PERRY DA CÂMARA E ASSOCIADOS
Consultores de Engenharia, Lda.

ORDEM DOS ENGENHEIROS

Utilização de um sistema de isolamento sísmico no projeto de reabilitação e reforço de um Viaduto

António Perry da Câmara

Eng. Civil (AM) Msc (FCT/UNL)

Especialista em Estruturas (O.E.)

21 de Outubro de 2020

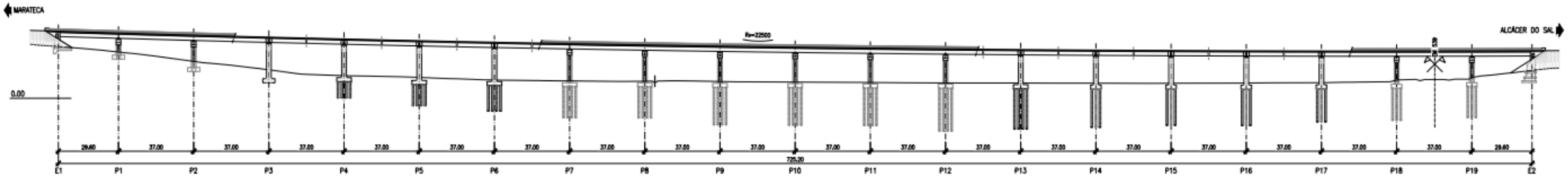
PERRY DA CÂMARA E ASSOCIADOS
Consultores de Engenharia, Lda.

ORDEM DOS ENGENHEIROS

Características do Viaduto

Extensão total de 725,2 m
Tabuleiro duplo com largura total de 37,4 m
Vinte vãos (29,6 m + 18 x 37,0 m + 29,6 m)
Tabuleiro contínuo de betão armado, pré-esforçado longitudinalmente
Secção transversal com duas vigas de secção constante com 2,60 m de altura
Carlingas dispostas a meio vão, sobre os pilares e encontros
Pilares em T de betão armado com alturas entre 7,7 e 16,2 m.
Fundações diretas nos P1 a P3 e indiretas por estacas com 0,80 m de diâmetro nos restantes pilares.
Tabuleiros fixos no encontro norte e equipados com aparelhos de apoio guiados longitudinalmente em todos os pilares e encontro sul.
Projeto realizado em 1996 segundo o RSA / REBAP. Abertura ao trânsito em 1998.

ALÇADO / CORTE LONGITUDINAL
A1=1:1000 / A3=1:2000



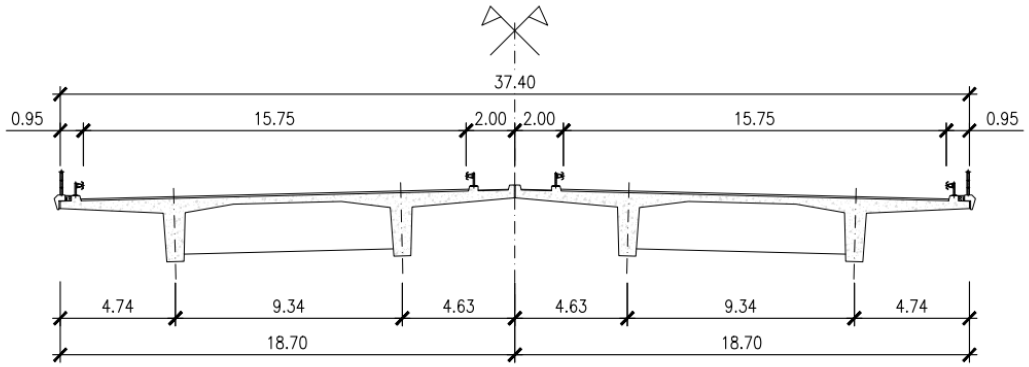
PERRY DA CÂMARA E ASSOCIADOS
Consultores de Engenharia, Lda.

ORDEM DOS ENGENHEIROS

Características do Viaduto

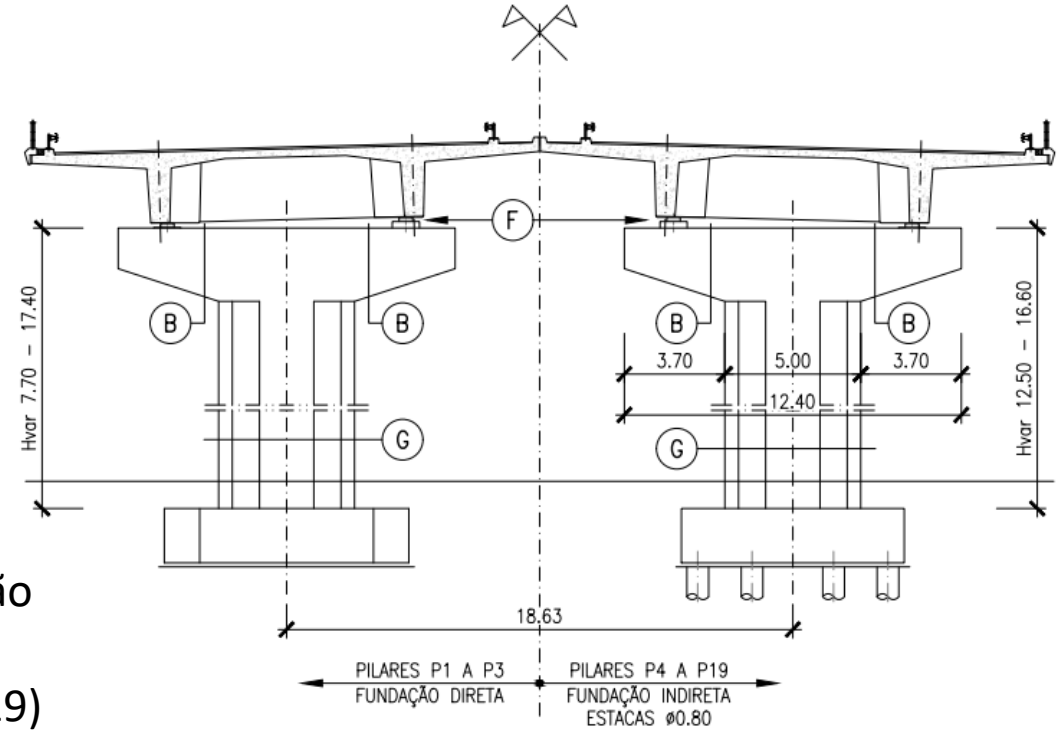
TABULEIRO – SECÇÃO TRANSVERSAL DE VÃO

A1=1:250 / A3=1:500



TABULEIRO E PILARES

A1=1:250 / A3=1:500



Tabuleiros bi-viga com uma altura – 2,70 m
Carlingas dispostas sobre os pilares, encontros e a meio vão
Fundações diretas no E1, P1 a P3 e E2 e por estacas de 0,80m de diâmetro (doze nos P4 a P13 e oito nos P14 a P19) fundadas no Miocénico

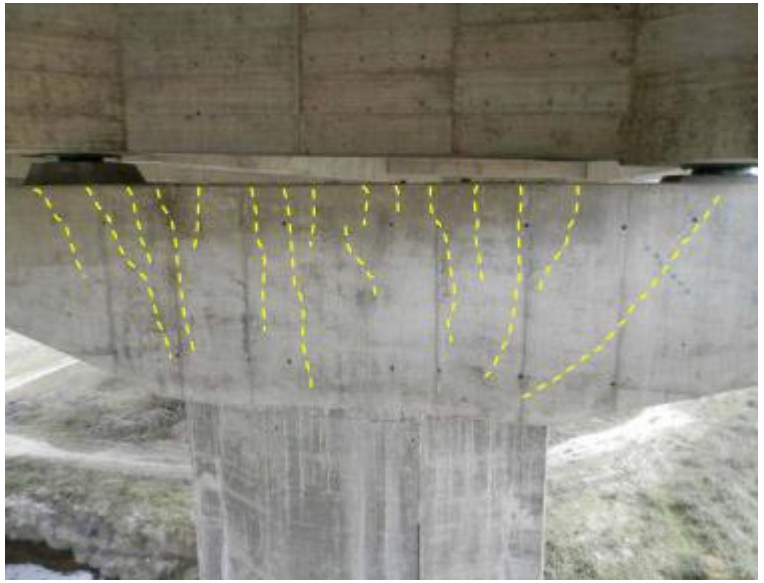
PERRY DA CÂMARA E ASSOCIADOS
Consultores de Engenharia, Lda.

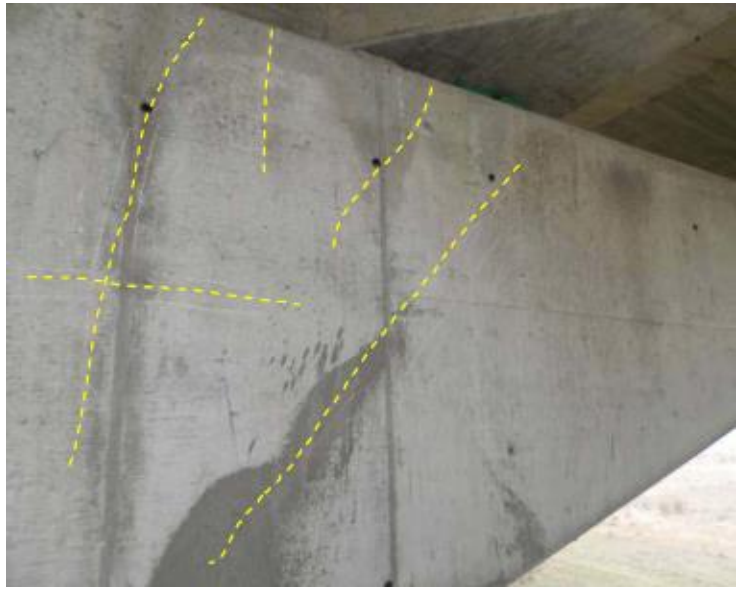
ORDEM DOS ENGENHEIROS

Razões para a intervenção

Inspeções anteriores ao projeto de reabilitação tinha identificado:

- Fendilhação vertical e diagonal dos capitéis dos pilares em evolução
- Fendilhação vertical de alguns fustes, indiciadora de reações expansivas





PERRY DA CÂMARA E ASSOCIADOS
Consultores de Engenharia, Lda.

ORDEM DOS ENGENHEIROS

Razões para a intervenção

Uma inspeção principal com execução de ensaios sobre os pilares foi realizada em 2015 tendo como principais conclusões:

- Os recobrimentos encontrados são em geral superiores aos regulamentares não tendo a frente de carbonatação atingido ainda as armaduras nas zonas ensaiadas;
- Confirmou-se o carácter evolutivo da fendilhação já detetada entre 2006 e 2012 que à data chegavam a atingir 1,3 mm;
- Ensaios petrográficos identificaram um betão com agregados calcários e areia quartzítica, com formação generalizada de etringite e ocorrência muito pontual de gel de sílica, confirmando a ocorrência de reacções expansivas do tipo reacção sulfática interna (RSI);
- O teor de alcális encontrado variava entre 2 a 3 vezes o máximo admissível (0,6% do teor de cimento);

PERRY DA CÂMARA E ASSOCIADOS
Consultores de Engenharia, Lda.

ORDEM DOS ENGENHEIROS

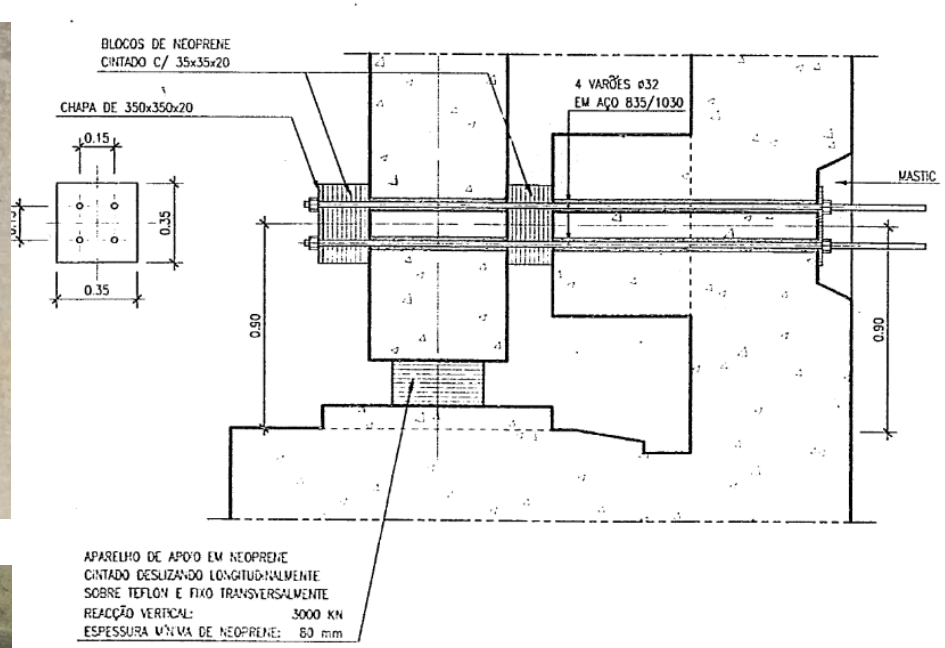
Aparelhos de apoio dos pilares

Encosto das guias devido à retração das carlingas leva à expulsão do revestimento das mesmas

PERRY DA CÂMARA E ASSOCIADOS
Consultores de Engenharia, Lda.

Patologias no sistema de apoio no encontro fixo

ORDEM DOS ENGENHEIROS



PERRY DA CÂMARA E ASSOCIADOS
Consultores de Engenharia, Lda.

ORDEM DOS ENGENHEIROS

Conclusões do Estudo Preliminar

- Existência de reacções expansivas especialmente nos pilares
- Falta de capacidade resistente das travessas dos pilares
- Deficiente capacidade resistente para a acção sísmica nalguns pilares e estacas e no encontro fixo
- Betão dos pilares com resistência actual idêntica à que estava especificada no projeto inicial (B35)
- Aparelhos de apoio sem capacidade adequada para a acção sísmica
- Aquando do início do estudo realizou-se uma inspeção de reconhecimento que confirmou as patologias já detetadas nas inspeções anteriores

PERRY DA CÂMARA E ASSOCIADOS
Consultores de Engenharia, Lda.

ORDEM DOS ENGENHEIROS

Reparação das superfícies de betão

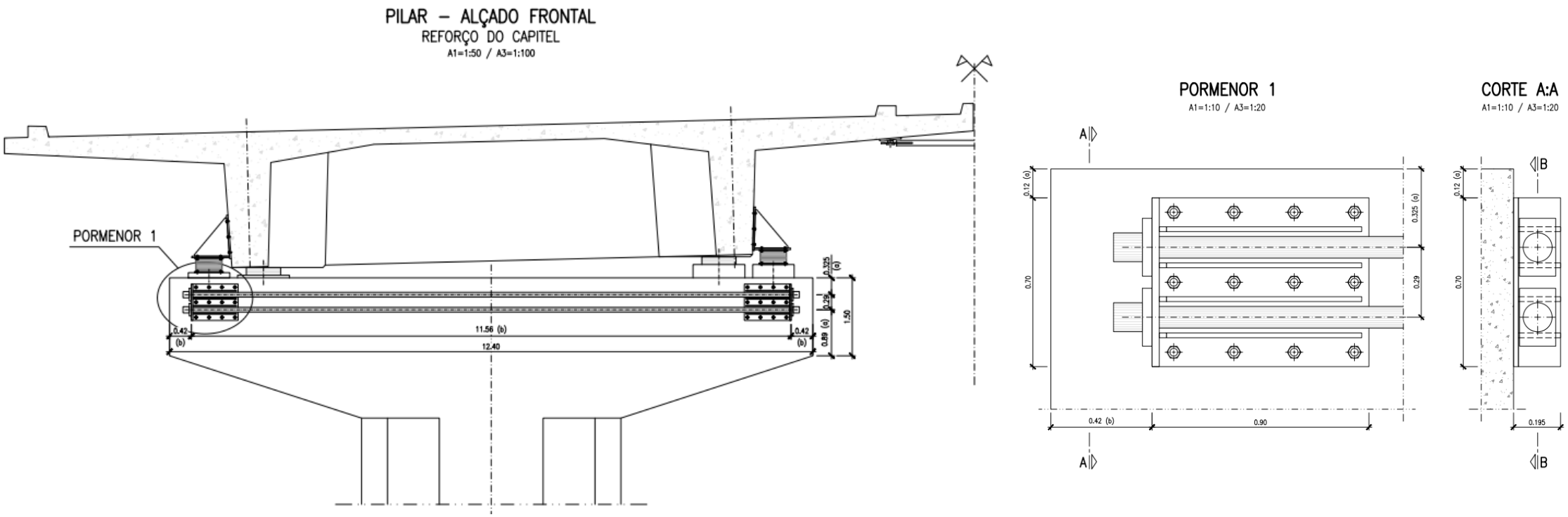
- Reparação de zonas de betão degradado
  - Limpeza das superfícies a jacto de água
  - Identificação e delimitação das áreas a reparar
  - Remoção do betão degradado
  - Limpeza do betão e das armaduras corroídas com jacto húmido de areia
  - Eventual complemento de armaduras corroídas
  - Proteção das armaduras com produto de base cimentícia
  - Molhagem das superfícies
  - Aplicação de argamassas de reparação
- Injecção e selagem de fendas
- Pintura dos pilares com tinta à base de resinas acrílicas

PERRY DA CÂMARA E ASSOCIADOS
Consultores de Engenharia, Lda.

ORDEM DOS ENGENHEIROS

Soluções de reparação e reforço

- Reforço das travessas dos pilares por pré-esforço exterior (cerca de 3000 kN / travessa)



PERRY DA CÂMARA E ASSOCIADOS
Consultores de Engenharia, Lda.

ORDEM DOS ENGENHEIROS

Alteração do sistema de apoio

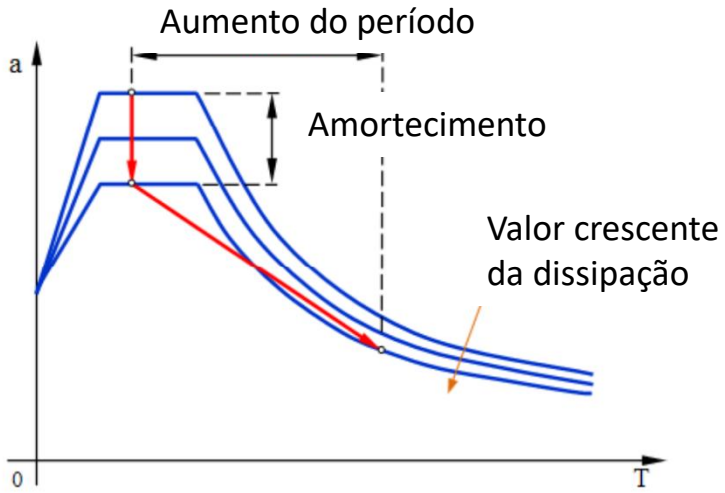
- Face ao défice de resistência sísmica punham-se duas opções:
  - Manter o mesmo sistema de apoios com:
    - Reforço dos fustes dos pilares e respectivas fundações
    - Reforço significativo do encontro fixo
    - Substituição integral dos aparelhos de apoio
  - Alterar o sistema de apoios tendo por objetivo diminuir as acelerações induzidas pela acção sísmica, procurando evitar a realização de reforços estruturais
- Ponderadas as duas opções a segunda (ISOLAMENTO SÍSMICO) revelou-se como a solução mais económica e com menor interferência com a exploração da Auto-estrada.

PERRY DA CÂMARA E ASSOCIADOS
Consultores de Engenharia, Lda.

ORDEM DOS ENGENHEIROS

Condicionamentos à instalação do isolamento sísmico

- Qualquer sistema de isolamento sísmico tem de cumprir cinco funções:
  1) Proporcionar suporte para as cargas verticais
  2) Aumentar a flexibilidade da estrutura aumentando o período fundamental
  3) Aumentar o amortecimento estrutural
  4) Acomodar os deslocamentos induzidos
  5) Garantir o recentramento da estrutura
- Há que assegurar o isolamento da estrutura no plano horizontal
- Não é permitido elevar a rasante da autoestrada
- Altura disponível para os aparelhos de apoio é muito limitada



PERRY DA CÂMARA E ASSOCIADOS
Consultores de Engenharia, Lda.

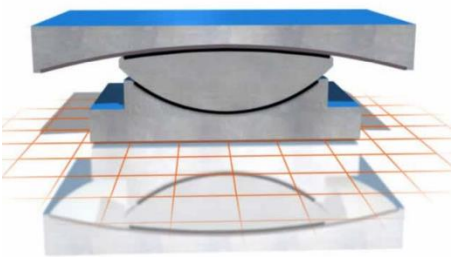
ORDEM DOS ENGENHEIROS

Opções ponderadas

Alteração do sistema de apoio libertando o apoio fixo e mobilizando os pilares para a resistência à acção sísmica

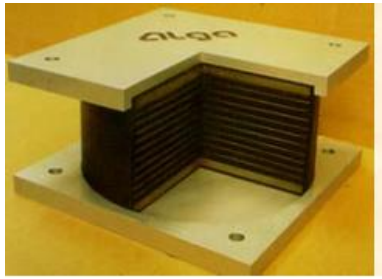
Sistemas de apoio:

- Apoios pendulares de atrito



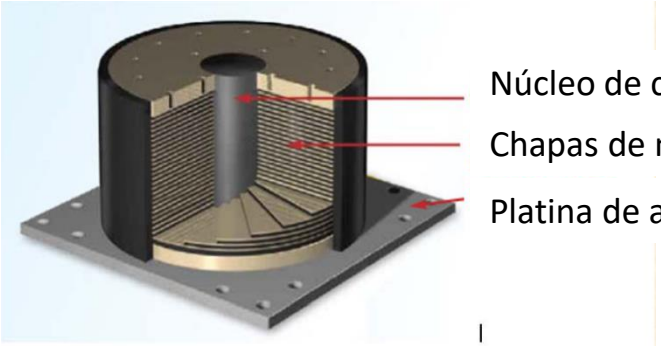
- Apoios de neoprene de alto amortecimento

HDRB



- Apoios de neoprene com núcleo de chumbo

LRB

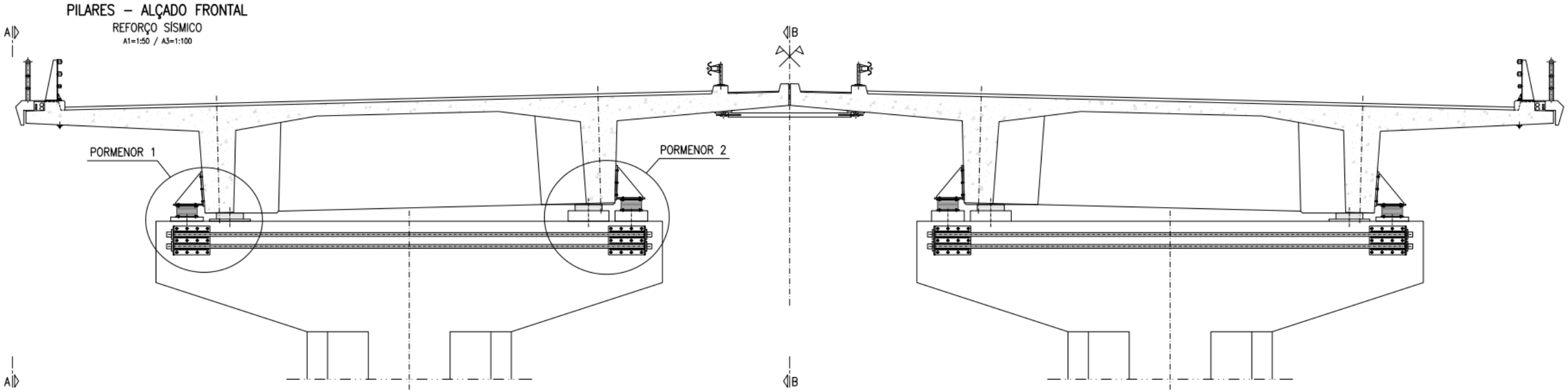


PERRY DA CÂMARA E ASSOCIADOS
Consultores de Engenharia, Lda.

ORDEM DOS ENGENHEIROS

Solução Adoptada

- Face à impossibilidade de alteamento dos tabuleiros optou-se por substituir os aparelhos de apoio por aparelhos de panela deslizantes associados a aparelhos de apoio de neoprene com núcleo de chumbo, montados lateralmente ao tabuleiro

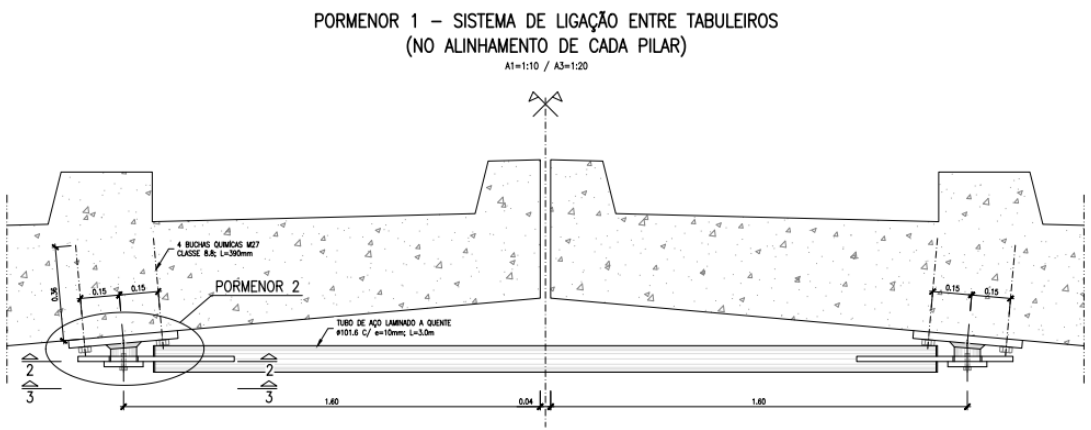


PERRY DA CÂMARA E ASSOCIADOS
Consultores de Engenharia, Lda.

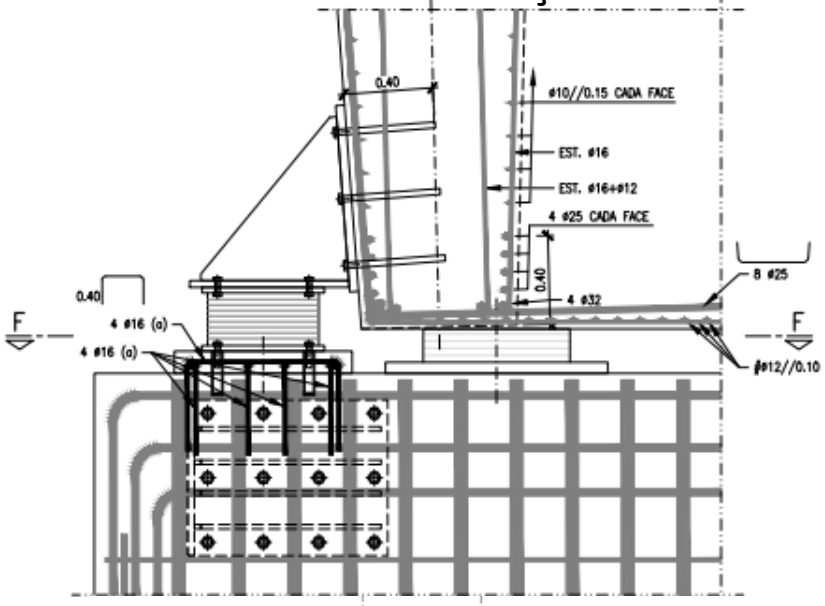
Detalhes construtivos

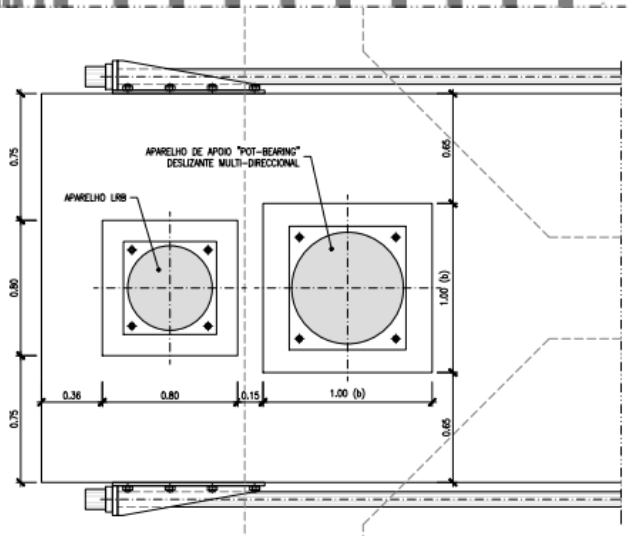
ORDEM DOS ENGENHEIROS

Escoras de ligação entre tabuleiros



Pormenor da instalação dos LRB





PERRY DA CÂMARA E ASSOCIADOS
Consultores de Engenharia, Lda.

ORDEM DOS ENGENHEIROS

Metodologia de análise sísmica

Cálculo da estrutura pela análise espetral do modo fundamental com as propriedades máximas (UBDP) e mínimas (LBDP) dos LRB

Determinam-se as características dinâmicas da estrutura e calcula-se a aceleração sísmica induzida para o modo de vibração fundamental a partir dos espetros de resposta da EN1998.

A estrutura apresenta períodos próprios fundamentais entre 3,1 s e 3,5 s em função das características tomadas para o neoprene (UBDP ou LBDP).

Dado que o amortecimento relativo obtido foi superior a 30% (entre 32 a 40%) os resultados foram confirmados com uma análise não linear de integração no tempo com a definição da acção sísmica por acelerogramas.

Os coeficientes sísmicos obtidos foram de 0,034 a 0,044 com um deslocamento do tabuleiro de cerca de 10 cm.

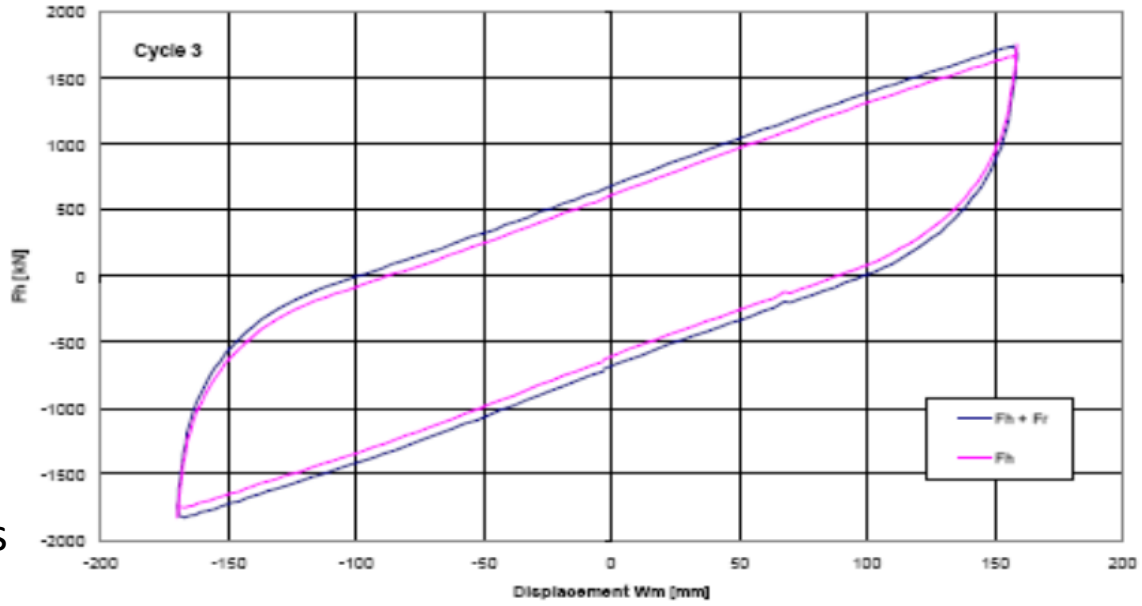
PERRY DA CÂMARA E ASSOCIADOS
Consultores de Engenharia, Lda.

ORDEM DOS ENGENHEIROS

Vantagens da utilização dos LRB

Resistência mecânica – A dissipação de energia é realizada fundamentalmente através do núcleo de chumbo e o neoprene é idêntico ao usado nos aparelhos de apoio convencionais que é caracterizado por uma alta resistência mecânica

Dissipação de energia – o coeficiente de amortecimento relativo ξ atinge valores de 25 a 35% chegando a ultrapassar 50%. Isto permite reduzir fortemente as forças e deslocamentos durante a acção sísmica.



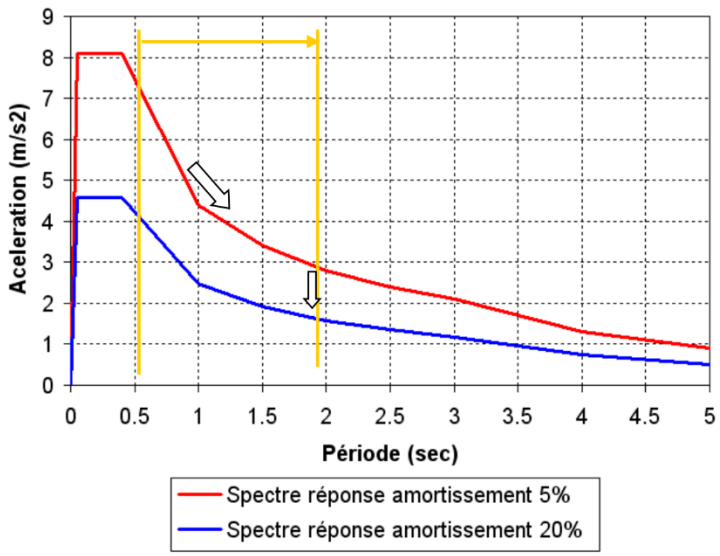
PERRY DA CÂMARA E ASSOCIADOS
Consultores de Engenharia, Lda.

ORDEM DOS ENGENHEIROS

Vantagens da utilização dos LRB

Capacidade de recentramento – Para o intervalo habitual do coeficiente de amortecimento relativo os LRB não apresentam qualquer problema de recentramento.

Rigidez sob as acções de serviço – Devido ao seu comportamento acentuadamente não linear os LRB não sofrem deformações parasitas significativas em serviço, acções que podem afetar negativamente a durabilidade das juntas de dilatação. Além disso, não se observa qualquer oscilação depois de uma ação dinâmica, graças ao elevado amortecimento do núcleo de chumbo. A sua reacção depende da velocidade de aplicação da distorção.



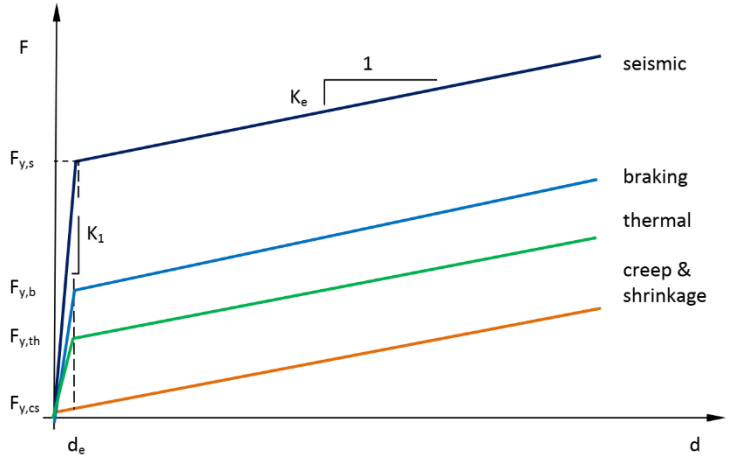


Figure 2: LRBs characteristic curves for different types of imposed actions

PERRY DA CÂMARA E ASSOCIADOS
Consultores de Engenharia, Lda.

ORDEM DOS ENGENHEIROS

PROCESSO CONSTRUTIVO

1) Alteração da junta de dilatação do encontro fixo
2) Reparação e reforço dos pilares
   1) Trabalhos de reparação dos pilares, fustes e capitéis com injeção e selagem de fissuras
   2) Instalação do reforço estrutural dos capitéis
3) Monitorização dos deslocamentos longitudinais dos aparelhos de apoio para deteção de eventuais apoios bloqueados
4) Levantamento de pormenor dos aparelhos de apoio para definir o sistema de fixação dos novos aparelhos
5) Execução dos plintos de apoio dos LRB nos capitéis dos pilares
6) Instalação dos LRB e montagem de ensaio das consolas metálicas de ligação às vigas
7) Substituição dos aparelhos de apoio dos pilares centrais e fixação dos LRB
8) Desativação parcial das ancoragens de fixação do tabuleiro no encontro E1
9) Progressiva substituição dos aparelhos de apoio a partir dos pilares centrais para os encontros
10) Desativação definitiva da ancoragem do E1

PERRY DA CÂMARA E ASSOCIADOS
Consultores de Engenharia, Lda.

ORDEM DOS ENGENHEIROS

ESTIMATIVA DE CUSTO

Estimativa de custo dos trabalhos : 3 200 000 € (cerca de 140 €/m^2) dos quais cerca de 1 100 000€ correspondem ao fornecimento e montagem dos aparelhos de apoio

PERRY DA CÂMARA E ASSOCIADOS
Consultores de Engenharia, Lda.

ORDEM DOS ENGENHEIROS

MUITO OBRIGADO PELA VOSSA ATENÇÃO

António Perry da Câmara

aperry@pcaengenharia.pt