

# A Engenharia do Estádio Municipal de Braga





# Estádio Municipal, Braga

“Escrever sobre o Projecto de Engenharia do Estádio não é falar da gravidade, da anulação dos momentos, da tracção e da compressão. Escrever não é falar da “empatia” entre duas disciplinas, a Arquitectura e a Engenharia, que foram sempre uma só, mas de um projecto de “vida” e não sobre a vida de um projecto. Durante 3 anos Engenheiros e Arquitectos propuseram-se alterar o lugar de uma pedreira, para que aquele sítio, que era para nós o “mundo todo, pudesse ficar melhor.”

**Eduardo Souto de Moura**, Arquitecto





## História

O local era um monte com uma pedreira no seu topo e o Cliente pretendia um estádio com 30.000 lugares. Eduardo Souto de Moura imaginou um estádio com apenas duas bancadas – como num teatro grego, uma seria escavada na pedra; a outra surgiria do chão, isolada. Uma opção mais convencional, com 4 bancadas, tinha entretanto sido desenvolvida. Aceitando o risco e o seu maior custo, o Cliente optou pela solução mais arrojada.

Havia pouca informação geotécnica disponível mas a rocha visível na pedreira deu-nos confiança para iniciar o estudo. A questão era saber se encontraríamos rocha boa em toda a profundidade, necessária para garantir as inclinações quase verticais dos taludes que a solução de projecto exigia. Quanto tempo levaria a escavar o monte numa profundidade de cerca de 50 m e qual seria o custo desta obra? Estávamos no início de 2000 e o Estádio deveria estar concluído até finais de 2003.

Informação preliminar recolhida em diversas fontes e um estudo geotécnico preliminar aliviou as nossas preocupações fundamentais: existia rocha em profundidade mas teríamos que ir adaptando o projecto ao nível de fracturação e aos “lisos” que fossemos encontrando. Veios e bolsas de saibro poderiam aparecer, como sempre com o granito. O prazo da obra não seria um problema se a empreitada pudesse começar depressa e o custo da escavação poderia ser reduzido significativamente, vendendo o material escavado.

A empreitada de escavação veio a iniciar-se em Agosto de 2000. Nesta altura, era já conhecida a orientação desfavorável da família principal de diáclases do talude Sul, o que obrigou desde logo ao lançamento de uma empreitada específica de contenção daquele talude. Os métodos de escavação e o tamanho dos blocos que produziriam eram as principais condicionantes das inclinações que viríamos a obter. Idealmente, os taludes deveriam ser verticais. Partindo do layout geral e considerando margens para fazer face a problemas que pudessem ocorrer durante a escavação, a geometria do grande “buraco” foi definida e a metodologia e sequências de operação foram especificadas. A obra foi sendo desenvolvida com um acompanhamento permanente e o projecto ajustado em função do que se ia encontrando. A situação mais dramática da obra acabou sendo o aparecimento de um veio de saibro, ligeiramente oblíquo em relação à face do talude Sul, que não tinha sido possível detectar no Estudo Geotécnico. Afectando fortemente a inclinação do talude e obrigando a um complicado sistema de contenção, a solução foi mover a implantação do estádio em cerca de 20 m para Norte de modo a assegurar que o talude possuiria uma espessura de rocha suficiente na sua face exterior.



A cobertura constituiu o segundo grande desafio para a equipa. Ela deveria reforçar a ideia da integração do Estádio no ambiente envolvente. Deveria ser tão leve e simples quanto possível: arcos, treliças, postes, cabos e membranas não encaixavam no conceito.

Uma cobertura suspensa como a do Pavilhão de Portugal na Expo 98 acabou por surgir como a solução natural. Dispúnhamos da rocha para ancorar os cabos e a reacção da cobertura na bancada nascente ajudaria a estabilizá-la. A dúvida era o comportamento dinâmico de uma cobertura com um vão de 220 m e o facto de que teria de ser construída a 50 m de altura (a pala do pavilhão de Portugal tinha sido construída com escoramento total a partir do solo).

Cálculos preliminares intensivos e o estudo de estruturas semelhantes, em especial de uma ponte de tubos construída na Argentina, revelaram a viabilidade da solução. Por outro lado, jogando com a geometria e o peso da laje de cobertura seria possível aspirar ao equilíbrio dos momentos na fundação, para combinações permanentes de acções. Infelizmente, no decurso do projecto, a inclusão do programa (bares, instalações sanitárias, etc) e os necessários ângulos de visão levaram à alteração da inclinação dos montantes da bancada Nascente, afastando-nos daquele objectivo original.

Uma estrutura de lâminas paralelas garantiria a rigidez necessária da Bancada Nascente e permitiria a integração de todos os bares, escadas e equipamentos necessários.

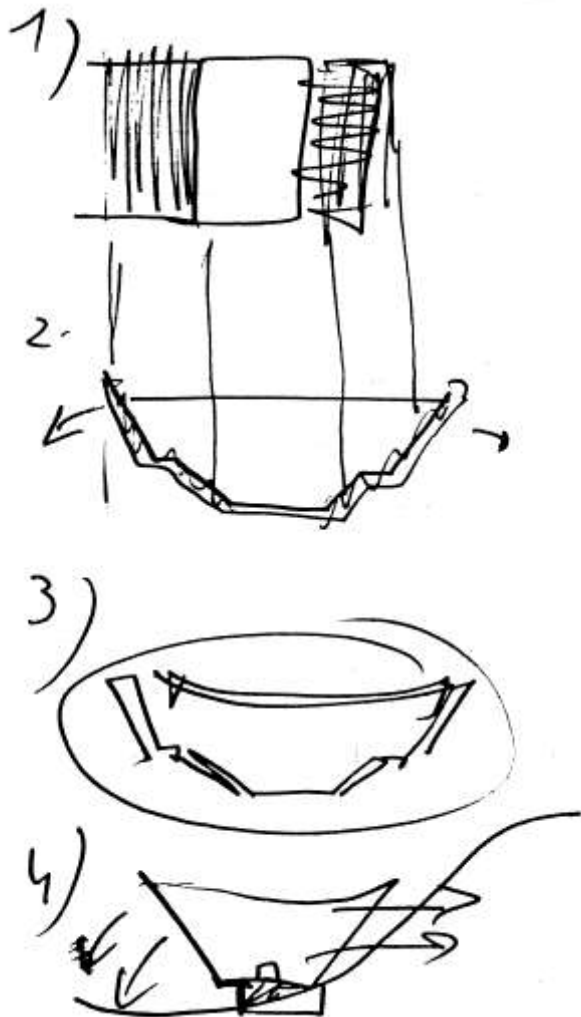
Numa atitude conservadora, estávamos ainda agarrados à ideia de uma cobertura contínua. Esta solução, no entanto, não permitia iluminação natural para o relvado. A divisão da cobertura em duas teve então de ser encarada e testada.

Foram efectuados estudos usando uma abordagem estática do vento, sendo a distribuição dos coeficientes de pressão estabelecida usando a bibliografia. O peso e a espessura da laje de cobertura foram inicialmente definidos de modo a anular as forças ascendentes do vento.

A primeira análise dinâmica foi feita na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, através de um modelo tridimensional de elementos finitos com o qual foi possível estabelecer os modos de vibração e as suas frequências. A resposta estrutural da cobertura à acção do vento em estado limite último foi igualmente calculada.

Estes resultados mostraram que a solução com duas lajes independentes era possível mas que a interacção dinâmica entre a cobertura e o vento deveria ser aprofundada em estudos posteriores.

O cálculo dos esforços principais nos montantes e a adequabilidade do solo de fundação revelou igualmente a razoabilidade da solução.



O processo de construção foi estudado e uma solução de lajes pré-fabricadas deslizando sobre os cabos, solidarizadas entre si no final, demonstrou ser exequível (tinha sido esta a solução adoptada no aeroporto Dulles, em Washington, há cerca de 30 anos).

A estimativa de custos mostrou que a solução se poderia encaixar no orçamento.

Outros aspectos foram ainda estudados e confirmados para validar a solução: em dias ventosos seria um estádio com duas bancadas confortável para os espectadores? As sombras dos cabos na zona central da cobertura afectariam as transmissões televisivas? A ventilação e exposição ao Sol do relvado seriam adequadas?

O Conceito foi então validado e o Projecto de execução iniciou-se.

#### Prémios

Prémio Secil Arquitectura 2004

Prémio Secil Engenharia 2005



## Arquitectura e Engenharia

O programa era novo para toda a equipa. Sem ideias pré-concebidas, começámos do zero. Juntamente com o Arquitecto visitámos diversos Estádios construídos recentemente na Europa, analisando e questionando as suas opções.

Para este projecto, Souto de Moura pretendia que as necessidades técnicas da construção determinassem o desenvolvimento do Projecto. Para além, naturalmente, do que resulta da definição dos espaços, o resultado estético da obra adviria de um intenso, exigente e estimulante diálogo entre a arquitectura e a engenharia, em que o processo de busca de soluções só terminava quando o resultado agradava a ambas. Critérios claros e rigorosos eram acordados para disciplinar as necessidades técnicas da construção. As soluções técnicas deveriam segui-los: alinhamentos, traçados, espessuras, arestas – tudo era sujeito a critérios cuja validade era dada pela inexistência de soluções “ad-hoc”.

Rigor, leveza e simplicidade formal eram os objectivos a perseguir.

O resultado devia ser simples na forma e na sua lógica construtiva. Mas a simplicidade formal só é alcançada através de um demorado e contínuo processo de aproximações sucessivas que termina, não raras vezes, em soluções bem diferentes das ideias que deram origem ao debate.

Toda a equipa estava permanentemente disponível para questionar opções anteriores, deixando mesmo que por vezes o tempo ajuizasse sobre a adequação das soluções adoptadas, simultaneamente de um ponto de vista estrutural e arquitectónico. No Estádio de Braga, soluções “forçadas” acabaram sempre por, com o tempo, ser alteradas.

Arquitectos e Engenheiros trabalharam em conjunto com vista a atingir um fim comum, que não era visto como exclusivo de uns ou de outros.

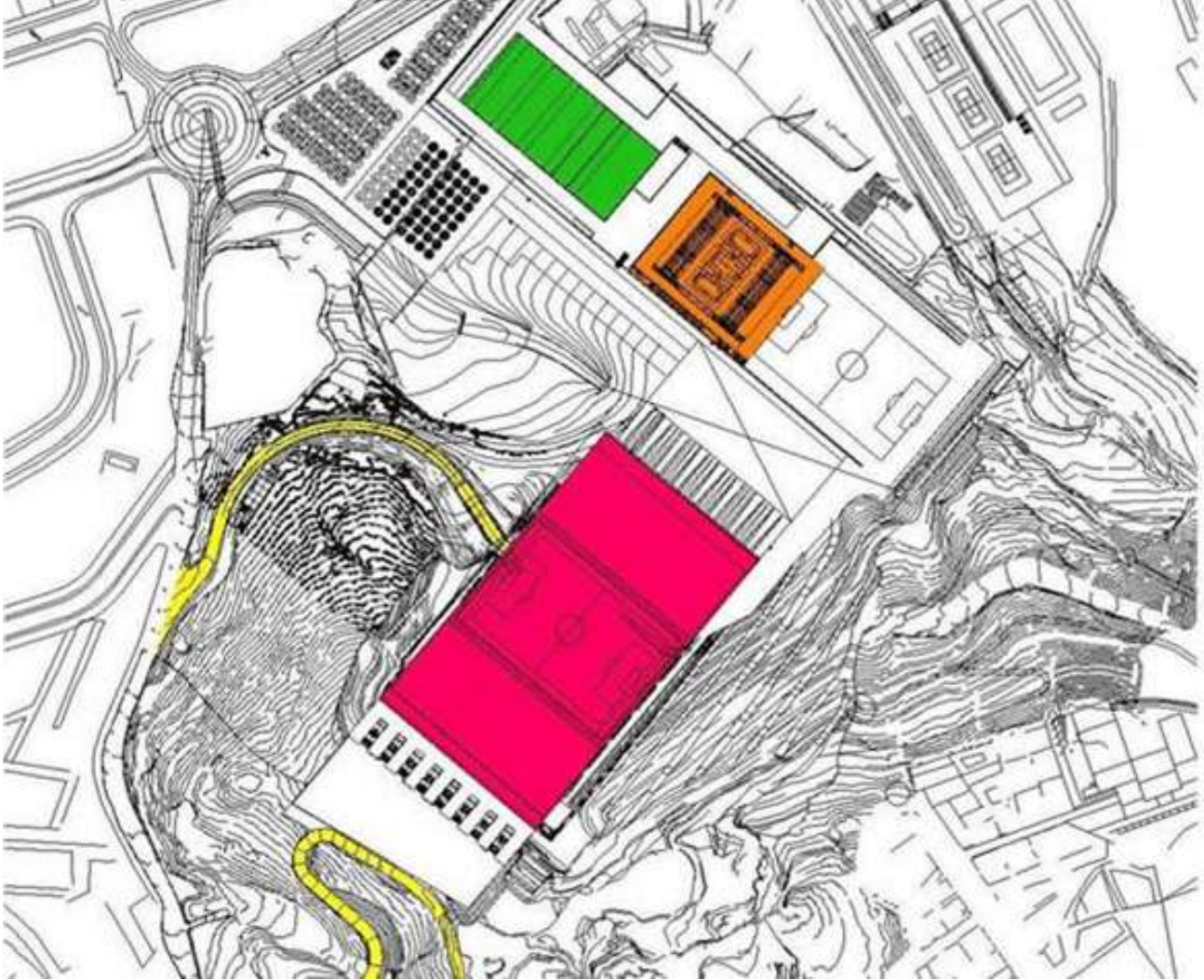
A ideia inicial de “encaixar” o Estádio na pedra, com apenas duas bancadas, iniciou um processo de Projecto em que as soluções encontradas foram resultando da confirmação e consolidação de ideias cuja viabilidade era, à partida, desconhecida. A escolha inicial do caminho a seguir assentou mais frequentemente na sensibilidade e no instinto do que em resultados conhecidos. Seguiu-se-lhe o indispensável processo de investigação e confirmação, em que o critério de aceitação das soluções assentava numa rigorosa análise de custo/benefício (funcional, técnico, económico e estético). Estávamos conscientes dos riscos inerentes ao desafio sistemático dos limites convencionais, controlando-o através de uma intensa metodologia de investigação. Análise de risco, redundâncias, estudo do mesmo problema por equipas independentes, cruzando resultados, permitiram-nos ir gradualmente reduzindo as margens de segurança adicionais com que inevitavelmente partíamos.

Este processo, que aproveita todos os recursos e espaço que lhe forem alocados, tinha que ser convergente. O seu fruto era afinal a construção de uma obra – havia prazos e custos para cumprir. O pragmatismo e flexibilidade para isso necessários tiveram que estar presentes e foi preciso aceitar os limites que não conseguimos ultrapassar.

A variedade e complexidade dos problemas técnicos que este projecto colocou constituíram um grande desafio para toda a equipa mas, simultaneamente, uma oportunidade de aprender que não desperdiçámos.

Uma palavra sobre o papel do Cliente - sem a sua confiança e entusiasmo, em especial do Sr. Presidente da Câmara de Braga, o sucesso do Projecto não teria sido possível.

É gratificante chegar ao fim da obra e constatar que falar da estrutura do Estádio é também falar da sua Arquitectura e que explicar a sua Arquitectura é contar a história dos problemas que a Engenharia foi tendo que enfrentar.



### Descrição Geral

O Estádio Municipal de Braga está localizado em Dume, no recinto do Complexo Desportivo de Braga, que integrará igualmente um pavilhão desportivo e uma piscina olímpica.

**O seu elemento mais visível é, sem dúvida, a cobertura. É composta por cabos “full locked coil” aos pares, afastados entre si de 3,75m, sobre os quais apoiam duas lajes de betão que cobrem as duas bancadas do Estádio. Trata-se de uma estrutura inédita não só pelo seu vão (202m) como também pelo facto de os cabos serem livres na zona central.**

Dado o seu carácter inovador, estiveram envolvidas no seu projecto diversas entidades nacionais e internacionais, tendo sido realizados 3 estudos do seu comportamento ao vento (rígidos e aeroelásticos).

A drenagem das águas pluviais da cobertura é feita (à semelhança da do Pavilhão de Portugal na EXPO 98), só para um lado, sendo recolhida por dois “aquedutos” em aço inox, saindo em consola do talude. O caimento da cobertura é conseguido por variação do comprimento dos diversos pares de cabos ao longo da cobertura.

O remate das duas lajes de betão da cobertura é feito com uma treliça de secção transversal triangular, inicialmente concebida como viga de rigidez e que acabou sendo o suporte dos projectores de iluminação e das colunas de som.

A cobertura apoia-se em duas grandes vigas que fazem o coroamento das duas bancadas – nascente e poente, onde é feita a ancoragem dos cabos.





A bancada nascente é estruturalmente constituída por montantes (consolas) com 50m de altura que, ao serem “furadas”, dão apoio às lajes dos diversos pisos de foyers do Estádio. A sua estabilização longitudinal é assegurada pelas lajes existentes sob os degraus das bancadas. Da bancada nascente salienta-se a esbelteza dos montantes que têm apenas 1,00m de espessura.

Depois da cobertura, a bancada poente é talvez o elemento estruturalmente mais complexo, pela diversidade de problemas encontrados: montantes ancorados em rocha e em saibro, funcionamento de conjunto da estrutura com o solo, compatibilização do funcionamento estrutural de estruturas com rigidezes muito diferentes, fundações sobre banquetas instáveis. De entre as diversas soluções encontradas, é difícil destacar uma como digna de especial referência.

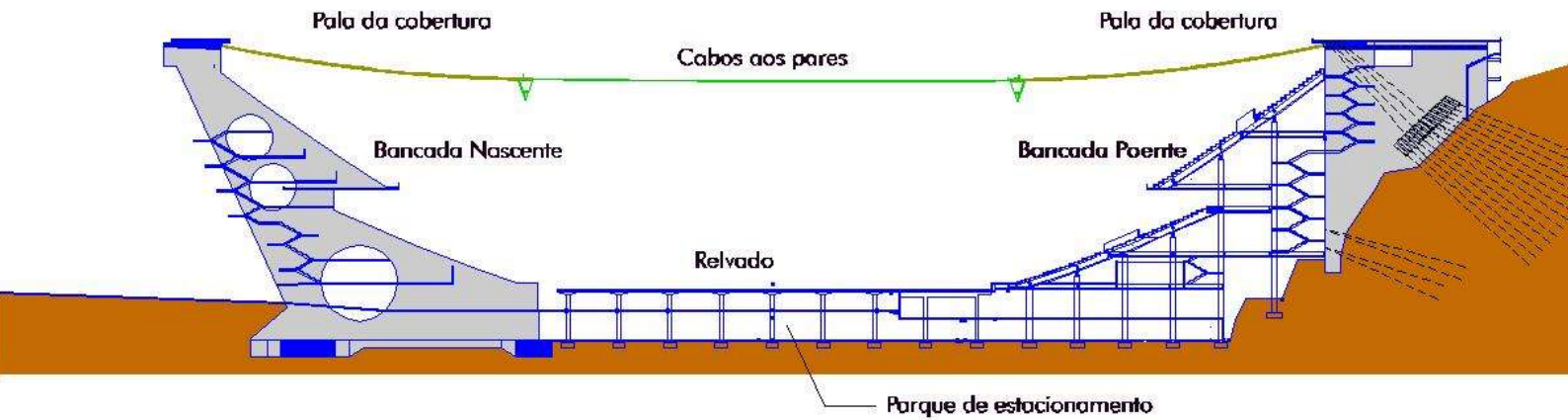
O chamado relvado é afinal o edifício que se esconde debaixo dele. Possui dois pisos e ocupa toda a área do relvado. Alberga um parque de estacionamento, os balneários e todos os serviços de apoio ao EURO 2004. Não coloca particulares dificuldades estruturais, para além do controle das consequências da retracção e das variações térmicas, que levou à utilização de aparelhos de apoio no apoio da laje do relvado, especialmente bem integrados pela Arquitectura.

A escavação e contenção de taludes necessária para a construção do Estádio é por si só uma grande obra. Deu origem à escavação de 1.700.000 m<sup>3</sup> de saibro e rocha e obrigou à contenção de grandes taludes de rocha em que, infelizmente, as diaclases tinham uma orientação desfavorável. A contenção do talude foi feita com uma malha de ancoragens e pregagens que asseguram a sua estabilidade.

O comportamento dos taludes é avaliado por um conjunto de inclinómetros e células de carga, ligados ao sistema de monitorização do Estádio.

Um complexo desta dimensão obrigou naturalmente à realização de um conjunto importante de infra-estruturas de que se destacam o desvio de um colector de saneamento de Braga que atravessava o terreno, a canalização de uma linha de água e a galeria técnica





## A Cobertura

A cobertura do Estádio constituía naturalmente o maior desafio pela sua dimensão e inovação. Não há no mundo nenhuma cobertura semelhante.

**O conceito que se pretendia materializar era o de um conjunto de cabos em catenária espaçados entre si de 1.875 m e suspensos das vigas de coroamento dos montantes, dando apoio a duas lajes independentes de betão que cobrem cada uma das bancadas.**

**A geometria escolhida para a cobertura resultava do compromisso entre o objectivo do Arquitecto (arco invertido muito abatido) e o valor dos esforços produzidos na estrutura pela componente horizontal das forças dos cabos.**

A selecção do tipo de cabos constituiu, também, uma importante decisão dado ser determinante para a definição das características formais e tecnológicas da cobertura. Duas opções se colocavam: cabos do tipo “full locked coil” e cabos embainhados. Estudadas as diferentes características das duas soluções em termos de durabilidade, dispositivos de ancoragem e dimensionamento, optou-se pela solução “full locked coil”, que conduz a secções inferiores.

Em fase de concurso, dada a grande importância da tecnologia “específica” de cada fabricante de cabos, definiu-se que a execução da cobertura seria uma empreitada de Concepção/Construção, em que era dada liberdade aos concorrentes para propor alterações ao projecto original, desenvolvido pela aassociados. A proposta vencedora do concurso – do ASSOC-Obras Públicas, ACE / Soares da Costa – propunha uma solução com cabos “full locked coil” (da Tensoteci) que diferia da solução original em três aspectos: os cabos eram agrupados em pares afastados entre si de 3.75m, a espessura das lajes de cobertura era uniforme e as lajes seriam desligadas das vigas de coroamento.

A responsabilidade do projecto da cobertura passou deste modo a ser partilhada pela equipa de projecto da aassociados e pelo Adjudicatário ASSOC-Obras Públicas, ACE / Soares da Costa / Tensoteci.

As coberturas suspensas colocam desafios especiais aos engenheiros estruturais. Estes desafios são causados fundamentalmente pela acção do vento e pelo processo construtivo.

Pela sua dimensão e condições fronteira, uma cobertura deste tipo não pode ser calculada com recurso a valores regulamentares, recomendações normativas ou experiências anteriores.





O estudo do comportamento desta cobertura requer que se repensem todos os procedimentos usuais de projecto a partir dos seus fundamentos, desde o estabelecimento dos valores das acções a considerar até à previsão da resposta da estrutura passando pela possível interação entre ambos. Tornou-se, assim, necessário recorrer a modelos físicos (ensaios em modelo reduzido) que completassem os usuais modelos matemáticos (algoritmos processados por cálculos automáticos em computador) que, no caso presente, por muito sofisticados que fossem não eram suficientes para, por si só, estimar o valor das solicitações, nomeadamente da acção do vento, e representar o conseqüente comportamento da estrutura.

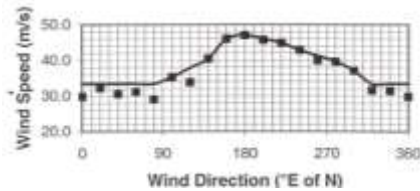
Daqui resultou a necessidade de realizar uma quantidade apreciável de cálculos e de ensaios independentes quer sobre a solução inicial quer sobre a solução final da cobertura que serão descritos adiante.

O processo de construção também apresentou grandes desafios. Como construir as palas muitos metros acima duma base sólida, numa área enorme e de uma maneira eficiente? E qual o efeito do processo construtivo na geometria final dos cabos e conseqüentemente das palas?



Esta solução de cobertura requer, naturalmente, uma estrutura que resista a grandes esforços horizontais, gerados pelos cabos, a uma grande altura acima das fundações. Como tal, exige-se um dimensionamento cuidadoso dos montantes das bancadas nascente e poente. Nesta última existe ainda uma excelente rocha granítica à cota dos cabos da cobertura, para onde se transmitem as forças desses mesmos cabos.





## A análise e o efeito do vento

Na vizinhança do local do Estádio, em Merelim, tinha sido instalada uma estação meteorológica moderna e automática, embora à data do projecto, registasse apenas trinta meses de existência. Este anemómetro fornece valores das velocidades média e máxima e suas direcções a cada dez minutos. Esses dados são depois tratados segundo procedimentos estatísticos estabelecidos<sup>14</sup> que permitem produzir curvas com as velocidades a considerar no local do Estádio, para as diversas direcções do vento.

Para obter a “descrição” do vento de projecto no local da obra para períodos de retorno de 100 anos foram usados os dados do anemómetro da Estação Meteorológica de Merelim tratados estatisticamente e convenientemente “corrigidos” para ter em conta os “escassos” trinta meses de registos.

Na análise dos valores extremos dos dados do anemómetro de Merelim recorreu-se ao método de Leiblein para velocidades de rajada independentes. Admitiu-se uma distribuição de extremos de Fisher Tippet tipo 1 com base no quadrado das velocidades do vento.

Para a determinação dos efeitos da topografia envolvente na velocidade média e na intensidade de turbulência do escoamento do ar na vizinhança do Estádio foram realizados ensaios em túnel de vento sobre modelo rígido à escala 1:1500. Estes ensaios foram realizados na Rowan Williams Davies & Irwin Inc. (RWDI, Canadá).



A obtenção do historial de pressões dinâmicas, em vários pontos da cobertura, provocadas pela acção do vento de projecto para cada uma das direcções consideradas foi efectuada a partir de ensaios em túnel de vento sobre modelo rígido à escala 1:400. A cobertura do modelo estava instrumentada com sensores de pressão em 200 posições distribuídos pela sua face superior e inferior. O registo das medições era feito de forma automática, tendo sido obtidas as respectivas séries temporais para ventos em 36 direcções distintas. Estes ensaios foram realizados na Rowan Williams Davies & Irwin Inc. (RWDI, Canadá).



O cálculo da resposta da estrutura à acção dinâmica do vento descrita pelo historial de pressões anteriormente obtido foi realizado de duas formas distintas.

A primeira, foi uma análise dinâmica determinista no domínio do tempo, por integração directa passo a passo das equações de equilíbrio dinâmico da estrutura baseadas numa análise elástica e linear de um modelo de elementos finitos de casca com matriz de rigidez geométrica que se assumiu como constante. A matriz de rigidez geométrica foi obtida a partir dos esforços axiais dos cabos devidos às cargas permanentes. Com esta análise obteve-se a resposta dinâmica da estrutura à acção dinâmica do vento. O deslocamento máximo calculado foi de 47 centímetros.

A segunda, foi uma análise dinâmica probabilista pelo Método da Decomposição Ortogonal. Este método baseia-se no princípio de que um campo de pressões multivariado e não estacionário pode ser eficazmente simplificado projectando-o num espaço gerado pelos vectores próprios da matriz de covariância do campo original. Esta técnica apresenta duas grandes vantagens. Em primeiro lugar, os novos campos (modos de pressão) são mutuamente não correlacionados. Em segundo lugar, o conteúdo energético do campo multivariado completo é normalmente bem representado por um número reduzido de componentes no espaço transformado, permitindo a representação do campo efectivo de pressões por meio de poucos modos de pressão. Com esta formulação obtém-se a estimativa da componente quasi-estacionária e da componente ressonante da resposta da estrutura em termos de tensões e deformações. Estes valores foram usados no dimensionamento de diversos elementos estruturais da cobertura.

A modelação matemática com base nos resultados dos ensaios em túnel de vento daqueles primeiros modelos físicos não permite garantir a não ocorrência de um comportamento aeroelástico da cobertura. Aliás, este tipo de comportamento das estruturas requer estudos especializados de grande complexidade. O problema mais delicado consiste na possibilidade do fluxo do vento em volta da estrutura provocar um comportamento ressonante dessa estrutura. Estas excitações podem ser forçadas – desprendimento de vórtices – ou interactivas – divergência, galope ou “flutter” (esvoaçar). Todos estes tipos de comportamento têm definições tecnicamente específicas<sup>15</sup>.

Embora tenha sido considerado que um tal comportamento seria muito improvável, considerou-se conveniente desenvolver modelos físicos aeroelásticos a serem testados em túnel de vento

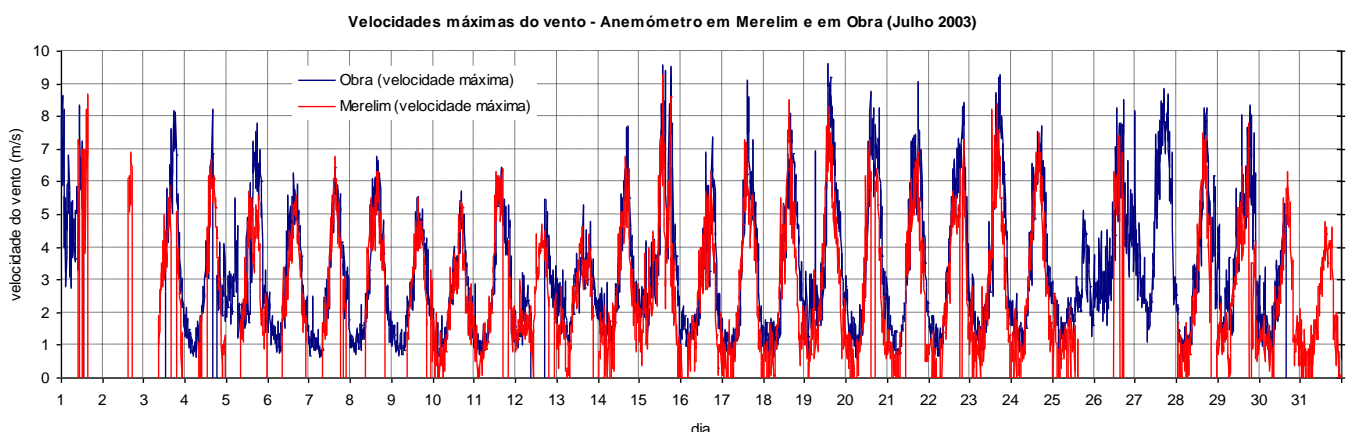
A estabilidade aerodinâmica da solução inicial ficou demonstrada por ensaios sobre um modelo aeroelástico à escala 1:200 realizado no Danish Maritime Institute (DMI, Dinamarca).

A não ocorrência de fenómenos de instabilidade aeroelástica da solução final foi provada por ensaios sobre um modelo igualmente aeroelástico à escala 1:70 realizado no Politécnico de Milano.

Ambos os ensaios demonstraram a estabilidade aeroelástica da cobertura, tendo o deslocamento máximo medido sido quase igual ao deslocamento calculado.

Todavia, na zona central, onde existem apenas os cabos, é possível que estes possam exibir algum daqueles comportamentos dinâmicos. Assim, decidiu-se que os pares de cabos serão ligados entre si e que a eles serão adicionados pequenos amortecedores.

Com o intuito de confirmar a validade da estimativa dos valores do “vento de projecto” com base nos registos do anemómetro de Merelim e de dissipar eventuais dúvidas acerca da intensidade de turbulência do escoamento do ar no local



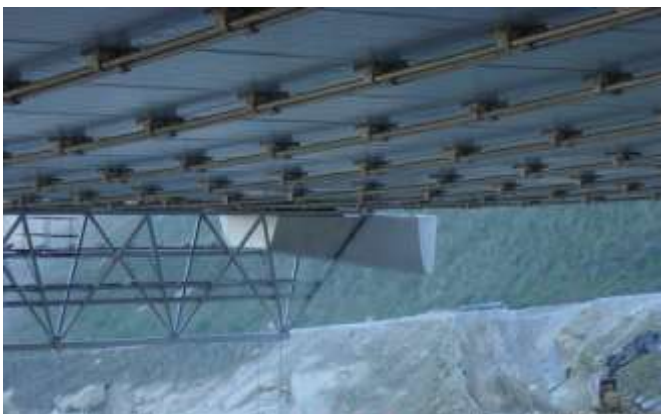
Para estudar a sensibilidade dos esforços de flexão da laje de cobertura a variações das forças nos cabos realizou-se uma análise probabilista. Considera-se a cobertura composta por uma laje em betão armado apoiada em  $n$  cabos e consideram-se os momentos flectores em  $m$  pontos da laje. Para uma determinada combinação de acções, os  $n$  cabos têm instaladas forças dadas pelo vector  $\epsilon$ . Vários factores podem produzir uma variação aleatória  $\Delta\epsilon$  dessas forças (desvios na aplicação do pré-esforço, distribuições não uniformes da temperatura, fluência diferencial). Considera-se que estes efeitos são representados pelo vector de variáveis aleatórias  $\Delta\epsilon$  com valor médio  $\mu$  e desvio padrão  $\sigma$ . O problema consiste, então, em estimar a probabilidade,  $P_f$ , dos momentos flectores aleatórios  $M$  resultantes serem maiores do que os momentos resistentes  $M_u$  nos  $m$  pontos da laje. Na resolução deste problema faz-se uso de uma simulação estocástica com base no método de Montecarlo conjugada com o “Método Orientado de Simulação” para a geração das variáveis aleatórias  $\Delta\epsilon$ .



### O escoamento das águas pluviais

O escoamento das águas pluviais da cobertura é feito no sentido do talude nascente, com um caimento de um por cento, que é conseguido através da variação de comprimento dos pares de cabos que a suportam. Duas grandes “gárgulas” em aço inox duplex, suspensas das lajes de betão encaminham a água para os “aquedutos”, também eles em aço inox, encarregados de a levar até à rede de águas pluviais e à linha de água existente no recinto do Estádio. Estes aquedutos com cerca de 40 m de comprimento, dos quais 27 em consola, apoiam-se nas banquetas do talude em pilares de comprimento variável, uma vez que as banquetas apresentam uma inclinação significativa. A estabilidade lateral destes aquedutos é garantida por um par de escoras ancorado à rocha do talude.

As dimensões destes dois dispositivos foram estabelecidas através do estudo do escoamento da água, tendo em conta a altura da queda, limitada inferiormente pelo deslocamento previsível da cobertura sob a acção do vento.





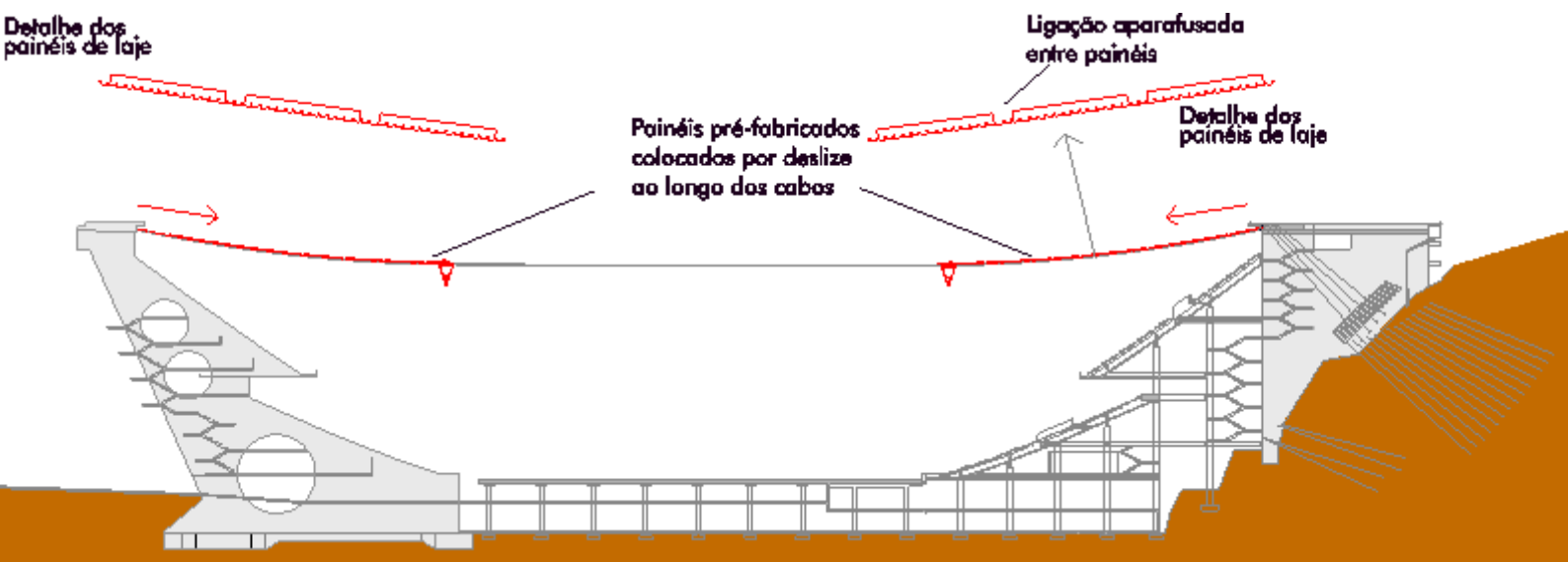
### O processo de construção

O processo de construção desta cobertura tem três problemas fundamentais: a pormenorização das palas, o sistema de montagem e o efeito do processo de montagem nas formas dos cabos suspensos.

A espessura da laje de betão armado é de 200 milímetros, tendo este valor resultado do compromisso entre a necessidade de massa estabilizadora e a minimização do seu peso. Claro, por razões práticas e económicas, o escoramento e a cofragem tinham de ser evitados. Portanto, a consideração de elementos pré-fabricados era inevitável. Os elementos escolhidos foram painéis com as dimensões tipo de 1,8 metros por 3,75 metros. Por baixo, têm uma chapa de aço que dá o acabamento e que se estende para fora dos limites do betão pré-fabricado para fornecer a cofragem para a execução in situ das juntas entre os painéis. Os painéis têm ainda peças metálicas que permitem a sua interligação, com parafusos, durante o processo de montagem

Os elementos pré-fabricados são montados sobre os cabos, no topo das bancadas. Cada novo elemento é ligado ao elemento prévio com parafusos, e os elementos deslizarão ao longo dos cabos por gravidade. Quando todos os elementos estiverem colocados, as juntas transversais e longitudinais entre os painéis são betonadas.





### Controlo de geometria e monitorização

O carregamento correspondente à instalação dos cabos e dos painéis pré-fabricados da cobertura constituiu um “verdadeiro ensaio de carga” dos elementos estruturais do Estádio, por esta razão a resposta de todo o sistema estrutural, em termos de tensões e deformações, foi acompanhada com cuidado especial de modo a poder identificar e analisar antecipadamente possíveis “desvios” em relação ao comportamento teórico previsto.

O acompanhamento “fase a fase” da resposta da estrutura durante a montagem da cobertura bem como a sua “interpretação mecânica” foram uma “garantia” de que não haveria “surpresas” na geometria final pretendida para o sistema de cabos que dão forma a esta cobertura única.



A forma final da cobertura seria sempre função do peso da cobertura, da força instalada nos cabos e da rigidez dos elementos de suporte (viga de coroamento e montantes das bancadas). A importância relativa de qualquer um destes factores foi avaliada e o acompanhamento da resposta da estrutura incluiu obrigatoriamente as “parcelas” referentes a cada um deles.

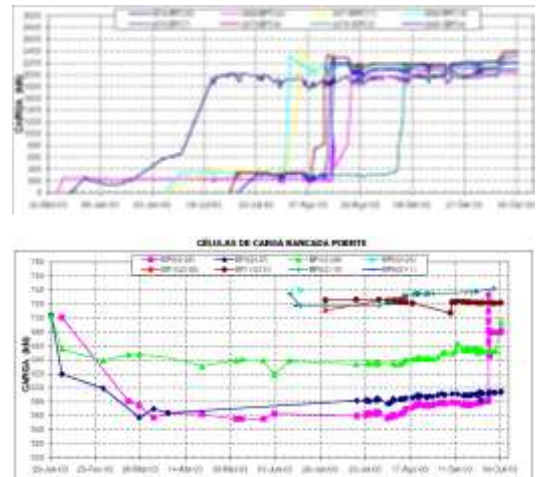
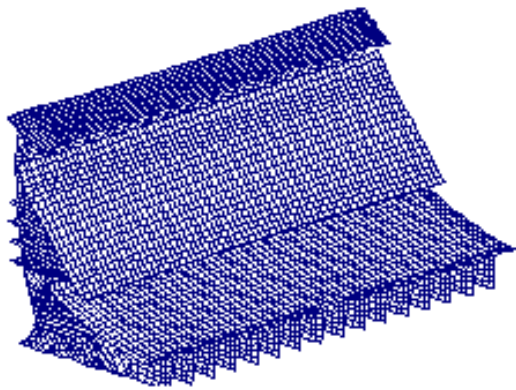


Para este efeito tornou-se necessário efectuar um “controlo apertado” de todas as cargas aplicadas aos cabos da cobertura. Em conjunto com o registo das cargas aplicadas, as operações de controlo geométrico com recurso aos levantamentos topográficos e a recolha e tratamento da informação fornecida pelo sistema de monitorização (instrumentação “interna” da estrutura e instrumentação dos maciços rochosos e fundações) foram imprescindíveis para a análise do comportamento da estrutura durante a montagem da cobertura do Estádio.

O acompanhamento do comportamento dos elementos estruturais do Estádio durante a montagem da cobertura foi realizado recorrendo à informação recolhida pelo sistema de instrumentação instalado, nomeadamente:

Células de carga nos cabos da cobertura | Instrumentação “interna” da estrutura de betão (extensómetros clinómetros e termómetros nos montantes da Bancada Nascente) | Instrumentação dos maciços rochosos e fundações | Células de carga nas ancoragens ao terreno | Inclínómetros “in place”.





A organização e a interpretação dos dados recolhidos durante todo o processo permitiram que, no espaço de tempo que decorreu até final da montagem dos elementos da cobertura, os modelos matemáticos usados em fase de projecto fossem continuamente aferidos e, eventualmente, corrigidos para serem coerentes com os valores medidos em obra. Assim se definiram os critérios para o estabelecimento da correcção a efectuar à geometria teórica de referência da cobertura para ter em conta o comportamento real da obra e as condições climáticas da data em que foi realizado o ajuste final de geometria previsto desde início.

Salienta-se que a existência de desvios na geometria da cobertura e/ou nas forças instaladas nos cabos em relação aos valores previstos, obrigaria a uma análise cuidada da sua repercussão na forma final da cobertura e nas forças finais dos cabos (tendo presente os limites regulamentares usados em fase de projecto).

Em fase de serviço, a monitorização estrutural do novo Estádio Municipal de Braga será realizada através de um sistema de controlo electrónico de diversos parâmetros estruturais, tanto estáticos como dinâmicos. O referido sistema será gerido informaticamente, permitindo o registo de dados discretos ou o registo quase em contínuo, de acordo com a natureza da grandeza a medir e a localização do instrumento.

Além dos sensores de instrumentação estática já mencionados (quer na estrutura de betão, quer nos maciços rochosos) salienta-se a monitorização de carácter dinâmico constituída por 3 acelerómetros triaxiais colocados nos pontos de maior amplitude de vibração da cobertura e por células medidoras da pressão do vento em vários pontos da face inferior e superior das palas da cobertura.



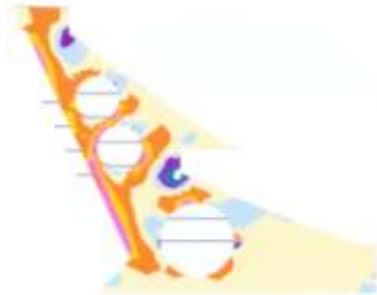
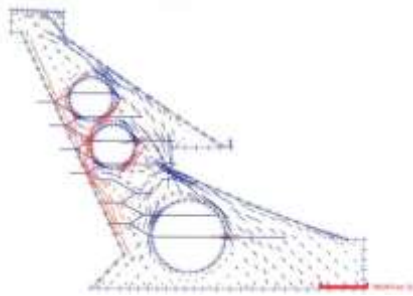


### **A Bancada Nascente**

Percorrendo a alameda de acesso ao estádio, atinge-se a Bancada Nascente à cota +98.00. A bancada apoia-se em dezasseis lâminas verticais (montantes) de espessura constante e igual a 1,0 metro, que “arrancam” à cota +87,80 e atingem a cota +142.85. O acesso às bancadas faz-se por rampas alternadamente descendentes e ascendentes. As rampas descendentes permitem cruzar um amplo espaço existente imediatamente abaixo da cota do relvado, dando acesso à Bancada Poente. As rampas ascendentes permitem ter acesso aos lugares das bancadas superior e inferior, e a todas as áreas de apoio existentes nesta bancada como as zonas de circulação, as instalações sanitárias, os camarotes e os bares.

A circulação vertical realiza-se por escadas localizadas entre montantes que, a partir da cota +110, têm os patamares intermédios em consola (para fora dos montantes). Existem ainda dois elevadores panorâmicos que permitem o transporte de cargas e pessoas entre as cotas +98 e a cota +112. As infraestruturas hidráulicas e eléctricas “circulam” no interior dos montantes e das lajes, desde o nível da fundação até ao nível da cobertura.





Estruturalmente, a Bancada Nascente funciona sem qualquer junta de dilatação. Assim, o conjunto dos 16 montantes com as lajes dos pisos e das bancadas, estabilizam a estrutura desta bancada tanto às acções verticais como às horizontais.

Desde o início do projecto que se percebeu que uma cobertura “suspensa” entre as duas bancadas, teria como principal condicionante a estrutura do lado Nascente, em que a ancoragem dos cabos é feita a mais de 50 metros da cota de fundação. A estrutura desta Bancada deveria assim ajustar-se o mais possível a esta realidade, tendo havido a preocupação de ajustar a geometria dos montantes de modo a que a resultante da combinação das acções gravíticas da bancada com as elevadas forças transmitidas pela cobertura minimizasse os desequilíbrio de momentos ao nível da fundação. Numa primeira fase, este objectivo foi parcialmente atingido. Com o evoluir do projecto e com a implementação das exigências de funcionalidade do Estádio, o equilíbrio ao nível da fundação não foi totalmente conseguido, mantendo-se no final um razoável ajuste da solução.

Na análise da estrutura da Bancada Nascente utilizaram-se diversos programas de cálculo de estruturas bidimensionais e tridimensionais representativos de toda a estrutura da bancada. Ao nível das acções, a sísmica condicionou o dimensionamento dos elementos verticais, devido ao elevado “peso” existente à cota mais alta, isto é, ao nível da cobertura. Dado tratar-se de uma estrutura sem juntas de dilatação, a temperatura e a retracção revelaram-se igualmente acções de grande importância no dimensionamento final. Foi devido a estas acções que, o piso à cota +93,24 foi projectado completamente desligado dos montantes, criando-se um sistema de pórticos independentes que, no entanto, se apoiam na fundação dos montantes.



Os montantes são em betão armado (C35/45 + A500). As faces laterais são em “betão à vista”, tendo a arquitectura desenhado toda a estereotomia das cofragens. Para a circulação horizontal existem três grandes aberturas circulares, uma com 14 metros de diâmetro e as outras duas com 8,5 metros, que são atravessadas por lajes com uma extensão de aproximadamente 125 metros.

As lajes dos pisos apoiam-se nos montantes e em vigas metálicas sempre que o local de apoio são as aberturas circulares. Nesta zona as vigas metálicas funcionam em conjunto com as lajes como vigas mistas. As escadas são em betão armado e apoiam-se entre montantes, vencendo um vão livre de 6,5 metros. No topo dos montantes existe uma viga de grande rigidez segundo a direcção dos cabos da cobertura (viga de coroamento), que garante a transição entre os cabos da cobertura e os montantes.

Ao nível das fundações, apareciam os três tipos de estratos definidos no reconhecimento geológico-geotécnico (ZG1, ZG2 e ZG3). Esta heterogeneidade mereceu especial importância tendo-se efectuado várias análises representativas do comportamento global da estrutura com interacção solo-estrutura. **Atendendo à sensibilidade da estrutura a assentamentos de apoio manifestada nos modelos numéricos, optou-se por uma substituição dos terrenos de menor qualidade por betão ciclópico, garantindo assim que toda a estrutura está fundada sobre rocha.**



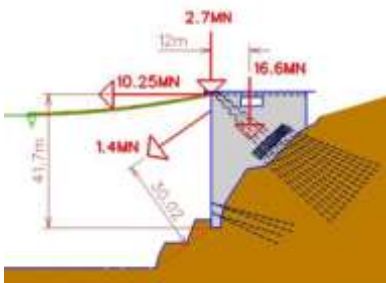
### A Bancada Poente

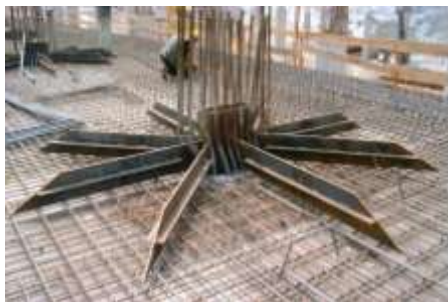
A bancada Poente do estádio encontra-se “encaixada” num maciço granítico cuja cota superior corresponde ao nível da praça que lhe dá acesso.

É nesta bancada que, durante o Euro 2004, ficarão instalados todos os jornalistas e VIP’s, contando ainda com áreas reservadas à restauração. As áreas ocupadas pelos pisos abaixo da cota do relvado (+98.00), destinam-se a zonas de circulação, balneários, posto médico, bombeiros, etc. A circulação vertical processa-se por escadas e por elevadores que, na sua maioria, são panorâmicos.

A relação dos espaços de circulação situados sob as bancadas com o “marcante” talude rochoso, caracterizado por cortes irregulares e fortemente diaclasado, tinha que ser privilegiada no Projecto. Nesse sentido, a estrutura das zonas de circulação e comunicações verticais deveria ser o mais leve possível, deixando o protagonismo para a rocha e a sua ligação com os montantes de apoio da cobertura.

Tirando partido do facto da praça superior (Poente) se encontrar à mesma cota da cobertura, a estabilização da estrutura às acções horizontais transmitidas pelos cabos da cobertura é conseguida por ancoragens “directas” ao maciço. Existem nesta zona de transição, entre a cobertura e o maciço, dezoito montantes com uma espessura constante igual a 1,0 metro, que se ajustam às irregularidades do talude.





As lajes dos pisos são invertidas, isto é, alinham a sua face inferior com a face inferior das vigas que lhe dão apoio. Sobre estas lajes inferiores existem lajes mistas que se apoiam em blocos de betão e que vencem vãos de aproximadamente 2,4 metros. Deste modo, entre a laje inferior e as lajes mistas, conseguem-se espaços com altura livre de aproximadamente 65 cm, utilizados para a passagem de condutas das Instalações Hidráulicas, Eléctricas e AVAC.



Os degraus das bancadas são pré-fabricados e apoiam-se em vigas inclinadas em betão armado e pré-esforçado, continuas ao longo de 16 alinhamentos na direcção dos eixos dos montantes. Imediatamente abaixo dos degraus das bancadas, colocam-se painéis pré-fabricados. Dadas as características do maciço de fundação, as fundações da estrutura são do tipo directo (sapatas). O apoio de pilares e montantes em zonas do maciço bastante fragmentado e na proximidade da crista de taludes, obrigou a que fossem executadas estabilizações locais com recurso a ancoragens definitivas.

A estrutura da bancada Poente, sendo porticada, poderia, tal como acontece com a maioria das estruturas deste género, ser considerada auto-suficiente para travamento segundo o plano horizontal. Dada a esbelteza dos pilares e o modo quase sempre excêntrico com que as vigas se apoiam, limitou essa possibilidade. Houve assim que tirar partido das lajes à cota 112 e 116, pisos 2 e 3 respectivamente, que funcionando como diafragmas horizontais rígidos, conferem um adequado travamento às acções horizontais apesar do reduzido número de ligações destas aos montantes. A irregularidade existente ao nível dos pisos e a configuração das bancadas (inclinadas), obrigou a que todo o cálculo se efectuasse sobre modelos tridimensionais globais. Nestes modelos representaram-se vigas, lajes, pilares e paredes, de acordo com os espaços requeridos pela Arquitectura.



Esta estrutura, dotada de um elevado grau de hiperestacidade, é muito sensível a assentamentos de apoio, o que obrigou a um grande cuidado no controlo de possíveis assentamentos não só através do cálculo da estrutura considerando a interacção solo/estrutura, mas também ao melhoramento e uniformização do comportamento do solo de fundação.

As reacções da cobertura e as componentes horizontais da reacção das bancadas determinaram o dimensionamento dos montantes. Sendo esta uma peça fundamental para a estabilidade global do estádio, e encontrando-se os montantes fundados em zonas de características geotécnicas diversas, houve que desenvolver modelos representativos da interacção solo/estrutura que permitiram confirmar o dimensionamento das ancoragens e confirmar o estado de compressão permanente entre os montantes e o talude em rocha. Desta forma foi possível confirmar o equilíbrio global dos montantes em relação às cargas a eles transmitidas e proceder ao seu dimensionamento interno, incluindo as fundações.



O nível superior das ancoragens transmite de um modo “quase directo” a maior percentagem de carga horizontal ao maciço rochoso. O nível inferior de ancoragens desempenha uma papel fundamental na correcção da orientação da reacção do montante na sua fundação, cuja resultante fica assim orientada para o interior do maciço, necessário face ao estado de fracturação do maciço sob a fundação.

Em face da sensibilidade da estrutura a assentamentos e atendendo ao papel fundamental que as ancoragens desempenham no equilíbrio global da estrutura do Estádio, houve que definir um faseamento construtivo que viabilizasse a entrada em funcionamento da estrutura conforme projectado. O facto de haver várias peças pré-esforçadas e de 5 montantes se encontrarem fundados em saibro reforçaram essa necessidade. Esta necessidade contrariava no entanto a questão de a força das ancoragens não dever ser aplicada na totalidade antes de ser executada a cobertura, uma vez que lhe corresponderia uma compressão exagerada no maciço. Foram então simulados e calculados diversos cenários para diversos faseamentos possíveis, tendo-se concluído pela aplicação de apenas 20 % da força das ancoragens antes da execução da cobertura, deixando para depois o tensionamento final, o que obrigou à verificação da capacidade resistente das diferentes peças tendo em vista os esforços resultantes da aplicação destas cargas numa estrutura hiperestática já construída.

A construção dos montantes 1 a 5, assentes em saibro (mais deformável portanto) iniciou-se com a construção de uma viga de fundação ancorada ao maciço tendo sido de imediato aplicada a totalidade da força prevista, de modo a que a estrutura final fosse construída já depois dos assentamentos se verificarem. Nos montantes assentes sobre rocha (6 a 18), de modo a minimizar os efeitos dos assentamentos que o elevado estado de fracturação do maciço fazia prever, foram realizadas ancoragens provisórias que lhe conferiram um estado de pré-compressão, e que foram sendo desactivadas em simultâneo com o tensionamento das ancoragens definitivas.





### **O Relvado**

A entrada das viaturas para o estádio faz-se através de um túnel pré-fabricado com o topo em abobada, inserido num dos taludes que delimitam a Poente o relvado. O acesso a partir do túnel dá ligação directa ao piso -2 (+87,80). Nesta área existe um amplo espaço para estacionamento de viaturas ligeiras e autocarros. Junto à área da Bancada Poente localiza-se o “programa” definido pela UEFA para utilização durante o EURO2004, onde se destaca um auditório, salas de recepção, salas de trabalho, etc. Ainda neste piso, localizam-se as cisternas para rega de segurança contra incêndios, assim como outras infraestruturas eléctricas do estádio. O piso -1, à cota +93,24, consiste num amplo espaço de circulação entre as bancadas Nascente e Poente e ainda numa área destinada aos balneários de jogadores, treinadores e árbitros. Esta área é delimitada por uma parede em betão à vista. O relvado localiza-se à cota +98,0 e tem uma dimensão de aproximadamente 125x80 m<sup>2</sup>. Em todo o contorno do campo de jogos (relvado), existe um “fosso” fechado por um gradil metálico, que permite a entrada de luz para o piso -1 e, simultaneamente, a circulação nesta zona de pessoas e viaturas em caso de emergência. A drenagem do relvado é assegurada por um sistema de drenos instalados sobre o relvado e ainda por pendentes superficiais. As águas drenadas são conduzidas a uma caleira periférica, ao longo do perímetro do relvado.

À semelhança do que acontece nas Bancadas Nascente e Poente, as infraestruturas eléctricas e hidráulicas existentes nas áreas em que exista betão à vista, tais como: iluminação, sistemas de detecção de incêndio, CCTV, etc, encontram-se no interior destes elementos (lajes e pilares).



Estruturalmente, a zona ocupada pelo Relvado é formada por pilares de secção circular com diâmetro constante de 0,70 metros, que apoiam as lajes fungiformes dos pisos -1 e 0. Estes pilares têm um espaçamento regular em planta com 9,35 m numa das direcções e 7,5 m na outra. A laje do piso -1 é maciça e tem uma espessura total constante de 0,35 m.

A laje que dá apoio ao campo de jogos tem uma espessura constante de 0,50 m e suporta, para além das cargas prevista no relvado, toda o sistema que constitui o relvado e perfaz uma espessura média total de 1,10 metros, onde se incluem os sistemas de impermeabilização e drenagem inferior. No topo dos pilares existem capiteis troncocónicos com um diâmetro mínimo de 0,70 m e máximo de 3,90 m.

Existem pilares fundados imediatamente abaixo do piso -1 e outros sob a laje térrea do piso -2. A diferente rigidez entre estes dois tipos de pilares, foi o motivo para a colocação de aparelhos de apoio em neoprene cintado no topo dos pilares mais rígidos (fundados abaixo do piso 1), evitando assim esforços exagerados resultantes da retracção do betão e de gradientes térmicos. A necessidade da colocação destes aparelhos de apoio condicionou a configuração final do remate entre o topo dos pilares e o capital troncocónico, criando-se um aspecto visual idêntico entre os pilares com aparelho de apoio e os que não o têm (com continuidade). As fundações são do tipo directas (sapatas).





### Escavação geral e contenção

Para se construir o estádio no interior de um “Monte Castro”, foi necessário retirar aproximadamente 1,7 milhões de m<sup>3</sup> de material rochoso. Apesar do primeiro reconhecimento geológico-geotécnico realizado no local, revelar um granito heterogéneo, com boas características mecânicas em algumas zonas apresentando-se noutras bastante alterado, o decorrer da escavação, confirmou um cenário pior: o talude maior (Nascente) tinha apresentava-se bastante diaclasado, com inclinações na direcção do próprio talude variando entre 45 e 50°. Esta realidade inviabilizou a obtenção de uma “parede vertical” como pretendido inicialmente, obrigando à criação de banquetas e à contenção de todo o talude. A escavação teve assim que decorrer de um modo muito mais lento já que a contenção prevista em projecto (ancoragens e pregagens) deveria de evoluir, de cima para baixo, ao ritmo da escavação. Apesar disso, houve zonas em que não foi possível evitar deslizamentos de blocos, daí resultando as superfícies visíveis do talude de rocha – os “lisos”. Como resultado destes deslizamentos e de uma falha entretanto detectada, com uma orientação NW-SE, houve que proceder a uma translação do Estádio para Poente em relação ao inicialmente previsto em cerca de 20 metros. Para a estabilização dos taludes utilizaram-se ancoragens e pregagens definitivas, realizadas com varões em aço de alta resistência com diâmetros 36 e 32 mm respectivamente. A força instalada nas ancoragens é de 600 kN e o aço é do tipo 835/1030.

O Talude Poente, com dimensões muito menores que o nascente, apresentava problemas de estabilização muito menores que o Nascente já que a inclinação das famílias de diáclases principais era favorável. A estabilização deste talude foi garantida também com a utilização de pregagens e ancoragens.

Os taludes foram instrumentados com 10 células de carga nas ancoragens e com quatro inclinómetros “in place” com um comprimento total de 20 metros/cada. As leituras destes sensores têm sido regularmente acompanhadas de modo a serem avaliadas eventuais fenómenos não espectáveis no maciço. Futuramente, tanto as células de carga como os inclinómetros “in place” serão integrados no sistema global de monitorização da estrutura do estádio que fará uma gestão automática e permanente de todos os sensores instalados



## Infra-estruturas

O terreno onde se vai localizar o Complexo era atravessado por uma linha de água que corria ao longo do vale e por um colector de saneamento da cidade de Braga. Ambos tiveram que ser desviados, provisoriamente primeiro, durante a construção e definitivamente no final. A linha de água foi canalizada sob a actual Praça Nascente, descarregando num canal a céu aberto. O desnível entre a praça nascente e a sua ligação a jusante, é vencido através de diversas quedas de água. O colector de saneamento segue agora dentro da galeria técnica que liga o Estádio à Rotunda, sob a avenida de acesso. Esta galeria, realizada com “box-culverts” pré-fabricados, transporta ainda os cabos de alimentação de electricidade, telefones e o ramal de abastecimento de água.

A implantação de qualquer destas infraestruturas obrigou à execução de valas com profundidades significativas (15 m nalguns casos) e à adopção de soluções diversas para a sua fundação, dada a heterogeneidade dos solos atravessados, que iam desde a rocha (na zona do Estádio) até grandes espessuras de material aluvionar na zona do vale.

<b>Quantidades Gerais</b>		
<b>Empreitada de Escavação</b>		Agosto 2000 a Fevereiro 2002
Volume de rocha escavada	1.013.515m <sup>3</sup>	
Volume de saibro escavado	698.496 m <sup>3</sup>	
<b>Empreitada de Contenção de Taludes</b>		Agosto 2000 a Fevereiro 2002
Ancoragens	5.504 m	
Pregagens	724 m	
<b>Empreitada de Estruturas</b>		Fevereiro 2002 a Setembro 2003
Betão	88.958 m <sup>3</sup>	
Aço A500 em armaduras ordinárias	14.722.495 kg	
Aço em perfis e chapas	1.006.81 kg	
Aço Inox	107.296 kg	
Cofragem	230.580 m <sup>2</sup>	
Cabos em Full Locked Coil na cobertura	1.3.736 m (517.657 kg)	
<b>Arranjos Exteriores</b>		Junho 2003 a Setembro 2003
Áreas pavimentadas	37.530 m <sup>2</sup>	
Áreas ajardinadas	9.800 m <sup>2</sup>	

# Anexo

## Galeria de Desenhos

