

MODELAÇÃO E ANÁLISE NUMÉRICA DE PONTES EM ARCO DE ALVENARIA DE PEDRA

Cristina COSTA

OBJECTIVOS

- ✓ Apresentar os aspectos relativos à modelação e análise numérica do comportamento estrutural de duas pontes em arco de alvenaria de pedra
 1. Ponte da Lagoncinha - Avaliação Estrutural
Avaliar se certos danos observados no local se deviam aos efeitos das acções do tráfego rodoviário e de assentamentos de apoio.
 2. Ponte de Vila Fria - Recentemente construída
Sustentar e acompanhar os trabalhos envolvidos desde a fase de projecto até à entrada em serviço.
 - Descrição geral da obra.
 - Caracterização geométrica e mecânica os materiais e a estrutura.
 - Descrição do modelo numérico.
 - Discussão dos resultados da análise numérica.
- ✓ Resumir os resultados de dois trabalhos de seminário do 5º ano de EC do DEC da ESTT-IPT relativos à identificação das pontes em pedra existentes nos concelhos de Tomar e de Torres Novas.

PONTE DA LAGONCINHA

CASO 1

1 DESCRIÇÃO GERAL DA PONTE



- Ponte com tipologia medieval. (1000-1200)
- Classificada como Monumento Nacional desde 1943 pela DGEMN.
- Estrutura em alvenaria de pedra.
- 6 arcos diferentes.
- 5 pilares.
- Comprimento total de cerca de 130 m e largura de 3.5 m.



2 FASE INICIAL DO ESTUDO

2.1 Avaliação do estado actual da estrutura

Fendas longitudinais no intradorso dos arcos

Causas possíveis:

Cargas de tráfego rodoviário intensas.



• Inspeção visual do monumento:

- Avaliar as características gerais da estrutura.
- Detectar a existência de fendas, assentamentos e deformações extremas.

CASO 1 - PONTE DA LAGONCINHA

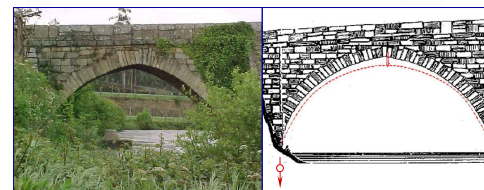
2 FASE INICIAL DO ESTUDO

2.1 Avaliação do estado actual da estrutura

Descompressão do arco

Causas possíveis:

Assentamentos diferenciais do encontro Norte devido a alterações no escoamento.



• Inspeção visual do monumento:

- Avaliar as características gerais da estrutura.
- Detectar a existência de fendas, assentamentos e deformações extremas.

CASO 1 - PONTE DA LAGONCINHA

2 FASE INICIAL DO ESTUDO

2.1 Avaliação do estado actual da estrutura

Degradação do material degradação e poluição biológica

Causas possíveis:

Envelhecimento dos materiais e manutenção insuficiente.



• Inspeção visual do monumento:

- Avaliar as características gerais da estrutura.
- Detectar a existência de fendas, assentamentos e deformações extremas.
- Avaliar do estado de degradação do material.

CASO 1 - PONTE DA LAGONCINHA

2 FASE INICIAL DO ESTUDO

2.1 Avaliação do estado actual da estrutura

Amostras de Material extraídas da ponte



• Inspeção visual do monumento:

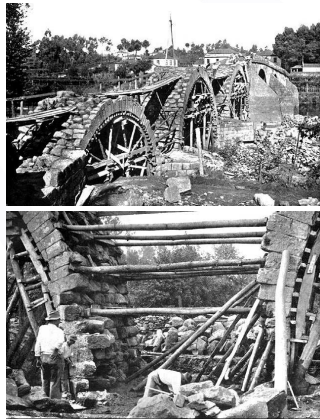
- Avaliar as características gerais da estrutura.
- Detectar a existência de fendas, assentamentos e deformações extremas.
- Avaliar do estado de degradação do material.

CASO 1 - PONTE DA LAGONCINHA

2 FASE INICIAL DO ESTUDO

2.1 Avaliação do estado actual da estrutura

Reconstrução da parte Sul em 1952



CASO 1 - PONTE DA LAGONCINHA

- Inspeção visual do monumento:
 - Avaliar as características gerais da estrutura.
 - Detectar a existência de fendas, assentamentos e deformações extremas.
 - Avaliar do estado de degradação do material.
- Dados históricos:
 - Detalhes sobre a construção, reabilitação e trabalhos de restauro.
 - Informação sobre outros eventos que possam ter influenciado o comportamento estrutural.

2 FASE INICIAL DO ESTUDO

2.1 Avaliação do estado actual da estrutura

Relatório de inspeção

MAPA DE DANOS Tipo: D1

Tipo de dano: FENDILHAÇÃO LONGITUDINAL DO INTRADORSO DA PONTE

Localização do dano:	Extensão:
S	E1
E1	E2
E2	E3
E3	E4
E4	E5
E5	E6
E6	W

Descrição: O padrão de fendilhação observado é caracterizado pela existência de fendas predominantemente ao longo do intradorso do arco. Estas fendas desenvolvem-se predominantemente nas juntas metálicas de abóbada e seguem uma direção alinhando também as juntas de grande vãos entre os decorações ao longo mais baixas, também seguem as juntas horizontais.

Diagnóstico das fendas: A fendilhação observada corresponde a um processo complexo podendo-se agrupar as fendas registadas nos seguintes tipos: fendas por tração nas juntas entre os blocos; fendas por corte com encorregamento das juntas; fendas nos blocos devido ao efeito de entalho lateral das juntas em presença de tensões de compressão.

Causas: Verifica-se a existência de fendas nos blocos da abóbada devido ao efeito de entalho lateral das juntas e ainda fendilhação devido ao efeito combinado de tensões de compressão e corte produzindo fendilhação diagonal para as juntas horizontais.

A degradação de materiais, bem como pelo tipo de fendilhação da abóbada e por uma agulha sobre as juntas de abóbada nas juntas, poderá estar relacionada com a existência de um volume de tráfego que se encontra em um estado transversal de abertura do arco ao longo dos anos (Fig. 10).

Reparação: Diminuição do volume de tráfego para reduzir as cargas de impacto na ponte; Tomada das juntas ferrosas e o compactar até à entalho da ponte.

Observações: Apesar de não ter sido possível a realização de ensaios e a ponte encontra-se em estado de conservação satisfatório.

CASO 1 - PONTE DA LAGONCINHA

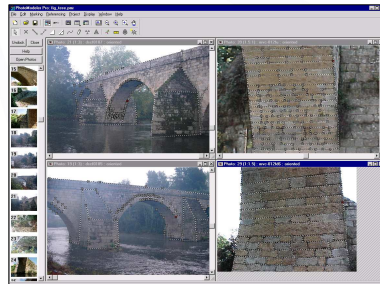
- Inspeção visual do monumento
- Dados históricos

Relatório de inspeção

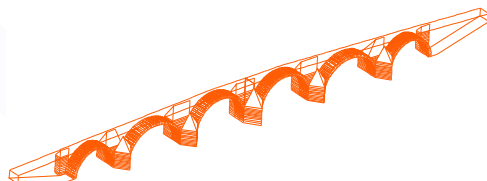
3 MODELAÇÃO NUMÉRICA

3.1 Modelo de cálculo

- Caracterização da geometria



- Levantamento fotogramétrico (PhotoModeler).
- Validação complementar com taqueómetro, medições com fita métrica, distanciómetro laser e consultando peças desenhadas existentes da DGEMN.
- Correção dos resultados num programa de desenho assistido por computador (AutoCAD).

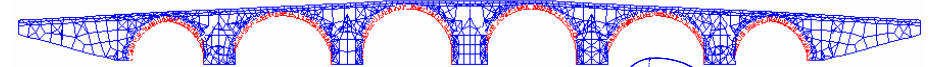


CASO 1 - PONTE DA LAGONCINHA

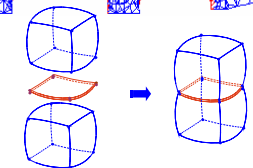
3 MODELAÇÃO NUMÉRICA

3.1 Modelo de cálculo

- Método dos Elementos Finitos (Programa de cálculo Cast3m)



- Elementos finitos:
 - Elementos volumétricos (blocos, enchimento, etc.).
 - Elementos de interface (Juntas).



- Modelo de comportamento dos materiais
 - Blocos e enchimento com *comportamento linear elástico*
 - Peso específico;
 - Módulo de Elasticidade;
 - Coefficiente de Poisson.

- Juntas (arco 5 e arco 6) com *comportamento não-linear de atrito de Coulomb sem dilatação*
- Rigidez normal (kn) e tangencial (ks);
- Resistência à tracção t_n ;
- Ângulo de atrito ϕ ;
- Evolução do encorregamento com a rigidez tangencial mobilizada (t_s, γ).

CASO 1 - PONTE DA LAGONCINHA

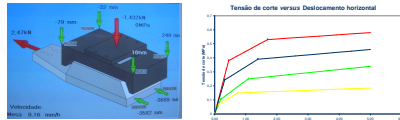
3 MODELAÇÃO NUMÉRICA

3.2 Caracterização mecânica dos materiais

- Pedra



- Juntas



- Enchimento

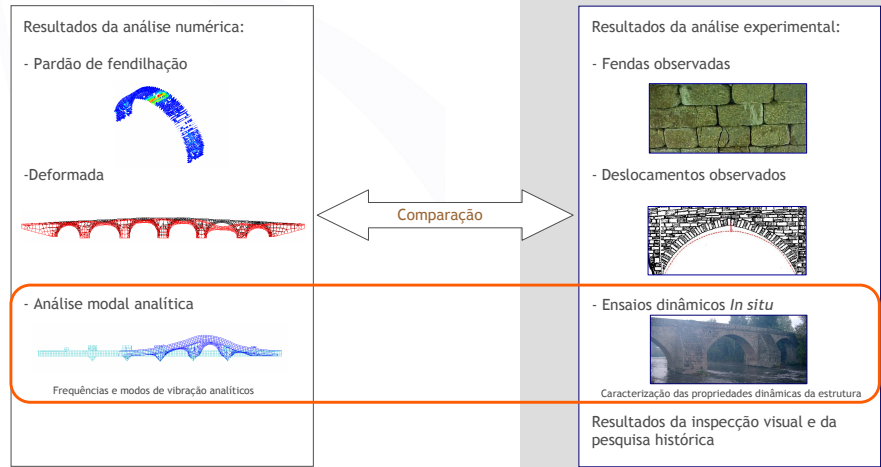


- Ensaio de compressão uniaxial
Tensão de rotura por compressão.
- Ensaio de tracção por compressão diametral
Tensão de rotura por tracção.
- Determinação do módulo de elasticidade
Módulo de elasticidade.
- Ensaio de compressão
- Rigidez normal, kn;
- Ensaio de corte
- Rigidez tangencial, kt;
- Coeficiente de atrito;
- Curva de comportamento (τ , γ)
- Ensaio edométrico
Módulo de elasticidade.

CASO 1 - PONTE DA LAGONCINHA

3 MODELAÇÃO NUMÉRICA

3.3 Calibração do modelo numérico

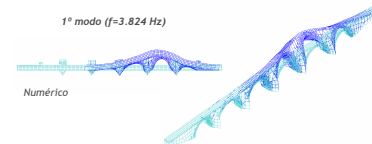
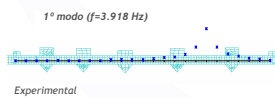
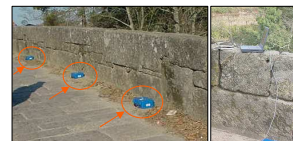
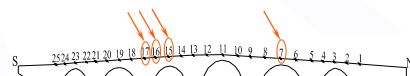


CASO 1 - PONTE DA LAGONCINHA

3 MODELAÇÃO NUMÉRICA

3.3 Calibração do modelo numérico

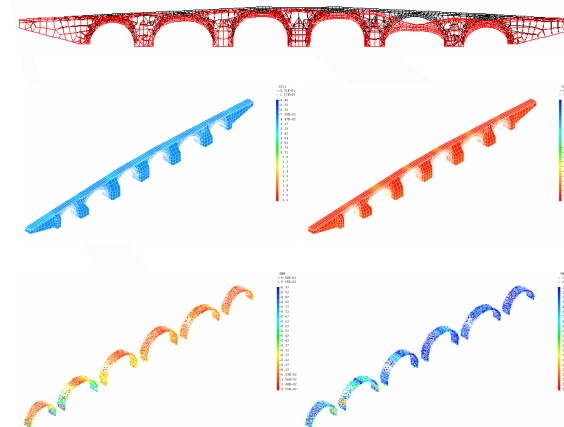
- ENSAIOS DINÂMICOS *IN SITU* DE VIBRAÇÃO AMBIENTAL



CASO 1 - PONTE DA LAGONCINHA

4 RESULTADOS DA ANÁLISE GLOBAL LINEAR

4.1 Acção do peso próprio

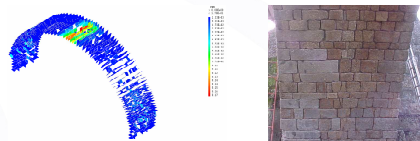


- Deformada
 $d_{z_{máx}} = 4.24$ mm
- Tensões nos blocos
 $\sigma_{3_{máx}}^- = -1.45$ MPa
 $\sigma_{1_{máx}}^+ = 0.61$ MPa
- Tensões nas juntas
 $t_{nmáx}^+ = 0.093$ MPa
 $t_{nmáx}^- = -0.980$ MPa
 $t_{smáx} = 0.025$ MPa

CASO 1 - PONTE DA LAGONCINHA

5 RESULTADOS DA ANÁLISE LOCAL NÃO-LINEAR

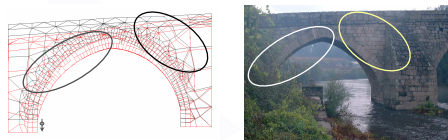
5.1 Acção do peso próprio + tráfego rodoviário



Abertura das juntas

Máxima abertura das juntas
 $\delta_{max} = 0.17 \text{ mm}$ (1.0)
 $\delta_{max} = 0.34 \text{ mm}$ (2.5)

5.2 Acção do peso próprio + tráfego rodoviário + assentamento de apoio



Deformada do arco 6

Máximo deslocamento
 $d_{z,max} = 10 \text{ mm}$

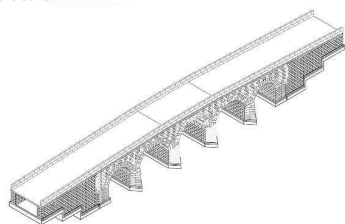
CASO 1 - PONTE DA LAGONCINHA

PONTE DE VILA FRIA

CASO 2

1 DESCRIÇÃO GERAL DA PONTE

1.1 Estrutura

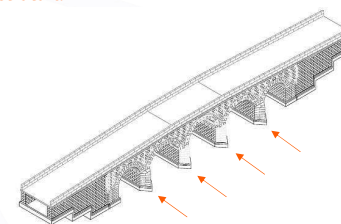


- fundações em microestacas.

CASO 2 - PONTE DE VILA FRIA

1 DESCRIÇÃO GERAL DA PONTE

1.1 Estrutura

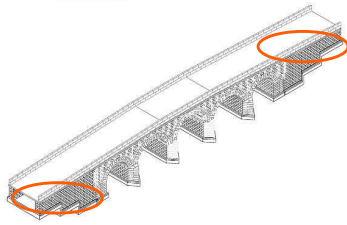


- fundações em microestacas.
- 4 pilares

CASO 2 - PONTE DE VILA FRIA

1 DESCRIÇÃO GERAL DA PONTE

1.1 Estrutura

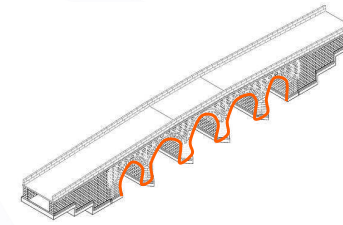


CASO 2 - PONTE DE VILA FRIA

- fundações em microestacas.
- 4 pilares
- 2 encontros.

1 DESCRIÇÃO GERAL DA PONTE

1.1 Estrutura

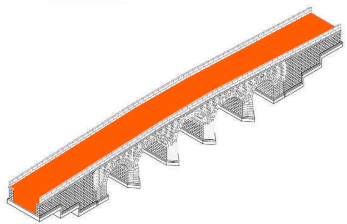


CASO 2 - PONTE DE VILA FRIA

- fundações em microestacas.
- 4 pilares
- 2 encontros.
- 5 arcos com vãos entre 4.3 e 5.8 m

1 DESCRIÇÃO GERAL DA PONTE

1.1 Estrutura

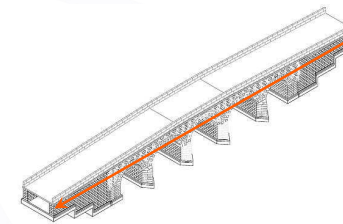


CASO 2 - PONTE DE VILA FRIA

- fundações em microestacas.
- 4 pilares
- 2 encontros.
- 5 arcos com vãos entre 4.3 e 5.8 m
- enchimento

1 DESCRIÇÃO GERAL DA PONTE

1.1 Estrutura

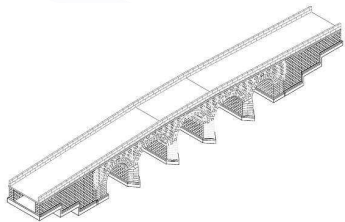


- fundações em microestacas.
- 4 pilares
- 2 encontros.
- 5 arcos com vãos entre 4.3 e 5.8 m
- enchimento
- vão total de 60 m

CASO 2 - PONTE DE VILA FRIA

1 DESCRIÇÃO GERAL DA PONTE

1.2 Materiais

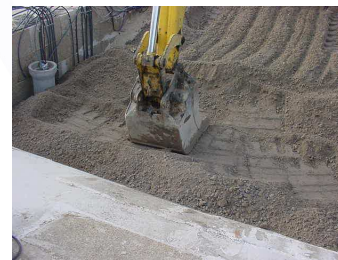
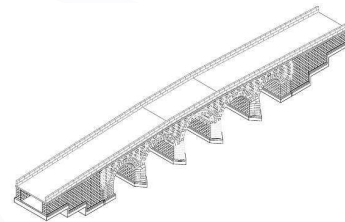


CASO 2 - PONTE DE VILA FRIA

- Alvenaria de pedra de granito
- Argamassa fina de cal

1 DESCRIÇÃO GERAL DA PONTE

1.2 Materiais

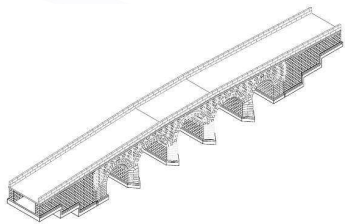


CASO 2 - PONTE DE VILA FRIA

- Alvenaria de pedra de granito
- Argamassa fina de cal
- Enchimento com tout-vennant

1 DESCRIÇÃO GERAL DA PONTE

1.2 Materiais

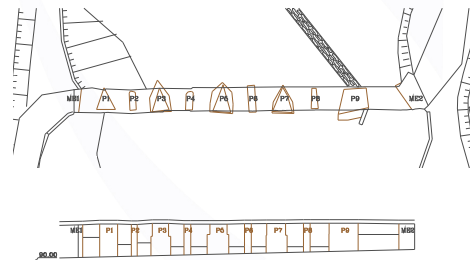


CASO 2 - PONTE DE VILA FRIA

- Alvenaria de pedra de granito
- Argamassa fina de cal
- Enchimento com tout-vennant
- Pavimento em granito

2. CRITÉRIOS DE BASE PARA O PROJECTO

- Ponte em alvenaria de pedra de granito (respeitando, dentro do possível, o existente).
- Arcos de volta inteira.
- Passagem de tráfego rodoviário do tabuleiro nos dois sentidos.



CASO 2 - PONTE DE VILA FRIA

- ✓ Meio ambiente da envolvente
- ✓ Dados de estudos precedentes
- ✓ Opções de base estabelecidas pela Câmara Municipal de Felgueiras



3. INSTRUMENTAÇÃO

3.2 Instrumentação adoptada

- Sensores de nível
- **Transdutores de deslocamento**
- Extensómetros
- Células de pressão
- Transdutores de temperatura

- Deslocamentos relativos das juntas
- Deslocamentos relativos entre muros-tímpano opostos;



CASO 2 - PONTE DE VILA FRIA

3. INSTRUMENTAÇÃO

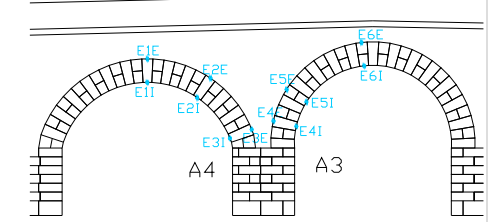
3.2 Instrumentação adoptada

- Sensores de nível
- Transdutores de deslocamento
- **Extensómetros**
- Células de pressão
- Transdutores de temperatura

- Deformações normais em alguns blocos dos arcos;



Corte1



CASO 2 - PONTE DE VILA FRIA

3. INSTRUMENTAÇÃO

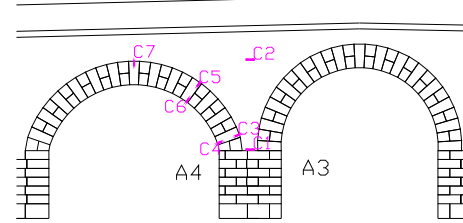
3.2 Instrumentação adoptada

- Sensores de nível
- Transdutores de deslocamento
- Extensómetros
- **Células de pressão**

- Tensões normais em alguns blocos dos arcos;
- Pressões verticais no material de enchimento;



Corte1



CASO 2 - PONTE DE VILA FRIA

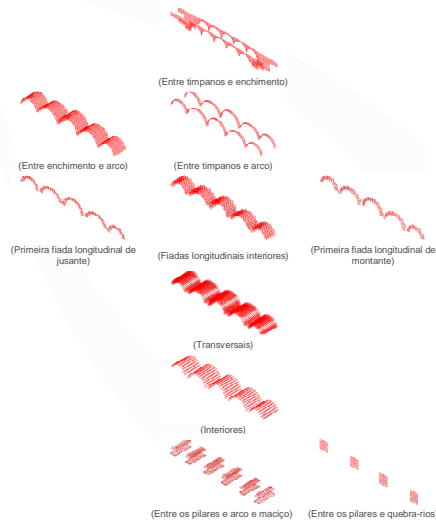
4. MODELAÇÃO NUMÉRICA. Malha de elementos finitos

Elementos volumétricos

- Maciços de fundação
- Pilares
- Quebrários
- Blocos do arco da primeira fiada do lado montante
- Blocos do arco da primeira fiada do lado jusante
- Blocos do arco das fiadas interiores
- Tímpano de jusante
- Tímpano de montante
- Enchimento
- Lajeta
- Pavimento

CASO 2 - PONTE DE VILA FRIA

4. MODELAÇÃO NUMÉRICA. Malha de elementos finitos



CASO 2 - PONTE DE VILA FRIA

Elementos de junta

- Entre os pilares e maciços
- Entre pilares e quebra-rios
- Do arco interiores
- Do arco transversais
- Do arco primeira fiada longitudinal de montante
- Do arco primeira fiada longitudinal de jusante
- Do arco restantes fiadas longitudinais
- Entre os tímpanos e o arco
- Entre o enchimento e o arco
- Entre os tímpanos e o enchimento

5. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS MATERIAIS

5.1 Ensaios de laboratório para caracterização da pedra

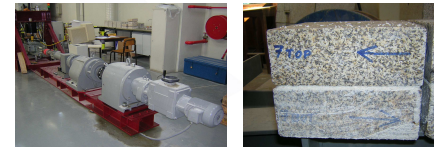
- Determinação das características das pedras



- Ensaio de compressão uniaxial
- Ensaio de tração por compressão diametral
- Ensaio para determinação do módulo de elasticidade
- Ensaio para determinação da porosidade
- Ensaio de absorção por capilaridade
- Ensaio gelo/desgelo

5.2 Ensaios de laboratório para caracterização das juntas

- Determinação da curva de comportamento das juntas



- Ensaios de corte sob tensão vertical constante

- Juntas secas
- Juntas argamassadas
- Juntas entre tout-venant e pedra

CASO 2 - PONTE DE VILA FRIA

5. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS MATERIAIS

5.3 Ensaios *in situ* para caracterização do enchimento

- Determinação do peso específico *in situ*
- Controle da compactação



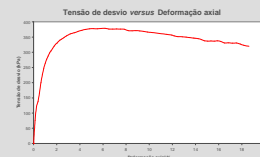
- Gama-densímetro
 - Garrafa de areia
 - Proctor
- Teor em água - 5.2 a 7.9 %
 Peso volúmico seco - 17.4 a 20.6 kN/m³
 Grau de compactação - 80.2 a 95.7 %

5.4 Ensaios de laboratório para caracterização do enchimento

- Determinação da curva de comportamento



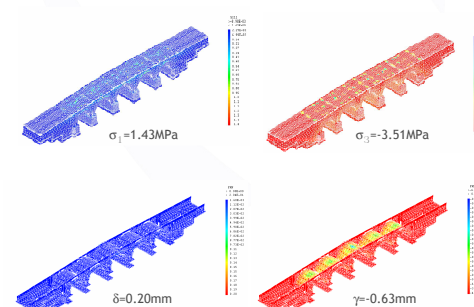
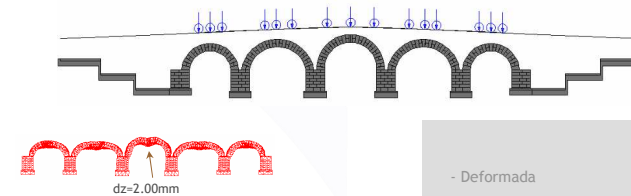
- Ensaios triaxiais



CASO 2 - PONTE DE VILA FRIA

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS NUMÉRICOS

- Efeito do peso próprio + Veículo tipo + Sobrecarga distribuída



- Deformada
- Tensões principais máximas e mínimas - blocos
- Tensões normais e tangenciais - juntas
- Abertura/fecho e escorregamento - juntas


CASO 2 - PONTE DE VILA FRIA

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA DE PEDRA EXISTENTES NO CONCELHO DE TOMAR

FICHAS DE IDENTIFICAÇÃO DAS PONTES

Ficha de identificação das características gerais

FICHA DE IDENTIFICAÇÃO Nº1



DETALHES GERAIS

IDENTIFICAÇÃO: []

TIPO DE PONTE: []

ESTADO DE CONSERVAÇÃO: []

USO: []

DESCRIÇÃO

Localização: []

Características principais: []

CONDIÇÕES AMBIENTAIS

Temperatura: []

Humidade: []

RECOMENDAÇÕES

[]

Ficha de identificação de patologias

PATOLOGIAS

IDENTIFICAÇÃO	DESCRIÇÃO	LOCALIZAÇÃO
Pta 1.1	Presença de infiltrações	Abóbada do arco
Pta 1.2	Presença de infiltrações	Abóbada do arco
Pta 1.3	Presença de infiltrações	Abóbada do arco
Pta 1.4	Presença de infiltrações	Abóbada do arco
Pta 1.5	Presença de infiltrações	Abóbada do arco
Pta 1.6	Presença de infiltrações	Abóbada do arco
Pta 1.7	Presença de infiltrações	Abóbada do arco

RECOMENDAÇÕES

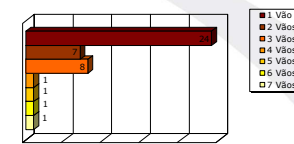
[]

CASO 4 - P. A. A. P. N. E. C. TOMAR

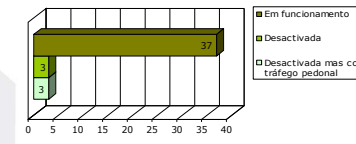
PONTES EM ARCO DE ALVENARIA DE PEDRA EXISTENTES NO CONCELHO DE TOMAR

CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE AS PONTES CATALOGADAS

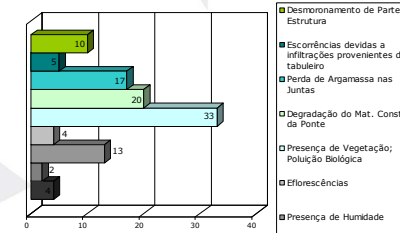
DISTRIBUIÇÃO DAS PONTES EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE VÃOS



DISTRIBUIÇÃO DAS PONTES PELO ESTADO DE FUNCIONAMENTO



DISTRIBUIÇÃO DAS PONTES PELAS PATOLOGIAS



CASO 4 - P. A. A. P. N. E. C. TOMAR

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA DE PEDRA NATURAL EXISTENTES NO CONCELHO DE TOMAR

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DAS PEDRAS CALCÁRIAS

DETERMINAÇÃO DA MASSA VOLUMICA NP - 581 de 1969

PROVETES

- São de partículas de material que não passe numa peneira de 4,75mm de abertura

RESULTADOS

Temperatura de ensaio: 22,4°C

Massa volumica (água a 20°C): 1997 Kg/m³

Massa volumica (partículas imersíveis): 2670 Kg/m³

Massa volumica (partículas saturadas): 2500 Kg/m³

Massa volumica (partículas secas): 2410 Kg/m³

Absorção de água: 4,1%

ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE NP EN 1925 de 2000

PROVETES

- PROVETES SIMPLEMENTE SECCADOS (NÃO FOLGOS)

- JÓRAN ENLASCADO E PROVETES

- PREPARAÇÃO COM FOLGOS DE INERTE

RESULTADOS



COMPRESSÃO SIMPLES ASTM D4543-85 (REAPPROVED 1991)

PROVETES

- OBJETOS POR COMPACTAÇÃO DE MODO A QUE SEJAM REPRESENTATIVOS DO TIPO DE PEDRA A ENSAJAR

- JÓRAN ENLASCADO E PROVETES SECOS E PROVETES SATURADOS

RESULTADOS

PROVETA	Ten. - 74,0 MPa
Prov 1	Ten. = 74,0 MPa
Prov 2	Ten. = 72,3 MPa
Prov 3	Ten. = 59,9 MPa

PROVETES SATURADOS

PROVETA	Ten. - 53,7 MPa
Prov 1	Ten. = 53,7 MPa
Prov 2	Ten. = 58,6 MPa
Prov 3	Ten. = 60,6 MPa
Prov 4	Ten. = 58,1 MPa

COMPRESSÃO DIAMETRAL ASTM D4543-85 (REAPPROVED 1991)

PROVETES

- OBJETOS POR COMPACTAÇÃO DE MODO A QUE SEJAM REPRESENTATIVOS DO TIPO DE PEDRA A ENSAJAR

- JÓRAN ENLASCADO E PROVETES SECOS E PROVETES SATURADOS

RESULTADOS

PROVETA	Ten. - 7,66 MPa
Prov 1	Ten. = 7,66 MPa
Prov 2	Ten. = 5,58 MPa
Prov 3	Ten. = 5,60 MPa

PROVETES SATURADOS

PROVETA	Ten. - 4,57 MPa
Prov 1	Ten. = 4,57 MPa
Prov 2	Ten. = 5,24 MPa
Prov 3	Ten. = 5,02 MPa

POINT LOAD SUGGESTED METHOD FOR DETERMINING POINT LOAD STRENGTH

PROVETES

- SECCADOS GREGORIAMENTE COM INERTE PARA COEFICIENTE DE INERTE

- JÓRAN ENLASCADO E PROVETES SECOS E PROVETES SATURADOS DURANTE 24h

RESULTADOS

PROVETA	P ₁₀	P ₁₅
1	3,42	3,61
2	4,26	4,54
3	4,63	5,13
4	3,81	4,08
5	3,82	3,97
6	4,12	4,18
7	3,67	3,82
8	3,51	3,53
9	3,27	3,27
10	3,27	3,27
11	3,12	3,67
P ₁₀ (média)	3,87	
P ₁₅ (média)	3,88	

SLAKE DURABILITY ASTM D4644 - 87 (REAPPROVED 1998)

PROVETES

- INERTE COMPACTAÇÃO POR 15 PRADIMENTOS DE CALCÁRIO BREGUEIROS, COM CEBEA DE FERRA CAJA, RESISTENDO CADA ANOSADA DE 45/100g

RESULTADOS

PROVETA	Peso Inicial	Peso Final
Prov 1	100,0%	100,0%
Prov 2	100,0%	100,0%
Prov 3	100,0%	100,0%
Prov 4	100,0%	100,0%

CASO 4 - P. A. A. P. N. E. C. TOMAR

CONCLUSÕES

Foram apresentados os aspectos essenciais relativos à modelação e análise numérica de duas pontes em arco de alvenaria de pedra.

A metodologia seguida mostrou-se eficaz para os objectivos propostos e permitiu:

✓ No primeiro caso: avaliar os efeitos das acções e concluir que a acção do tráfego rodoviário não é responsável pela a fendilhação observada no intradorso dos arcos e, por sua vez, que a descompressão detectada corresponde a presença de assentamentos de apoio.

✓ No segundo caso: o estudo permitiu atestar a robustez da solução proposta no projecto de execução.

Os trabalhos realizados no âmbito da disciplina de seminário permitiram:

✓ Catalogar as pontes existentes nos concelhos de Tomar e Torres Novas

✓ Identificar alguns danos visíveis nas pontes catalogadas

Obrigado!