

HOSPITAL DA LUZ

Um Edifício com Isolamento Sísmico de Base

José Prazeres Ferreira
Engenheiro Civil – Director de STA, Segadães Tavares & Associados, Lda

2006-06-06

1 - INTRODUÇÃO

A ESPÍRITO SANTO UNIDADES DE SAÚDE E APOIO À 3ª IDADE, SA está a construir em Lisboa, mais concretamente no terreno localizado em Benfica, entre a Av. Lusíada, a Av. Marechal Teixeira Rebelo e a Radial da Pontinha, um Complexo Integrado de Saúde, composto por 2 edifícios independentes que se destinam um a equipamento de saúde (hospital e residências medicalizadas) e outro a residências para a 3ª idade (apartamentos).

A presença de 2 galerias do metropolitano que atravessam o terreno e também a eventual construção dum túnel rodoviário, no canto mais a poente, condicionaram a implantação e a geometria dos edifícios, tendo contribuído para a implementação duma solução que garante o isolamento da estrutura quer às acções sísmicas, quer às vibrações induzidas pela passagem das composições do metropolitano (isolamento de base).

2 – AS GALERIAS DO METROPOLITANO. CONDICIONANTES

A passagem das composições do metropolitano entre as estações do Colégio Militar e Carnide induz vibrações no terreno, tendo a empresa ACÚSTICA E AMBIENTE, Lda preconizado que as construções enterradas se afastassem das galerias e que se estabelecessem na estrutura “cortes elásticos” adequados para atenuar a transmissão de estímulos, através da estrutura, para locais mais afastados das galerias.

As dimensões e a configuração do terreno, associadas às limitações impostas pelo Plano Director Municipal e ao programa do Dono da Obra para o Complexo Integrado de Saúde, não permitiram que a construção fosse implantada fora da zona das galerias do metropolitano, o que originou nova intervenção da empresa ACÚSTICA E AMBIENTE, no sentido de proceder a uma caracterização mais rigorosa das vibrações, tendo sido realizadas medições em pontos próximos da galeria (localizados sobre a própria galeria no fundo de poços abertos para o efeito), cujo relatório refere que a “situação detectada evidencia a necessidade de instalação nas fundações do edifício de sistemas de atenuação das vibrações”.

3 - ISOLAMENTO DE BASE

A cidade de Lisboa localiza-se numa zona de elevada sismicidade, conduzindo a que a acção sísmica tenha uma importância relevante no dimensionamento das estruturas, situação que se agrava substancialmente (cerca de 43%) no caso dum hospital, já que a regulamentação portuguesa impõe uma redução de 30% nos coeficientes de comportamento relativos a esforços, para os edifícios e pontes cuja operacionalidade tenha de ser assegurada após a ocorrência dum sismo intenso (artigo 33º do REBAP).

Nestas condições e atendendo à necessidade de isolar a estrutura das vibrações do metropolitano, propusemos ao Dono da Obra a implementação dum isolamento de base que protegesse a estrutura da acção dos sismos e das vibrações do

HOSPITAL DA LUZ

Um Edifício com Isolamento Sísmico de Base

metropolitano. A solução preconizada propõe apenas que se intercalem, nos elementos verticais da estrutura, blocos de borracha de alto amortecimento (aparelhos de apoio do tipo HDRB – “High Damping Rubber Bearing”).

Estes blocos de borracha (aparelhos de apoio), intercalados entre a estrutura e a fundação, são elementos com baixa rigidez horizontal e elevado amortecimento, que separam a estrutura dos movimentos do solo, isolando-a das acções sísmicas (ver fig. 1).

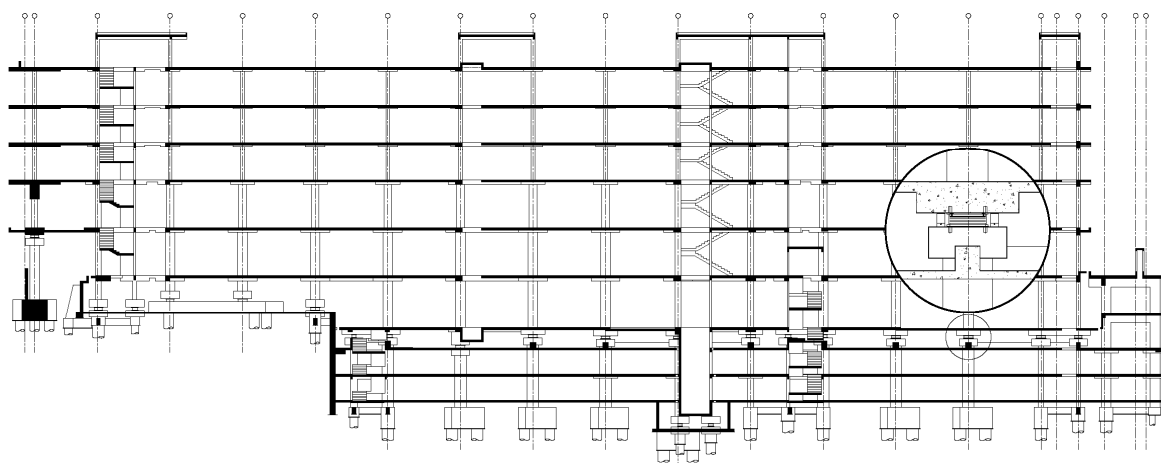


FIGURA 1

Logo que o Dono da Obra aceitou a implementação da solução de isolamento de base, houve que alertar toda a restante equipa projectista relativamente às consequências da sua utilização (ligações ao edifício das infraestruturas de águas, esgotos, gás e energia eléctrica, telecomunicações; juntas de transição entre os pavimentos ligados ao edifício e os pavimentos na sua envolvente exterior), uma vez que em caso de sismo irão ocorrer deslocamentos relativos, entre o edifício e a sua envolvente exterior, bastante significativos (aparelhos de apoio).

4 - IMPLANTAÇÃO DA OBRA

O edifício de apartamentos localiza-se sobre as galerias do metropolitano e sobre o futuro túnel rodoviário, pelo que apenas se desenvolve acima do coroamento das respectivas galerias (ver figs. 2 e 3).

Houve necessidade de enterrar o edifício do hospital em toda a zona a nordeste das galerias do metropolitano, de modo a criar 3 pisos enterrados (2 de estacionamento e 1 de serviços). Na zona sobre as galerias do metropolitano, apenas existe o piso de serviços na parte mais a poente (ver figs. 2 e 3).

Em toda a área com 3 pisos enterrados, a escavação geral tem de atingir a cota 66 m gerando desníveis que chegam a atingir os 17 metros.

HOSPITAL DA LUZ

Um Edifício com Isolamento Sísmico de Base

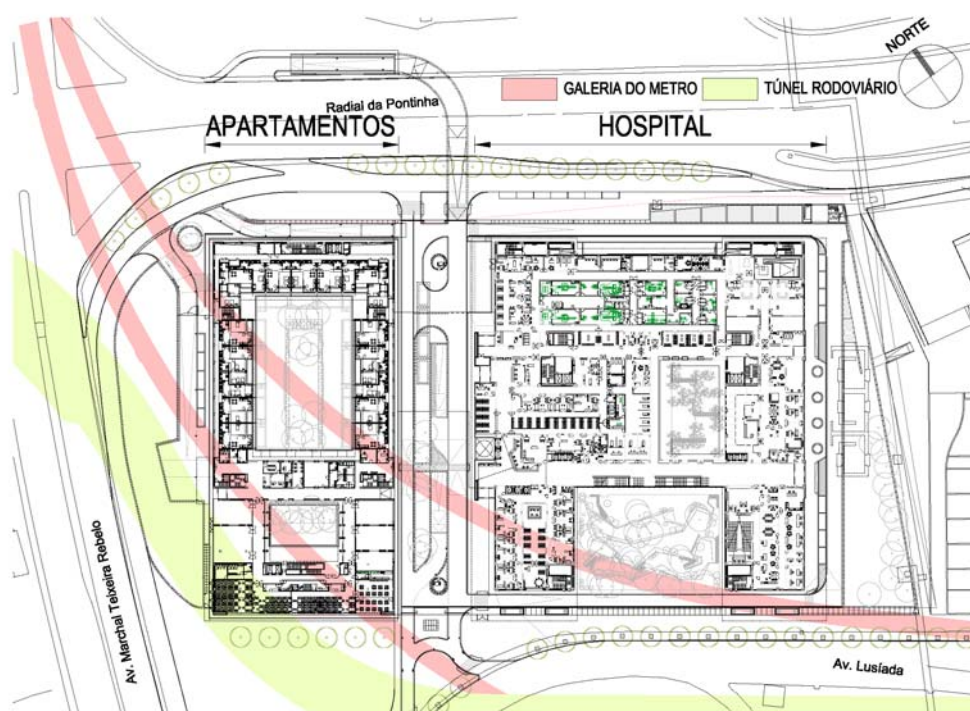


FIGURA 2

5 - CONCEPÇÃO E DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA

5.1 – Descrição Geral da Estrutura

Tratando-se de estruturas com isolamento sísmico de base, o que equivale a dizer que as acções sísmicas deixam de ser preponderantes, optou-se por uma estrutura ligeira em betão armado, constituída por lajes fungiformes apoiando em pilares dispostos numa malha de $7.5 \times 7.5 \text{ m}^2$. As lajes fungiformes são maciças com uma espessura de 0.25 m, apresentando nos pisos de serviços capitéis com 0.40 m de espessura.

O edifício do hospital tem uma área de implantação de cerca de $110 \times 110 \text{ m}^2$, com 9 pisos, 6 dos quais acima dos apoios de isolamento, sendo 4 enterrados:

- Área de Pavimentos – 66.000 m²
- Isolamento de Base – 195 apoios do tipo HDRB

O edifício das residências (apartamentos), com uma área de implantação de cerca de $55 \times 110 \text{ m}^2$, tem um embasamento com 4 pisos, 1 dos quais enterrado. Nas extremidades deste embasamento desenvolvem-se 2 blocos com 3 pisos adicionais.

- Área de Pavimentos – 20.500 m²
- Isolamento de Base – 120 apoios do tipo HDRB

As fundações são indirectas por estacas e a contenção periférica foi realizada no hospital por paredes moldadas ancoradas em fase provisória, enquanto que nos apartamentos se adoptou uma solução de muros em consola.

HOSPITAL DA LUZ

Um Edifício com Isolamento Sísmico de Base

5.2 – Localização dos Aparelhos de Apoio e Consequências Construtivas

A localização mais óbvia para os aparelhos de apoio (blocos de borracha) consiste em colocá-los imediatamente acima dos órgãos de fundação, solução que foi adoptada no edifício de apartamentos, que apresenta apenas 1 piso enterrado (piso -1). Adoptou-se um piso técnico para acesso aos aparelhos de apoio, que foram localizados directamente sobre os órgãos de fundação. Os pilares assentam nos blocos de apoio através de plintos e os muros de contenção funcionam em consola, uma vez que não podem ligar-se às lajes do piso -1 e do piso 0, já que estas estão “isoladas” (ver figs. 3 e 6).

No edifício do hospital, atendendo à profundidade da escavação (variável entre 12 m e 17 m), houve necessidade de implantar os blocos de borracha bastante acima das fundações, de forma a assegurar o travamento horizontal das paredes de contenção, embora garantindo isolamento em todos os pisos hospitalares (o piso -1, totalmente enterrado, é já um piso de serviços hospitalares). Assim, os blocos de borracha foram instalados imediatamente abaixo do piso -1 (que já está desligado da contenção), tendo sido criado um piso técnico, entre os estacionamento (pisos -3 e -2) e o piso -1, para acesso aos aparelhos de apoio (ver figs. 1, 3 e 6).

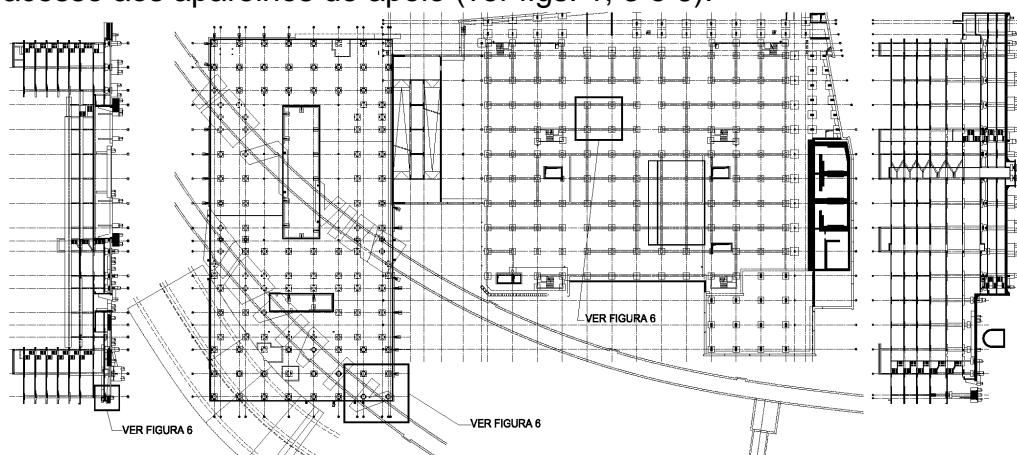


FIGURA 3

Enquanto que nos apartamentos apenas foi necessário desligar da contenção as lajes do piso -1 e do piso 0 (ver pormenor 2, fig. 6), intercalando juntas ao nível do piso 0 para assegurar a transição com a envolvente exterior, no edifício do hospital, para além destes procedimentos ao nível dos pisos -1 e 0, houve ainda que garantir:

- o funcionamento dos elevadores até ao piso -3, o que implicou que ao nível dos estacionamento as respectivas caixas, apoiadas em blocos de borracha aplicados na base sobre as fundações, funcionassem como ilhas separadas por juntas horizontais dos pavimentos ao nível dos pisos -3, -2 e técnico (ver pormenor 1, fig. 6);
- deslocamento relativo no patim intermédio das escadas entre os pisos -1 e técnico;

HOSPITAL DA LUZ

Um Edifício com Isolamento Sísmico de Base

- deslocamento relativo ao nível da laje do piso –1 e em toda a compartimentação existente ao nível do piso técnico.

Adicionalmente, uma vez que no hospital a separação das zonas com e sem isolamento de base se situa no interior dos pisos 0 e –1, houve que garantir uma pormenorização adequada em todas as paredes e vãos atravessados pela junta.

5.3 – Modelo Estrutural

Para o estudo do comportamento da estrutura e para a determinação dos esforços e deslocamentos representativos nos respectivos elementos estruturais procedeu-se à análise detalhada de ambos os edifícios através de modelos de pórtico espacial com piso rígido no seu plano (3 graus de liberdade), recorrendo a um programa de cálculo desenvolvido pela STA.

A estrutura dos pisos foi simulada através dum modelo de grelha representando a discretização da laje e incorporando as vigas sempre que existentes.

Os elementos verticais foram discretizados através de peças lineares com 6 graus de liberdade por nó, 3 dos quais compatibilizados pelos pisos rígidos, sempre que integram as grelhas de piso, tendo sido considerada a interacção com o terreno de fundação.

Os aparelhos de apoio, consoante a respectiva localização, foram introduzidos na base dos pilares ou intercalados no troço dos pilares entre o piso técnico e o piso –1, através de molas simulando convenientemente a respectiva rigidez horizontal e vertical.

5.4 – Dimensionamento e Características do Sistema de Isolamento

Como já referido, a estrutura incorpora isolamento de base, tendo-se intercalado nos pilares apoios de elevado amortecimento, constituídos por blocos cilíndricos de borracha cintada com chapas de aço, sendo que as chapas de topo (superior e inferior) apresentam maior espessura e dispositivos para fixação ao betão (chumbadouros).

A STA contou com a acessoria do Prof. Luís Guerreiro, do Instituto Superior Técnico – ICIST, na caracterização detalhada do sistema de isolamento de base, que terá de garantir uma atenuação não inferior a 20 dB para frequências de vibração vertical superior a 37.5 Hz, bem como o isolamento das acções sísmicas, tendo sido elaborada uma estimativa das características dos blocos de apoio.

As características dos apoios foram comprovadas por ensaios sobre protótipos, em que foi determinada a rigidez horizontal, a rigidez vertical, o amortecimento e a respectiva variação por efeito do envelhecimento e da variação de temperatura (ver fig. 4).



HOSPITAL DA LUZ

Um Edifício com Isolamento Sísmico de Base

FIGURA 4

Comprovadas as características dos apoios, dimensionaram-se os aparelhos de apoio garantindo que:

- a carga axial máxima para a combinação de acções envolvendo a acção sísmica agravada de 20% (N_{\max}^{sismo}) não excede a máxima capacidade resistente do apoio em carga axial (N_{\max}^{res}), com o aparelho de apoio distorcido por um deslocamento horizontal igual a 1.5 vezes o valor do deslocamento máximo de cálculo;
- não se ultrapassa a frequência vertical de 9.3Hz, para a combinação quase permanente, garantindo-se assim o objectivo de atenuação pretendido.

5.5 – Regulamentação

Adoptou-se a regulamentação aplicável às estruturas, às fundações e à contenção, nomeadamente:

- Regulamento de Segurança e Acções em Estruturas de Edifícios e Pontes (RSAEEP);
- Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado (REBAP);
- Norma Portuguesa – Eurocódigo 3: Projecto de Estruturas de Aço;

tendo-se atendido ao disposto no CEB-FIP Model Code e nos Eurocódigos, nomeadamente em:

- Eurocódigo 1: Basis of design and actions on structures – Part 2 – 7: Actions on structures – Accidental actions due to impact and explosions;
- Eurocódigo 2 – Parte 1.1 – Projecto de Estruturas de Betão Armado – Regras Gerais e Regras para Edifícios;
- Eurocódigo 7 – Geotechnical Design – Parte 1 – General Rules;
- Eurocódigo 8 – Design of Structures for Earthquake Resistance (draft nº 4, 2001).

HOSPITAL DA LUZ

Um Edifício com Isolamento Sísmico de Base

Foi necessário recorrer ao Eurocódigo 8 (EC8), na versão de Janeiro de 2003, para enquadrar regulamentarmente o dimensionamento de estruturas em edifícios com isolamento de base.

Segundo o EC8, na análise de estruturas com isolamento de base pode utilizar-se o método da análise linear equivalente (análise modal), uma vez que os aparelhos de apoio, constituídos por blocos de borracha de alto amortecimento (HDRB), satisfazem todas as condições impostas para a utilização da análise modal.

O EC8 remete para os anexos nacionais a definição dos espectros de resposta da acção sísmica, tendo-se aplicado no caso presente o Regulamento de Segurança e Acções em Estruturas de Edifícios e Pontes (RSAEEP), considerando zona A e terreno tipo II. Como o sistema de isolamento assegura um amortecimento horizontal superior a 10% e já que as estruturas de betão armado apresentam um coeficiente de amortecimento de 5%, adoptou-se um espectro de resposta que tem em linha de conta estas situações. Assim, para frequências inferiores a 0.5 Hz (condicionadas pelos aparelhos de apoio) foi adoptado o espectro de resposta correspondente a um amortecimento de 10%, enquanto que para as frequências superiores a 0.5 Hz (condicionadas pela estrutura de betão armado) adoptou-se o espectro de resposta correspondente ao amortecimento de 5%.

O espectro de resposta, segundo o EC8, deverá ainda ter em conta o factor de importância do edifício para garantir um nível de segurança mais elevado, factor este que no caso de um hospital é de 1.4, enquanto que nas residências se considerou 1.2. Nestas circunstâncias, o espectro de resposta de cálculo é obtido através da multiplicação deste factor de importância pelo espectro de resposta de referência.

O Eurocódigo 8 prevê também a adopção de um coeficiente de comportamento, de valor igual a 1.5, para o cálculo dos esforços de dimensionamento da estrutura. Os esforços de combinação devidos à acção sísmica serão obtidos dividindo os esforços lineares, resultantes da análise linear equivalente, pelo referido coeficiente de comportamento.

5.6 – Resposta da Estrutura

Foram introduzidos 315 apoios do tipo HDRB (195 unidades no hospital e 120 unidades nos apartamentos), com as dimensões indicadas no quadro seguinte:

| Módulo de Distorção (G) | Diâmetro (ϕ) | Altura Total | Número de Apoios | |
|-------------------------|---------------------|--------------|------------------|--------------|
| | | | Hospital | Apartamentos |
| 0.8 MPa | 400 mm | 250 m | 8 un | 0 un |
| 1.4 MPa | 400 mm | 281 m | 4 un | 3 un |
| 1.4 MPa | 500 mm | 259 m | 7 un | 28 un |
| 1.4 MPa | 600 mm | 285 m | 10 un | 21 un |
| 1.4 MPa | 700 mm | 265 m | 15 un | 28 un |
| 1.4 MPa | 800 mm | 298 m | 81 un | 26 un |
| 1.4 MPa | 900 mm | 283 m | 70 un | 14 un |
| Total | | | 195 un | 120 un |

HOSPITAL DA LUZ

Um Edifício com Isolamento Sísmico de Base

O modelo global anteriormente descrito forneceu frequências de 0.39 Hz para os deslocamentos horizontais em ambos os edifícios e de 0.40 Hz para a torção, sendo que todas as restantes frequências são superiores a 1 Hz. Observam-se deslocamentos horizontais máximos da ordem dos 18 cm.

Como estávamos em presença de edifícios com isolamento de base rodeámo-nos de cuidados acrescidos, em termos de resposta ao vento, uma vez que a frequência fundamental é inferior a 0.5 Hz.

Analisada a deformabilidade do edifício para a acção do vento concluiu-se que a mesma se encontra dentro dos valores considerados imperceptíveis ao ser humano para vibrações induzidas pelo vento.

Também em termos de instabilidade global e uma vez que a estrutura é muito ligeira (a esbelteza média dos pilares aproxima-se de 50, embora inferior), decidimos avaliar as cargas críticas nos pilares pelo método de Horne, tendo-se concluído que as cargas críticas se situam, no mínimo, 35% acima dos esforços axiais máximos nos pilares.

5.7 – Pormenorização e Detalhes Construtivos

Para além da existência do isolamento de base é de salientar alguns detalhes construtivos decorrentes da presença das galerias do metropolitano e do túnel rodoviário.

O Metropolitano de Lisboa não permitiu a execução de barretas junto à galeria, o que obrigou a que a contenção na proximidade da galeria fosse assegurada por estacas $\phi = 800$ mm afastadas 1.20 m entre eixos, ancoradas em 3 níveis, através de perfis horizontais. Nesta contenção há ainda a salientar a dificuldade em implantar as ancoragens, devido à presença das estacas para fundação dos elementos verticais na envolvente da galeria.

No que se refere ao desvio das cargas verticais foi necessário recorrer a maciços de transição dos pilares para os elementos de fundação com forma pouco trivial, funcionando como lajes fungiformes (apoiadas nas estacas), que recebem cargas pontais significativas (pilares).

O túnel rodoviário obrigou à implementação duma laje que no futuro servirá de cobertura do túnel, mas que desde já suporta as cargas verticais transmitidas pelos pilares do edifício das residências. Esta laje apoia em 3 fiadas de estacas, sendo que as exteriores materializam as paredes laterais do túnel, enquanto que a 3ª fiada se localiza no separador central (ver fig. 5).

Relativamente aos blocos de apoio do isolamento de base, os mesmos foram aplicados:

- na base dos pilares, imediatamente acima das fundações;
- ou intercalados nos pilares.

HOSPITAL DA LUZ

Um Edifício com Isolamento Sísmico de Base

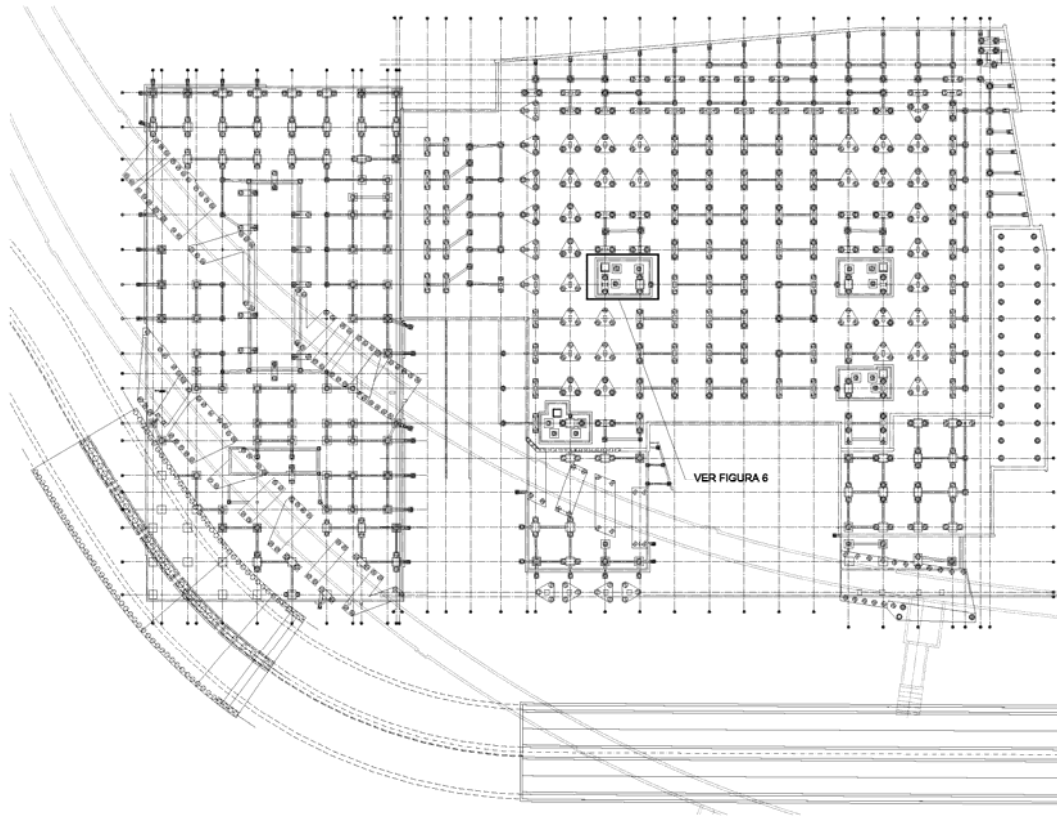


FIGURA 5

Na situação em que os blocos de apoio foram instalados na base dos pilares, a solução consistiu em fixar os apoios na face superior dos maciços de encabeçamento das estacas, arrancando os pilares sobre os apoios através dum plinto de transição (ver pormenor 3, fig. 6).

Nas situações em que o apoio foi intercalado no pilar previu-se um plinto de transição na base do apoio, tendo-se adoptado elementos de travamento, para absorver os esforços resultantes do desvio das cargas verticais em caso de sismo (distorção no apoio), como se evidencia no pormenor 2 da figura 6.

Dado que se exige uma grande precisão no nivelamento dos apoios, preconizámos que os mesmos deveriam ser selados com argamassa de vazamento sem retracção na face superior dos maciços de encabeçamento ou nos plintos inferiores. Fixado o apoio será então colocada a cofragem e a armadura do plinto de transição para o pilar, procedendo-se à respectiva betonagem.

HOSPITAL DA LUZ

Um Edifício com Isolamento Sísmico de Base

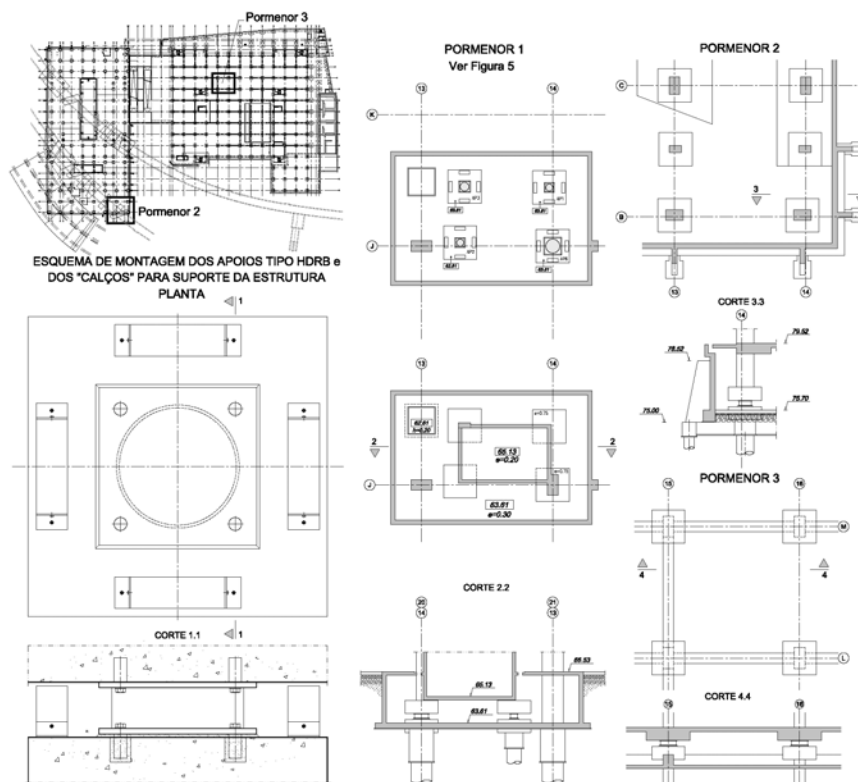


FIGURA 6

6 - A OBSERVAÇÃO FUTURA DA OBRA

Como já se referiu foram criadas condições para aceder aos blocos de apoio, tendo-se previsto pisos técnicos, quer no hospital, quer nos apartamentos.

Assim, no futuro será possível aceder aos apoios para proceder a inspeções que se prevêem com uma periodicidade mínima de 3 anos, embora fosse desejável realizar inspeções anuais. Em caso de ocorrência dum sismo, mesmo com intensidade moderada, deverá proceder-se obrigatoriamente a uma inspeção aos aparelhos de apoio.

Apesar de ser muito reduzida a probabilidade de ocorrer um problema com um apoio, que possa pôr em causa a respectiva capacidade de suporte, instalaram-se calços em betão que permitem suportar a estrutura caso venha a ocorrer um acidente que implique a destruição do apoio. Os referidos calços são blocos em betão convenientemente localizados cujo afastamento aos plintos após deformação dos apoios é inferior a 20 mm, pelo que a sua presença evitará a "queda da estrutura" na hipótese de "desaparecer" um apoio (ver fig. 7).

Também foi convenientemente caracterizada a eventual substituição dum qualquer apoio que implica a elevação da estrutura para a retirada do bloco de borracha, prevendo-se que seja necessário sobreelevar alguns dos pilares envolventes, de modo a evitar a imposição de deslocamentos relativos superiores a 5 mm entre os pilares da envolvente próxima.

HOSPITAL DA LUZ

Um Edifício com Isolamento Sísmico de Base



FIGURA 7

7 - A CONSTRUÇÃO

A empreitada de execução da escavação, da contenção periférica, das fundações, da estrutura e das alvenarias iniciou-se em Dezembro de 2003, tendo sido concluída em Abril de 2005 (16 meses de obra).



FIGURA 8

Com 8 meses de obra estava realizada grande parte da escavação e da contenção periférica, encontrando-se já executadas as fundações, bem como a 1ª e 2ª lajes elevadas numa faixa do edifício do hospital, podendo observar-se na figura 8 alguns aparelhos de apoio aplicados.

HOSPITAL DA LUZ

Um Edifício com Isolamento Sísmico de Base

Em Abril de 2005 a estrutura estava concluída (ver fig. 9), tendo sido realizados os seguintes trabalhos:

- Escavação

- . abaixo da plataforma ajustada aos arruamentos envolventes – mais de 220.000 m³

- Contenção

- . parede moldada – 7.700 m²
- . ancoragens – 10.000 ml

- Fundações

- . estacas – 11.000 ml
- . estacas + maciços
betão – 13.400 m³
aço – 1.030 ton

- Superestrutura

- . lajes – cofragem – 108.000 m²
(inclui os pisos técnicos)
- . toda a superestrutura
betão – 41.100 m³
aço – 6.000 ton



FIGURA 9