

# Sbo

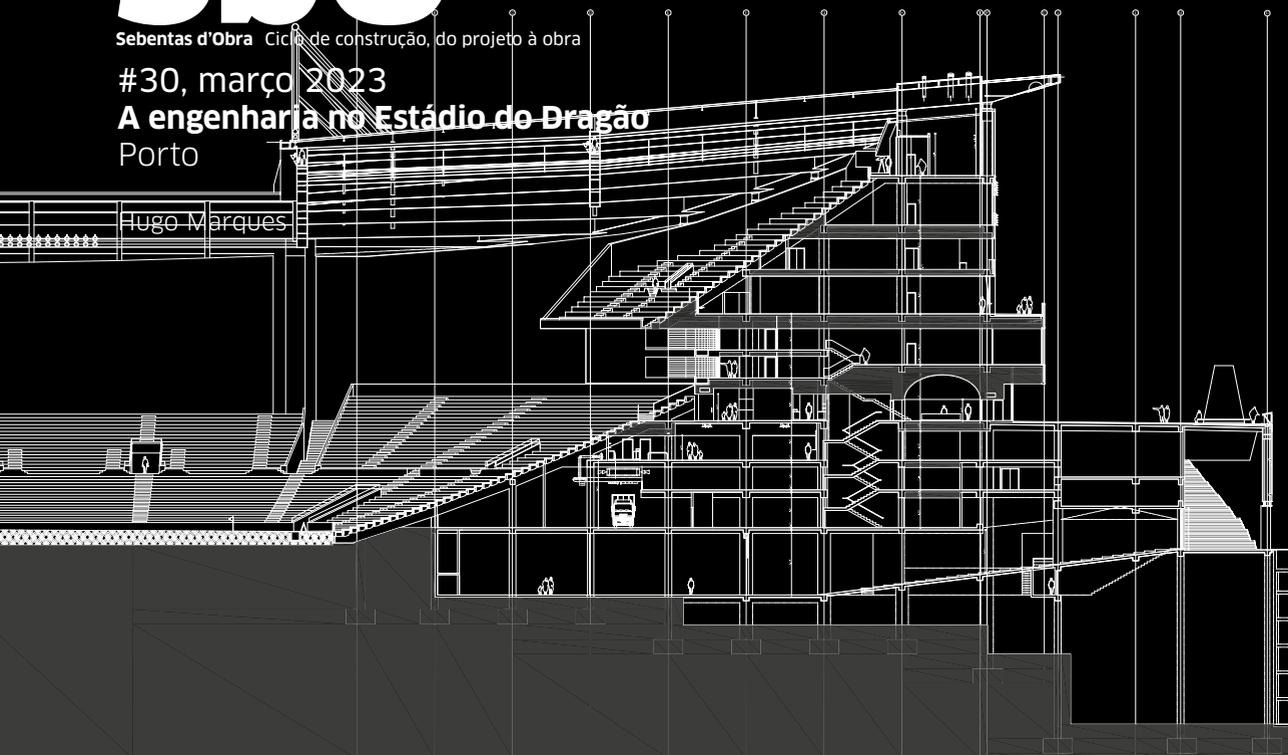
Sebentas d'Obra Ciclo de construção, do projeto à obra

#30, março 2023

A engenharia no Estádio do Dragão

Porto

Hugo Marques



**Editor**

Cadernos d'Obra

**Diretor**

Bárbara Rangel

**Coordenação Editorial**

Bárbara Rangel

**Conceção Gráfica**

Teresa Seródio

**Texto**

Hugo Marques

O texto está escrito sem considerar o acordo ortográfico atual.

**Créditos Fotográficos**

Arquivo GEG

**Impressão**

Rainho e Neves

Março 2023

Depósito legal: 336727/11

ISSN 2184-6065

Tiragem: 500 exemplares

**Publicação periódica**

n.º 30. Ano XII, março 2023

**Propriedade**

FEUP/DEC

R. Dr. Roberto Frias s/n

4200-465 Porto

Portugal

Tel./fax: + 351 22 508 19 40

cdo@fe.up.pt

É proibida a reprodução sem a autorização escrita dos autores e do editor.

A exatidão da informação, os copyrights das imagens, as fontes das notas de rodapé, bem como a bibliografia, são da responsabilidade dos autores dos artigos, razão pela qual a direção da revista não pode assumir nenhum tipo de responsabilidade em caso de erro ou omissão.

A iniciativa “Fora de Portas engenharia civil à mostra”, resulta da colaboração entre o Departamento de Engenharia Civil da FEUP, a Mostra da UP e o Município do Porto. Realiza-se no contexto da iniciativa Porto Innovation Hub (PIH), que pretende envolver os cidadãos e visitantes da Invicta na descoberta da inovação que transformou a cidade nos últimos séculos. Através da visita a locais históricos e infraestruturas emblemáticas do Porto, procura-se demonstrar o impacto direto da inovação na melhoria da qualidade de vida dos cidadãos. O PIH é uma iniciativa do Município do Porto que pretende ser uma plataforma para o fortalecimento do ecossistema de inovação e empreendedorismo da cidade, contribuindo desta forma para que o Porto se possa destacar no panorama nacional e internacional como uma cidade inovadora e criativa. O PIH propõe a criação de um espaço de experimentação e laboratório vivo, potenciando cenários e oportunidades de desenvolver novos produtos, métodos ou conceitos à escala urbana, contribuindo, assim, para a cultura de transformação para a inovação.

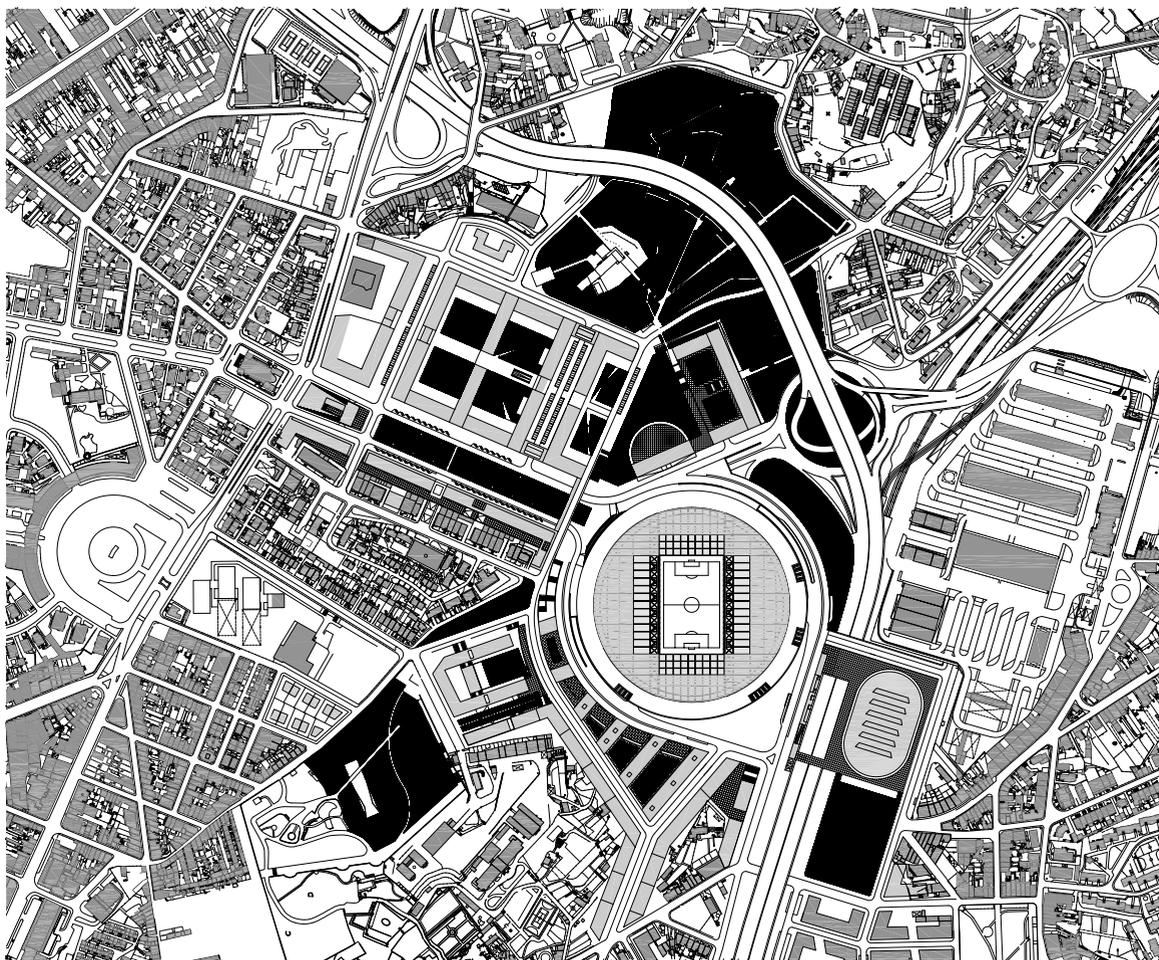
# A engenharia no Estádio do Dragão

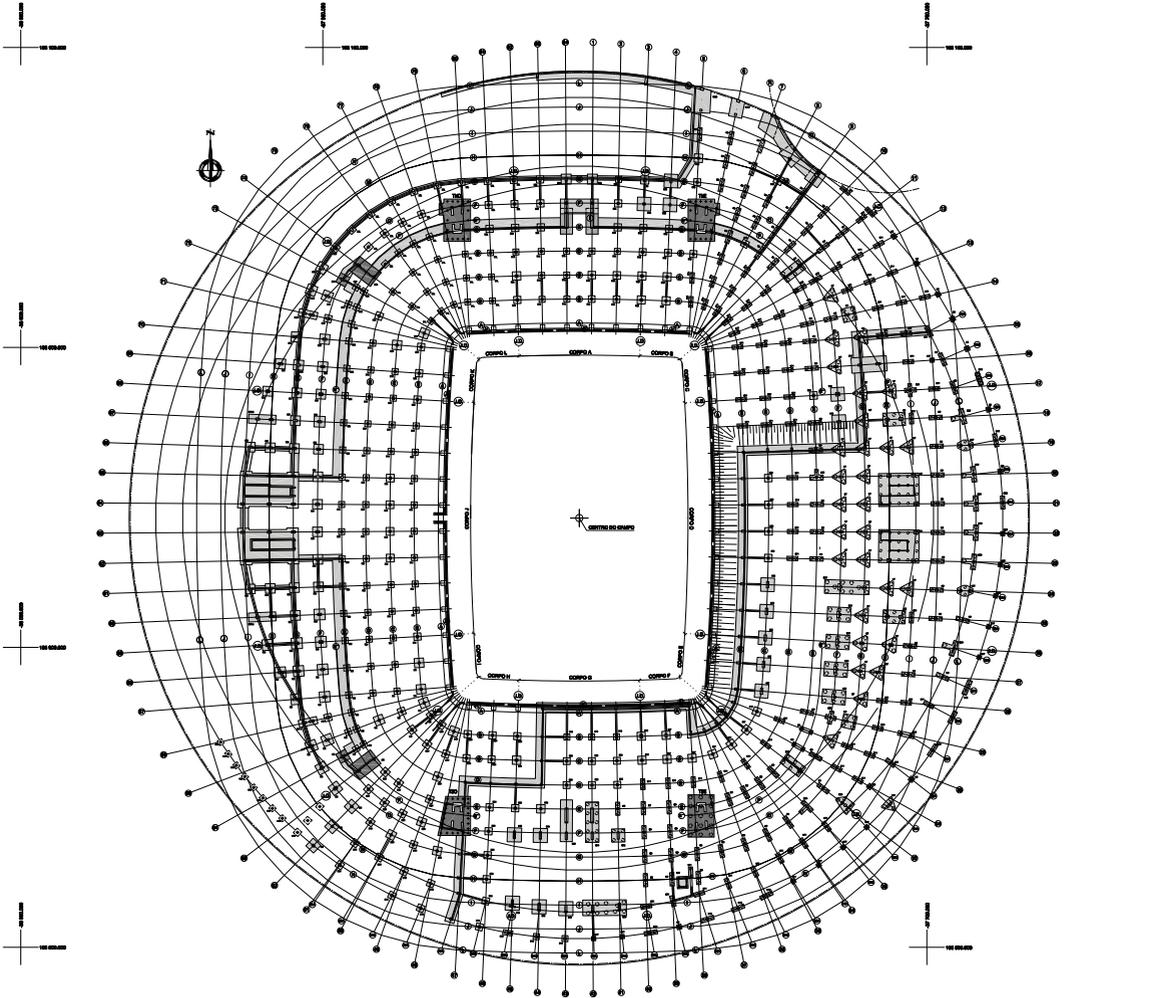
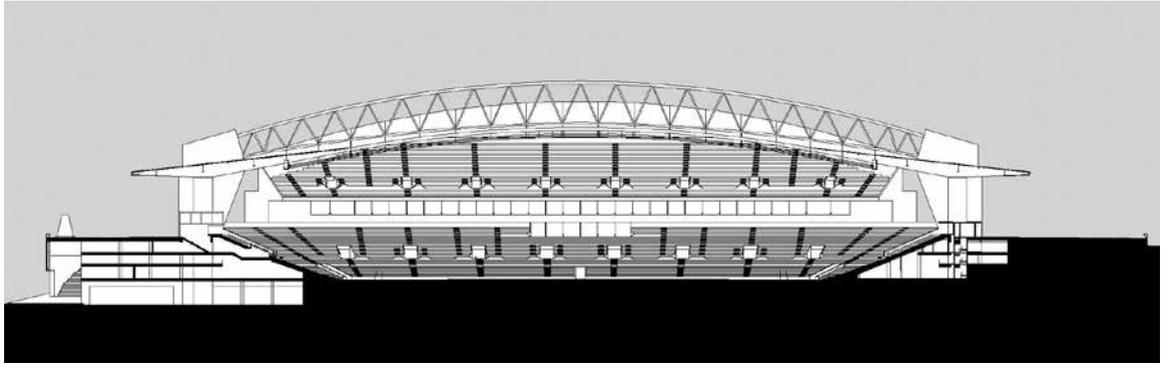


O Estádio do Dragão é um equipamento âncora do projecto de reabilitação urbana da zona das Antas na cidade do Porto e corresponde à concretização do conceito de equipamento desportivo, lúdico, recreativo e comercial. A sua utilização não se limita à realização periódica de jogos de futebol. Este espaço procura captar diferentes populações através da oferta de uma grande diversidade de actividades exercidas nas melhores condições, podendo desatacar-se os espaços comerciais e de serviços, a clínica, o health-club e o museu, estando todos estes espaços integrados num único edifício multiusos concebido para os receber.

Tendo passado quinze anos a após a sua inauguração o Estádio do Dragão provou ser indiscutivelmente uma nova centralidade integrada no projecto de reabilitação urbana da zona das Antas na cidade do Porto, sendo ambos os projectos da autoria do Arq.º Manuel Salgado.

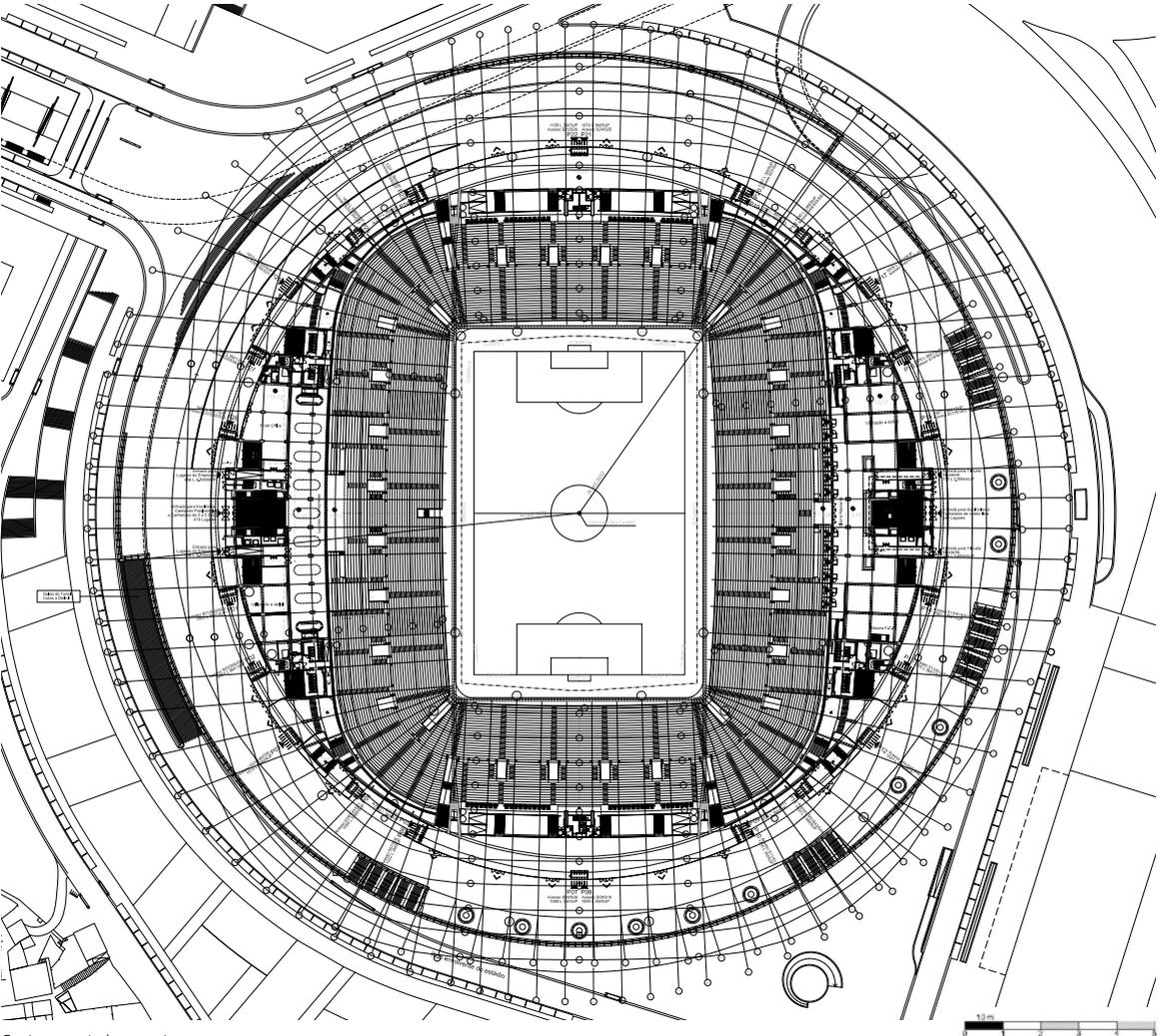
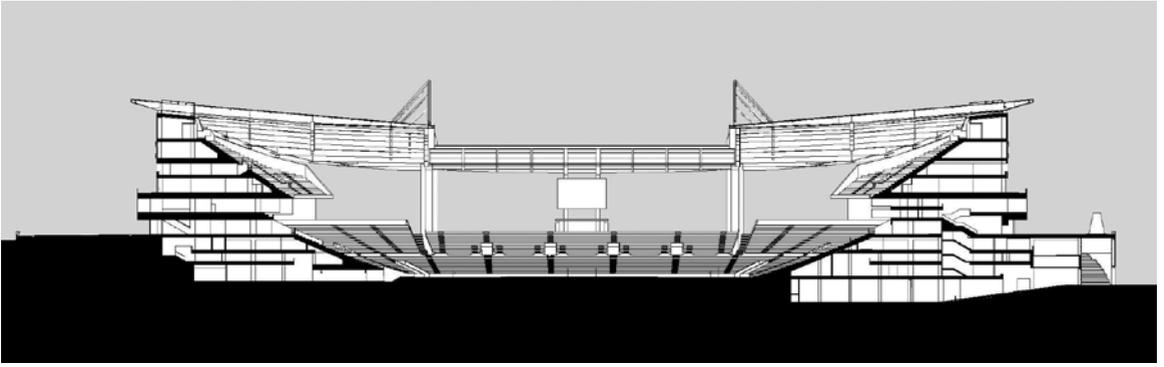
O Estádio do Dragão é um equipamento de grande importância urbana no redesenho da zona das Antas. Para reduzir o impacto da sua escala face aos edifícios envolventes, a implantação do Estádio tira partido das particulares condições declivosas do terreno. A alameda, os principais caminhos pedonais, a estação de metro, as paragens de autocarro e as saídas dos parques de





Corte Sul/Norte  
Implantação geral das fundações





Corte poente/nascente  
Piso 0

estacionamento convergem numa grande praça circular que serve de base à implantação do estádio.

A solução de 'escavar' a bancada inferior na praça permitiu reduzir a cerca de metade a massa aparente do estádio, já que este elemento funciona como uma plataforma encaixada no terreno, a meia cota entre o topo da alameda e a zona baixa no contacto com a VCI (via circular interna do Porto).

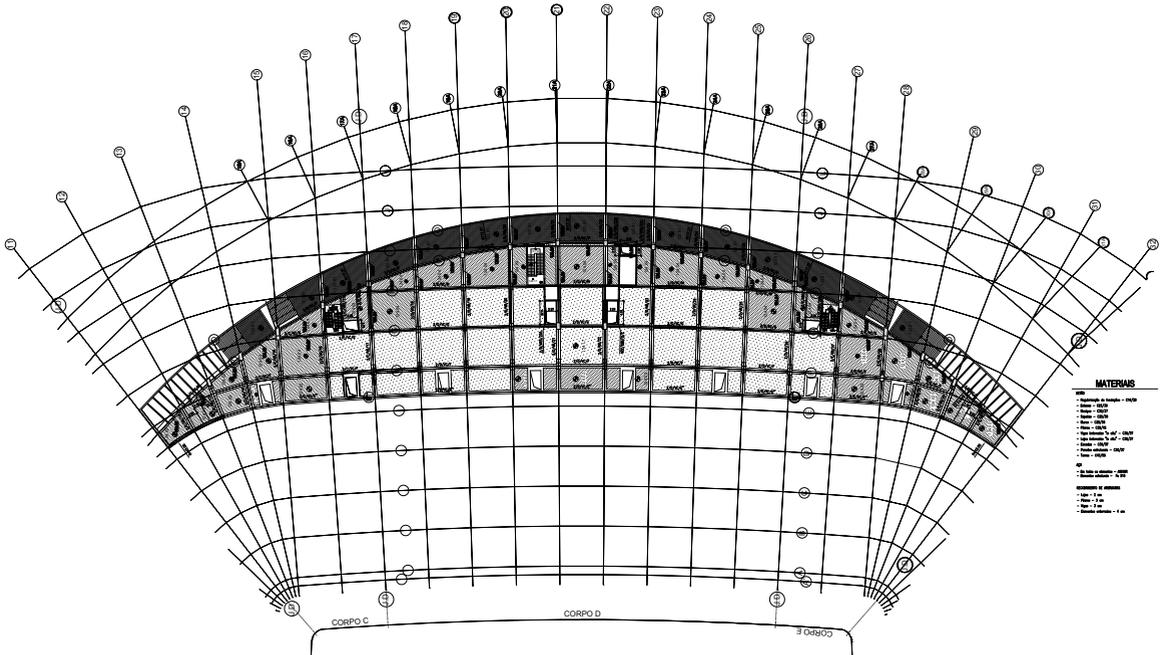
As bancadas superiores, que limitam o campo a Nascente e a Poente, estão descoladas da praça e desenhadas como edifícios isolados. Ao abrir as cabeceiras (topos norte e sul) ao nível da praça, permite-se a criação de aberturas com vistas para a cidade o que contribui para atenuar o impacte urbano do edifício.

*Descrição da arquitectura - Texto obtido em <https://www.risco.org>*

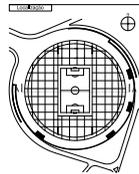
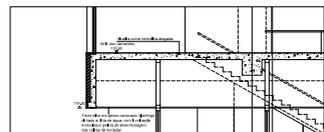
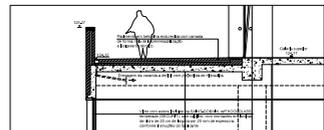
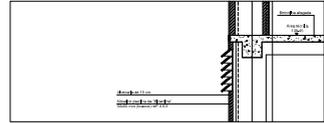
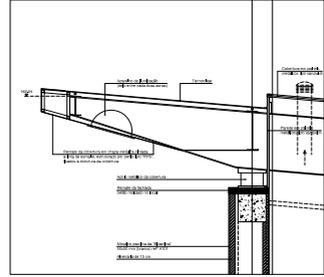
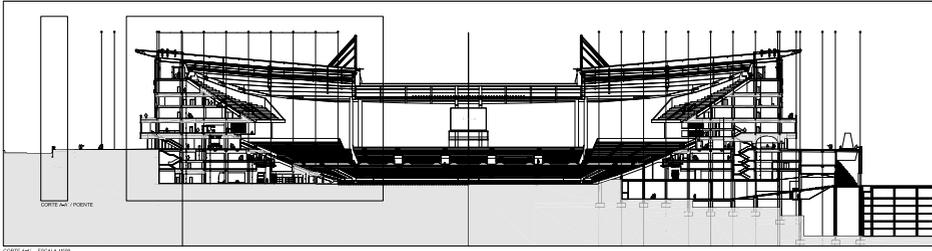
O projecto de estruturas foi realizado pelos gabinetes GEG, Gabinete de Estruturas e Geotecnia Lda. responsável pelo projecto de estruturas de betão armado e fundações e GRID, Consultas Estudos e Projectos de Engenharia Lda. que desenvolveu o projecto da cobertura.



O estádio tem uma capacidade para 50.948 espectadores distribuídos numa área de bancada coberta de 32.400 m<sup>2</sup>, com 1.177 lugares de estacionamento. Na sua execução foram empregues 69.500 m<sup>3</sup> betão, 11.800 toneladas de aço em armaduras, 89.100.000 kNm em pré-esforço, 106.400 m<sup>2</sup> de pré-lajes e 25.000 m lineares de elementos de bancada pré-fabricados.



Planta estrutural piso 2, nascente



CORTE PARCHEL 141 - ESCALA 1:50



CORTE PARCHEL 141 - ESCALA 1:100

Corte A



## Descrição da estrutura

O estádio é um edifício com 6 pisos acima do nível da Praça (Piso 0) e quatro pisos enterrados tanto na bancada Nascente como Sul.

As estruturas de betão resistentes do estádio são essencialmente constituídas por conjuntos de pórticos principais distribuídos radialmente, afastados de 8.5 m no intradorso até 10.5 m na periferia, compostos por pilares e vigas de betão armado que suportam os pavimentos e as bancadas, sendo, neste último caso, vigas inclinadas.

Este conjunto de pórticos é ligado entre si por vigas horizontais circunferenciais ao nível dos pavimentos, que contribuem para o suporte destes e formam em planta um sistema estrutural de grelha plana.

Sem prejuízo da resistência sísmica das estruturas e com o objectivo de, em condições de serviço, minimizar os efeitos associados à retracção do betão e às variações de temperatura regulamentares, a estrutura do estádio é dividida em 12 corpos separados por juntas de dilatação, o maior dos quais tem 90x90m, justificando especial atenção na consideração das referidas acções.

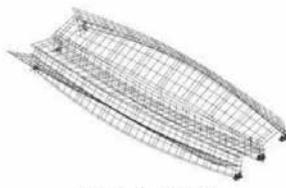
A solução dos pavimentos consiste em lajes maciças integrando painéis pré-fabricados pré-esforçados, de espessura reduzida, sobre os quais é betonada uma camada complementar de betão para completar a espessura final da laje de 24 cm.

Os elementos que constituem as bancadas são elementos pré-fabricados de betão. Estão apoiados nas vigas inclinadas integradas nos pórticos radiais, com um vão que varia à medida que o afastamento entre pórticos aumenta para a periferia. As zonas dos vomitórios foram também construídas por elementos pré-fabricados específicos que apoiam numa grelha de vigas própria.

As torres para suporte das treliças metálicas principais da cobertura estão localizadas nos quatro cantos e integram-se nos respectivos corpos estruturais formando, com os pórticos envolventes, um sistema estrutural pórtico-parede tridimensional. Para apoio da estrutura da cobertura existem ainda nos topos Norte e Sul dois pilares-parede, os quais se integram nos respectivos pórticos radiais.



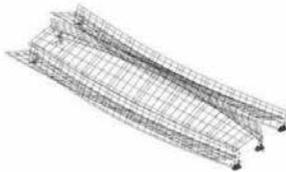
Modo 1 –  $f = 12,15$  Hz



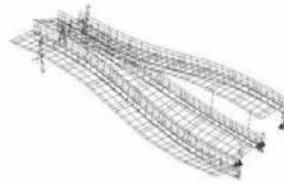
Modo 2 –  $f = 18,57$  Hz



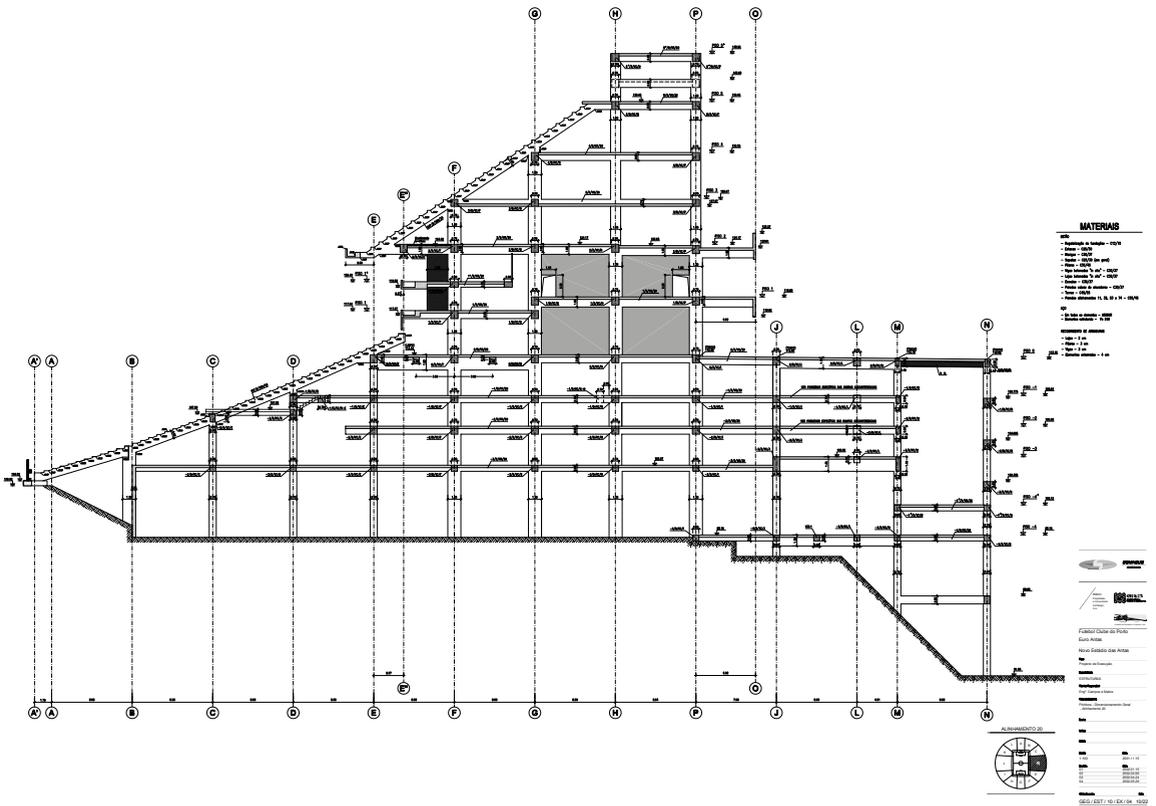
Modo 3 –  $f = 20,66$  Hz



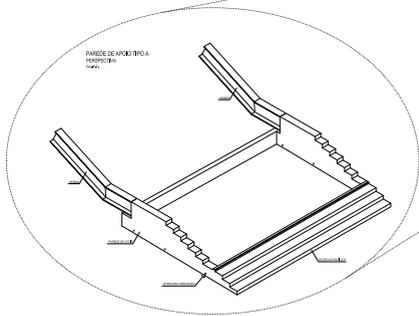
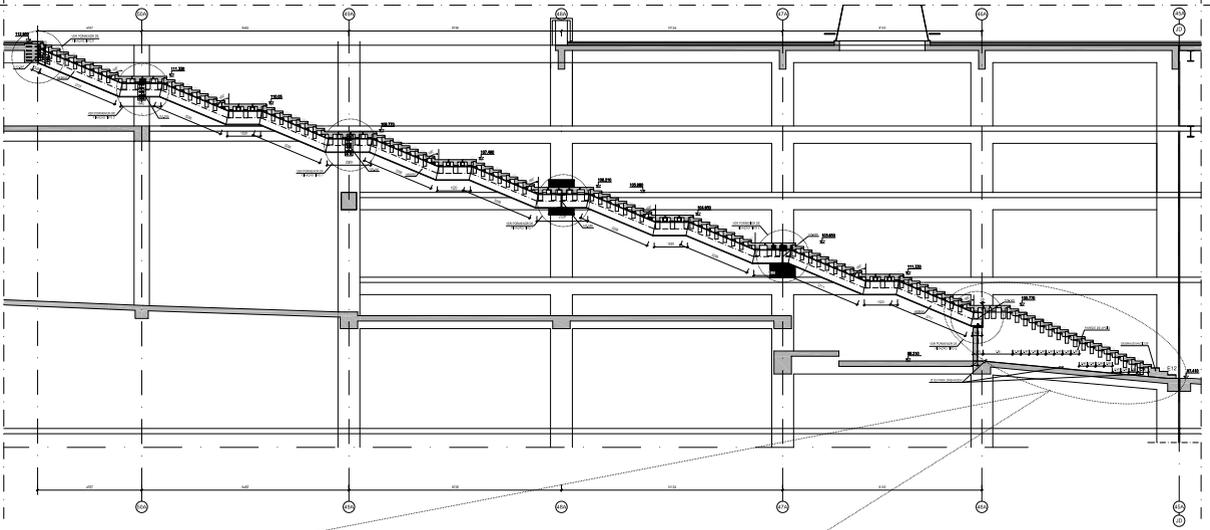
Modo 4 –  $f = 23,32$  Hz



Modo 5 –  $f = 30,71$  Hz



Parâmetros midais numéricos  
Pórticos





## Implantação e Fundações

A localização do estádio interferiu significativamente com a morfologia do terreno e com os maciços graníticos heterogêneos característicos do Porto. Assim, a encosta fortemente inclinada obrigou, por um lado, à realização de grandes volumes de escavação (1.350.000 m<sup>3</sup>), boa parte em rocha, para implantação das bancadas Poente e Norte, enquanto, para a realização das bancadas Nascente e Sul, foi necessário criar plataformas de aterro.

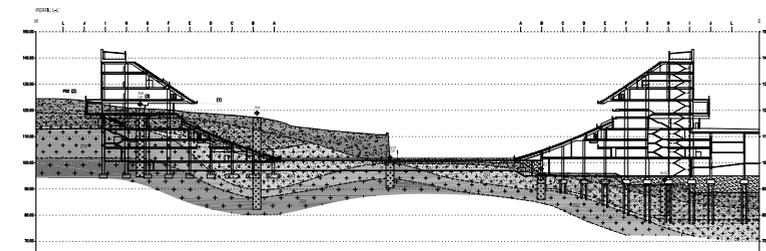
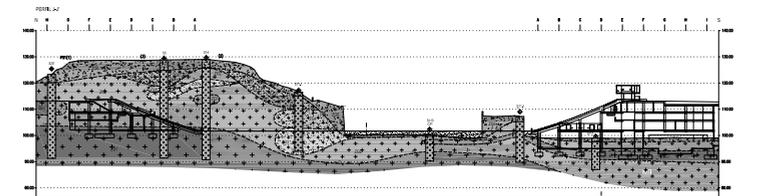
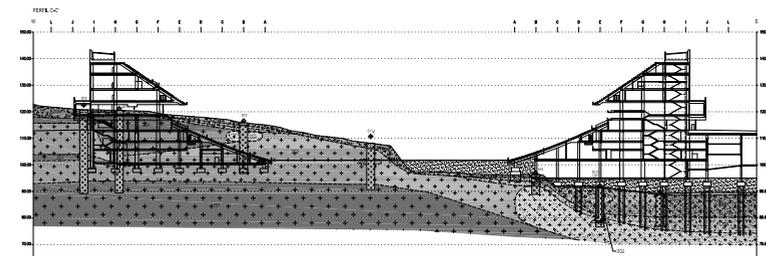
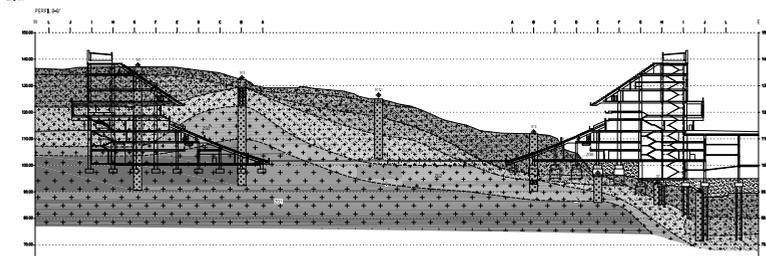
Em termos de fundações, refira-se que em parte significativa do estádio foi possível tirar partido das elevadas resistências do maciço rochoso - realizando fundações na rocha mas, em contrapartida, nas bancadas Nascente e Sul foi necessária uma mobilização indirecta do maciço rochoso através de estacas que chegaram a atingir duas dezenas de metros de comprimento.

Este cenário geológico-geotécnico tão heterogêneo torna a determinação prévia da fronteira entre soluções de fundação extremamente complexa. Em resultado deste facto, houve necessidade de recorrer nas zonas de transição a fundações semi-profundas e a poços de fundação.

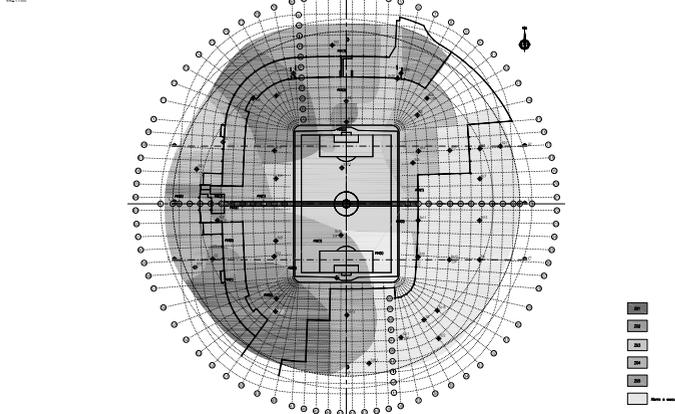
Atendendo às características especiais dos esforços na base das torres - que se caracterizam por significativa alternância de esforços, sob efeito ou não, de vento e sobrecargas - houve necessidade de mobilizar também a resistência à tracção do maciço de fundação que, na concepção projectada, é realizada de duas formas diferentes: através de fundações indirectas com 15 estacas de 1.20 m de diâmetro, e por fundações directas através da mobilização integral do peso do maciço granítico sub-adjacente, conseguido pelo emprego de microestacas injectadas.



PERFIL GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO



PLANTA DE ZONAMENTO GEOLÓGICO AO NÍVEL DAS FUNDADAÇÕES



LEGENDA

	Terreno comum

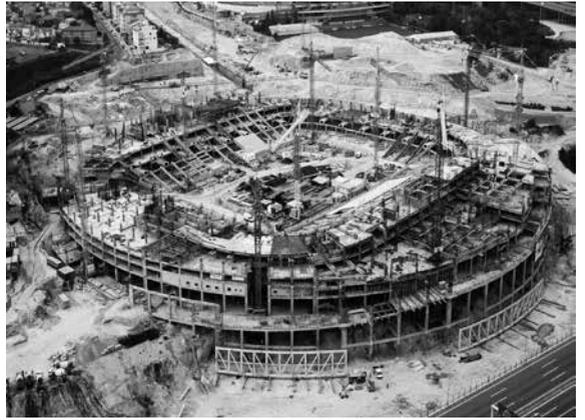
NOTA

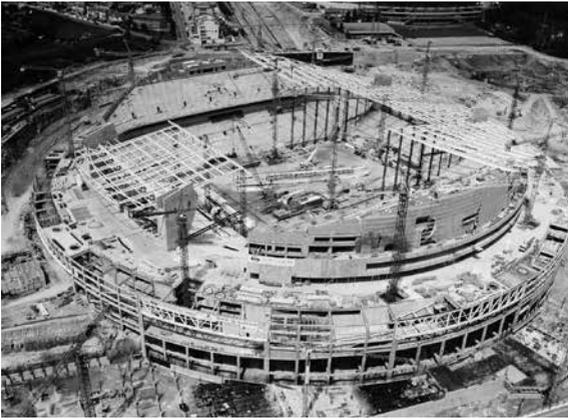
As fundações de tipo Sol serão providas em todos os pontos de alinhamento (S), caso contrário ser executadas como fundações superficiais, após conferência de terreno completa no local (dele Fax nº. F07-164-02).

PROFUNDIDADE (m)	TIPO DE TERRENO	TIPO DE TERRENO	TIPO DE TERRENO
0,00 - 0,50	Terreno comum	Terreno comum	Terreno comum
0,50 - 1,00	Terreno comum	Terreno comum	Terreno comum
1,00 - 1,50	Terreno comum	Terreno comum	Terreno comum
1,50 - 2,00	Terreno comum	Terreno comum	Terreno comum
2,00 - 2,50	Terreno comum	Terreno comum	Terreno comum
2,50 - 3,00	Terreno comum	Terreno comum	Terreno comum
3,00 - 3,50	Terreno comum	Terreno comum	Terreno comum
3,50 - 4,00	Terreno comum	Terreno comum	Terreno comum
4,00 - 4,50	Terreno comum	Terreno comum	Terreno comum
4,50 - 5,00	Terreno comum	Terreno comum	Terreno comum
5,00 - 5,50	Terreno comum	Terreno comum	Terreno comum
5,50 - 6,00	Terreno comum	Terreno comum	Terreno comum
6,00 - 6,50	Terreno comum	Terreno comum	Terreno comum
6,50 - 7,00	Terreno comum	Terreno comum	Terreno comum
7,00 - 7,50	Terreno comum	Terreno comum	Terreno comum
7,50 - 8,00	Terreno comum	Terreno comum	Terreno comum
8,00 - 8,50	Terreno comum	Terreno comum	Terreno comum
8,50 - 9,00	Terreno comum	Terreno comum	Terreno comum
9,00 - 9,50	Terreno comum	Terreno comum	Terreno comum
9,50 - 10,00	Terreno comum	Terreno comum	Terreno comum

PROFUNDIDADE (m)	TIPO DE TERRENO	TIPO DE TERRENO	TIPO DE TERRENO
0,00 - 0,50	Terreno comum	Terreno comum	Terreno comum
0,50 - 1,00	Terreno comum	Terreno comum	Terreno comum
1,00 - 1,50	Terreno comum	Terreno comum	Terreno comum
1,50 - 2,00	Terreno comum	Terreno comum	Terreno comum
2,00 - 2,50	Terreno comum	Terreno comum	Terreno comum
2,50 - 3,00	Terreno comum	Terreno comum	Terreno comum
3,00 - 3,50	Terreno comum	Terreno comum	Terreno comum
3,50 - 4,00	Terreno comum	Terreno comum	Terreno comum
4,00 - 4,50	Terreno comum	Terreno comum	Terreno comum
4,50 - 5,00	Terreno comum	Terreno comum	Terreno comum
5,00 - 5,50	Terreno comum	Terreno comum	Terreno comum
5,50 - 6,00	Terreno comum	Terreno comum	Terreno comum
6,00 - 6,50	Terreno comum	Terreno comum	Terreno comum
6,50 - 7,00	Terreno comum	Terreno comum	Terreno comum
7,00 - 7,50	Terreno comum	Terreno comum	Terreno comum
7,50 - 8,00	Terreno comum	Terreno comum	Terreno comum
8,00 - 8,50	Terreno comum	Terreno comum	Terreno comum
8,50 - 9,00	Terreno comum	Terreno comum	Terreno comum
9,00 - 9,50	Terreno comum	Terreno comum	Terreno comum
9,50 - 10,00	Terreno comum	Terreno comum	Terreno comum

NOTA: 1 - A largura do muro é de 0,40 m e a altura é de 2,00 m.



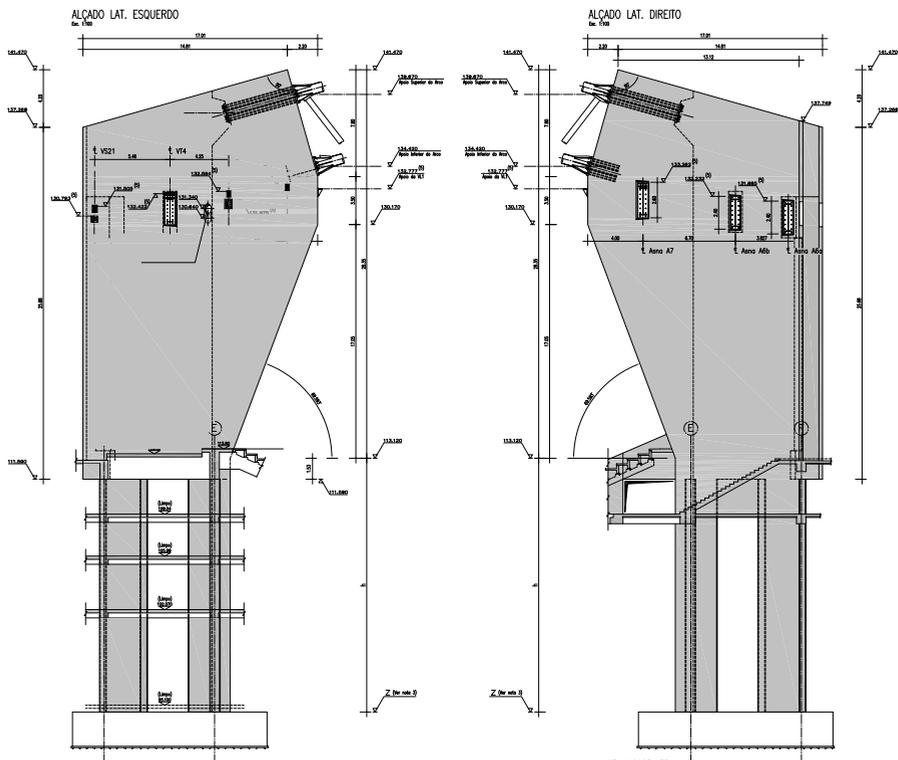
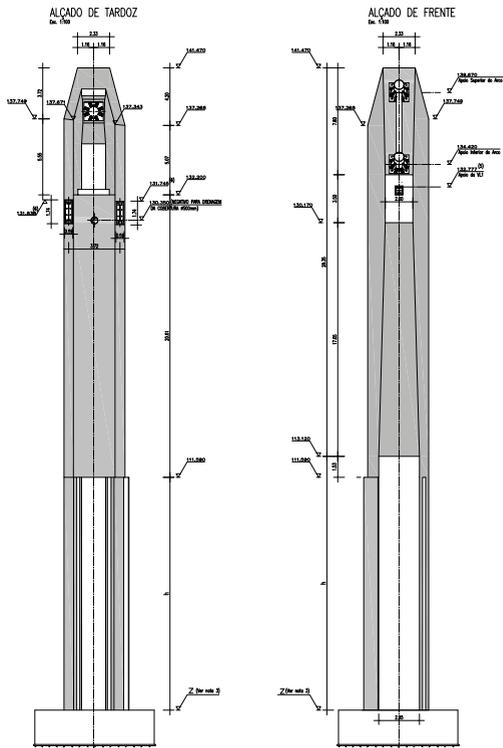


## Cobertura

A cobertura das bancadas é circular e estende-se 6,0 além do perímetro do edifício tendo uma abertura rectangular sobre o campo de jogo. O revestimento é feito de placas de policarbonato translúcido. Nos lados da abertura existe duas treliças em arco que suspendem as vigas principais. A cobertura é uma estrutura de aço materializada por vigas metálicas soldadas espaçadas de 9 m, com uma altura variável entre 600 mm a 2000 mm, excepto as vigas em consola dos topos que tem uma altura máxima de 3500 mm e que formam um sistema de grelha na zona A. Na zona B, as vigas principais são suportadas na periferia em pilares tubular de aço (com diâmetro 711 mm,  $t = 12,5$  ou  $25$  mm) transferindo as cargas para o estrutura de betão subjacente.

Na extremidade interior, as vigas estão suspensas de treliças do arco principal rigidamente ligadas a duas torres de betão.

A extensão dos arcos é aproximada 180,5 m; a altura das treliças varia entre 5,29 m no suporte seção e 10,8 m no meio-vão. Estes arcos são treliças de seções tubulares (diâmetros 324 a 711 mm,  $t = 8$  a 30 mm) em aço S355 (EN10210).



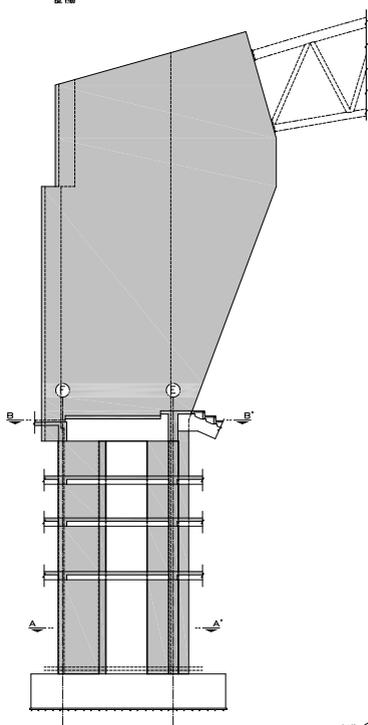


As ações do vento foram quantificadas por ensaios em túnel de vento (escala 1/200) e os resultados foram introduzidos nos modelos numéricos das estruturas para realizar as análises dinâmicas. O Eurocódigo 3 (EC3) foi adotado para o projeto de estruturas de aço. A máxima rajada vento foi considerada com velocidades  $d$  a ordem de 40 a 44 m/s.

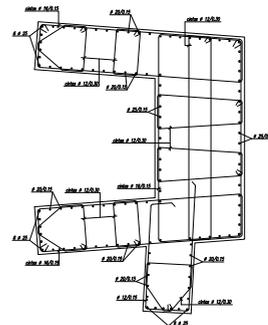
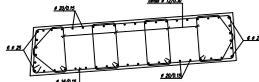
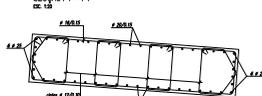
A resposta dinâmica à ação do vento foi obtida tendo em consideração as características da estrutura e as frequências de ressonância. A estrutura da cobertura, tem uma frequência fundamental de 1,123 Hz. A máxima deformada vertical avaliada sob ação extrema do vento foi de 132 mm.

*Adaptado de Structural Engineering International 2/2005*

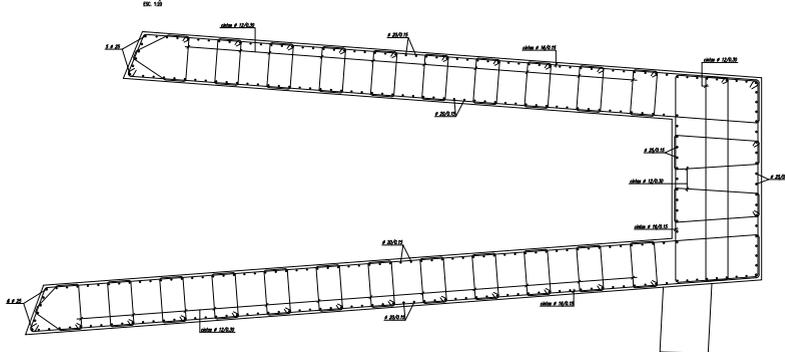
LOCALIZAÇÃO DOS CORTE



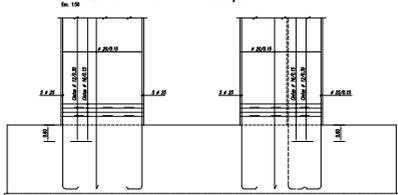
SECÇÃO A-A'



SECÇÃO B-B'



ARRANQUE DE ARMADURAS NA FUNDAÇÃO



**MATERIAIS**

- BT50
  - Especificação de fundações - C12/15
  - Método de ancoramento de anilhas - C20/25
  - Encaixe - C20/25
  - Placas - C20/25
  - Vigas - C20/25
  - Vigas pré-moldadas das placas 41 e 45 - C20/25
  - Lajes - C40/50
- Aço
  - Armaduras ordinárias - A500R
  - Armaduras de soldadura  $f_{yk} > 1800$  N/mm<sup>2</sup>
  - Aço de baixa resistência  $f_{yk} > 1800$  N/mm<sup>2</sup>
- RECOBRIMENTO DE ARMADURA
  - Placa - 3 cm
  - Viga - 3 cm
  - Espalho - 5 cm
  - Orientação exterior - 4 cm
  - Moldeira e estaca - 5 cm

## Montagem da cobertura

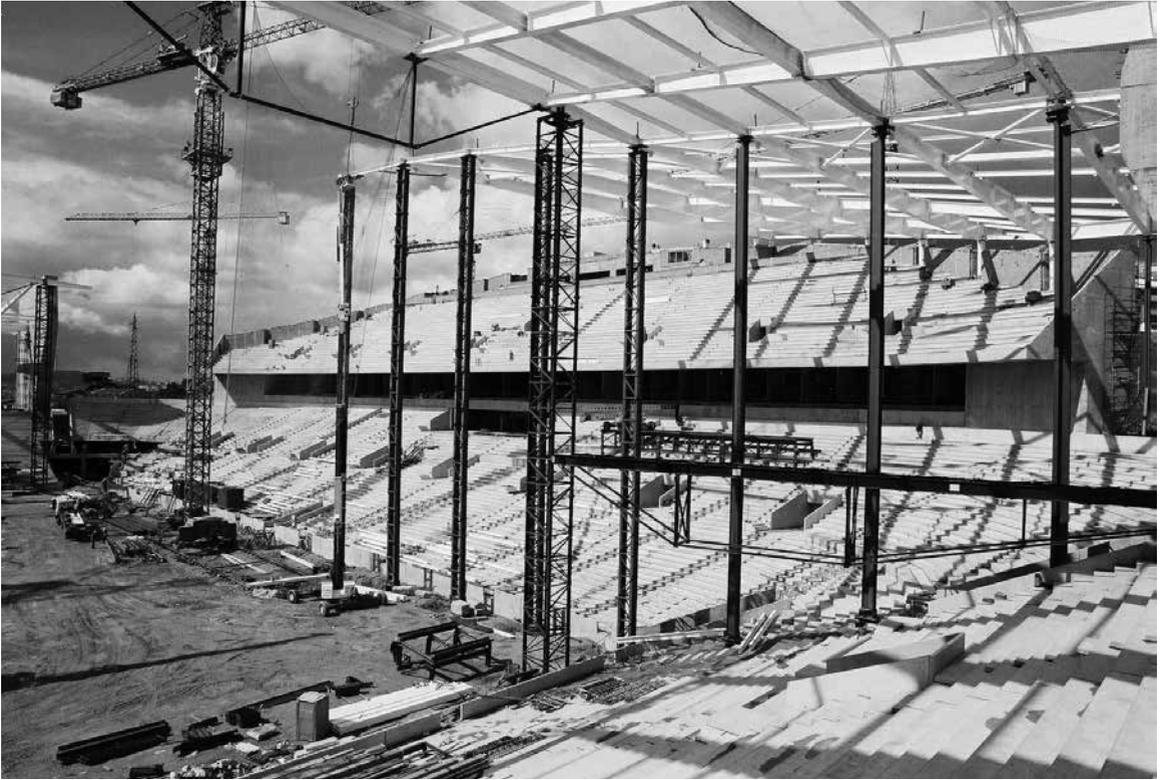
O aspecto de construção mais complexo foi a construção do telhado. A contra flecha foi introduzida para compensar as deflexões devido ao peso próprio da cobertura.

Durante a construção apenas os nós nas secções finais das vigas principais, isto é, na abertura interna rectangular, eram suportados em colunas temporárias. De particular relevância no plano de montagem foi a remoção destes suportes temporários sob os arcos. Para garantir os valores iniciais de projecto das forças de reacção dos arcos, foram usados macacos hidráulicos na conexão das cordas inferiores à torre de betão para ajustar a geometria e as forças antes que uma argamassa de alta resistência fosse estabelecida entre as placas de suporte e o betão.

Um sistema de monitoramento foi adoptado durante a montagem. Os valores calculados e medidos para os deslocamentos nodais dos arcos estiveram em boa concordância.

*Adaptado de Structural Engineering International 2/2005*









## Dinâmica

Em estruturas onde seja possível concentrar múltiplas, tais como passadiços e bancadas de estádios, as sobrecargas devem-se quase inteiramente à actividade humana, onde os movimentos dos utilizadores induzem forças com componentes horizontais e verticais.

Verifica-se actualmente a tendência para a realização de espaços abertos com poucos apoios, o que resulta em pisos de grande vão e com uma rigidez reduzida, implicando uma redução da frequência própria da estrutura para valores que podem ser comparáveis com aqueles da frequência do movimento das multidões, tornando assim a estrutura suscetível às acções dinâmicas induzidas pelos seus utilizadores.

Por outro lado é actualmente evidente uma mudança de comportamento da assistência de acontecimentos públicos que se caracteriza por ser mais participativo e entusiasmado. Isto verifica-se quer em salas de espectáculo, quer em estádios onde, além da existência dos estímulos visuais e auditivos utilizados nos novos estádios, se constata a existência de “cliques” organizadas que incentivam as manifestações do público. É ainda de referir a utilização destes espaços para a realização de concertos, o que torna mais provável a existência de níveis significativos de sincronização da actividade dinâmica produzida pela audiência. A comprovação deste facto levou à limitação da realização destes eventos em alguns estádios ou ao reforço da sua estrutura. Estes exemplos servem para ilustrar a importância de se obter uma descrição correcta das cargas geradas por pessoas e a necessidade de levar em consideração, no



projecto, os efeitos dinâmicos que estas cargas podem gerar de forma a assegurar tanto a integridade estrutural como um satisfatório funcionamento em serviço.

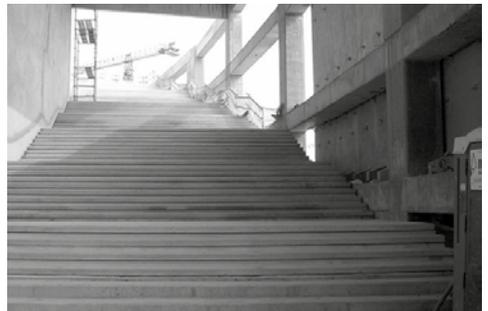
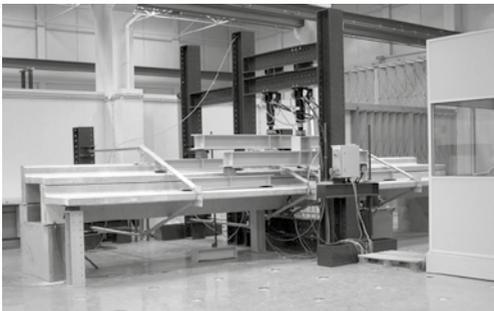
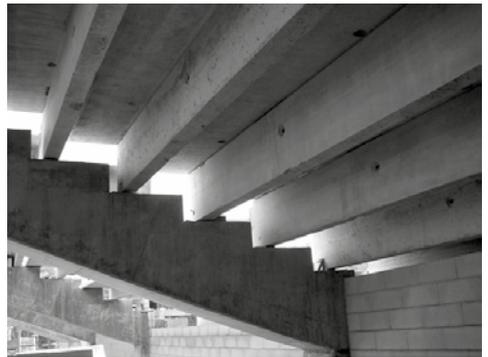
Uma acção considera-se dinâmica quando a sua variação no tempo é tal que os efeitos da inércia da massa da estrutura não podem ser negligenciados no estudo do comportamento estrutural. No caso das estruturas suscetíveis de estarem sujeitas a acções dinâmicas induzidas pelos utilizadores, dada a sua natureza particular, poderá ainda haver um nível significativo de interacção entre a estrutura e o conjunto dos seus utilizadores. Estes não somente fornecem massa adicional mas servem também para adicionar amortecimento à estrutura, o que tem um efeito positivo no controlo de vibrações. Assim são necessários modelos físicos fiáveis, quer da estrutura, quer da acção induzida, para permitir uma análise do seu comportamento dinâmico.

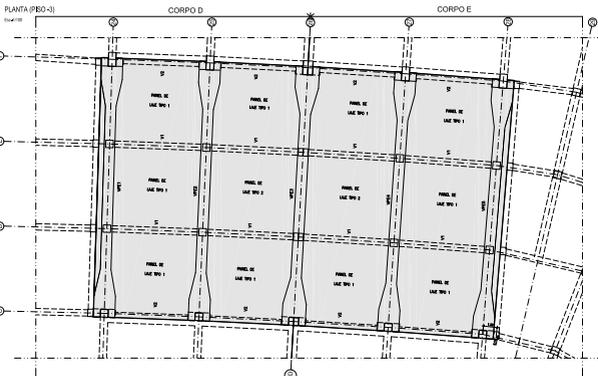
As sobrecargas usadas no dimensionamento de estruturas são geralmente especificadas para serem aplicadas como forças estáticas equivalentes, sendo implícito que os valores incluem uma força estática ponderada mais um agravamento dos eventuais efeitos dinâmicos induzidos. Estes valores de cálculo foram desenvolvidos com o objectivo de serem utilizados na verificação do estado limite último, não sendo adequados, contudo, para a verificação em serviço.

No projecto foram tidas em conta, com especial preocupação, estas questões. Foram adotadas normas e regulamentação aplicáveis a estruturas destinadas a acolher uma elevada concentração de pessoas, que reflectem já alguns aspectos respeitantes à consideração de acções dinâmicas, sendo, no entanto, predominante a adopção de forças estáticas equivalentes. Foram também realizados vários estudos apoiados em modelos numéricos que tiveram por base a investigação mais recente que existia publicada sobre o assunto. Posteriormente foram realizados ensaios sobre os degraus de bancada para a sua caracterização ao nível do seu comportamento estático e dinâmico. Neste estudo foi tido em consideração que a estrutura do estádio do dragão é realizada em betão armado e que o seu sistema estrutural é pouco suscetível de ser excitado dinamicamente ao nível das acções induzidas por espectadores. Deste modo, o estudo foi orientado para avaliar o comportamento dinâmico dos elementos pré-fabricados que constituem os degraus de bancada.

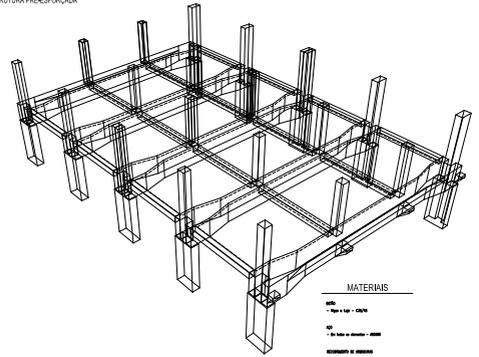
De forma a complementar os ensaios laboratoriais entendeu-se serem essenciais os dados obtidos na monitorização da estrutura real para a validação das opções e critérios estabelecidos na fase de projecto. Foi neste âmbito que se realizou a monitorização de dois eventos ocorridos no Estádio do Dragão, designadamente um jogo de futebol e testes na mesma bancada com um grupo de voluntários.

Pretendeu-se, com estes ensaios, obter uma última validação do modelo de cargas dinâmicas utilizado no seu dimensionamento e estabelecer uma avaliação do desempenho da estrutura em serviço, que provou ser satisfatório.



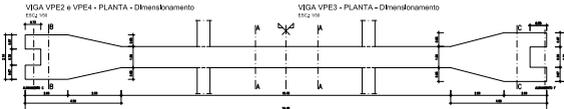


PERSPECTIVA DA ESTRUTURA PRE-FORÇADA

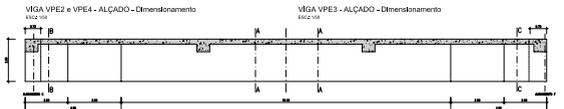


MATERIAIS

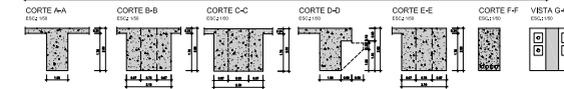
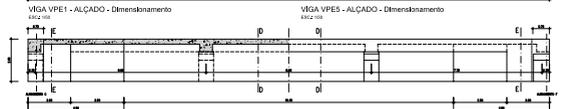
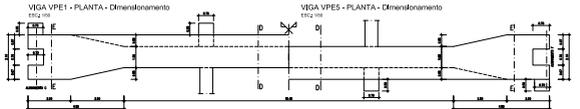
- C20
- S20 x 100 - C200



VIGA VPE3 - PLANTA - Dimensionamento

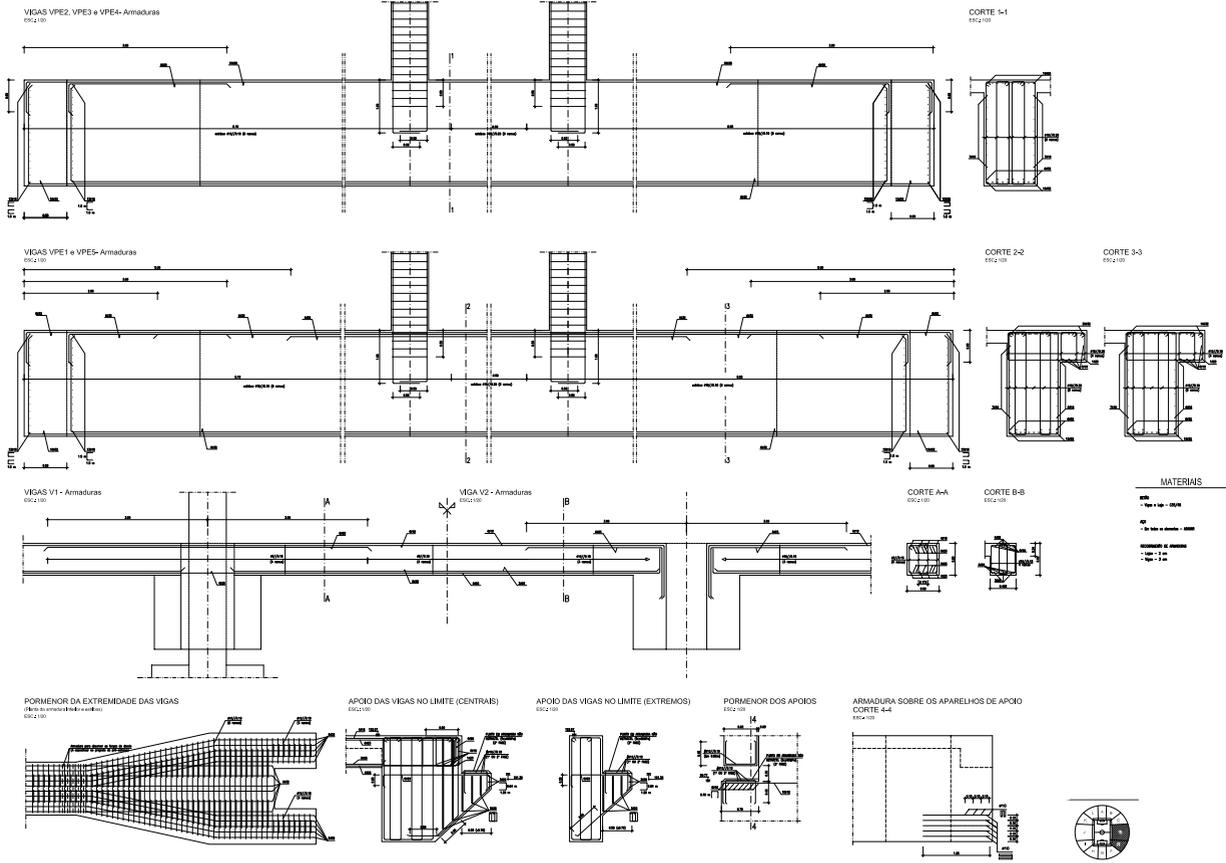


VIGA VPE3 - ALÇADO - Dimensionamento



**NOTAS**

- 1 - A estrutura de concreto armado será executada em concreto armado C20.
- 2 - A estrutura de aço será executada em aço S20 x 100 - C200.
- 3 - A estrutura de aço será executada em aço S20 x 100 - C200.
- 4 - A estrutura de aço será executada em aço S20 x 100 - C200.
- 5 - A estrutura de aço será executada em aço S20 x 100 - C200.
- 6 - A estrutura de aço será executada em aço S20 x 100 - C200.
- 7 - A estrutura de aço será executada em aço S20 x 100 - C200.
- 8 - A estrutura de aço será executada em aço S20 x 100 - C200.
- 9 - A estrutura de aço será executada em aço S20 x 100 - C200.
- 10 - A estrutura de aço será executada em aço S20 x 100 - C200.









**Projecto**

Estádio do Dragão

**Localização**

Antas, Porto

**Data**

2000-2003

**Área de Construção**

132.288 m2

**Dono de Obra**

F. C. do Porto

**Construtor**

Somague

**Arquitectura**

Manuel Salgado,

Jorge Estriga,

Carlos Cruz e

Inês Cruz

**Engenharia de Estruturas**

GRID

Antonio J. Reis e Nuno Lopes

GEG

Antonio C. Matos, Paulo Pimenta, Hugo Marques e

José Cunha

