

JPEE 2006

4^{as} JORNADAS PORTUGUESAS DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

Lisboa, LNEC, 13 a 16 de Dezembro de 2006

Organizadas por:

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

GPBE – Grupo Português do Betão Estrutural



Colaboração de:

APEE – Associação Portuguesa de Engenharia de Estruturas

CMM – Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista

SPES – Sociedade Portuguesa de Engenharia Sísmica



Apoio de:

OE – Ordem dos Engenheiros



ÍNDICE

Prefácio	iii
Comissões.....	iv
Patrocínios	vi
Índice.....	vii
Lista de Autores.....	xx

PARTE I - CONFERÊNCIAS

<i>Future Design Processes for Structural Engineering</i> John MILES, Reino Unido	2
<i>Precast Tower Buildings in Belgium</i> Arnold Van ACKER, Bélgica	16
<i>The Future of Life-Cycle Cost Bridge Management</i> Palle THOFT-CHRISTENSEN, Dinamarca	28
<i>Challenging Natural Hazards. The Rion-Antirion Bridge in Greece</i> Jacques COMBAULT, França	46
<i>A Travessia do Tejo no Carregado. Um Empreendimento Estrutural Português</i> Paulo BARROS, Carlos BISCAIA, Pedro CARVALHO, J. ALMEIDA MENDES, João BENTO, Portugal	64

PARTE II - COMUNICAÇÕES

TEMA 1 – VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA DE ESTRUTURAS

<i>Viadutos sobre os Rios Galvão e Real - II: Fundações</i> Júlio APPLETON, A. SOUSA COUTINHO, António COSTA, Nuno TRAVASSOS, João DIAS, Pedro LOPES	70
<i>Modelação Analítica da Influência da Idade de Betão Auto-Compactável Reforçado com Fibras de Aço no seu Comportamento à Compressão</i> Vítor CUNHA, Joaquim BARROS, J. SENA CRUZ	72

<i>Modelos Não Lineares Baseados em Campos de Tensões</i> Miguel S. LOURENÇO, João F. ALMEIDA	74
<i>Comportamento em Serviço de Zonas de Descontinuidade de Betão Estrutural</i> Nuno NUNES, Miguel S. LOURENÇO, João F. ALMEIDA	76
<i>Zonas de Descontinuidade em Betão Estrutural. Selecção e Avaliação de Modelos</i> P. SILVA LOBO, Miguel S. LOURENÇO, João F. ALMEIDA	78
<i>Dimensionamento à Flexão Composta Desviada de Secções Genéricas de Betão Armado - Programa 2D Design</i> Nuno M. PINHEIRO, Mário P. COSTA, N. VILA POUÇA	80
<i>Comportamento de Ligações Aparafusadas em Aços de Alta Resistência</i> A. GIRÃO COELHO, Frans BIJLAARD	82
<i>Verificação da Segurança de Pilares de Betão Armado em Pontes</i> Carla MARCHÃO, Francisco VIRTUOSO	84
<i>Estimação do Erro de Aproximações de Elementos Finitos Utilizando Soluções Duais</i> J.P. MOITINHO de ALMEIDA, Orlando PEREIRA	86
<i>Modelação de Estruturas de Alvenaria Antigas com um Modelo de Partículas</i> Nuno M. AZEVEDO, J. VIEIRA de LEMOS, J.R. de ALMEIDA	88
<i>Análise Estrutural de Aduela Prefabricada em Betão Reforçado com Fibras para o Revestimento de Túneis</i> Lúcio LOURENÇO, Joaquim BARROS, Simão SANTOS, António MESQUITA	90
<i>Aplicação de Técnicas de Perturbação na Análise da Incerteza Estrutural</i> J. Miguel VEIGA, A. Abel HENRIQUES, Jorge M. DELGADO	92
<i>Encurvadura Lateral de Vigas em I Duplamente Simétricas com Alma de Altura Linearmente Variável</i> Anísio ANDRADE, Dinar CAMOTIM, Paulo PROVIDÊNCIA	94
<i>Análise dos Efeitos Mecânicos do Calor de Hidratação numa Sapata de Fundação de um Aerogerador</i> Miguel AZENHA, Rui FARIA	96
<i>Simulação Numérica do Comportamento de Prumos Telescópicos Extensíveis</i> João ANDRÉ, António M. BAPTISTA	98
<i>Formulação Analítica do Cálculo Elastoplástico de Secções Transversais em Forma de Losango</i> António M. BAPTISTA	100

<i>Crítério de Interaçãõ entre o Esforço Normal e o Momento Flector para Secções de Perfis de Aço em I ou Rectangulares Ocas Totalmente Plasticadas</i>	
António M. BAPTISTA	102
<i>Modelaçãõ Numérica da Encurvadura de Elementos Estruturais em Aço Inoxidável Sujeitos a Compressãõ Axial em Caso de Incêndio</i>	
Nuno LOPES, P. VILA REAL, L. SIMÕES da SILVA	104
<i>Modelaçãõ Numérica da Encurvadura de Elementos Estruturais em Aço Inoxidável Sujeitos a Compressãõ Axial</i>	
Nuno LOPES, P. VILA REAL, L. SIMÕES da SILVA	106
<i>Estimativa da Capacidade Resistente de Arcos Metálicos</i>	
António CORREIA, Francisco VIRTUOSO	108
<i>Modelaçãõ de Passagens Enterradas Constituídas por "Box-Culverts" sob Aterros de Altura Elevada</i>	
Mário PIMENTEL, Pedro COSTA, Carlos FÉLIX, Joaquim FIGUEIRAS	110
<i>Comportamento de Ligações Soldadas em Nó Interno com Vigas de Alturas Diferentes</i>	
Sandra JORDÃO, L. SIMÕES da SILVA, R. SIMÕES	112
<i>Modelaçãõ Numérica de Ligações Viga I - Pilar Tubular</i>	
Afonso MESQUITA, L. SIMÕES da SILVA, L. COSTA NEVES, A.J. BAPTISTA	114
<i>Estudo Experimental e Numérico de Lajes Fungiformes</i>	
Carlos MORENO, Ana Maria SARMENTO	116
<i>Análise Não Linear de Vigas Mistas Considerando os Efeitos Diferidos e a Conexão Flexível</i>	
J. OLIVEIRA PEDRO, António REIS	118
<i>Desempenho Não Linear Geométrico de Pórticos Metálicos 3D Assimétricos</i>	
M. Braz CÉSAR, Rui C. BARROS	120
<i>Sobre a Análise Estrutural a Acções de Pré-Dimensionamento de uma Central Nuclear em Portugal</i>	
A.S. SOUSA, A.B. MONTEIRO, Rui C. BARROS, J.G. PEDROSA, J.R. MELO	122
<i>Comportamento Sísmico de Lajes Alveoladas Pré-fabricadas em Betão Armado. Caracterizaçãõ Experimental de um Modelo Físico</i>	
Duarte FARIA, Jorge PROENÇA, Javier ZUBIA	124
<i>Avaliaçãõ da Vulnerabilidade Sísmica dos Edífcios Pombalinos Utilizando a Abordagem dos Macro-Elementos</i>	
M. Rosa VALLUZZI, Vítor CÓIAS, Marco MUNARI	126

<i>Isolamento Sísmico de Base - Comparação de Custos/Soluções Construtivas</i> João ALBERTY	128
<i>Análise Sísmica da Barragem da Chicamba (Moçambique)</i> J. VIEIRA de LEMOS, António L. BATISTA, Ivo DIAS, Romano CÂMARA	130
<i>Avaliação Expedita da Segurança Sísmica de Pontes</i> Pedro DELGADO, Mário MARQUES, Ricardo MONTEIRO, Raimundo DELGADO, Aníbal COSTA	132
<i>Avaliação Probabilística da Segurança Sísmica de Pontes. Aplicação a um Caso Prático</i> Pedro DELGADO, Ricardo MONTEIRO, Mário MARQUES, Aníbal COSTA, Raimundo DELGADO	134
<i>Flexão Simples: Análise Comparativa REBAP vs. EC2</i> J. SENA CRUZ, Paulo B. LOURENÇO	136
<i>Revista dos Métodos da EN1991-1-2 para Análise Térmica</i> Adérito ALVES, João RODRIGUES, A. LEÇA COELHO, Emília M. LOPES	138
<i>Avaliação da Capacidade Sísmica de Edifícios de Betão Armado de Acordo com o Eurocódigo 8 - Parte 3</i> João P. SARAIVA, Júlio APPLETON	140
<i>Dimensionamento e Pormenorização das Zonas Sujeitas à Acção Localizada do Pré-Esforço Segundo o EC2</i> Luciano JACINTO	142
<i>Análise das Disposições do EC2 para a Avaliação dos Efeitos de 2^a Ordem em Estruturas de Betão Armado</i> João FALCÃO, João VINAGRE	144
<i>A Garantia da Vida Útil das Estruturas de Betão Armado. A Abordagem da Especificação LNEC E465</i> Arlindo GONÇALVES, A. BETTENCOURT RIBEIRO, M. J. ESTEVES FERREIRA	146
 TEMA 2 – COMPORTAMENTO E REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS	
<i>Desempenho Mecânico de Betões com Agregados Grossos Reciclados de Betão, Argamassas e Tijolos</i> Marco GOMES, Jorge de BRITO	150

<i>Microestrutura e Absorção de Agregados Leves de Argila Expandida</i> J. Alexandre BOGAS, Augusto GOMES, A. Paula PINTO	152
<i>Influência do Teor em Água na Absorção de Agregados Leves de Argila Expandida</i> J. Alexandre BOGAS, Augusto GOMES, A. Paula PINTO	154
<i>Identificação do Estado de Tensão na Interface CFRP/Madeira</i> Jorge T. PINTO, Abílio P. JESUS, José L. MORAIS, José L. LOUSADA	156
<i>Sistema Híbrido em Materiais Compósitos para Reforço de Lajes de Betão Armado</i> Everaldo BONALDO, Joaquim BARROS, Paulo B. LOURENÇO	158
<i>Comportamento de Vigas de Betão Armado Reforçadas ao Corte por Inserção de Laminados de CFRP</i> Salvador DIAS, Joaquim BARROS	160
<i>Betão Auto-Compactável Reforçado com Fibras de Aço para o Reforço à Flexão de Estruturas Laminadas</i> Simão SANTOS, Joaquim BARROS, Miguel FREITAS	162
<i>Betão Fibroso de Comportamento Melhorado ao Fogo</i> Lúcio LOURENÇO, Joaquim BARROS, João RODRIGUES, Simão SANTOS, Adérito ALVES	164
<i>Estudo Numérico e Experimental da Retração e Fluência. Metodologia de Ajuste das Expressões do Eurocódigo 2</i> Helder SOUSA, A. Abel HENRIQUES, Joaquim FIGUEIRAS	166
<i>Identificação da Resistência ao Esmagamento Localizado da Madeira de Pinho Português em Ligações do Tipo Cavilha</i> Francisco M. BERNARDO, Abílio P. JESUS, José L. MORAIS, José L. LOUSADA	168
<i>Utilização de Agregados Reciclados em Betão Estrutural</i> Bruno ROCHA, A. Sarmento BASTOS, Paulo CACHIM	170
<i>Implicações da Utilização do Aço Inoxidável nos Requisitos de Durabilidade do Betão Armado para Estruturas com Vida Útil Superior a 100 Anos</i> M. João CORREIA, M. Manuela SALTA, Manuel PIPA	172
<i>Propriedades dos Ferros Utilizados nas Pontes Metálicas Históricas</i> M. Manuela SALTA, M. João CORREIA, Manuel PIPA, António M. BAPTISTA	174
<i>Técnica da Calorimetria Isotérmica para Caracterização do Calor de Hidratação do Cimento</i> Luis SILVA, Miguel AZENHA, Rui FARIA	176

<i>A Utilização de Betões Leves em Vigas Mistas Aço-Betão</i> Isabel VALENTE, Paulo CRUZ	178
<i>Importância do Projecto e do Fabrico na Durabilidade de Estruturas de Madeira Lamelada-Colada. Aplicação ao Pinho Bravo</i> Florindo GASPAR, Helena CRUZ, Lina NUNES, Augusto GOMES	180
<i>Efeito da Sinergia de Dois Adjuvantes Redutores de Retracção</i> A. BETTENCOURT RIBEIRO, Ana CARRAJOLA, Arlindo GONÇALVES, Fernando BRANCO	182
<i>A Temperatura e a Técnica de Reforço por Colagem de Sistemas de FRP</i> Luís JUVANDES, Paulo SILVA, Maria ALPALHÃO, Joaquim MOREIRA, Margarida SILVA	184
<i>Retracção em Painéis de Parede de Betão Expostos a Diferentes Condições Ambientais em Faces Opostas</i> Teresa O. SANTOS, J. ALMEIDA FERNANDES, António L. BATISTA	186
<i>Robustez do BAC</i> Sandra NUNES, Paula MILHEIRO, J. SOUSA COUTINHO, Joaquim FIGUEIRAS	188
<i>Aplicação das Tecnologias do BAC e do CPF na Indústria da Pré-fabricação: Aferição das Características Mecânicas e de Durabilidade</i> Helena FIGUEIRAS, Sandra NUNES, Ana M. PROENÇA, J. SOUSA COUTINHO, Joaquim FIGUEIRAS	190
<i>Cofragem de Permeabilidade Controlada (CPF) Aplicada em Peças Prefabricadas</i> Vânia MARQUES, Diogo CAMPOS, Isaías SÁ, J. SOUSA COUTINHO	192
<i>Comportamento Experimental de Arcos de Alvenaria Reforçados com FRP</i> Daniel V. OLIVEIRA, Paulo B. LOURENÇO, Ismael BASÍLIO	194
<i>Avaliação do Comportamento de Paredes de Alvenaria com Blocos de Betão Leve</i> João P. GOUVEIA, Paulo B. LOURENÇO	196
<i>Alvenaria Estrutural: Aplicação a um Caso de Estudo</i> João P. GOUVEIA, Fontes de MELO, Paulo B. LOURENÇO	198
<i>Ensaio Sísmico a uma Solução de Edifício de Betão Armado Pré-Fabricado</i> Luís MENDES, Ema COELHO, A. CAMPOS COSTA	200
<i>Ensaio de Caracterização do Comportamento Experimental de Lajes Mistas Aço-Betão</i> José SANTOS, Rui FARIA, Joaquim FIGUEIRAS	202



<i>Análise Experimental de uma Sub-Estrutura Metálica Viga-Pilar em Situação de Incêndio</i> Aldina SANTIAGO, L. SIMÕES da SILVA, P. VILA REAL	204
<i>Distribuição Transversal de Cargas em Lajes Realizadas com Painéis Pré-Esforçados e Nervurados</i> A. Serra NEVES, Miguel RIBEIRO, C. F. SOUSA	206
<i>Asnas de Madeira. A Importância da Rigidez das Ligações</i> Jorge BRANCO, Paulo CRUZ, Maurizio PIAZZA	208
<i>Optimização da Vida Útil das Estruturas de Betão Armado</i> Rui M. FERREIRA	210
<i>Comportamento Experimental de Paredes de Alvenaria de Panos Múltiplos</i> Daniel V. OLIVEIRA, Paulo B. LOURENÇO, Rui SILVA	212
<i>Profundidade da Linha Neutra "Versus" Ductilidade em Vigas de Alta Resistência</i> Luís F. BERNARDO, Sérgio M. LOPES	214
<i>Obras da Linha Vermelha do Metropolitano de Lisboa entre a Alameda e S. Sebastião</i> Frederico MELÂNEO	216
<i>Análise Retrospectiva das Pontes da Estrada Real em Ouro Preto - MG</i> E. B. DRUMOND, Luiz A. BRANCO, R. VASCONCELLOS	218
<i>Beneficiação da Ponte Ferroviária de Canharda</i> Fernando MARTINS	220
<i>Comparação de Técnicas de Reforço Sísmico de Edifícios "Gaioleiros"</i> Miguel BRANCO, Luís GUERREIRO	222
<i>Reabilitação e Reforço Estrutural da Ponte de Lanheses sobre o Rio Lima</i> João PINHO, Alexandre PORTUGAL, José DAVID	224
<i>Comportamento de Ligações Tradicionais em Estruturas de Madeira</i> Pedro PALMA, Helena CRUZ	226
<i>Reforço à Flexão de Cobertura de Betão Armado</i> Joaquim BARROS	228
<i>Desempenho de Modelos Analíticos de Previsão da Contribuição de Materiais Compósitos no Reforço ao Corte de Vigas de Betão Armado</i> J. L. LIMA, Joaquim BARROS	230
<i>Alargamento do Viaduto sobre o Rio Antuã e da Passagem Inferior 275 na A1</i> Manuel LOUREIRO, Armando RITO	232

<i>Reabilitação da Ponte da Barra - Reparação</i> Thomaz RIPPER, Pedro MARQUES, J. Nunes FERREIRA, Armando RITO, Susana BISPO, Manuel LOUREIRO	234
<i>Três Soluções Distintas para Adaptação das Obras de Arte ao Alargamento das Auto- Estradas</i> Susana BISPO, Manuel LOUREIRO, Armando RITO	236
<i>Reabilitação da Ponte de Fagilde sobre o Rio Dão</i> Manuel LOUREIRO, Susana BISPO, Armando RITO	238
<i>Reabilitação da Ponte da Barra - Reforço da Estrutura</i> Manuel LOUREIRO, Susana BISPO, Thomaz RIPPER, Armando RITO	240
<i>Reabilitação e Reaproveitamento de Obras de Arte Correntes</i> P. SÁ da COSTA, Miguel MENDES	242
<i>Reforço de Pilares Ocos com CFRP Sujeitos a Acções Horizontais Cíclicas</i> Pedro DELGADO, Patrício ROCHA, Miguel SANTOS, António ARÊDE, N. VILA POUCA, Aníbal COSTA, Raimundo DELGADO	244
<i>Ponte Luiz I: Reforço e Instalação do Metro do Porto</i> António REIS, N. T. LOPES, D. RIBEIRO	246
<i>Reabilitação e Reforço de Pontes com a Tecnologia de Microestacas</i> Rubens PRADO, João FAÍSCA, Nuno VAZ	248
<i>Reabilitação do Viaduto da Rua Ramalho Ortigão em Lisboa</i> Fernando GONÇALVES, Victor D. BARATA	250
<i>Reabilitação Estrutural com Recurso a Microestacas</i> J. MATOS e SILVA	252
<i>Medição de Deslocamentos Superficiais em Barragens de Aterro com o GNSS</i> J. Nuno LIMA, M. João HENRIQUES, João CASACA, João COELHO	254
<i>Caracterização Experimental do Comportamento Dinâmico de Barragens de Betão com Base na sua Monitorização em Contínuo</i> Paulo MENDES, C. OLIVEIRA COSTA, J. ALMEIDA GARRETT, Sérgio OLIVEIRA	256
<i>Análise e Interpretação do Comportamento Observado da Barragem da Chicamba (Moçambique)</i> António L. BATISTA	258

<i>Monitorização Permanente da Durabilidade de Estruturas de Betão Armado. Métodos Existentes e suas Limitações</i> Elsa V. PEREIRA, M. Manuela SALTA	260
<i>Concepção, Arquitectura e Instalação do Sistema de Monitorização de Base Óptica Aplicado à Ponte Luiz I</i> Bruno J. COSTA, Carlos FÉLIX, Joaquim FIGUEIRAS	262
<i>Ensaio de Caracterização Dinâmica das Bancadas do Estádio do Dragão</i> Hugo MARQUES, Raimundo DELGADO, A. CAMPOS e MATOS	264
<i>Tratamento de Resultados Experimentais em Estruturas com Base em Filtros de Alisamento Savitzky-Golay</i> Helder SOUSA, A. Abel HENRIQUES, Joaquim FIGUEIRAS	266
<i>Metodologia Simplificada de Visualização de Deformadas com Base em Resultados Experimentais</i> Helder SOUSA, A. Abel HENRIQUES, Joaquim FIGUEIRAS	268
<i>Sistemas Integrados de Monitorização Estrutural e de Durabilidade - Aplicação a Estruturas da Rede do Metro do Porto</i> Helder SOUSA, Helena FIGUEIRAS, Álvaro PERDIGÃO, Carlos FÉLIX, Joaquim FIGUEIRAS	270
<i>Modelação do Comportamento da Nova Ponte Pedonal sobre o Rio Mondego Durante a Fase Construtiva</i> Mário PIMENTEL, Rui ALVES, Américo O. DIMANDE, Carlos FÉLIX, Joaquim FIGUEIRAS	272
<i>Monitorização do Viaduto Metálico sobre a VCI - Porto Durante a Fase de Construção e Ensaio de Carga</i> Américo O. DIMANDE, Bruno J. COSTA, Carlos FÉLIX, Joaquim FIGUEIRAS	274
<i>Observação do Viaduto Metálico sobre a VCI - Porto Sob o Efeito do Tráfego</i> Américo O. DIMANDE, Álvaro PERDIGÃO, Carlos FÉLIX, Joaquim FIGUEIRAS	276
<i>Sistema de Monitorização Aplicado na Nova Ponte Pedonal sobre o Rio Mondego em Coimbra</i> Américo O. DIMANDE, Álvaro PERDIGÃO, Mário PIMENTEL, Carlos FÉLIX, Joaquim FIGUEIRAS	278
<i>Ensaio Dinâmico do Viaduto de Millau. Contribuição do VIBEST/FEUP</i> Elsa CAETANO, Álvaro CUNHA, Filipe MAGALHÃES	280

<i>Estudo do Comportamento Dinâmico da Ponte Infante D. Henrique. Contribuição do VIBEST/FEUP</i>	
Álvaro CUNHA, Filipe MAGALHÃES, Elsa CAETANO	282
<i>Ensaio Dinâmico da Ponte Luiz I Antes e Após Intervenção de Reabilitação</i>	
Filipe MAGALHÃES, Álvaro CUNHA, Elsa CAETANO	284
<i>Observação e Interpretação do Comportamento da Barragem de Pedrogão durante o Primeiro Enchimento da Albufeira</i>	
A. TAVARES de CASTRO, António L. BATISTA, Carlos SERRA	286
<i>Comportamento In Situ de Obras de Arte com Junta Belga</i>	
L. OLIVEIRA SANTOS, Xu MIN, Jorge RODRIGUES	288
<i>Ensaio Estático e Dinâmico da Ponte Ferroviária de Campilhas</i>	
Jorge RODRIGUES, Paulo SILVEIRA, Maira LEDESMA	290
<i>Estratégias de Manutenção em Pontes Ferroviárias de Alvenaria de Pedra</i>	
Fernando MARTINS	292
<i>Os Tipos de Juntas de Dilatação Mais Aplicados na Rede Rodoviária Portuguesa e a sua Principal Patologia</i>	
A. Marques LIMA, Jorge de BRITO	294
<i>A Estratégia da REFER na Manutenção das Pontes Metálicas</i>	
A. Isabel SILVA	296
<i>Identificação dos Parâmetros a Considerar na Inspeção dos Principais Tipos de Aparelhos de Apoio Aplicados na Rede Rodoviária Portuguesa</i>	
Luís R. FREIRE, Jorge de BRITO	298
<i>Estruturas de Madeira em Ambiente Marítimo. Nova Abordagem na Promoção da Sua Conservação - Projecto MEDACHS</i>	
Lina NUNES, J. SAPORITI MACHADO	300
<i>Utilização do Radar de Prospecção Geotécnica na Localização das Bainhas de Pré-Esforço nas Pontes da Barra e de Lanheses</i>	
Paulo CRUZ, Lukasz TOPCZEWSKI, Francisco M. FERNANDES, Paulo B. LOURENÇO	302
<i>Linhas Orientadoras de uma Política de Manutenção, Conservação e Inspeção de Pontes</i>	
Paulo CRUZ	304

TEMA 3 – NOVAS REALIZAÇÕES DE ESTRUTURAS

<i>Viadutos sobre os Rios Galvão e Real - I: Superestrutura</i> Júlio APPLETON, António COSTA, Nuno TRAVASSOS, A. SOUSA COUTINHO	308
<i>Edifício Burgo - Av. da Boavista - Porto</i> Rui FURTADO, Guilhermina BARRETO	310
<i>Ponte sobre a Ribeira da Vidigueira</i> Alexandre PORTUGAL, João PINHO, Eva JERÓNIMO	312
<i>Comportamento Estrutural de Vigas de Grande Vão em Betão de Alta Resistência Pré-Esforçado</i> Paulo L. FERNANDES, Eduardo S. JÚLIO, Paulo M. TIAGO	314
<i>Concepção Estrutural do Centro Comercial da Cadeia El Corte Inglés em Vila Nova de Gaia</i> Paulo PIMENTA, Hugo MARQUES, A. CAMPOS e MATOS	316
<i>CTNAS - Centro de Tecnologias Nucleares Aplicadas Saúde</i> Nuno NEVES, Pedro MORUJÃO	318
<i>Desenvolvimento de Sistemas de Lajes Fungiformes Ortótropas Realizadas com Painéis Pré-Fabricados e Blocos de Aligeiramento</i> Fernando TEIXEIRA, A. Serra NEVES	320
<i>Ponte Mista Madeira-Betão na Estrada Florestal N^o 1 em Quiaios</i> Luís JORGE, Alfredo DIAS, Miguel FERREIRA	322
<i>Precast Segmental Bridge Construction</i> Neil THORBURN, Max MEYER	324
<i>Construção da Ponte sobre o Rio Louredo e do Viaduto sobre o Rio Vizela</i> Armando RITO, Pedro CABRAL, Manuel LOUREIRO	326
<i>O Viaduto sobre a Ribeira da Laje e Rio Grande da Pipa</i> Susana BISPO, Pedro CABRAL, Armando RITO	328
<i>Construção da Ponte sobre o Rio Tâmega e do Viaduto IX, na A7</i> Pedro CABRAL, Armando RITO	330
<i>Construção do Viaduto de Vila Pouca de Aguiar</i> Armando RITO, Pedro CABRAL, Luís XAVIER	332

<i>Soluções Parcialmente Pré-Fabricadas para Pontes de Médio Vão: O Caso da Ponte sobre o Rio Tâmega</i> A. FERREIRA, B. LIMA, P. TORRES, R. SOUSA, D. FERNÁNDEZ-ORDÓÑEZ, J. TERRA, Carlos SOUSA, A. Serra NEVES	334
<i>Concepção e Dimensionamento de uma Ponte Pedonal para a Geira Romana no Gerês</i> Elói FIGUEIREDO, Luís JUVANDES, Fernando B. ALVES, Joaquim FIGUEIRAS	336
<i>Ponte sobre o Rio Zambeze em Moçambique. Desenvolvimento Histórico do Projecto e Concepção da Obra</i> António REIS	338
<i>Laje de Cobertura da Estação Saldanha II. Prolongamento da Linha Vermelha Alameda II - Campolide</i> Rute VIEGAS, A. TAVARES FLOR	340
<i>Interface Modal do Cais do Sodré</i> A. Carla LOPES, Carlos VIEIRA	342
<i>Prolongamento da Linha Vermelha do Metropolitano de Lisboa. Troço 98^o (Parcial) / Encarnação - Aeroporto</i> Carlos VIEIRA, J. SOUSA CRUZ	344
<i>Reabilitação de uma Galeria do Metropolitano de Lisboa</i> Gonçalo D. VIEIRA, Frederico MELÂNEO	346
<i>Viaduto sobre o Vale da Ribeira de S. Sebastião</i> Vasco AMARAL, Fernando GONÇALVES, Victor D. BARATA	348
<i>Viaduto sobre a Auto-Estrada A1 no Carregado</i> Júlio APPLETON, José DELGADO, António COSTA	350
<i>Nova Travessia do Rio Tejo no Carregado</i> Alexandre PORTUGAL, A. PERRY da CÂMARA, Francisco VIRTUOSO, Virgílio REBELO	352
<i>Resposta em Frequência de Pontes Ferroviárias Considerando a Interação Veículo/Balastro/Ponte</i> Constança RIGUEIRO, Carlos REBELO, L. SIMÕES da SILVA	354
<i>Efeito de Diferentes Estratégias de Reforço de uma Ponte Metálica para Tráfego de Comboios de Alta Velocidade</i> Diogo RIBEIRO, Rui CALÇADA, Raimundo DELGADO	356

<i>Comportamento Dinâmico de Lajes sobre Estacas para Suporte de Vias Férreas de Alta Velocidade</i> Bruno COELHO, Rui CALÇADA, Raimundo DELGADO	358
<i>Fadiga de Pontes Mistas Aço-Betão em Linhas de Alta Velocidade</i> Helder FIGUEIREDO, Rui CALÇADA, Raimundo DELGADO	360
<i>Interacção Via-Estrutura em Pontes Ferroviárias: Aplicação ao Estudo da Ponte sobre o Rio Moros</i> Romeu SIMÕES, Rui CALÇADA, Raimundo DELGADO	362
<i>Medição das Vibrações em Aterros Geradas por Comboios de Alta Velocidade</i> João MARCELINO, Carina MONTEIRO	364

COMPORTAMENTO EXPERIMENTAL DE PAREDES DE ALVENARIA DE PANOS MÚLTIPLOS



Daniel V. Oliveira
Professor Auxiliar
Universidade do
Minho
Guimarães



Paulo B. Lourenço
Professor Associado
com Agregação
Universidade do
Minho
Guimarães



Rui Silva
Engenheiro Civil
Universidade do
Minho
Guimarães

SUMÁRIO

Este artigo apresenta os primeiros resultados de um estudo experimental desenvolvido no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho, sobre o comportamento de paredes de alvenaria de três panos e dos seus materiais constituintes. São apresentados e discutidos os resultados de ensaios de compressão uniaxial em paredes de três panos simples e reforçadas com a aplicação de varões de GFRP transversais às paredes.

Palavras-chave: alvenaria, panos múltiplos, GFRP, calda de injeção.

1. INTRODUÇÃO

Uma parte importante das estruturas históricas existentes nos centros urbanos Europeus é constituída por alvenaria de pedra, frequentemente composta por paredes de panos múltiplos, onde a tipologia mais comum é constituída por paredes de três panos. Estas são caracterizadas por uma presença significativa de vazios no pano interno [1], por uma fraca resistência dos materiais que as constituem e por uma ligação entre panos deficiente ou mesmo inexistente, traduzindo-se em mecanismos de colapso frágeis, tipicamente associados à separação dos seus panos externos e no seu colapso para fora do seu plano.

Apesar da importância do conhecimento do comportamento das paredes de alvenaria de três panos, este é, ainda, bastante limitado, pela falta de estudos experimentais, devido à dificuldade de reprodução em laboratório de provetes representativos, por razões económicas

e por vezes técnicas. Estas limitações conduzem, por vezes, a trabalhos de reabilitação estrutural desajustados, o que é preocupante, pois geralmente este tipo de paredes surge em edifícios com valor patrimonial elevado. Este tipo de intervenção exige dos responsáveis pela intervenção cuidados específicos na escolha dos materiais, pois é necessário garantir compatibilidade mecânica, física e química com os materiais originais, para que a intervenção seja efectiva e duradoura [2, 3].

Assim, foi planeado no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho um estudo experimental sobre o comportamento de paredes de alvenaria de três panos. A campanha experimental consiste no ensaio à compressão de dezasseis paredes de alvenaria de pedra de granito sob condições de reforço diferentes: ligação transversal dos panos através da aplicação de varões de fibra de vidro (GFRP - glass fibre reinforced polymer) transversais às paredes, refecimento das juntas com inserção de varões de GFRP e combinação simultânea destas duas técnicas. Com este estudo pretende-se caracterizar o comportamento de paredes de alvenaria de pedra de três panos quando sujeitas a um carregamento de compressão, em termos de parâmetros mecânicos (resistência à compressão e módulo de elasticidade), em termos de configuração do mecanismo de colapso e em termos de alguns parâmetros mecânicos dos materiais constituintes das paredes, de forma a contribuir para um maior conhecimento sobre o assunto, apoiando o desenvolvimento de modelos analíticos e de métodos de dimensionamento. Um outro objectivo a que este estudo se propõe, mas que não está presente neste artigo devido ao estado inicial dos trabalhos, é comparar as eficiências e mudanças de comportamento através da aplicação das diferentes técnicas de reforço. Assim, relativamente às técnicas de reforço mencionadas anteriormente, apenas são apresentados resultados experimentais das paredes reforçadas com varões de GFRP, dispostos transversalmente aos panos.

Para a definição das dimensões e materiais a utilizar na construção das paredes em estudo, foi realizada uma pesquisa bibliográfica preliminar [1-2, 4-7], para que os provetes fossem o mais possível representativos das paredes de três panos existentes. Assim, para a construção das paredes foram utilizadas pedras de granito e uma argamassa à base de cal, tendo-se contratado um pedreiro profissional para que a construção das paredes fosse feita segundo os métodos tradicionais e fosse representativa das paredes antigas. Relativamente aos materiais, para garantir a sua representatividade, foi realizado um estudo experimental que incidiu sobre o comportamento isolado do granito e da argamassa. Foram ainda realizados estudos experimentais sobre a calda de injeção utilizada para a realização do reforço e sobre o comportamento individual dos panos externo e interno.

2. TÉCNICAS DE REFORÇO

Apresenta-se, de seguida, uma breve descrição das diferentes técnicas de reforço a adoptar neste projecto. Os objectivos destas técnicas visam resolver determinadas deficiências estruturais das paredes de três panos, tais como:

- ligação deficiente entre os panos das paredes;
- deformação horizontal devido à fluência do material;
- fraca resistência mecânica do pano interno.

A aplicação de varões transversais às paredes visa melhorar a ligação entre os panos, principalmente entre os panos externos, levando a que haja uma redução efectiva da deformação transversal. Esta técnica é geralmente realizada com varões de aço, facilmente aplicados através de furos realizados nas paredes, sendo os varões ancorados nos panos externos. No caso dos varões de aço, a sua ancoragem pode facilmente ser realizada por dobragem dos varões de fora para as juntas, previamente abertas e depois preenchidas com uma nova argamassa. No caso de varões de FRP, a dobragem não é possível, pelo que a ancoragem é realizada com elementos especiais tais como barras de ângulo ou conectores desenvolvidos especificamente para esse efeito. A ancoragem pode, ainda, ser realizada através da injeção local com uma calda de injeção, realizando-se a transferência de esforços por atrito entre o varão e a calda.

O refechamento das juntas tem sido utilizado para reparar e reforçar estruturas históricas de alvenaria de tijolo apresentando deformação horizontal devido à fluência [8]. Esta técnica é complementada com a aplicação de armaduras horizontais ao longo do desenvolvimento das paredes, nas juntas. A utilização destas armaduras apenas é possível em paredes de alvenaria de tijolo ou em paredes de alvenaria de pedra em que os blocos sejam bastante regulares, permitindo o desenvolvimento regular das juntas. Esta técnica é realizada através da remoção da camada superficial da argamassa das juntas horizontais (cerca de 6-8 cm) e aplicando varões de aço ou de FRP, que posteriormente são revestidos com uma nova argamassa de características superiores à original. No caso de paredes de panos múltiplos podem, ainda, serem colocados pequenos varões transversalmente às paredes em furos realizados para o efeito, de forma a melhorar o efeito de confinamento das armaduras das juntas e promover a ligação entre os panos externos.

Quanto à injeção, apesar de ser uma técnica não utilizada neste estudo como técnica de reforço, é importante que seja referida nesta exposição, até porque é uma técnica bastante utilizada [4, 9] e que se pensa usar em trabalhos futuros. Esta tem como objectivo melhorar a capacidade resistente do pano interno, através do preenchimento dos vazios e aumentar a aderência aos panos externos. Nos últimos anos têm sido realizados bastantes estudos sobre a fiabilidade desta técnica e sobre a compatibilidade a nível mecânico, físico e químico [4-5, 10]. Actualmente é corrente a utilização desta técnica com uma calda à base de cal, particularmente na reabilitação de construções históricas. Normalmente em paredes de três panos a injeção é realizada a baixa pressão (50-100 kPa), para evitar destacamentos indesejáveis nos panos externos e o arrastamento de material ao longo do pano interno, através dos vazios.

3. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS CONSTITUINTES DAS PAREDES

3.1 Granito

A maior parte dos edifícios antigos encontrados no Norte de Portugal são construídos por granito. Assim, para assegurar uma representatividade efectiva, foi utilizada uma pedra granítica, disponível localmente, na construção de todas as paredes ensaiadas. Para a caracterização do comportamento mecânico do granito foram ensaiados seis cilindros com

$\varnothing 100 \times 200 \text{ mm}^2$. Os ensaios foram realizados com o bastidor da Figura 1(a) através da aplicação de uma carga de compressão monotônica com controle de deslocamentos até à total perda de capacidade de carga do provete. Para permitir a obtenção do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson foram colocados nos provetes quatro extensômetros igualmente espaçados ao longo do seu perímetro e a meia altura do provete, ver Figura 1(b).

Considerando todos os provetes ensaiados, obteve-se um valor médio da resistência à compressão de 52.2 MPa, um valor médio do módulo de elasticidade de 20.6 GPa e um valor médio do coeficiente de Poisson de 0.24 (obtidos para o intervalo [30%-60%] da tensão máxima). Os valores obtidos para os três parâmetros podem ser considerados valores típicos do material em questão, ver [11] para mais informação. O valor do coeficiente de variação para os três parâmetros ronda os 20%, podendo ser considerado bastante aceitável, dada a natureza do material.

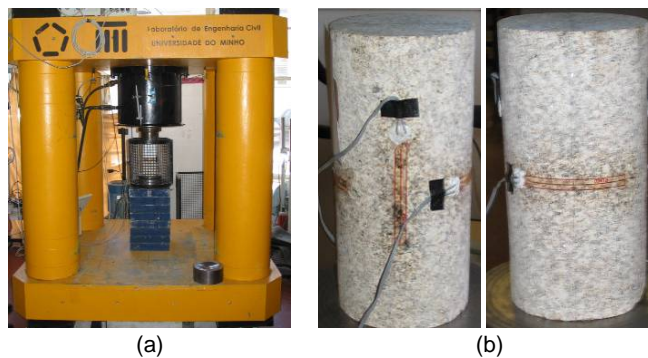


Figura 1: Preparação do ensaio: (a) equipamento de ensaio; (b) disposição dos extensómetros.

3.2 Argamassa

Na reprodução em laboratório de componentes de alvenaria antiga, a escolha da argamassa é fundamental, pois deve-se ter presente que as argamassas e os ligantes utilizados antigamente são completamente diferentes dos utilizados hoje em dia [12]. De forma a obter uma argamassa de baixa resistência representativa das argamassas antigas existentes, foi escolhida uma argamassa à base de pozolana e cal para a construção das paredes e dos provetes. A partir de um estudo de composição preliminar desenvolvido pelos autores, escolheu-se uma composição em que a razão areia/ligante foi de 1:3 e a razão água/ligante foi de 0.8 (traço em termos de peso), ver detalhes em [13]. Para facilitar o processo construtivo das paredes foi, ainda, adicionado um secante pozolanico.

Com vista à caracterização do comportamento mecânico da argamassa, foram realizados ensaios à compressão em provetes cúbicos com dimensões de $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ obtidos durante a construção das paredes, para provetes com a idade de 7, 28 e 90 dias. Para cada idade determinou-se o valor médio da resistência à compressão dentro uma série de três provetes. Assim, obteve-se uma resistência à compressão de 0.5 MPa, 2.9 MPa e 2.2 MPa, para as

idades de 7, 28 e 90 dias, respectivamente. Com base nos resultados disponibilizados na bibliografia, esta argamassa pode ser considerada mecanicamente representativa das argamassas antigas.

3.3 Pano externo

Para caracterizar o comportamento estrutural de cada um dos panos, foram construídos provetes dos panos externo e interno. Os provetes do pano externo, compostos por três pedras e duas juntas, foram construídos de forma a simular o mais possível os panos externos das paredes. Foram construídos um total de nove provetes durante a construção das duas séries de paredes, com dimensões médias de $150 \times 150 \times 320 \text{ mm}^3$ (razão altura/largura de 2.1), tendo sido ensaiados à compressão uniaxial com controlo de deslocamentos com velocidade de $10 \mu\text{m/s}$, ver Figura 2(a). Os provetes foram ensaiados à idade de 60 dias.

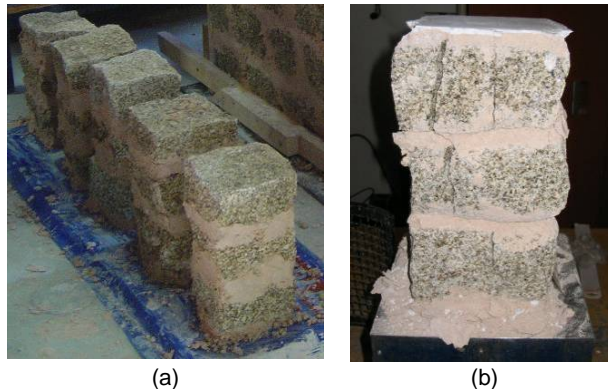


Figura 2: Provetes representativos dos panos externos: (a) provetes antes do ensaio;
(b) padrão de fendilhação típico.

Foi obtido um valor médio da resistência à compressão de 7.7 MPa e um coeficiente de variação de 28 %. Tal como publicado na bibliografia, ver [14] e outros, a justaposição de pedras num único prisma (caso dos provetes em estudo) conduz a uma redução da resistência à compressão, quando comparada com os provetes de pedra. Neste trabalho foi observada uma redução da resistência à compressão de 85 % dos provetes de granito para os do pano externo. Para além disso, o valor do coeficiente de variação é bastante elevado, devido à grande diferença dos valores médios das duas séries, podendo esta redução estar associada a diferenças no processo construtivo, sendo necessária a realização de mais estudos experimentais de forma a avaliar o efeito da argamassa das juntas. O padrão de fendilhação destes provetes é caracterizado pela predominância de fendas verticais que atravessam todas as pedras, ver Figura 2(b).

3.4 Pano interno

O pano interno das paredes de alvenaria de três panos é tipicamente constituído por materiais de qualidade bastante reduzida, tais como desperdícios das pedras utilizadas nos panos externos e desperdícios de argamassa. Neste estudo, tanto na construção do pano interno das paredes como nos provetes representativos do pano interno, foram utilizadas pequenas pedras de granito dispostas em camadas alternadas com camadas de argamassa, evitando a compactação do material, de forma a criar um determinado volume de vazios. Tal como nos provetes do pano externo, os provetes representativos do pano interno foram executados durante a construção das duas séries de paredes, tendo sido construídos um total de seis, com dimensões de $\varnothing 150 \times 300 \text{ mm}^2$, ver Figura 3(a).

Os provetes foram ensaiados à compressão uniaxial com controlo de deslocamento, aproximadamente aos 60 dias de idade e com uma velocidade de $5 \mu\text{m/s}$. Obteve-se um valor médio de resistência à compressão de 292 kPa e um coeficiente de variação de 46%. Tal como esperado, foi obtida uma resistência muito baixa, devido à fraca ligação entre a argamassa e o granito, sendo demonstrado pelo mecanismo de rotura encontrado, que é caracterizado pela desagregação parcial do material do provete, ver Figura 3(b).

Tal como ocorreu para os provetes do pano externo, os valores médios da resistência à compressão das duas séries são bastante diferentes (405 kPa e 178 kPa), o que justifica o elevado coeficiente de variação. Porém, o coeficiente de variação dentro de cada série não é superior a 25%, o que parece indicar que foi seguido o mesmo procedimento dentro de cada série.

A resistência à compressão do pano interno é cerca de 4% da resistência do pano externo, demonstrando que as cargas são essencialmente transmitidas pelos panos externos.



Figura 3: Provetes representativos dos panos internos: (a) provetes antes do ensaio; (b) mecanismos de colapso observados.

3.5 Materiais de reforço e injeção

O reforço das paredes, que será discutido adiante neste trabalho, foi realizado através da aplicação de varões de GFRP transversalmente às paredes, sendo a ancoragem realizada ao longo da espessura dos panos externos através da injeção local de uma calda à base de cal. Considerou-se que a resistência da ligação entre os varões de GFRP e a calda é suficientemente elevada para garantir a transmissão de força dos panos para os varões. O valor da tensão resistente à tracção dos varões de GFRP é bastante elevado (760 MPa, valor fornecido pelo fabricante), pelo que previne a rotura frágil do varão de reforço.

Os furos abertos para a colocação dos varões de GFRP foram depois injectados com uma calda comercial à base de cal de forma a preencher o furo e os vazios circundantes. De forma a caracterizar o seu comportamento mecânico, foram ensaiados à compressão uniaxial e tracção provetes cúbicos de dimensões $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$, obtidos durante a injeção das paredes. Os provetes foram ensaiados sensivelmente aos 30 dias de idade, tendo sido obtido um valor médio da resistência à compressão de 17.6 MPa e de 291 kPa para a resistência à tracção.

4. CARACTERIZAÇÃO DAS PAREDES DE TRÊS PANOS

4.1 Provetes

Neste trabalho foram construídas paredes com as dimensões de 600 mm de comprimento, 300 mm de espessura e 1100 mm de altura, ver Figura 4(a). Cada pano externo tem uma espessura aproximada de 100 mm sendo executado por justaposição de pedras ligadas por argamassa à base de cal, formando as juntas. Durante a construção não foi prevista a colocação de pedras orientadas transversalmente às paredes, segundo a sua maior dimensão, para promover a ligação entre panos. O granito utilizado na construção das paredes é proveniente de uma pedreira do Norte de Portugal e a argamassa utilizada é composta por um ligante à base de cal e pozolana. O comportamento mecânico destes materiais foi apresentado na secção 3.

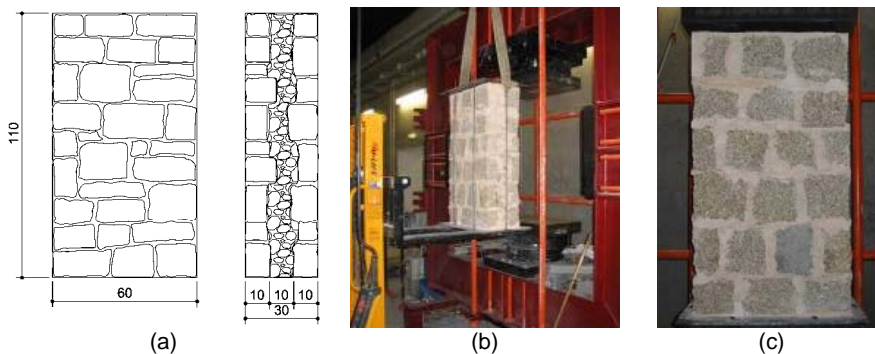


Figura 4: Provetes das paredes de três panos: (a) esquema das dimensões (unidades em cm); (b) transporte da parede para o pântico; (c) parede antes do ensaio.

4.2 Programa de ensaios

O programa de ensaios, sintetizado no Quadro 1, consiste no ensaio à compressão uniaxial de dezasseis provetes de paredes de três panos reforçadas com diferentes técnicas: aplicação de varões de GFRP transversais às paredes, refecimento das juntas com a aplicação de varões de GFRP e aplicação simultânea destas duas técnicas. A aplicação destas técnicas de reforço não será restringida a uma única série, sendo aplicadas ao longo de todas as séries a serem realizadas, de forma a minimizar a influência do processo construtivo. As primeiras duas séries (as únicas que são apresentadas neste artigo), permitem caracterizar o comportamento de paredes simples (não reforçadas) e de paredes reforçadas com a aplicação de varões de GFRP, ver Quadro 2.

Quadro 1: Programa de ensaios

Tipo de reforço	Número de paredes a serem ensaiadas	Número de paredes ensaiadas
Sem reforço (U)	4	3
Aplicação de varões de GFRP transversais à parede (T)	4	3
Refecimento das juntas (B)	4	0
Combinação da aplicação de varões de GFRP transversais à parede e refecimento das juntas (T+B)	4	0

Aproximadamente 60 dias após a construção das paredes, estas foram colocadas entre duas chapas metálicas ligeiramente pré-esforçadas, por meio de varões de aço, e transportadas para o pórtico de ensaio, ver Figura 4 (b, c).

Quadro 2: Provetes das paredes de três panos

Série	Número de paredes	Tipo de reforço	Denominação da parede
I	2	U×2	1W1, 1W2
II	4	U×1 e T×3	2W1 e 2W2, 2W3, 2W4

As paredes foram ensaiadas à compressão uniaxial sob carga monotónica, utilizando um pórtico com capacidade para aplicação de uma força de 2 MN, ver Figura 5(a). Todos os ensaios foram realizados com controlo de deslocamentos com uma velocidade de 3 $\mu\text{m/s}$. Para prevenir o colapso total das paredes, os ensaios eram interrompidos antes que tal sucedesse. Para a medição dos deslocamentos das paredes foram utilizados dez transdutores (LVDTs), tendo sido dispostos de acordo com a Figura 5(b).

4.3 Reforço

As paredes 2W2, 2W3 e 2W4 foram reforçadas com a aplicação de dois varões de GFRP de 10 mm de diâmetro. Para tal foi necessário realizar dois furos com 20 mm de diâmetro aos terços da altura da parede, como se pode ver na Figura 6(a, c). Para facilitar o processo, os

furos foram realizados de forma a coincidirem com as juntas. Após a colocação dos varões injectou-se os furos com uma calda à base de cal. O reforço foi aplicado aproximadamente 30 dias após a construção das paredes.

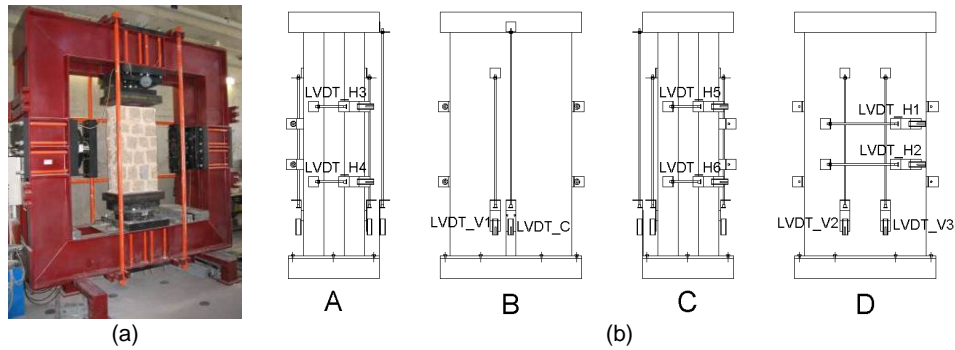


Figura 5: Preparação do ensaio: (a) pórtico do ensaio; (b) disposição dos transdutores.

Os vazios adjacentes aos furos foram, também, preenchidos pela calda e a ausência de compactação bem como a interligação dos vazios do pano interno foi notoriamente verificada pelo escoamento de calda através das faces transversais das paredes, ver Figura 6(b). Isto implica que a resistência de algumas partes do pano interno foi melhorada pela injeção.

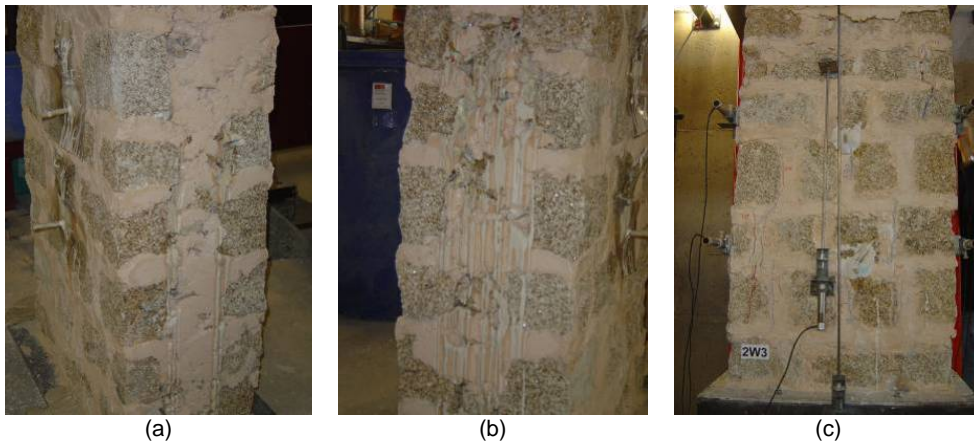


Figura 6: Aplicação do reforço: (a) injeção dos furos; (b) escoamento de calda; (c) parede 2W3 durante o carregamento.

4.4 Resultados

Nesta secção são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios das paredes de três panos (três paredes simples e três paredes reforçadas com varões de GFRP). No Quadro 3 apresenta-se a resistência à compressão e o módulo de elasticidade, calculado para

o intervalo de [30%-60%] da tensão máxima, sendo apresentado também o valor médio destes parâmetros bem como o coeficiente de variação, entre parêntesis. As paredes simples apresentaram um valor médio da resistência à compressão de 1.8 MPa, enquanto que as paredes reforçadas apresentam um valor médio para este parâmetro de 3.1 MPa, o que significa um aumento médio da resistência de 71%, devido ao efeito de confinamento introduzido pelos varões de GFRP. O valor médio do módulo de elasticidade das paredes não reforçadas, não contabilizando o valor obtido para a parede 1W2 por razões que serão expostas à frente, foi de 0.72 GPa e para as paredes reforçadas foi de 0.67 GPa. Este resultado parece indicar que a aplicação do reforço não altera o módulo de elasticidade das paredes.

Quadro 3: Resistência à compressão e módulo de elasticidade das paredes reforçadas e não reforçadas (os coeficientes de variação são apresentados entre parêntesis).

Parede	f_c (MPa)	$E_{[30\%-60\%]}$ (GPa)	Parede	f_c (MPa)	$E_{[30\%-60\%]}$ (GPa)
1W1	2.4	0.75	2W2	3.3	0.72
1W2	1.7	-	2W3	2.6	0.60
2W1	1.4	0.70	2W4	3.5	0.68
Média	1.8 (26%)	0.72 (5%)	Média	3.1 (15%)	0.67 (9%)

Na Figura 7 são apresentadas as curvas tensão-extensão obtidas para as paredes. As paredes não reforçadas, ver Figura 7(a), apresentam um comportamento semelhante entre si. Este é caracterizado pela existência de duas zonas de degradação de rigidez, onde a primeira ocorre a um nível de tensão de cerca de 0.6 MPa, que poderá estar relacionado com a separação inicial dos panos externos, e a segunda próximo da tensão de pico. Porém, na parede 1W2 a separação dos panos externos parece acontecer para um nível de tensão mais elevado, optando-se por não incluir esta parede no cálculo do módulo de elasticidade por apresentar um comportamento atípico relativamente às outras paredes não reforçadas.

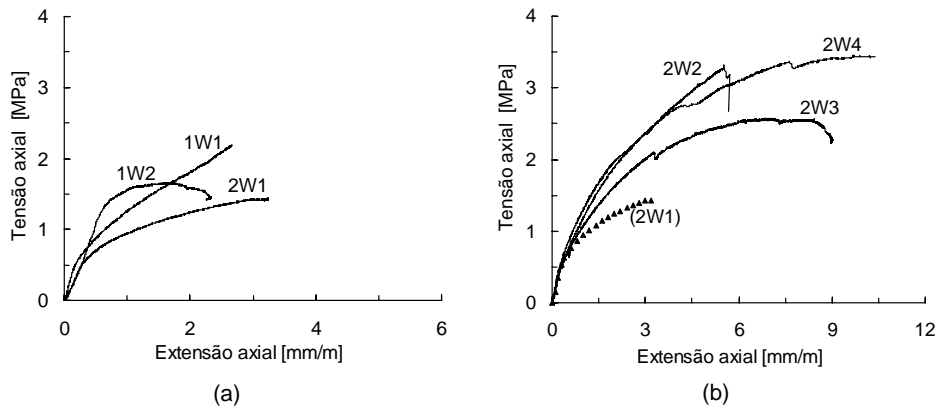


Figura 7: Curvas tensão-extensão: (a) paredes não reforçadas; (b) paredes reforçadas (a parede 2W1 está também representada).

As paredes reforçadas apresentam também curvas tensão-extensão análogas entre si, ver Figura 7(b), caracterizadas por uma degradação progressiva de rigidez com o aumento da tensão instalada. A parede 2W2 rompe prematuramente de uma forma frágil, devido, provavelmente, a um defeito de construção. Na Figura 7, observa-se também que o valor do módulo de elasticidade não é significativamente alterado pela presença do reforço.

Para além do aumento da resistência das paredes, o reforço promoveu também um aumento da deformação das paredes próximo da rotura. Isto só foi possível pela existência dos dois varões de GFRP, que alteraram o mecanismo de rotura das paredes. De facto, o mecanismo de rotura das paredes não reforçadas é caracterizado pelo desenvolvimento de fendas horizontais, como pode ser observado na Figura 8, a que corresponde a formação de rótulas plana, levando à formação de um mecanismo, dando-se a rotura por rotação do pano externo para fora do seu plano (mecanismo global).

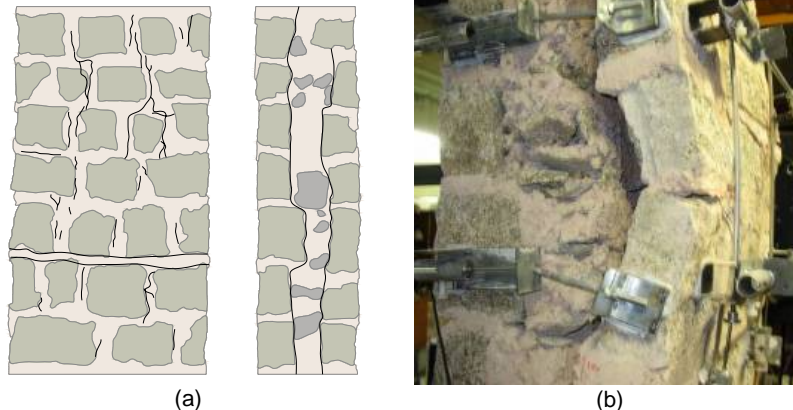


Figura 8: Mecanismo de rotura da parede 2W1 (não reforçada): (a) padrão de fendilhação próximo da rotura; (b) rotação do pano externo.

Porém, para as paredes reforçadas, os varões de GFRP promoveram uma ligação efectiva entre os panos externos, permitindo que a parede funcionasse como se fosse constituída por um único pano, comprovado pelas fendas verticais existentes próximo da rotura e pela ausência de fendas horizontais significativas nesta mesma fase, ver Figura 9. O mecanismo de rotura destas paredes é caracterizado pela rotura local, devido à instabilidade de alguns blocos de pedra (mecanismo local).

Nas paredes reforçadas, a rotura ocorreu sempre antes da perda de ligação entre os varões de GFRP e a calda de injecção. Uma vez que não será de esperar uma grande resistência da ligação calda-GFRP, isto parece indicar que os varões de GFRP estarão sujeitos a um nível de tensão baixo.

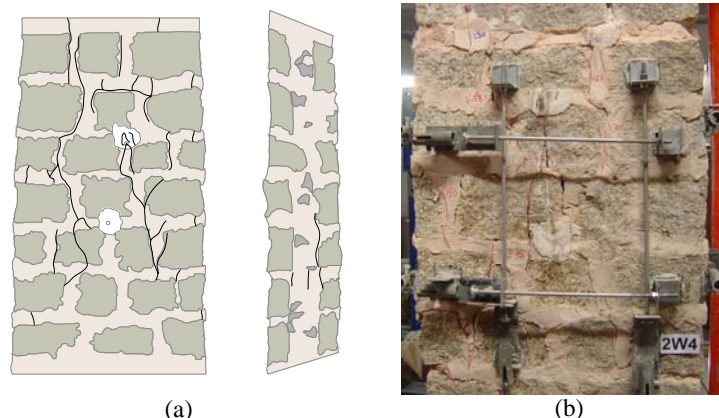


Figura 9: Mecanismo de rotura da parede 2W4 (reforçada): (a) padrão de fendilhação próximo da rotura, (b) padrão de fendilhação vertical.

5. CONCLUSÕES GERAIS

Este artigo apresenta os primeiros resultados de um programa experimental sobre o comportamento de paredes de alvenaria de três panos. A caracterização mecânica dos materiais componentes das paredes foi realizada para que houvesse uma melhor compreensão do comportamento global das paredes. Dada a grande diferença entre o pano externo e interno em termos de capacidade de carga, demonstra-se que a maior parte da carga é transmitida pelos panos externos.

A aplicação dos varões de GFRP transversalmente às paredes demonstrou ser uma técnica de reforço bastante eficiente, pois permitiu um aumento médio do valor da resistência à compressão de 71% em relação às paredes não reforçadas. O mecanismo de rotura típico associado às paredes não reforçadas, caracterizado pela rotação para fora do plano dos panos externos devido à formação de rótulas planas (mecanismo global), foi alterado pela introdução do reforço, caracterizando-se, depois, pela formação de um padrão de fendilhação predominantemente vertical e pela ocorrência de roturas localizadas (mecanismo local).

Por fim, os resultados apresentados neste artigo demonstram que a influência da mão-de-obra e da variabilidade de materiais naturais e executados manualmente deverá ser igualmente considerada quando se trabalha com construções antigas.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores deste estudo agradecem às empresas Fradical, Mapei e Augusto de Oliveira Ferreira & Ca Lda pelo apoio prestado através do fornecimento de materiais e mão-de-obra. Agradecem, igualmente, à FCT pelo apoio financeiro concedido através do Projecto POCI/ECM/58987/2004.

7. REFERÊNCIAS

- [1] Binda, L., Baronio, G., Penazzi, D., Palma, M., Tiraboschi, C. - Characterization of stone masonry walls in seismic areas: data-base on the masonry sections and materials investigations. *L'ingegneria Sismica in Italia, 9th National Conference*, Turin, Italy, 1999, 14 pp., em CD-ROM (apenas disponivel em Italiano).
- [2] Valluzzi, M.R., da Porto, F., Modena, C. - Behaviour and modeling of strengthened three-leaf stone masonry walls. *Materials and Structures*, Vol. 37, 2004, pp. 184-192.
- [3] Modena C. - Criteria for cautious repair of historic building. A valuation and strengthening of existing masonry structures. *Binda L. and Modena C., Ed. RILEM*, 1997.
- [4] Valluzzi M.R. - Mechanical behaviour of historic masonry walls consolidated with lime-based materials and techniques. *Ph.D. Thesis*, University of Trieste, Trieste, Italy, 2000, 276 pp. (apenas disponivel em Italiano).
- [5] Toumbakari, E.E. - Lime-pozzolan-cement grouts and their structural effects on composite masonry walls. *Ph.D. Thesis*, Katholieke Universiteit Leuven, Heverlee, Belgium, 2002, 364 pp.
- [6] Rodrigues, P.; Henriques, F. - Current mortars in conservation: an overview. *6th International Conference on Materials Science and Restoration*, Karlsruhe, Germany, 2003.
- [7] Bartos, P., Groot, C., Hughes, J.J. - Historic Mortars: Characteristics and Tests. *Int. RILEM Workshop*, Paisley, Scotland.RILEM, 1999, pp. 95-104.
- [8] Valluzzi M.R., Binda L., Modena C. - Mechanical behaviour of historic masonry structures strengthened by bed joints structural repointing. *Construction and Building Materials*, Vol. 19, 2005, pp. 63-73.
- [9] Vintzileou, E., Tassios, T.P. - Three-Leaf Stone Masonry Strengthened by Injecting Cement Grouts, *Journal of Structural Engineering*, May, 1995, pp.848-856.
- [10] Binda L., Modena C., Baronio G., Gelmi A. - Experimental qualification of injection admixtures used for repair and strengthening of stone masonry walls. *10th International Brick/Block Masonry Conference*, Calgary, Canada, Vol. 2, 1994, pp. 539-548.
- [11] Vasconcelos, G. - Experimental investigations on the mechanics of stone masonry: Characterization of granites and behavior of ancient masonry shear walls. *PhD Dissertation*, Universidade do Minho Guimarães, 2005 (disponível a partir de www.civil.uminho.pt/masonry).
- [12] Klrca, Ö. - Ancient binding materials, mortars and concrete technology: history and durability aspects", *Structural Analysis of Historical Constructions. 4th International Seminar on Structural Analysis of Historical Constructions*, Padova, Italy, 2004, pp. 87-94.
- [13] Oliveira, D.V., Silva, R., Garbin., E. - Comportamento de paredes antigas de alvenaria de panos, *Relatório 06-DEC/E-14*, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2006.
- [14] Oliveira, D.V., Lourenço, P.B., Roca, P. - Cyclic behaviour of stone and brick masonry under uniaxial compressive loading, *Materials and Structures*, 39(2), 2006, pp. 219-227.