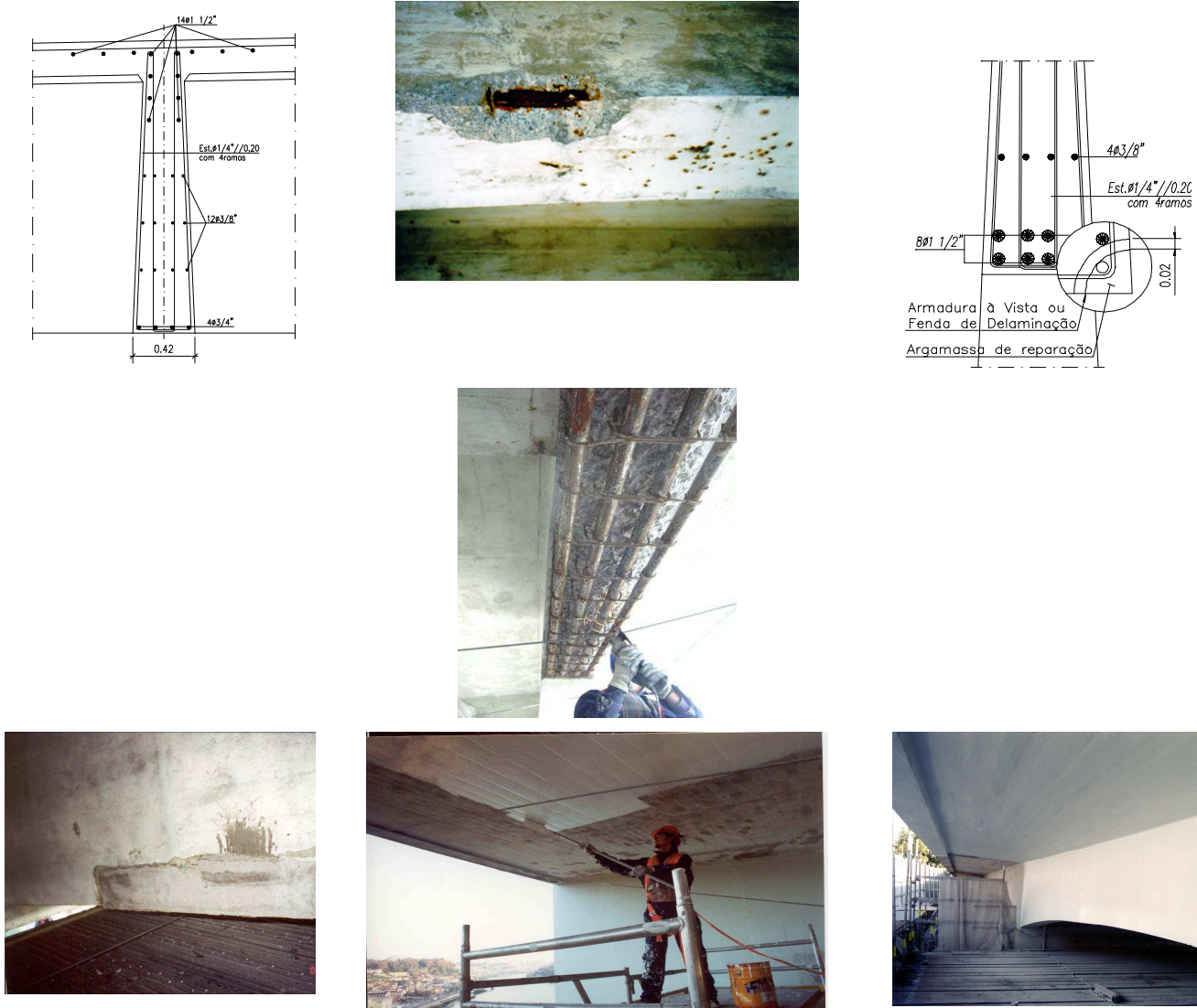


Figura 15

Os pilares sobre os arcos, junto ao fecho, foram objecto de reparação das zonas fendilhadas e delaminadas e introduziu-se uma junta com selante deformável por forma a permitir a rotação das secções de topo e base dos pilares. Foram ainda injectadas, com resina epoxy, fendas em carlingas e travessas (Fig. 16).

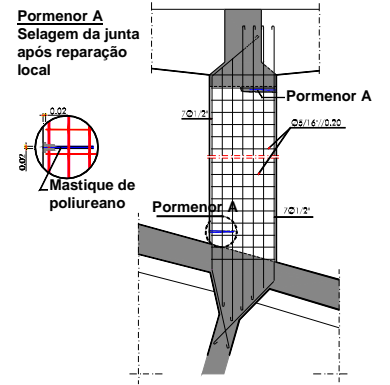


Figura 16

### 5.3. Outras Intervenções

A reabilitação geral contempla ainda a reformulação do sistema do pavimento do tabuleiro, incluindo a sua impermeabilização, a reformulação do sistema de drenagem e a substituição das juntas de dilatação (Fig. 17).

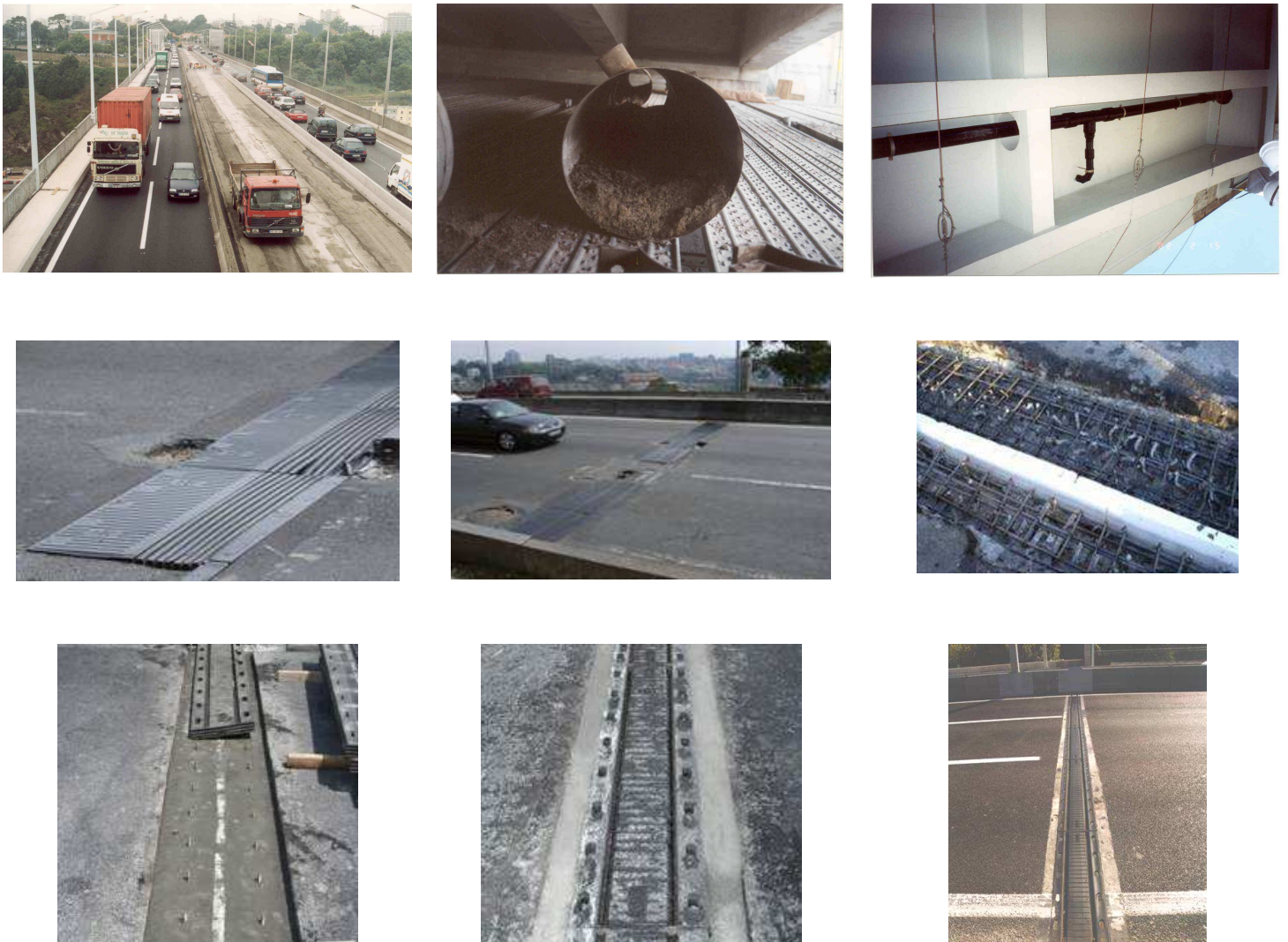


Figura 17

Foi ainda introduzido um sistema para facilitar o acesso ao fecho do arco com degraus em betão simples e um corrimão em compósito de fibra de vidro (Fig. 18).



Figura 18

#### 5.4. Controlo de Qualidade [5]

A obra foi objecto de um plano de qualidade que envolveu numerosos ensaios (Fig. 19). Os ensaios realizados no âmbito da reparação de betão (Betões, Argamassas) consistiram em:

- Ensaio de aderência das argamassas ou microbetão ao betão da ponte
- Ensaios de absorção
- Ensaios de retracção
- Ensaio compressão uniaxial das argamassas de alta resistência

- Ensaio de penetração de CO<sub>2</sub> em argamassas
- Ensaio de difusão ao ião Cloreto

Os ensaios de aderência aos 28 dias revelaram que se obtém uma tensão de aderência mais elevada na solução de microbetão (2.5 a 3.0 MPa) quando comparado com o valor obtido com as argamassas pré-doseadas (1.0 a 1.5 MPa). Os ensaios de retracção mostraram que as argamassas pré-doseadas apresentam, a longo prazo, elevada retracção, apenas sendo, no período inicial, essa retracção compensada.

Os ensaios realizados no âmbito dos trabalhos de decapagem e pintura das superfícies de betão e metálicas foram:

- Ensaio de aderência (NP 1903)
- Medições de espessuras das pinturas aplicadas em betão e em superfícies metálicas (ISO 2808)
- Controlo de qualidade com medição de viscosidade e massa volúmica de todos os lotes de tinta fornecidos (NP 256, NP234)
- Ensaios de permeabilidade ao vapor de água, dióxido de carbono e cloretos



Figura 19

## 5.5. Monitorização (5)

A avaliação contínua do comportamento da obra relativamente aos aspectos quer estruturais quer associados à deterioração implicou a elaboração de um plano de monitorização, observação e manutenção.

O objectivo deste plano foi a observação de determinados parâmetros que fornecem indicações relativas a deficiências estruturais e à progressão dos mecanismos de deterioração, permitindo tomar decisões atempadas quanto ao tipo de medidas a implementar por forma a corrigir essas deficiências. Dado verificar-se que a corrosão de armaduras era o principal problema apresentado pela estrutura da ponte para a sua deterioração, foi este aspecto o principal objectivo do plano a implementar.

Desta forma foi elaborado e implementado um sistema de monitorização da corrosão que permite a avaliação em tempo real de vários parâmetros caracterizadores do estado de corrosão da armadura da obra.

O sistema consistiu na introdução de 16 conjuntos de sensores distribuídos por 4 secções na face inferior do tabuleiro, região que se mostrou ser a mais sensível ao processo de corrosão de armaduras, 2 junto ao fecho do arco e 2 junto às pilastras, sensores estes que transmitem informação para um sistema de aquisição e tratamento de dados.

Em cada uma destas secções os 4 conjuntos de sensores instalados foram distribuídos por 2 zonas que foram objecto de reparação do betão e em 2 zonas que não foram sujeitas a qualquer reparação (Fig. 20).

### 5.5.1. Zonas Reparadas

Nas zonas que foram objecto de reparação local pretende-se avaliar o comportamento e eficácia da obra de reparação ao longo do tempo.

Os sensores instalados nestas zonas, são compostos, essencialmente, por eléctrodos cilíndricos do mesmo material (aço) de que são constituídas as armaduras. As sondas, juntamente com um eléctrodo de referência (Mn/MnO), estão montadas numa peça de resina epoxídica de tal modo que, uma vez instalados na obra, as superfícies dos eléctrodos fiquem em contacto electrolítico com o betão e localizados a duas profundidades (1,5 e 3 cm) na camada de recobrimento, paralelamente à superfície do betão.

#### 5.5.2. Zonas Não Reparadas

Nas zonas que não são objecto de reparação local mas serão objecto de protecção superficial por pintura pretende avaliar-se a eficácia do sistema de pintura como forma de controlar o teor de humidade no interior do betão e a penetração dos agentes agressivos.

Nestas zonas, os sistemas de monitorização terão duas componentes; uma para medir resistividades e outra para medir temperaturas e humidades relativas no interior do betão. A sonda de resistividade, é constituída por um conjunto de 8 aneis de aço inox 316 L, separados por 8 aneis de borracha butílica, unidos interiormente por uma resina epoxídica. O sistema deverá ser excitado, por uma corrente alternada com uma diferença de potencial entre 10 V e 20 V e uma frequência entre os 200 e os 1000 Hz.

Os sensores de temperatura e humidade relativa foram montados no interior de um tubo cilíndrico de aço 316L de forma a criar uma câmara de ar entre o sensor e o meio a medir e selados por uma resina epoxidica.

#### 5.5.3. Sistema de Aquisição de Dados

O sistema de aquisição de dados adoptado consiste na utilização de placas de aquisição de dados/geração de formas de onda a instalar em PC's. Estas placas permitem analisar sinais eléctricos expressos em diferenças de potencial e intensidades de corrente e gerar sinais eléctricos em corrente alterna com as características próprias ao estímulo dos sensores de resistividade.

Informações fornecidas pelo sistema de monitorização:

- O valor dos parâmetros que influem no processo de corrosão, nomeadamente a resistividade, teor de humidade e temperatura do betão ao nível das armaduras.
- Evolução da penetração e teor de cloretos em relação ao teor crítico (por via indirecta)
- Evolução da profundidade de carbonatação (por via indirecta)
- O estado das armaduras relativamente ao processo de corrosão (passivação ou despassivação).



Figura 20

## 5.6. A Obra Após a Reabilitação

Na Fig. 21 apresentam-se aspectos da obra após reabilitação, a qual devolveu-lhe a sua beleza inicial e prolongou, por várias décadas, o seu período de vida, tendo assim

contribuido os participantes neste trabalho para a preservação de um património que constitui, no nosso entender, a mais importante obra de betão armado realizada em Portugal.



Figura 21

## **6. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Participaram neste estudo para além do autor os Eng. M. Cachadinha, Sanches de Gama, P. Candeias, A. Costa, J. Nunes da Silva e F. Virtuoso e na prestação de serviços na fase de inspecção as empresas e instituições: LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, IST, Instituto Superior Técnico, Oz, Diagnóstico, Levantamento e Controlo de Qualidade em Estruturas e Fundações, Lda, ISQ, Instituto de Soldadura e Qualidade e SPGO, Sociedade de Projectos e Gestão de Obras, Lda. A empreitada de reabilitação geral foi realizada pela empresa Teixeira Duarte, SA que envolveu uma vasta equipa de que se salientam os Eng. F. Frias, Moreira da Silva e Rita Moura.

## **7. REFERÊNCIAS**

- [1] - Edgar Cardoso, Projecto de Execução da Ponte da Arrábida, JAE, 1955
- [2] - MOP - JAE - Ponte da Arrábida sobre o Rio Douro e seus Acessos
- [3] - Costa, A - Durabilidade de Estruturas de Betão Armado em Ambiente Marítimo, Tese de Doutoramento, IST, 1997
- [4] - Appleton, J., Cachadinha, M., Costa, A., Candeias, P. - Inspeção e Reabilitação da Ponte da Arrábida, Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, LNEC, Lisboa, 1998.
- [5] - Frias, F., Moura, R., Appleton, J. - Reparação da Ponte da Arrábida sobre o Rio Douro .- Porto, Congresso Nacional de Engenharia de Estruturas, LNEC, Lisboa, Julho 2002.
- [6] - Rodrigues, Jorge, Costa, Alfredo Campos - Caracterização Dinâmica de Estruturas de Pontes com Base em Ensaios de Vibrações Ambiente, Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, nº 44, pág. 35 a 50.