

PRÉMIO LECA DE CONSTRUÇÃO

1998

A “PALA” E O PAVILHÃO DE PORTUGAL NA EXPO'98

E A UTILIZAÇÃO DE BETÃO LEVE ESTRUTURAL

Por A. Segadães Tavares



**DONO DA OBRA:
PARQUE-EXPO'98, SA**

**AUTOR DO PROJECTO DE ESTRUTURAS:
ENGº A. SEGADÃES TAVARES**

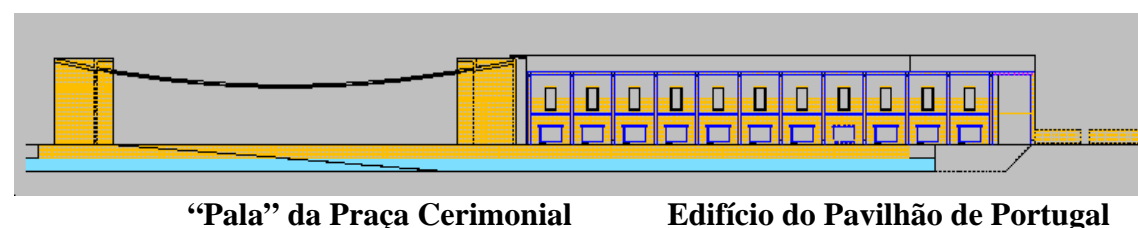
**CONSTRUTOR - CONSÓRCIO:
Construtora Abrantina,SA
OPCA, SA
Construtora Do Tâmega, SA
H. HAGEN, SA
OBRECOL, SA**

A “PALA” E O PAVILHÃO DE PORTUGAL NA EXPO'98 E A UTILIZAÇÃO DE BETÃO LEVE ESTRUTURAL

A. Segadães Tavares

1. INTRODUÇÃO

Vulgarmente conhecida como “A PALA”, a cobertura da Praça Cerimonial contígua ao edifício em que durante a EXPO'98 funcionou o PAVILHÃO DE PORTUGAL (ver Fig^a.s 1 e 2), é fundamentalmente uma membrana de pequena espessura em betão armado de agregados ligeiros, de directriz tronco-cónica suspensa, mediante cabos de aço de alta resistência ancorados em duas estruturas paralelas constituídas por contrafortes prismáticos em betão armado unidos por uma das faces por paredes e solidarizados no seu coroamento por lajes de repartição de esforços, também em betão armado. A estrutura da cobertura tem uma área de implantação aproximada de quatro mil duzentos e cinquenta metros quadrados, dos quais cerca de três mil novecentos e setenta e cinco metros quadrados (75m×53m) correspondem à área livre coberta.



“Pala” da Praça Cerimonial Edifício do Pavilhão de Portugal

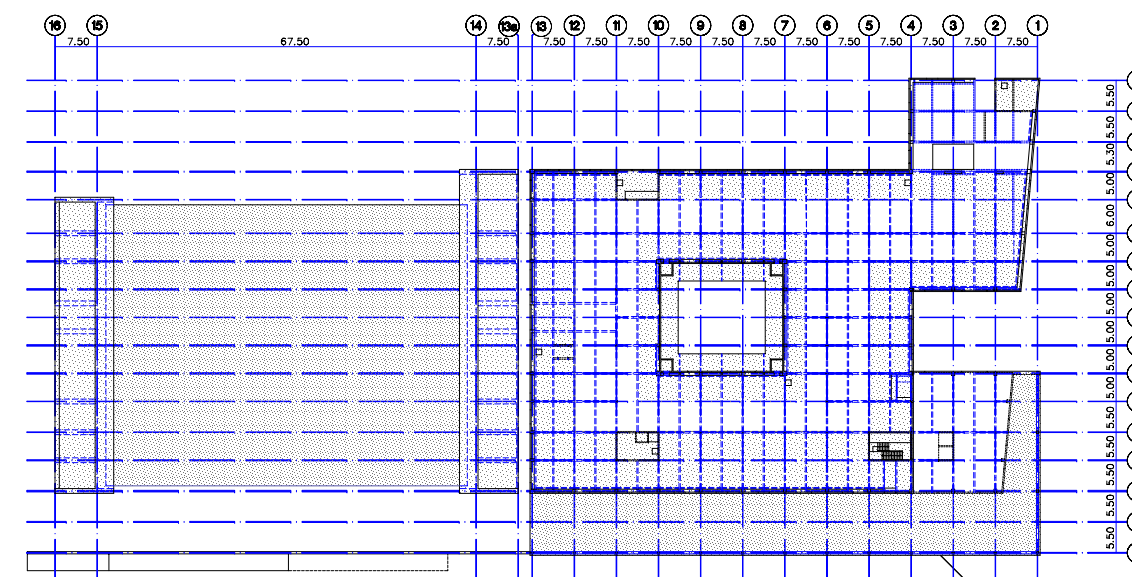
Fig^a 1 – Conjunto do Pavilhão de Portugal – Alçado Visto da Doca

O comportamento estrutural da “Pala” pode assemelhar-se ao de uma catenária tensa bidimensional, com uma flecha a meio-vão da ordem de um para vinte e cinco da distância entre pontos de sustentação, o que origina impulsos de magnitude apreciável nos pontos de amarração. A utilização de um betão leve estrutural não só se evidenciou adequada à função pretendida como conduziu a uma redução da ordem de vinte e dois por cento nos impulsos a resistir pela estrutura de suporte com a consequente economia, não só nesta estrutura e suas fundações, como ainda nos cabos de aço de alta resistência que a integram e suportam.



Fig^a 2 – A “Pala” e o Pavilhão – Vista Durante a Construção

O edifício, com dimensões aproximadas de 90 metros de comprimento por 60 metros de largura e com 4 pisos destinados a utilizações múltiplas, é constituído por dois corpos. O corpo inferior, em cave, totalmente em betão armado, compreende a laje de fundo, formando um ensoleiramento que simultaneamente realiza o encabeçamento das estacas de fundação, os muros periféricos de contenção de terras, um sistema de pilares dispostos numa malha aproximada de 7.5m por 5.5m e, neles apoiando e no muro periférico, uma laje que realiza o pavimento do rés-do-chão. O segundo corpo é constituído por uma estrutura mista; na periferia, bem como bordejando o pátio interior, paredes de betão armado com aberturas de dimensões variáveis constituem a estrutura principal para resistência às acções horizontais, nomeadamente acções sísmicas; no interior os pilares são metálicos com função preponderante de resistência às acções verticais, pilares em que apoia um sistema de vigas metálicas dando suporte a estruturas mistas que realizam os pavimentos dos pisos superiores. São as lajes de pavimento constituídas por estruturas compostas de aço e betão, compreendendo chapas de aço nervurado colaborantes que funcionam simultaneamente como elementos de cofragem, enchimentos em betão leve estrutural e armaduras passivas de reforço em varões de aço endurecido.



“Pala” da Praça Cerimonial Edifício do Pavilhão de Portugal

Fig^a 3 –Planta de Conjunto das Coberturas

Também aqui a utilização de betão leve estrutural se revelou adequada, não só permitindo um menor número de escoramentos das chapas de aço colaborantes, mas também permitindo uma margem maior a utilizar em sobrecargas úteis e ainda, dado o edifício ser fundado sobre estacas profundas, diminuindo as acções totais solicitando as estacas, com vantagens económicas evidentes.

2. A COBERTURA DA "PRAÇA CERIMONIAL"

2.1. O Modelo de Cálculo

Dadas a pequena espessura da membrana (20 centímetros) e a distância de 67.5 metros entre pontos de suspensão (a relação entre a espessura e o vão livre é da ordem de 1:340), cada faixa de membrana adjacente a um cabo de sustentação comporta-se como um "cabo virtual" perfeitamente flexível suspenso a partir de dois pontos, A e B, que no caso da "Pala" estão de nível.

Considerando a pequena relação entre a flecha máxima a meio-vão (da ordem de 3 metros) e a distância igual a 67.5 metros entre pontos fixos de suspensão, relação da ordem de 1:22.5, pode considerar-se que o peso da faixa de "Pala" em questão tem um valor uniforme ao longo da sua extensão, sendo também uniformes as outras acções características que podem actuar sobre a membrana.

O comportamento do "cabo virtual" é, neste caso, governado pela equação

$$y = \frac{wx}{2H}(l-x) \quad (2.1)$$

em que H é a componente horizontal da força de tracção no cabo, l o vão livre, y a ordenada medida a partir da recta que une os pontos de suspensão e w a intensidade da força actuante, por metro linear.

Aplicando aquela equação ao ponto médio do "cabo virtual", ponto em que a ordenada da curva funicular se representa por f e se designa por flecha, obtem-se:

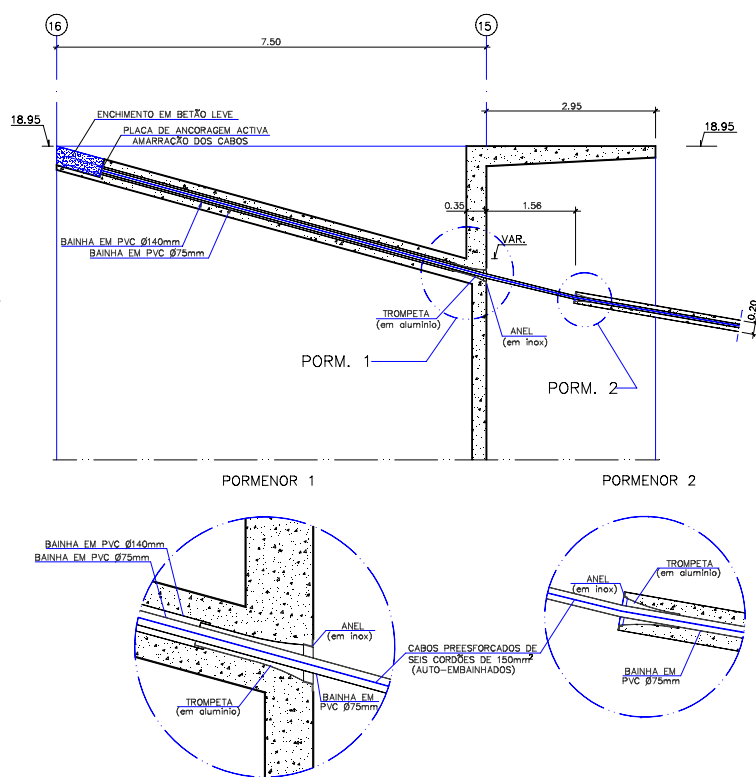
$$f = \frac{wl^2}{8H} \quad \text{ou} \quad H = \frac{wl^2}{8f}$$

O comprimento s da curva funicular obtem-se integrando

$$s = \int_0^l (1 + y'^2)^{1/2} dx$$

Desenvolvendo em série a expressão integranda obtem-se

$$s = l \left(1 + \frac{8f^2}{3l^2} - \frac{32f^4}{5l^4} + \frac{256f^6}{7l^6} - \dots \right)$$



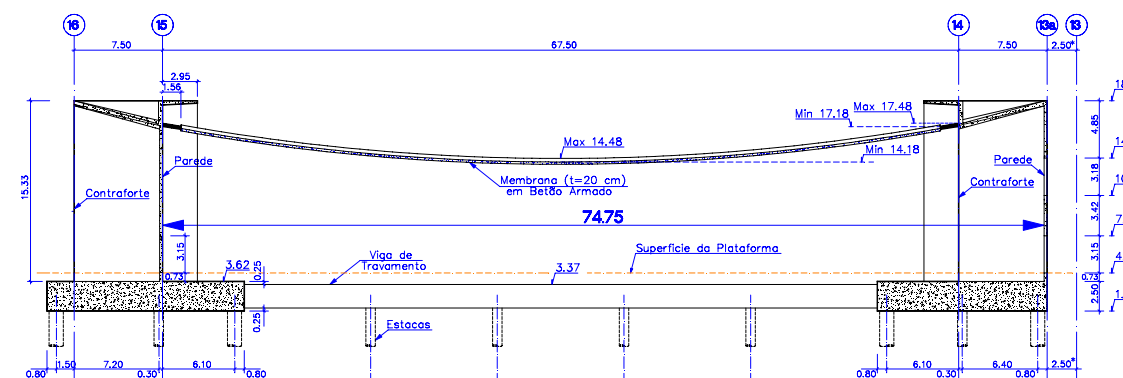
Fig^a 4 - Dispositivo de suspensão da "Pala"

No caso de curvas tensas, em que $f/l \leq 1/10$, podem considerar-se apenas os dois primeiros termos da série, usando, com erros desprezáveis, a fórmula aproximada

$$s = l \left(1 + \frac{8f^2}{3l^2} \right) \quad (2.2)$$

A relação entre a variação de comprimento da curva e a variação da flecha pode ser estabelecida por diferenciação da equação (2.2), obtendo-se:

$$\Delta s = \frac{16f}{3l} \Delta f \quad \text{ou} \quad \Delta f = \frac{3l}{16f} \Delta s \quad (2.3)$$



Fig^a 5 - Corte Transversal pela "Pala"

A variação Δf da flecha originada pela variação de temperatura Δt pode ser obtida a partir da correspondente variação do comprimento da curva, $\Delta s = \alpha \cdot s \cdot \Delta t$, que introduzindo na equação (2.3) dá:

$$\Delta f = \frac{3l^2}{16f} \cdot \alpha \cdot \Delta t \cdot \left(1 + \frac{8f^2}{3l^2} \right)$$

Por integração das extensões pode obter-se o alongamento elástico a partir da equação:

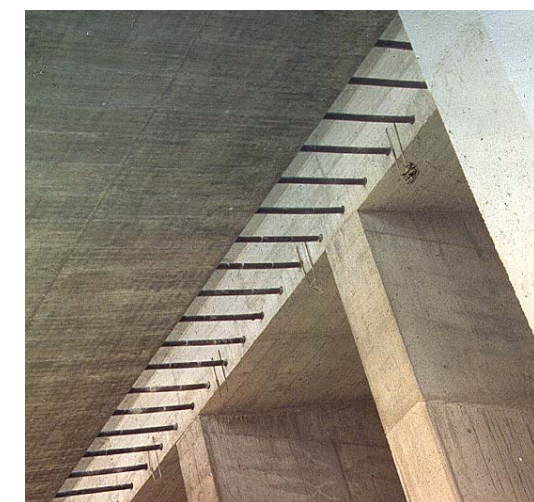
$$\Delta s = \int_0^s \frac{H}{A_h E_h} ds = \int_0^l \frac{H}{A_h E_h} \cdot (1 + y'^2) \cdot dx$$

em que A_h é a área homogeneizada da secção transversal do "cabo virtual" e E_h o respectivo módulo de elasticidade. Substituindo y dado pela equação (2.1) e integrando obtem-se:

$$\Delta s = \frac{Hl}{A_h E_h} \cdot \left(1 + \frac{16f^2}{3l^2} \right)$$

e a correspondente variação da flecha vem dada por

$$\Delta f = \frac{3}{16} \frac{Hl^2}{A_h E_h f} \cdot \left(1 + \frac{16f^2}{3l^2} \right)$$



Fig^a 6 - Suspensão da "Pala"; Pormenor

2.2. Comportamento às Acções Horizontais

As acções preponderantes que podem actuar sobre a "Pala" são, como habitualmente, as acções sísmicas e as acções do vento.

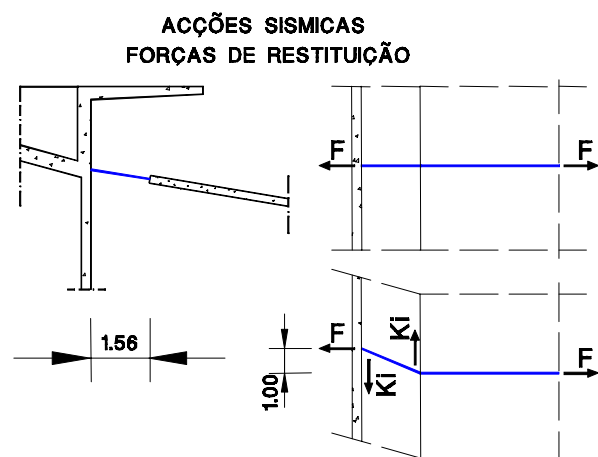
Nas acções do vento importa considerar os dois aspectos mais significativos: no primeiro, relativo às pressões verticais induzidas pelo escoamento laminar, a situação é semelhante à correspondente à actuação do peso próprio da membrana e seus revestimentos e pode considerar-se como um agravamento ou uma diminuição da força w , uniformemente distribuída, que actua sobre os "cabos virtuais"; no segundo aspecto são de considerar as forças de arrasto induzidas pelo escoamento laminar do vento.

Dada a grande superfície alar constituída pela própria "Pala", as forças de arrasto assumem uma magnitude apreciável. Também apreciável é a massa da própria "Pala", da ordem de 1500 toneladas, que excitadas pelas acções sísmicas poderiam, se a "Pala" estivesse rigidamente ligada à estrutura de suporte, originar forças horizontais de inércia de grande magnitude que iriam agravar as já importantes solicitações horizontais que sobre aquela estrutura actuam.

Tomou-se assim a decisão de libertar completamente a estrutura da "Pala", sendo única ligação à estrutura de suporte a constituída pela trajectória aérea dos cabos de aço de sustentação na descontinuidade existente entre a "Pala" propriamente dita e a estrutura de suporte.

Embora muito flexível na direcção vertical, a "Pala" tem uma grande rigidez horizontal, nessa direcção muito superior à dos cabos que a sustentam.

Isole-se então uma faixa da "Pala" adjacente a um cabo de sustentação e consideremos a imposição à membrana de um deslocamento horizontal Δu no sentido transversal à estrutura, tal como se representa na Figura 7.



Fig^a 7 – Forças Transversais de Restituição

forças horizontais que tendem a restituir a posição inicial uma vez cessada a causa que impôs o deslocamento horizontal.

Se o deslocamento horizontal for unitário aquela força horizontal corresponde à rigidez horizontal transversal da ligação do cabo à estrutura, e se for N o número de ligações (igual a

sendo F o valor da força de tracção instalada em cada cabo e $\Delta l = 1.56$ metros a distância do bordo da "Pala" ao bordo da estrutura de suporte, e considerando como rígidas na direcção horizontal estas duas estruturas, a variação de direcção da trajectória do cabo na sua trajectória aérea induz, nos pontos angulosos de variação da trajectória, forças horizontais de magnitude ΔK dada por:

$$\Delta K = F \frac{\Delta u}{\Delta l}$$

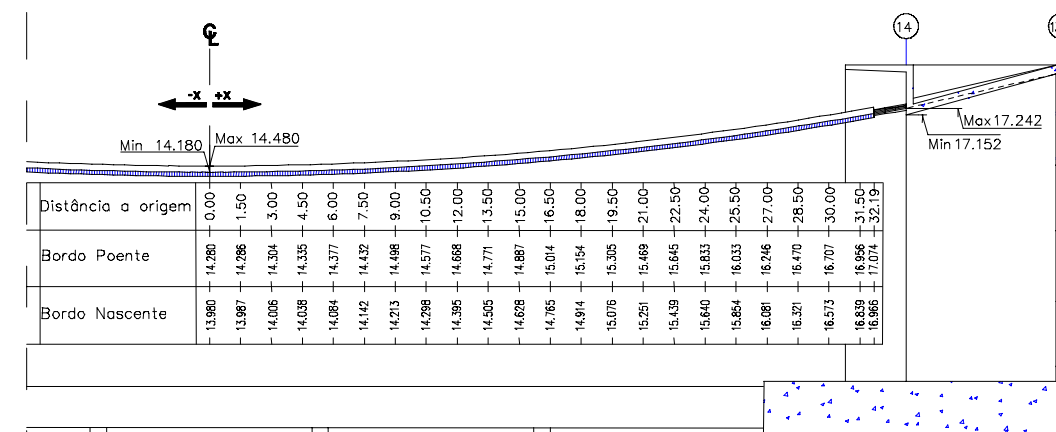
duas vezes o número de cabos de sustentação e F_m (em quilonewtons) o valor médio das forças de pré-tensão aplicadas aos cabos, a rigidez horizontal transversal da "Pala" será dada por:

$$K = N \cdot \frac{F_m}{1.56} \text{ kN/m}$$

Determinada a rigidez e conhecida a massa da estrutura podem determinar-se com facilidade, recorrendo aos métodos típicos de análise dinâmica de um oscilador com um grau de liberdade, as características dinâmicas notáveis e os deslocamentos horizontais máximos espectáveis sob a acção das acções horizontais (sismos e vento). Com os deslocamentos horizontais máximos (que no caso concreto são da ordem de 6 centímetros) determinou-se a forma adequada da transição dos cabos de sustentação na transição do seu trajecto aéreo para a trajectória embebida na estrutura, de forma a que essa transição seja feita, não segundo pontos angulosos originando fenómenos de fadiga do aço, mas segundo uma transição suave de concordância que não provoque concentrações de tensões.

2.3. A Drenagem da "Pala"

A "Pala" comporta-se como uma bacia hidrogáfica de área já apreciável, sendo necessário assegurar o adequado escoamento das águas pluviais. Não sendo possível, por razões estéticas, assegurar dispositivos de drenagem especiais, aceitou-se pragmaticamente um escoamento natural das águas, para tal se criando uma inclinação transversal de 6 por mil ao longo do eixo



Fig^a 8 – Pontos Notáveis da Superfície Inferior da "Pala"

médio da membrana.

Como ainda por razões estéticas a estrutura de suporte deve aparentar uma linha de bordo aparente aproximadamente horizontal, varia transversalmente de ponto para ponto a equação da superfície inferior da membrana. Dado tratar-se de uma curva tensa adoptou-se a aproximação parabólica e, representando por Z a cota de um ponto da face inferior da membrana e x a distância do ponto ao eixo de simetria da membrana, apresentam-se a seguir duas das equações adoptadas:

- Bordo Poente (Pontos mais altos)..... $Z = 14.280 + 0.0026965 x^2$
- Bordo Nascente (Pontos mais baixos) $Z = 13.980 + 0.0028815 x^2$

No eixo central o desnível entre os pontos mais alto e mais baixo é de apenas 30 centímetros. Recordando a expressão que relaciona a flecha f com a tracção H nos cabos ($f=wl^2/8H$), nota-se que, a um aumento de dez por cento no valor da força de pré-tensão aplicada aos cabos de sustentação, corresponde uma diminuição de igual montante na flecha (ou seja de aproximadamente 30 centímetros), pelo que, quer a construção da “Pala”, quer a aplicação do pré-esforço exigiram grande rigor para não originar efeitos perversos que poderiam anular a pendente de escoamento das águas ou mesmo invertê-la.

2.4. A Estrutura dos Contrafortes

Os cabos de sustentação da “Pala” amarram em lajes de ancoragem em betão armado, de pequena inclinação transversal e que, por suficientemente rígidas no seu plano, distribuem de uma forma aproximadamente uniforme aos nove contrafortes que se dispõem de cada lado da “Pala” os impulsos que se geram na ancoragem dos cabos e que para cargas permanentes são da ordem de 760 kN/m,.



Fig^a 9 – Construção dos Contrafortes

Os contrafortes têm uma secção transversal rectangular de 7.5m×0.80m e uma altura de cerca de 13.5m acima do coroamento de maciço de fundação e no seu topo são solicitados por forças horizontais que, para cargas permanentes, são da ordem de 4500 kN.

São os contrafortes peças fortemente armadas dada a magnitude das forças em presença e a sua fundação é constituída por maciços em betão armado encabeçando três fiadas de estacas em betão armado moldadas no solo. Sendo os impulsos da suspensão da “Pala” forças com carácter de permanentes e dada a fraca consistência das camadas superiores do solo de fundação (lodos fluídos), são os dois maciços de fundação opostos unidos por escoras em betão armado (apoiadas em estacas intermédias para obviar fenómenos de instabilidade elástica) que realizam o auto-equilíbrio dos impulsos de cada lado da “Pala” sem qualquer transmissão de forças às camadas superiores do solo e assim obviando os grandes deslocamentos que, instantaneamente e agravados pela fluência do solo, se manifestariam durante as operações de pré-tensionamento dos cabos de suspensão.

2.5. A Construção da “Pala”

Para a construção da “Pala” duas condicionantes impuseram que a sua betonagem fosse feita de uma só vez, com o recurso a um cavalete ao solo integrando toda a área de projecção da cobertura.

Das condicionantes a primeira é de cariz estético, resultando da imposição de o arquitecto autor do projecto pretender minimizar a existência de juntas aparentes, e a segunda de cariz técnico, consequência de pequenas variações na aplicação da pré-tensão aos cabos conduzirem a

variações significativas da flecha a meio-vão da “Pala”, com resultados potencialmente perversos no estabelecimento da pendente para o escoamento das águas pluviais.



Fig^a 10 – Cavalete e Cofragem da “Pala”

Os cabos de suspensão estão distanciados entre si de cerca de 60 centímetros e cada um é constituído por 7 cordões de 150 mm² de área, em aço de alta resistência. Trabalhando cada cabo a tensões relativamente reduzidas para a sua capacidade nominal, resulta esta decisão de múltiplos aspectos: por um lado garantir uma segurança adicional a uma estrutura de tão grande importância, pelo menos simbólica; por outro lado garantir uma segurança adequada ao efeito de potenciais acidentes originando incêndios sob a “Pala”, já que em parte do seu percurso os cabos seguem uma trajectória aérea não protegida pelo envolvimento em betão; e finalmente, a “Pala” comporta-se como uma grande superfície alar, sendo a rigidez dos cabos assim constituídos a necessária para impedir que, literalmente, “a Pala levante vôo”.



Fig^a 11 – Bainhas dos Cabos e Armaduras

2.6. As Operações de Betonagem

A opção, justificada, de utilização de um betão leve estrutural, de modo a reduzir-se o peso próprio da “Pala”, conduziu a estudos especiais para obtenção de um betão que satisfizesse as resistências de projecto e que a betonagem pudesse ser feita numa única operação de modo a minimizar a visibilidade das inevitáveis juntas construtivas.



Fig^a 12 – Operação de Betonagem da “Pala”

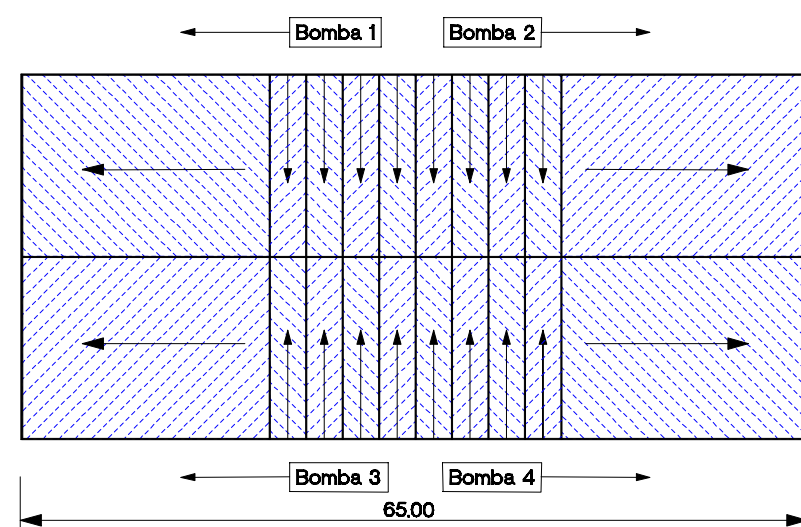
O betão conseguido apresenta uma resistência mínima correspondente à classe **LC25**, com uma massa específica de 1800 kg/m³ e com uma consistência adequada para

bombagens até distâncias da ordem de 60 metros.

Na composição do betão usou-se:

- Cimento Portland Tipo I 42.5
- Cinzas Volantes (da Central Térmica de Sines)
- Fumos de Sílica (MS 610 da MBT)
- Areia Natural (Siliciosa)
- Argila Expandida (LECA 2-4)
- Superplastificante (Rheobuilh 561)

A sequência de betonagem adoptada foi a que se mostra na *Figura* seguinte:



Figª 13 – Sequência de Betonagem da “Pala”

As operações de betonagem sobre os cerca de 4000 metros quadrados de cofragem tiveram o seu início numa faixa central de 2,5 metros de largura e prosseguiram como se representa na *Figura 13*, sendo usadas 4 bombas de betão com uma produção da ordem de 80 metros cúbicos por hora. O tempo médio de espera nas juntas de betonagem não ultrapassou os 45 minutos de modo a poder garantir-se uma continuidade total na superfície inferior do betão.

2.7. A Aplicação de Pré-esforço e o Descimbramento da “Pala”

A aplicação do pré-esforço aos cabos de suspensão iniciou-se decorridas cerca de duas semanas após a betonagem da cobertura.

O equipamento utilizado no esticamento dos cabos não era dos mais adequados, nomeadamente pela imprecisão dos manómetros dos macacos que, para as tensões relativamente baixas a que trabalham os cabos,



Figª 14 – Descimbramento da “Pala”

conduziam a erros superiores a vinte por cento no controle das forças aplicadas. Também o controle a partir do alongamento dos cabos se tornou impraticável por um conjunto de circunstâncias que inviabilizou a confiança nos registos. A solução adoptada para o controle de aplicação da pré-tensão aos cabos, pré-tensão que além do mais é teoricamente variável de cabo para cabo por serem também distintas as equações da membrana, foi uma solução mista jogando com a escala dos manómetros complementada com apoio topográfico em pontos seleccionados ao longo do eixo da “Pala”, começando por uma aplicação generalizada de forças da ordem de 80 por cento do previsto aos cabos e depois fazendo varrimentos alternados de aplicação de forças aos cabos, por grupos de valores, até que as cotas do eixo central atingissem os valores previstos, aliviando a deformação inicial do cavalete e libertando-se finalmente da cofragem, situação que era comprovada ao longo dos pontos acessíveis, nos bordos da membrana, operação que se desenrolou ao longo de 5 dias ao fim dos quais foi então possível dar ordens para desmontar o cavalete e libertar a “Pala” na sua posição definitiva.



Figª 15 – A “Pala” liberta

3. A ESTRUTURA DO EDIFÍCIO

3.1. As Lajes do Pavimento

Descreveu-se já na introdução, com suficiente detalhe, a concepção geral da estrutura do edifício, solução adoptada para, de uma maneira relativamente fácil, permitir futuras adaptações a novas utilizações. Mesmo durante a fase construtiva, já que o programa de utilização durante a fase da EXPO’98 só muito tardiamente estabilizou, foram frequentes essas adaptações.

Na *Figura 16* apresenta-se uma vista parcial da estrutura metálica base dos pavimentos, sendo visíveis os perfilados principais que constituem a estrutura principal e os perfilados secundários que servem de apoio às chapas de aço colaborantes.

Na *Figura 17* apresenta-se uma vista inferior da estrutura dos pavimentos em que já estão montadas as chapas colaborantes que integram a estrutura mista das lajes e na *Figura 18* uma



Fig^a 16 – Estrutura Principal do Pavimento



Fig^a 17 – Vista Inferior das Chapas Colaborantes



Fig^a 18 – Betonagem da Lâmina de Compressão

vista de um pavimento já parcialmente betonado e em que se nota, na parte superior, o dispositivo de armaduras passivas aguardando a betonagem da lâmina de compressão.

4. ÍNDICE

CAPÍTULO	Página
1. INTRODUÇÃO	1
2. A “PALA”, COBERTURA DA “PRAÇA CERIMONIAL”.....	2
2.1. O Modelo de Cálculo.....	2
2.2. Comportamento às Acções Horizontais	3
2.3. A Drenagem da “Pala”	3
2.4. A Estrutura dos Contrafortes	4
2.5. A Construção da “Pala”	4
2.6. As Operações de Betonagem	4
2.7. A Aplicação de Pré-esforço e o Descimbramento da “Pala”.....	5
3. A ESTRUTURA DO EDIFÍCIO.....	6
3.1. As Lajes do Pavimento.....	6

AGRADECIMENTOS

O autor agradece o amável e prestigioso convite da **LECA PORTUGAL** para concorrer ao “**PRÉMIO LECA DE CONSTRUÇÃO 98**”, convite que muito o honrou, esperando que com este breve texto, que se pretendeu despretensioso, tenha conseguido dar uma visão objectiva do que foi, em Portugal e num edifício de grande valor simbólico, uma das primeiras utilizações de argila expandida para o fabrico de betões estruturais.

Lisboa, Junho de 1999

(A. Segadães Tavares)