

DESENVOLVIMENTO DE REFORÇO SÍSMICO USANDO FRP: APLICAÇÃO A UM PILAR PRÉ-FABRICADO DE BETÃO

D. V. Oliveira¹, B. Costa², C. Loureiro², N. Coelho², N. Moreira³

¹Prof. Auxiliar, ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães

²Eng. Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães

³Eng. Civil, Director Técnico, LUSOMAPEI, Lisboa



RESUMO

Este artigo apresenta a concepção, desenvolvimento e ensaio em plataforma sísmica de uma solução de reforço sísmico de um pilar de betão composto por blocos pré-fabricados. A solução aqui descrita foi desenvolvida no âmbito de um concurso nacional estendido a todos os alunos dos cursos de Engenharia Civil de uma Universidade, Instituto ou Politécnico portugueses, tendo conquistado o primeiro e segundo lugares do concurso. Os resultados experimentais permitiram evidenciar as vantagens da solução adoptada, bem como as limitações da mesma, resultantes fundamentalmente das restrições impostas pelo regulamento do concurso.

1 - INTRODUÇÃO

De há uns anos a esta parte, os congressos nacionais de Engenharia de Estruturas, a par da divulgação dos avanços mais recentes registados no conhecimento científico, promovem uma competição relacionada com o comportamento experimental de uma dada estrutura. A esta competição podem concorrer alunos dos cursos de Engenharia Civil de uma Universidade, Instituto ou Politécnico portugueses.

O mais recente destes congressos foram as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas de 2006, organizadas pelo Grupo Português de Betão Estrutural e pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), com a colaboração de Associação Portuguesa de Engenharia de Estruturas,

Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista e Sociedade Portuguesa de Engenharia Sísmica, e com o apoio da Ordem dos Engenheiros.

No âmbito destas Jornadas, foi proposto aos estudantes de cursos de Engenharia Civil nacionais o desafio de conceber e construir um pilar constituído por blocos pré-fabricados e resistente a sismos de intensidade crescente (PSI 2). O pilar a desenvolver teria de obedecer a diversas condicionantes, nomeadamente limitações geométricas, materiais a utilizar, número de elementos pré-fabricados e peso global da solução desenvolvida. Cada equipa, composta por até três estudantes, podia participar com um máximo de dois pilares. O regulamento integral do concurso PSI 2 pode ser consultado na página de internet das Jornadas. Nesta competição

participaram 14 equipas com um total de 23 pilares. Todos os pilares submetidos pelos alunos e considerados válidos foram ensaiados publicamente na mesa sísmica triaxial do LNEC, durante as Jornadas.

2- CONCEPÇÃO DA SOLUÇÃO ESTRUTURAL

2.1 - Problema em análise

O pilar a conceber e executar deveria ser constituído por quatro blocos pré-fabricados sobrepostos, com dimensões exteriores de $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}^3$, de forma a realizar uma peça com 1600 mm de comprimento, como se ilustra na figura 1. O pilar deveria ter uma massa compreendida entre 30 e 34 kg, sendo o aligeiramento permitido apenas por meio de vazamentos interiores e/ou utilização de betões leves. As acelerações máximas suportadas por cada pilar seriam multiplicadas por um factor correctivo, inversamente proporcional ao seu peso (1.25 para 30 kg, 1.00 para 32 kg e 0.50 para 34 kg), pelo que se tornava extremamente importante minimizar o peso da solução desenvolvida.

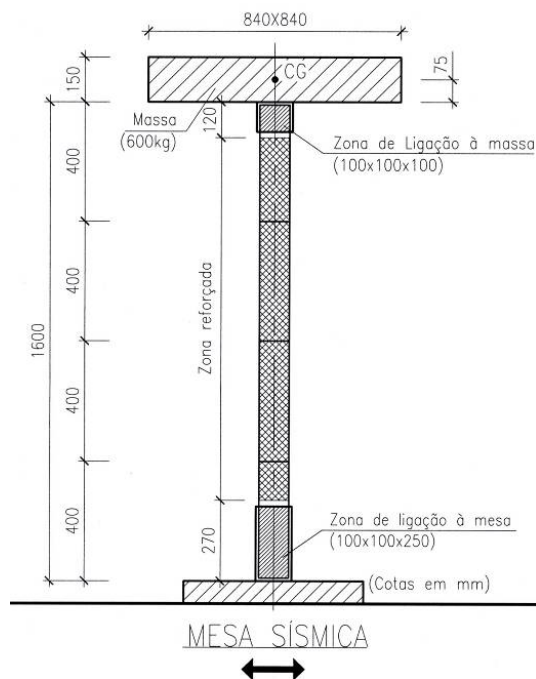


Fig 1 - Representação esquemática das condicionantes geométricas do pilar do concurso PSI 2.

Os quatro blocos deveriam ser interligados pelo exterior, de forma livre, a conceber pelos concorrentes. As zonas de ligação do pilar ao exterior seriam encaixadas em peças metálicas para fixação à mesa sísmica e para colocação da massa de topo, ver figura 1. O reforço exterior, a existir, deveria necessariamente terminar a 120 mm do topo e a 270 mm da base, para não interferir com o sistema de fixação. Permitia-se que apenas os blocos de extremidade fossem armados, com armadura convencional (interior), para controlar a sua fragilidade nas zonas de inserção nos dispositivos de fixação.

O ligante principal dos blocos pré-fabricados deveria ser constituído por um material cimentício hidráulico. Por outro lado, eram permitidos adjuvantes químicos e minerais, incluindo pó de sílica, pozolana, escórias e cinzas volantes. Contudo, não eram permitidas resinas epoxídicas e outros polímeros, colas e ligantes similares. Podia ser utilizado qualquer género de agregados, excepto metal, que passasse pelo peneiro de 3/8". Não era permitida a introdução de qualquer outro material na constituição do betão.

A não observação de qualquer uma das condicionantes impostas pelo regulamento implicaria a exclusão do pilar da competição.

2.2 - Concepção

Perante as condicionantes do problema acima exposto, tornou-se clara a definição das linhas gerais orientadoras de uma solução estruturalmente eficaz.

A restrição do peso do conjunto bem como as dimensões dos elementos pré-fabricados a usar apontavam para uma solução baseada na utilização de betão leve, eventualmente complementada com um aligeiramento interno. Contudo, este aligeiramento não deveria afectar, de forma séria, a resistência da secção transversal.

A obrigatoriedade da interligação dos blocos pelo exterior tornava extremamente atraente a utilização de um reforço baseado

em materiais compósitos, vulgo FRP. Para além da facilidade e rapidez de execução, o reduzido peso específico do FRP provocaria um aumento marginal da massa do pilar, com claros benefícios em termos de peso da solução final. O reforço pelo exterior com base em materiais compósitos deveria ser capaz de conferir ao pilar sujeito à acção dos sismos capacidade resistente em termos de flexão desviada e esforço transversal (reforço longitudinal e transversal).

Considerando que a aplicação de sismos de intensidade crescente iria solicitar o comportamento não linear do betão, a possibilidade de se melhorar o seu confinamento não deveria ser descurada.

2.3 - Desenvolvimento

Para a definição da composição do betão leve e de elevada resistência mecânica a usar, recorreu-se ao trabalho de investigação desenvolvido na Universidade do Minho sobre betões leves por Valente (2004), cujos componentes utilizados são: agregado leve (argila expandida), areia natural, cimento CEM I 52.5 R, água e superplastificante. Este betão é caracterizado por um peso específico aproximado de 18 kN/m^3 e por uma resistência média à compressão aos 28 dias de 56 MPa.

Considerando o peso específico do betão a utilizar bem como o peso do reforço a empregar, tornou-se clara a necessidade da execução de um aligeiramento, de forma a minimizar o peso do conjunto, logo a maximizar o valor do factor correctivo a aplicar ao pilar. Para o aligeiramento da secção utilizou-se um tubo de PVC com 32 mm de diâmetro no interior de cada um dos blocos pré-fabricados de betão, a funcionar como cofragem perdida. Para além da redução do peso do pilar, esta solução permitiu o aumento do confinamento interior do betão. Um aligeiramento superior era desaconselhado pois poderia conduzir a uma solução com peso inferior a 30 kg, que levaria à desclassificação do pilar, bem como a uma inconveniente redução da capacidade resistente da secção transversal.

Para a interligação dos blocos pré-fabricados e para proporcionar resistência à flexão e ao esforço transversal da secção transversal, foram utilizados laminados de fibras de carbono (CFRP). Contudo, o seu dimensionamento e disposição na secção dependeriam necessariamente da direcção da acção sísmica. De acordo com o regulamento do concurso, os pilares seriam submetidos na sua base a um movimento sísmico com duas componentes horizontais x e y , em que a componente na direcção x seria dupla da componente na direcção y . Cada componente horizontal seria caracterizada por um espectro de resposta (em aceleração) proporcional ao espectro regulamentar correspondente à acção sísmica tipo 1 do RSA (RSA, 1983) para a zona A, que é a zona de maior perigosidade sísmica de Portugal continental e onde se inclui Lisboa, e terreno tipo II, associado a solos coerentes duros e de consistência média. Esta definição da acção sísmica, em que as duas componentes diferem apenas na magnitude, permite, à partida, definir uma direcção preferencial de colocação do reforço, junto às arestas com maior extensão, como se ilustra na figura 2.

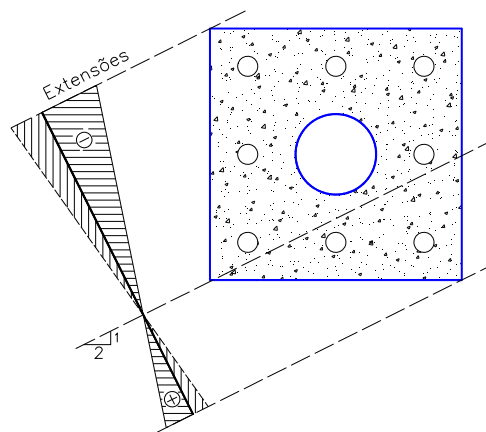


Fig 2 - Definição da direcção de actuação da resultante das duas componentes sísmicas (bloco inferior).

Porém, devido a incertezas relacionadas com uma possível colocação incorrecta do pilar na mesa sísmica e eventuais desfasamentos das componentes da acção sísmica, foi decidido adoptar um reforço longitudinal do pilar duplamente simétrico.

Assim, o reforço longitudinal foi materializado através da colagem de oito laminados Carboplate de 22 mm de largura e 1.4 mm de espessura, dois em cada face junto às arestas dos blocos. Este posicionamento potencia o aumento da capacidade resistente à flexão, independentemente da direcção da acção sísmica.

Para assegurar um eficaz grau de confinamento do pilar reforçado, este foi envolvido com mantas de carbono MapeWrap C ao longo de toda a altura permitida pelo regulamento. Para garantir o melhor comportamento das mantas, bolearam-se os laminados junto às arestas dos blocos e colocaram-se duas lâminas de carbono sobrepostas ao centro de cada face dos blocos, com o propósito de potenciar o efeito de confinamento.

3 - EXECUÇÃO DOS PILARES

Devido à limitação regulamentar relacionada com a colocação de reforço exterior nas extremidades do pilar, ver figura 1, os dois blocos pré-fabricados de extremidade foram armados interiormente com armadura convencional metálica, longitudinal e transversalmente, composta por varões de aço da classe A400 NR. Esta limitação regulamentar surge da necessidade de fixação do pilar à mesa sísmica e da fixação da massa de 600 kg no topo do pilar.

Sendo a secção da base do pilar a mais esforçada, devido ao tipo de acção e modelo estrutural tipo consola, as armaduras do bloco inferior foram dimensionadas para resistirem eficazmente à acção sísmica. Deste modo, para os blocos inferiores utilizou-se uma armadura longitudinal composta por 8Ø8 mm e uma armadura transversal formada por Ø3 mm espaçado a 70 mm, como se ilustra na figura 2 e na figura 3. Para os blocos superiores, a armadura longitudinal foi composta por 4Ø6 mm e a armadura transversal formada por Ø3 mm espaçado a 70 mm, ver figura 3.

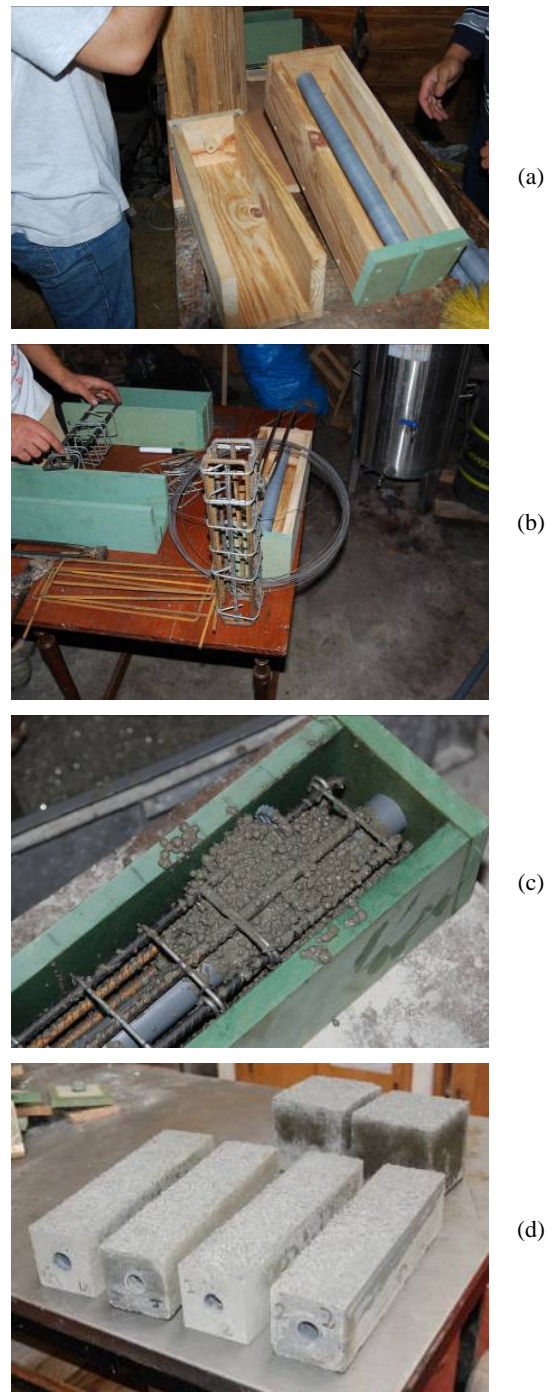


Fig 3 - Construção dos elementos pré-fabricados: (a) molde; (b) armaduras dos blocos extremos; (c) betonagem de um bloco extremo; (d) aspecto final dos blocos.

Contudo, a limitação regulamentar acima referida tem uma implicação importante. A interrupção do reforço exterior na zona inferior do pilar a uma distância de apenas 130 mm do elemento pré-fabricado seguinte poderá despoletar eventuais problemas relacionados com insuficiente comprimento de ancoragem. Este é um problema

complicado, pois o bloco pré-fabricado seguinte não pode ser armado e só pode ser ligado aos blocos adjacentes (inferior e superior) através do reforço exterior.

Com base na composição anteriormente descrita, foi executado um betão leve de elevada resistência tendo o mesmo sido utilizado na betonagem de todos os blocos constituintes dos dois pilares submetidos a concurso, ver figura 3. Foram ainda betonados dois provetes cúbicos de $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$, tendo-se obtido uma resistência à compressão de 67,8 MPa (aos 7 dias) e 69,7 MPa (aos 28 dias).

A aplicação do reforço está ilustrada na figura 4. Após a preparação da superfície dos blocos e do adesivo epoxídico (produto bicomponente), procedeu-se à colagem dos laminados de CFRP. Na figura 4 é possível



(a)



(b)



(c)

Fig 4 - Reforço dos pilares: (a) preparação do adesivo epoxídico; (b) aplicação dos laminados (extremidade superior); (c) aplicação dos laminados (extremidade inferior).

observar os dois laminados colocados ao nível de cada face, bem como o duplo laminado destinado a potenciar o efeito de confinamento proporcionado pela manta.

Na figura 5 apresentam-se os dois pilares, com a operação de aplicação da manta de confinamento já concluída.



Fig 5 – Vista geral dos dois pilares após a conclusão dos trabalhos de reforço.

Como se depreende da descrição da solução de reforço desenvolvida, esta não teve subjacente restrições associadas a aspectos de natureza económica, mas visou apenas a concepção de uma solução eficiente, no sentido de assegurar o melhor desempenho possível do pilar quando sujeito a acções sísmicas crescentes.

4 - ENSAIO EM MESA SÍSMICA

A plataforma sísmica triaxial do LNEC, com as dimensões úteis de $4,60 \times 5,60 \text{ m}^2$, permite aplicar movimentos de translação segundo os três graus de liberdade clássicos (longitudinal, transversal e vertical) e onde podem ser ensaiados espécimes com a massa máxima de 40 ton. Informação mais detalhada sobre esta plataforma sísmica

poderá ser encontrada na página de internet do LNEC.

A acção sísmica consistiu no movimento da plataforma, numa sucessão de ensaios de intensidade crescente, em termos de aceleração, até à rotura dos pilares.

4.1 - Acção sísmica

A figura 6 representa os espectros trilogarítmicos dos acelerogramas artificiais utilizados no ensaio dos pilares. Para uma melhor compreensão, apresentam-se na tabela 1 os valores da aceleração de pico (PGA ou “*peak ground acceleration*”) por direcção, referentes a cada uma das séries. Esta informação relativa à acção sísmica foi disponibilizada pelo LNEC.

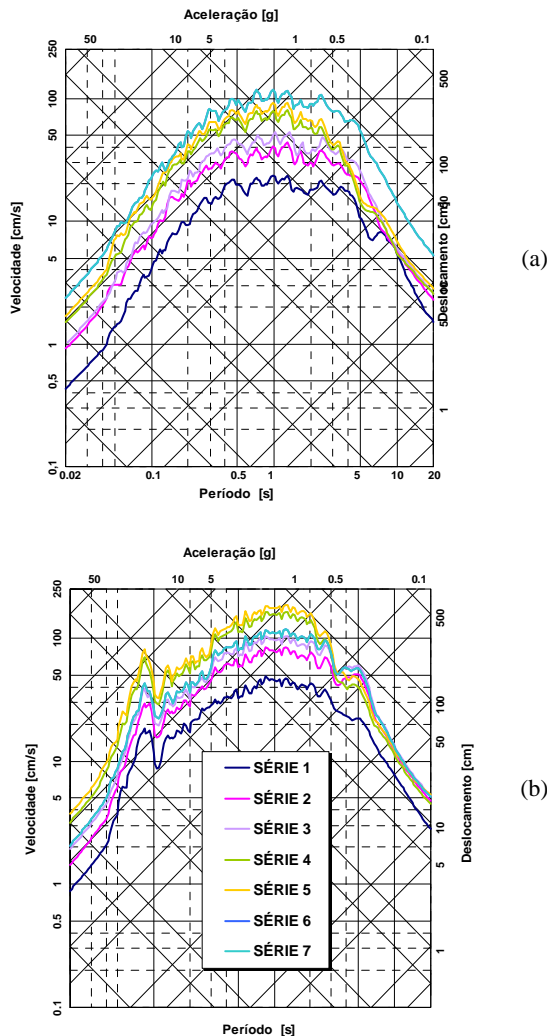


Fig 6 – Espectro trilogarítmico dos acelerogramas usados: (a) componente longitudinal; (b) componente transversal.

Um parâmetro muito importante para a avaliação dos efeitos da acção sísmica sobre as estruturas é a frequência própria de vibração. Para os pilares descritos neste trabalho (conjunto pilar e massa de topo), assimiláveis a um sistema de um grau de liberdade, foi estimada uma frequência de cerca de 3 Hz. A este valor da frequência corresponde uma localização no espectro trilogarítmico muito próxima da zona das acelerações constantes (ver figura 6), onde o efeito de amplificação do PGA é máximo. Contudo, a alteração do valor da frequência (dependente da massa e da rigidez), de forma a evitar a zona de acelerações constantes, é praticamente impossível. A massa do pilar é pouco significativa face à massa colocada no topo (aproximadamente 5%) e a rigidez do pilar é dificilmente alterável devido às condicionantes regulamentares.

Tabela 1 – Acelerações de pico, por direcção, relativas a cada uma das séries de ensaios.

Série	PGA x [g]	PGA y [g]
1	0,27	0,15
2	0,47	0,26
3	0,54	0,30
4	0,59	0,33
5	0,66	0,37
6	0,76	0,42
7	0,85	0,47

Relativamente ao valor característico da aceleração de pico regulamentar a considerar para a zona de Lisboa devido a um sismo tipo 1 (sismo a pequena distância focal e de magnitude não superior a 5.5) a ocorrer num solo rijo, o Anexo Nacional ao Eurocódigo 8 (CEN, 2004), em fase de conclusão, preconiza o valor de 0.23g. Isto significa que a série 7 considera um sismo (componente x) com uma aceleração de pico 3.7 vezes superior ao sismo regulamentar do Eurocódigo 8, para a situação acima descrita.

pela compreensível inexperiência dos alunos da equipa à data. De facto, o pilar P2 foi o primeiro a ser reforçado, o que permitiu melhorar a qualidade técnica da aplicação do reforço do pilar P1.

Os dois pilares apresentaram modos de colapso semelhantes, caracterizados pela perda de aderência entre o laminado de CFRP e o betão, ver figura 9 e figura 10. Este fenómeno deve-se ao comprimento de ancoragem do laminado (130 mm) no bloco inferior, insuficiente face à magnitude dos esforços actuantes. Tal significa que a ancoragem dos laminados no bloco inferior, limitada por aspectos regulamentares, constituiu o “ponto mais fraco” da cadeia de resistência dos pilares construídos.

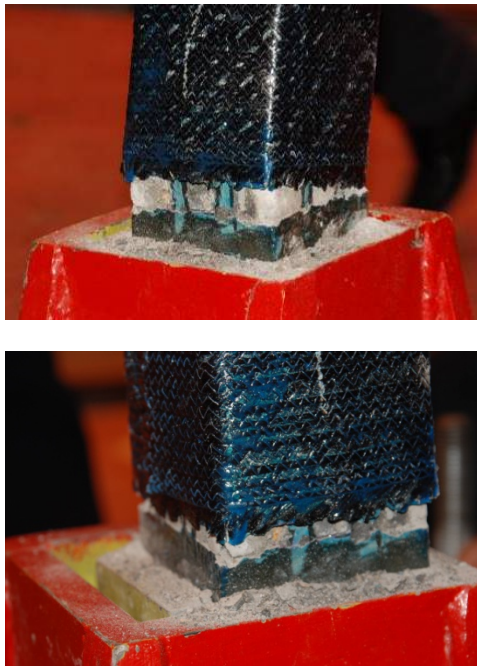


Fig 9 – Colapso do pilar P1 (bloco inferior).

Um outro aspecto importante, evidenciado pela figura 10b, é o deslocamento da armadura da sua posição original durante a betonagem do bloco inferior do pilar P2, o que poderá ter contribuído para uma menor capacidade resistente, relativamente ao pilar P1. Este facto realça o lado pedagógico que este tipo de ensaios possui, no sentido em que dão a conhecer os pontos fracos das estruturas.

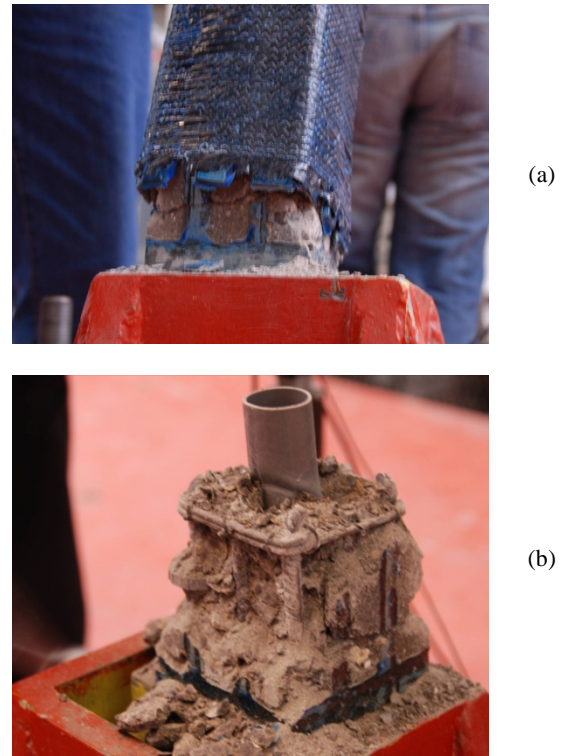


Fig 10 – Colapso do pilar P2 (bloco inferior).

Relativamente aos resultados experimentais observados, pensa-se que a melhoria das condições de ancoragem dos laminados, necessariamente através de dispositivos externos à secção de betão, poderia conduzir a uma maior redução da vulnerabilidade sísmica dos pilares.

O virtuosismo que estes tipos de ensaios experimentais têm em conseguir evidenciar os pontos fracos das estruturas, neste caso de diferentes tipos de reforço de um pilar pré-fabricado, deveria ter sido aproveitado para dar a conhecer as diferentes respostas em função das soluções de reforço utilizadas. Esta é uma ideia aqui deixada para futuros eventos deste género.

5- CONCLUSÕES GERAIS

Este artigo descreve a concepção, desenvolvimento e ensaio de uma solução de reforço sísmico de um pilar de betão composto por blocos pré-fabricados como resposta a um desafio lançado pela organização das Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas de 2006.

A solução desenvolvida recorreu à utilização de um reforço exterior baseado em materiais compósitos e fez uso dos conceitos mais relevantes de engenharia sísmica. O desempenho desta solução foi muito eficiente, permitindo obter os dois melhores resultados da competição. O modo de rotura observado em ambos os pilares deveu-se ao insuficiente comprimento de ancoragem, originado pelas condicionantes impostas pelo regulamento do concurso.

O carácter pedagógico destes ensaios, aliado à capacidade de evidenciar os pontos fracos dos pilares reforçados, devido quer a erros de concepção quer a erros de construção, deveria motivar os organizadores de futuros eventos a dar a conhecer as diferentes respostas estruturais obtidas experimentalmente.

A participação de estudantes de cursos de Engenharia Civil em concursos com desafios de base experimental, como o descrito no artigo, é extremamente importante para o desenvolvimento do seu espírito crítico e inovador.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Prof. Isabel Valente do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho a colaboração prestada na definição da composição do betão leve a utilizar. Agradece-se também ao Laboratório de Estruturas de Engenharia Civil da Universidade do Minho, onde foi realizado todo o trabalho de preparação dos pilares. Os autores agradecem igualmente à MAPEI a cedência dos materiais compósitos utilizados no reforço dos pilares (laminados, mantas e adesivos epoxídicos).

REFERÊNCIAS

CEN, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, EN 1998-1, Brussels, 2004.

RSA, Regulamento de Segurança e Acções em Estruturas de Edifícios e Pontes, Decreto-Lei nº 235/83, INCM, Lisboa, 1983.

Valente, I., Cruz, P.J.S., Caracterização experimental de um betão leve de elevada resistência, Encontro Nacional Betão Estrutural, Porto, 2004.

<http://jpee2006.lnec.pt>

<http://www.lnec.pt>

<http://www.mapei.pt>