



A Engenharia da Casa da Música





A Engenharia da Casa da Musica

“A Casa da Música é uma daquelas obras em que a Arquitectura e a Engenharia são indissociáveis e se potenciam mutuamente. O desafio era “encaixar” um complexo programa funcional num objecto com uma forma atípica, conseguindo simultaneamente que a estrutura de suporte fizesse parte integrante do conceito espacial do Arquitecto.”





A Casa da Música é uma daquelas obras em que a Arquitectura e a Engenharia são indissociáveis e se potenciam mutuamente. O desafio era “encaixar” um complexo programa funcional num objecto com uma forma atípica, conseguindo simultaneamente que a estrutura de suporte fizesse parte integrante do conceito espacial do Arquitecto.

Para Koolhaas os elementos de que a Engenharia necessita constituem oportunidades e temas que vão dando forma ao espaço. Fazendo sentido estrutural, pilares e paredes inclinadas são trabalhados formalmente e integrados no projecto, não através da sua dissimulação mas assumindo por vezes um protagonismo inesperado. Este processo cria uma liberdade inicial de concepção que, através de um rigoroso controlo formal, conduz ao resultado desejado.

A ideia inicial pressupunha um edifício “translúcido” com uma estrutura metálica. Razões de custo e a perda do efeito de transparência a que a densidade de elementos estruturais inevitavelmente obrigaria, levaram à opção pelo betão branco. Embora agradasse claramente a Rem Koolhaas, o betão branco só não tinha sido proposto inicialmente por não ser um material comum nos países do Norte da Europa, onde é já difícil de encontrar mão-de-obra qualificada para trabalhar com qualidade em betão aparente.



O projecto iniciou-se em Setembro de 1999, na sequência de um concurso de ideias ganho pelo Consórcio OMA / ARUP e que integrava já a AFAssociados. O projecto de escoramento e faseamento construtivo foi realizado em 2001, no âmbito de uma encomenda feita pelo Consórcio construtor à AFAssociados, promovida pelo Dono da Obra.

O Estudo Prévio devia desenrolar-se até Dezembro de 1999. Tratando-se de um projecto extremamente complexo, em que às dificuldades técnicas inerentes a este tipo de equipamentos (acústica, tratamento ambiental) se associava uma geometria invulgar e uma estrutura arrojada, houve que mobilizar uma equipa mista pluridisciplinar, reunindo semanalmente em Roterdão para discutir e acordar as soluções a desenvolver até à reunião seguinte. Estrutura, zonas técnicas, traçados de condutas e courettes eram discutidas e alteradas até à sua completa integração no edifício.

No que se refere ao Projecto de Estruturas, foi montada uma Equipa conjunta entre os Engenheiros da ARUP e da AFAssociados que, trabalhando em Londres durante a fase do Estudo Prévio, viabilizaram as soluções discutidas e acordadas nas reuniões semanais. A partir de Janeiro de 2000, após a entrega do Estudo Prévio, o Projecto passou a ser desenvolvido no Porto por equipas nacionais, tendo sido necessárias cerca de 50.000 horas só na AFAssociados, para a conclusão do projecto.





Em termos de estruturas, para além de haver que garantir a estabilidade global do edifício, merecem destaque as seguintes preocupações fundamentais:

encontrar um conjunto de elementos estruturais, integrados na Arquitectura, que assegurassem a transmissão das cargas à fundação. A complexidade geométrica do edifício, em particular na zona norte, não tornava esta tarefa fácil, obrigando à consideração de um complicado sistema de transferência de cargas, através do aproveitamento estrutural de grande parte das paredes;

conseguir um elevado rigor de pormenorização que permitisse definir a geometria do edifício e dos seus elementos estruturais, caracterizando com rigor as aberturas e courettes destinadas às instalações. Tratando-se de um edifício em betão branco aparente, muitas das infraestruturas encontram-se embebidas no próprio betão, obrigando a que o rigor da pormenorização se aplicasse igualmente a estas instalações. Os desenhos de betão armado ganharam a importância de desenhos de síntese e assim resultando de sucessivas iterações entre Arquitectos, Engenheiros de Estruturas e Engenheiros das Especialidades;

o estabelecimento de um faseamento construtivo e um sistema de escoramento compatível com os prazos da obra e as preferências do Empreiteiro.

o controlo da fissuração superficial, dada a sua importância na durabilidade de um Edifício em betão branco aparente.

a garantia de qualidade da execução da obra, através da realização de protótipos que permitissem testar materiais e metodologias de trabalho e do estudo de processos e materiais alternativos, em conjunto com o Empreiteiro.

No que se refere às especialidades, salienta-se a importância das Instalações Mecânicas, em que a geometria irregular do Edifício dificultava a tarefa de encontrar traçados de condutas de grandes dimensões compatíveis com os requisitos da Arquitectura e as necessidades da estrutura. As elevadas exigências de controlo acústico das diversas instalações e áreas técnicas determinaram a qualidade dos sistemas previstos.



Estrutura

Descrição Geral

Os elementos estruturais principais do Edifício dos Auditórios são a casca formada pelos painéis da parede exterior em betão armado e por duas grandes paredes longitudinais, laterais ao Auditório principal. Os painéis da casca exterior são em betão armado e têm uma espessura de 0,40m. As paredes longitudinais têm 1m de espessura, sendo em certas zonas aligeiradas por meio de vazamentos verticais circulares. Esta grande espessura deve-se ao facto de existirem muitas, e por vezes grandes, aberturas, e assim ser importante conferir às paredes a capacidade de encastramento para outros elementos estruturais perpendiculares.

Considerando a casca e todo o seu interior, verifica-se que o seu centro de massa se situa desviado para Sul do centro geométrico do seu embasamento. Este facto, e sobretudo o aumento desta excentricidade devido à acção sísmica, levou à utilização de dois pilares inclinados que dão apoio exterior a dois pontos situados na intersecção de duas das suas arestas mais a Sul com a laje do piso 0. Os pilares "cruzam" os três pisos do parque de estacionamento, sendo unicamente visíveis a partir deste. O conjunto formado pela casca exterior, as duas paredes, os dois pilares exteriores e ainda algumas das lajes que, funcionando como membranas, servem como nervuras da casca, absorvendo e transferindo as forças horizontais, formam a estrutura primária e de contraventamento do edifício.

Toda a estrutura é monolítica em betão armado. Ainda que do ponto de vista dos estados limites de utilização fosse, por vezes, desejável a utilização de pré-esforço, o grau de hiperstaticidade e a complexidade geométrica da estrutura fariam com que os seus efeitos fossem muito difícil ou mesmo impossíveis de determinar.

Os painéis das paredes exteriores do edifício funcionam como uma casca tridimensional com esforços de membrana e de flexão. O comportamento de cada painel em estado plano de tensão contribui decisivamente para a estabilidade global do edifício. A flexão resulta da acção do seu peso próprio e das acções transmitidas pelas lajes que se apoiam na casca. Por vezes, estes efeitos de flexão, sobretudo devido ao peso próprio, resultariam incomportáveis se não tivessem sido providenciados certos elementos auxiliares que foram denominados por "intervenções". Salientam-se os dois grandes pilares inclinados que atravessam o lado Sul e o lado Norte para dar apoio pontual aos painéis de cobertura. Existem ainda três pilares de secção circular que, nascendo das vigas-parede do Auditório pequeno, dão apoio à cobertura por cima.

Dada a pequena inclinação dos painéis da cobertura, certos bordos livres que se pretendiam muito esbeltos teriam deformações excessivas se a casca de betão armado não tivesse sido substituída por estruturas metálicas constituídas por treliças ou vigas em construção soldada de inércia variável. A rigidez destes bordos é fundamental nos casos em que suportam os painéis de vidro das grandes aberturas.





Zona Norte

Dada a complexidade geométrica das lajes, escadas e rampas do lado Norte, foram adoptados diversos tipos de soluções estruturais para apoio das lajes. Além da parede longitudinal principal Norte e da casca exterior, existem ainda duas caixas de elevador e um pilar inclinado que também servem como elementos de apoio vertical. Quando é possível, as lajes apoiam-se directamente nos elementos verticais ou na casca exterior. Nas zonas em que tal não é possível, elas apoiam-se em vigas ou vigas-parede que por vezes estão, ainda, apoiadas noutras vigas-parede. Note-se que uma das referidas caixas de elevador termina ao nível do piso 0, apoiando-se excentricamente num pilar rectangular.



Zona Sul – Foyer

Do lado Sul existe o grande espaço vazio do átrio de entrada que é “cortado” na parte superior pelo Auditório Pequeno. Existe ainda, entre este átrio e a parede longitudinal Sul do Auditório, uma “faixa” com 7m de largura onde se desenvolvem comunicações verticais e horizontais e zonas de apoio. Esta faixa é limitada a Sul por um plano estrutural vertical com 0,35m de espessura que contém zonas de parede, grandes aberturas e zonas porticadas.



O apoio vertical das lajes do lado Sul, que na zona do átrio existem entre a fundação e a escada de acesso ao Auditório principal, e na faixa atrás referida até à cobertura, é constituído pela casca exterior, a parede principal longitudinal Sul, o referido plano vertical com 0.35m de espessura e ainda o pilar inclinado que “cruza” o espaço do átrio.

A um nível superior, vencendo o vão entre a casca exterior e a parede longitudinal Sul, situa-se o Auditório pequeno. Os seus elementos estruturais principais são duas vigas - parede com 0,45m de espessura e altura variável. Os pisos de tecto e pavimento são constituídos por lajes mistas aço -betão apoiadas em vigas metálicas.

Auditório Principal

O isolamento acústico do Auditório Principal realiza-se por meio de uma separação da restante estrutura, separação que é denominada por “caixa dentro de caixa”. Nesta separação, o pavimento, as paredes e o tecto do Auditório contactam com a estrutura do edifício unicamente através de apoios resilientes. A laje do pavimento é em betão armado, as paredes são em estrutura metálica e o tecto é constituído por uma laje mista que se apoia em vigas metálicas. O dimensionamento dos referidos apoios foi realizado de modo a que a frequência própria do sistema massa – mola – massa seja inferior a 10 Hz.

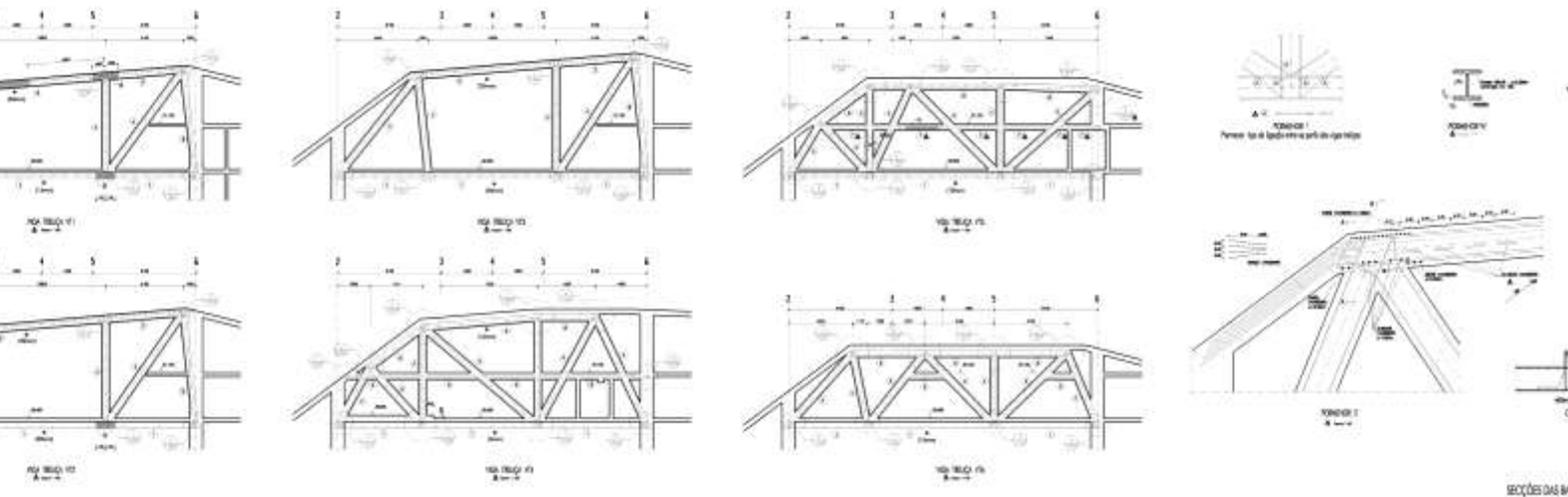


Cada um dos grandes vãos existentes nas extremidades do Auditório Principal são por razões acústicas, constituídos por dois “planos” de vidro separados entre si de 6.5m. Os vãos têm uma largura de 23.2m, o vão Nascente tem uma altura de 12.30m e o vão Poente, uma altura de 14.70m. Estas alturas são “vencidas” por três vidros sobrepostos. Os dois superiores são suspensos da cobertura e o inferior está apoiado na base.

A resistência às cargas do vento é conseguida através do perfil ondulado do vidro e por duas discretas treliças metálicas horizontais, situadas aos terços da altura, entre os dois planos de vidro. Para cargas horizontais, os painéis de vidro vencem a vão vertical entre treliças ou entre estas e a base ou a cobertura.

Cobertura do auditório

A laje situada por cima do Auditório (piso 8) vence o vão de 24,2 m entre as duas paredes longitudinais principais. Neste caso, foram adoptadas dois sistemas estruturais distintos. Nas área do restaurante, em que entre a referida laje e a cobertura existe altura suficiente, está prevista uma laje maciça que se apoia no banzo inferior de vigas treliças metálicas afastadas entre si de 6m. Estas vigas treliças desenvolvem-se até à cobertura e têm geometrias diferentes ditadas pela forma irregular desta última. As vigas conferem igualmente apoio aos painéis de cobertura da casca exterior. Na restante área deste piso, adoptaram-se vigas mistas aço-betão constituídas por perfis reconstruídos soldados com uma altura total de 1,9m e afastadas entre si de 3m, e uma laje igualmente mista com chapa metálica colaborante e com 0,20 m de espessura. As vigas contêm aberturas nas almas de modo a permitir a passagem de tubagens das instalações técnicas.



Parque de Estacionamento



As lajes que constituem os pisos dos parques de estacionamento são em betão armado, maciças e fungiformes. Apoiam-se em pilares isolados, em paredes de betão armado, nas paredes inclinadas do Edifício dos Auditórios e nas paredes de contenção periférica, estas últimas através de ferrolhos.

Da mesma forma que no caso do Edifício dos Auditórios, e apesar dos seus quase 130m de comprimento, a estrutura dos parques é monolítica, sem juntas. No entanto, as duas estruturas são separadas por uma junta de dilatação que é materializada na cantoneira de apoio das lajes do parque nos painéis do edifício dos auditórios.

Os pilares são circulares com capitéis tronco-cónicos e dispõem-se geralmente segundo uma malha rectangular de 7,8 x 7,8 m². As paredes verticais, além de constituírem elementos de apoio vertical, funcionam também como paredes corta-fogo; por vezes são igualmente apoio para as rampas de acesso.

As lajes das caves têm em geral uma espessura de 0,25m, enquanto que os capitéis têm uma altura máxima de 0,50m, incluindo a laje.

Como as cargas no piso de cobertura são bastante maiores, estas dimensões foram aumentadas para 0,35m e 0,7m, respectivamente.



Betão Branco

Realça-se o facto de se tratar de um edifício em betão branco que, em grande parte, será aparente. O betão é simultaneamente a estrutura e o acabamento final da obra. Este facto vem dar importância à necessidade de um bom comportamento da estrutura em serviço. Com efeito, a manutenção do bom aspecto do betão branco aparente é em grande parte assegurada pelo controle da largura de fendas associada a uma correcta quantificação dos esforços em estado limite de utilização.

Assume particular importância a correcta especificação do betão e os cuidados a ter nos trabalhos de cofragens e armaduras, nomeadamente na manutenção da obra sempre limpa e na disponibilidade de uma mão de obra empenhada.

Após um trabalho de pesquisa envolvendo a equipa de Projecto e a equipa técnica da Secil foi possível definir uma especificação que permitiria obter um betão com as características de cor, acabamento final, trabalhabilidade e resistência pretendidas.

Pretendia-se um betão da classe de resistência C40/50, com uma dosagem mínima de 380 kg/m³ de cimento branco BR I da classe 42.5, utilizando um inerte graúdo calcário, areias finas calcárias e graníticas e um filler calcário muito fino. É a presença da areia granítica que faz com que a cor do betão seja ligeiramente acinzentada e não amarelada como muitas vezes acontece quando se pretende um betão o mais branco possível.

Dadas as características particulares desta obra, nomeadamente a betonagem dos grandes painéis exteriores com ângulos de inclinação que chegavam a ser de 48° com a horizontal, o caderno de encargos pedia a construção prévia de vários protótipos em betão branco. Com a execução destes protótipos de grandes dimensões, pretendia-se adquirir conhecimentos sobre os métodos de cofragem, protecção das armaduras, betonagem, vibração, cura e desmoldagem e “afinar” a consistência do betão a utilizar. Os vários protótipos simulavam diferentes inclinações de betonagem de painéis exteriores, diferentes estereotomias dos moldes, e juntas de betonagem verticais e horizontais.

Considera-se que esta fase de aprendizagem do “novo” material por todos os intervenientes foi fundamental para o sucesso da utilização em obra do betão branco.

É de referir que a compacidade necessária para se obter o acabamento e o efeito de parede pretendidos levaram a que betão branco utilizado na obra apresentasse resistências que o aproximavam de um C50/60, portanto muito superior aos requisitos estruturais ou de durabilidade.



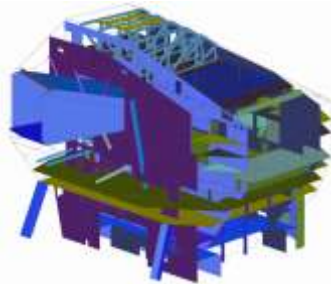
Dada a natureza desta obra, nomeadamente a betonagem dos painéis inclinados, fortemente armados e cofrados nas duas faces, levou a que no início do Projecto (1999) fosse posta a hipótese da utilização de betão auto-compactante (BAC). Atendendo a que na altura, o número de referências onde esta técnica fora utilizada com sucesso era relativamente escasso, foi decidido não a utilizar. Mais tarde, em 2002, atendendo aos desenvolvimentos da técnica do BAC que entretanto tinham tido lugar por todo o mundo, foi decidido realizar alguns ensaios com vista à sua utilização em partes da obra. Dos ensaios realizados foi concluído que sua utilização obrigava a meios que já não era possível mobilizar no estado de desenvolvimento da obra, e por isso foi novamente abandonada. Seria necessário aumentar a capacidade da central de bombagem, o número de meios de elevação e alterar o sistema de cofragem.

Experiências anteriores recomendavam a descofragem muito rápida das superfícies de betão branco aparente a fim de evitar o aparecimento de manchas. A impossibilidade de o fazer em alguns painéis, devido ao complexo sistema de escoramento levantava a questão do risco de aparecimento dessas manchas, naturalmente indesejáveis e impunha uma opção – ou a aceitação das manchas, ou o recurso a um ainda mais sofisticado sistema de cofragem. A realização atempada do protótipo foi determinante na indicação do caminho a seguir, uma vez que indicava o desaparecimento das manchas com o envelhecimento do betão. Foram feitos diversos ensaios em partes da obra que vieram a confirmar esse comportamento, generalizando por isso a aceitação de uma maior tempo de permanência da cofragem.

Manchas de sujidade e escorrimento de oxidações que não puderam ser evitadas, acabaram por ser resolvidas por recurso a uma limpeza final com recurso a produtos químicos apropriados, seleccionados após diversos ensaios.

Toda a superfície exterior de betão está protegida com um produto hidrófugo com vista a evitar o aparecimento de fungos, em especial nas superfícies voltadas a Norte. As zonas inferiores das superfícies em betão aparente serão ainda protegidas com um produto anti-grafitti que possibilita a limpeza de eventuais pinturas murais.





Cálculo de esforços e dimensionamento

A análise global do Edifício dos Auditórios foi realizada recorrendo a um modelo tridimensional de elementos finitos de casca.

O modelo é constituído por todos os elementos que formam a estrutura primária: a casca exterior, as duas paredes longitudinais principais, a estrutura no alinhamento 7, o Auditório pequeno, os pilares inclinados exteriores e interiores, as duas caixas de escadas do lado Norte, os pilares centrais, as lajes dos pisos - 2, -1, 0, 1, várias lajes do lado Norte, a escada principal de acesso ao Auditório principal, a laje do piso 8, etc.



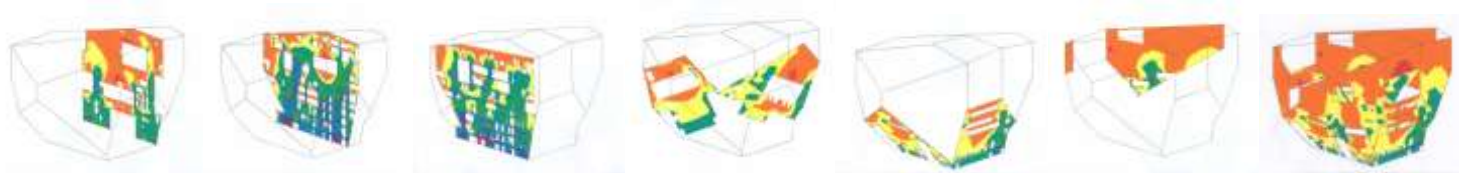
Além de servir para determinar os esforços em todos os seus elementos devidos às acções gravíticas, térmicas, reológicas, sísmicas e do vento, serviu igualmente para determinar os deslocamentos e as deformações.



A necessidade de limitar a dimensão do modelo de modo a garantir a compreensão clara do seu funcionamento estrutural, e a permitir uma rápida detecção de inevitáveis erros de modelação, levou a que nele só fossem considerados os elementos que se verificou terem importância significativa no comportamento global da obra. Os restantes elementos foram estudados através de modelos separados mais ou menos complexos, sendo as acções por eles transmitidas à estrutura primária consideradas no estudo desta. As lajes incluídas neste modelo foram introduzidas de forma simplificada de modo a serem avaliados os esforços de membrana nelas existentes e os momentos por elas introduzidos na casca exterior. O estudo dos esforços de flexão nas lajes foi realizado em modelos separados e mais refinados.



O referido modelo deu origem a vários outros que dele diferem apenas pelo maior refinamento e pormenorização da malha de elementos finitos em certas zonas. Desta forma, foi possível estudar, por exemplo, os painéis exteriores considerando todas as suas aberturas, utilizando malhas refinadas em zonas de concentração de esforços e considerando acções localizadas não introduzidas no modelo “mãe”, sem nunca deixar de considerar os esforços resultantes do funcionamento global para todas as combinações de acções. Como o programa utilizado permite calcular armaduras em cascas de betão armado, estes modelos refinados serviram igualmente para fazer uma primeira aproximação à distribuição das armaduras.



Faseamento Construtivo e escoramento

A construtibilidade do Edifício dos Auditórios da Casa da Música constituiu um dos principais desafios para toda a equipa envolvida no Projecto e na construção da Casa da Música. A estabilidade das paredes inclinadas durante a construção e o facto de a estrutura só ser estável no seu conjunto, isto é, após conclusão de toda a casca exterior, obrigaram a um estudo específico do faseamento construtivo de toda a estrutura, que dependia naturalmente da sequência de construção prevista pelo empreiteiro, em função dos seus meios de produção.

Este estudo foi antecedido pela definição, com o empreiteiro, do tipo de escoramento e cofragem a utilizar, fortemente condicionado pela estereotomia definida pela arquitectura, oblíqua relativamente às juntas de betonagem. A solução encontrada está patente na fotografia anexa e tem por base duas malhas de estrutura independentes – uma estrutura principal, metálica, vertical, que dava apoio à estrutura secundária, de madeira, oblíqua, sobre a qual se apoiavam os painéis de cofragem propriamente ditos. Esta estrutura possibilitava a obtenção da estereotomia pretendida, assegurando o rigor da continuidade das linhas de cofragem definidas e permitia a desmontagem dos níveis de cofragem inferiores, de modo a reduzir o tempo de permanência do equipamento de cofragem em obra.



O estudo de faseamento realizado tinha assim como objectivo adicional a minimização do tempo de permanência das cofragens em obra, de modo a libertar as áreas que lhe ficavam subjacentes para a realização dos trabalhos necessários. É claro que uma solução de “escoramento total” que se mantivesse até ao “fecho” da casca exterior do edifício garantiria a estabilidade do edifício durante toda a construção mas prejudicaria a mobilidade dentro da obra e o cumprimento dos prazos, pelo que não era então desejável.

Nesse sentido, com base no plano de trabalhos inicial do empreiteiro, que definia a sequência de operações de betonagem por ele previstas, foram definidas no edifício 88 fases de construção cuja estabilidade foi estudada individualmente.



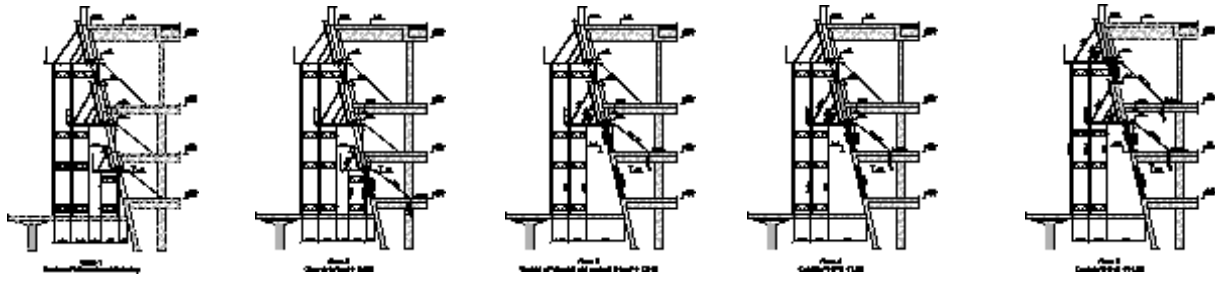


A fim de possibilitar a desmontagem do escoramento dos painéis inclinados ainda antes da execução das lajes horizontais que lhe conferiam o necessário travamento, foram estudados dispositivos de travamento provisório – tirantes Diwidag ancorados em peças estruturais entretanto concluídas.

Neste estudo houve que dedicar atenção particular ao chamado painel 13 (o mais inclinado) e a todo o sector sul (foyer) pela grande dimensão das peças em causa e o elevado número de fases abrangido por cada uma.

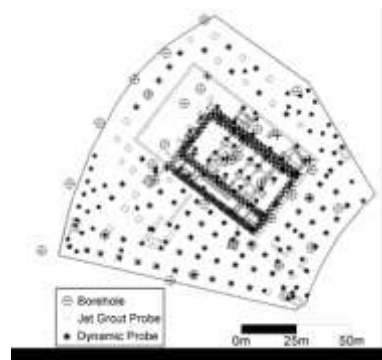
As reais condições de execução da obra, em termos de faseamento, foram determinando ajustes do estudo da estabilidade da estrutura durante a construção, tendo-se constatado que, em diversas situações e por questões de logística, o empreiteiro acabou por optar pela manutenção do escoramento até fases mais tardias da obra.





Fundações

No Edifício dos Auditórios foram adoptadas fundações indirectas por meio de estacas fundadas em granito pouco alterado, no Parque de Estacionamento foram utilizadas sapatas fundadas no estrato saibroso existente à cota da base dos pilares.



Reconhecimento Geológico – Geotécnico

O reconhecimento geológico - geotécnico realizado constou de sondagens à percussão e rotação com ensaios SPT espaçados de 1.5m . Estes ensaios foram complementados com ensaios com penetrómetro pesado tipo DPSH para as fundações directas (parque). Foram ainda realizadas sondagens com furação destrutiva na zona das estacas para identificação do nível do “bed-rock”. Do reconhecimento realizado pôde-se concluir que o terreno é muito heterogéneo com intercalações de estratos de rocha dura com saibro (lajes de rocha).

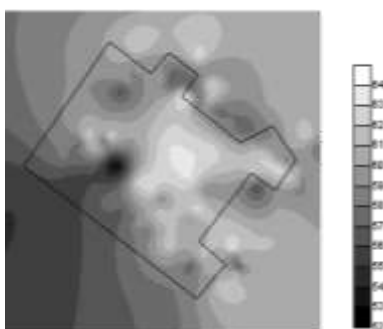
Parque de Estacionamento

Para o dimensionamento das fundações directas foi feito um zonamento do terreno em termos de deformabilidade (possança e características do estrato de saibro acima da rocha). Utilizou-se um modelo de cálculo onde foi considerado o comportamento global do estrato de saibro solicitado pelas cargas localizadas das sapatas. O critério de dimensionamento preponderante foi a limitação de assentamentos diferenciais entre pilares ou paredes vizinhos..

Edifício dos Auditórios



Utilizaram-se estacas Ø800 e Ø1300 moldadas no terreno com o furo estabilizado provisoriamente com lamas bentoníticas. A escavação das estacas foi feita com recurso a trado (solo) e/ou carotadora/trado de rocha e limpadeira (solos muito compactos e rocha branda).



As estacas foram dimensionadas para as reacções de apoio rígido do modelo 3D de cálculo.

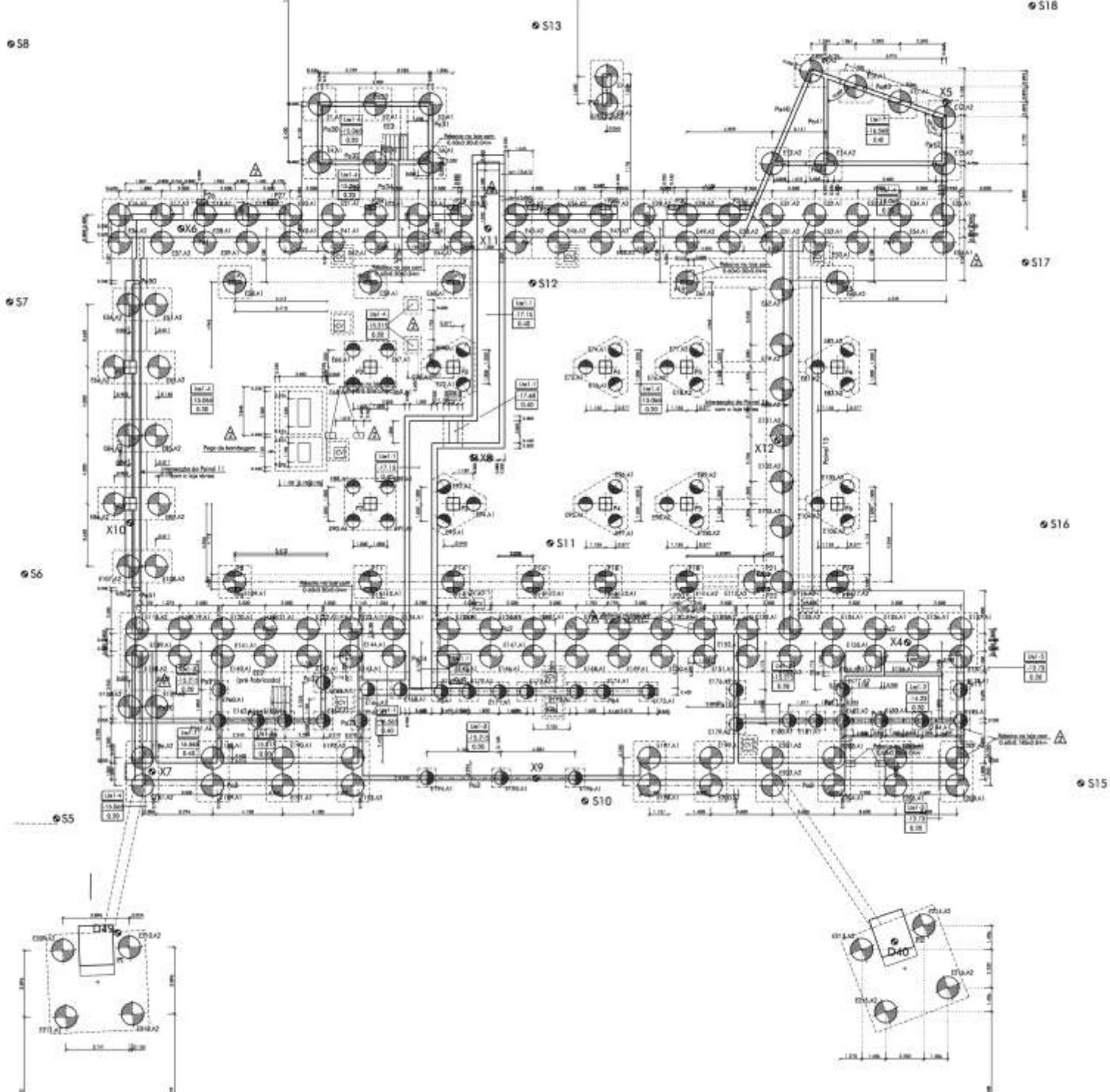
Posteriormente, no caso de estacas que não cumpriam os critérios de conformidade (ensaios sísmicos, carotes de fundo de estaca, velocidades de penetração) foram verificadas como apoios elásticos no modelo estrutural, tendo sido avaliada capacidade de redistribuição dos maciços de encabeçamento e da estrutura. As estacas foram consideradas a funcionar exclusivamente de ponta.

Ensaios em estacas



Realizaram-se 2 ensaios de carga em estacas. O primeiro tinha como fim a avaliação da carga última das estacas. (2 x carga de serviço numa estaca Ø800). Com o segundo pretendia-se avaliar o seu comportamento em serviço (1.5 x carga de serviço numa estaca Ø1300). Os resultados dos ensaios de carga confirmaram as condições de execução das estacas eram adequadas. Note-se que os ensaios de carga foram realizados já com a obra em andamento (não foram ensaios prévios).

Foram ainda realizados ensaios sísmicos correntes em todas as estacas para verificação da integridade do betão das estacas e ainda ensaios sísmicos cross-hole e carotagens de fundo de estaca para avaliação das condições do pé das estacas nas estacas mais carregadas e naquelas em que os registos da furação indicavam que poderia haver anomalias.



Controlo de qualidade das estacas

Para além da necessidade de se assegurar que a estaca estava fundada em terreno competente, foi necessário ter particular cuidado nas condições do fundo da estaca, pois um fundo de estaca “mole” provocaria assentamentos mesmo estando no terreno de fundação previsto. Para isso, tomaram-se as seguintes medidas:

- Reduzido tempo entre a abertura do furo e a betonagem da estaca,
- Apertado controlo das características das lammas bentoníticas,
- Processos de limpeza do fundo do furo.

Como já foi referido, nas estacas mais carregadas ou em que haveria suspeitas de contaminação do fundo dos furos (tempo elevado entre furação e betonagem ou resultados dos ensaios sínicos correntes inconclusivos) foram realizados ensaios sínicos cross-hole até à base da estaca e, no caso de ainda restarem dúvidas eram realizadas carotagens de pé de estaca (com 2m de comprimento, 1m na estaca e 1m no terreno). Houve estacas para as quais se teve que considerar uma relação tensão -deformação reduzida e verificar as implicações no comportamento estrutural.

Critério de paragem da furação para as estacas

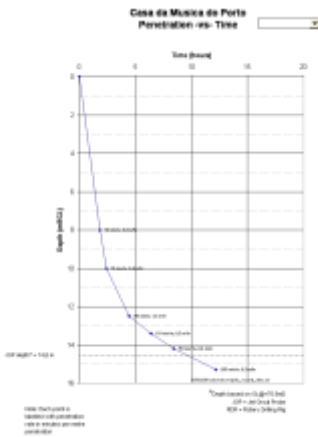
Devido às cargas suportadas e aos assentamentos admissíveis, as estacas foram fundadas em rocha com grau de alteração W3 (ou menor) e RQD \geq 50%.

Inicialmente foram feitos furos nos locais de cada grupo de estacas com uma máquina de furação a água para determinar a cota de pé de estaca (a velocidade de furação desta máquina tinha sido calibrada com a execução de furos prévios junto a sondagens). No entanto este equipamento foi incapaz de atravessar estratos duros que se encontravam a pequenas profundidades e as vel. de penetração não era sempre coerente com a vel. de penetração da máquina de estacas, pelo que este método foi abandonado para determinar cotas de pé de estaca.

O método que se revelou mais fiável para a paragem das estacas foi a análise da velocidade de penetração da máquina de estacas, tendo sido realizadas algumas sondagens complementares para garantir que não se estaria a fundar num estrato duro sobrejacente a um estrato de solo.

Os critérios adoptados para a determinação das cotas de fundo de estaca foram:

- comprimento mínimo definido pelos dados da prospecção geotécnica e furos prévios,
- paragem da furação (abaixo do comprimento mínimo) quando se regista uma velocidade de penetração inferior a 0.50m/h medidos num período de meia hora.
- excepcionalmente algumas estacas tiveram comprimento inferior ao mínimo devido a “nega” da máquina de estacas (geralmente penetração inferior a 1m em 2 horas).



Serviços

A Casa da Música representou um desafio na aplicação da engenharia de serviços num edifício público. Aliás, este edifício foi encarado pela equipa como uma obra de arte o que motivou e justificou à partida uma abordagem particular e específica no desenvolvimento de conceitos e soluções técnicas.

O caminho para o sucesso não é uma linha recta e o desenvolvimento do projecto transformou-se num processo iterativo que teve como base os desenvolvimentos da arquitectura e como espinha dorsal uma efectiva e constante comunicação entre os membros da equipa. Os procedimentos de coordenação existentes e aplicáveis para um projecto comum cedo se mostraram inadequados para um edifício desta natureza, pelo que seria necessário proporcionar um apoio constante e eficaz à Arquitectura.

A definição dos pressupostos de projecto teve duas componentes distintas, as necessidades do cliente e a integração com a Arquitectura. A primeira componente foi amplamente explorada através de uma articulação com os representantes do cliente, quer consultores, quer elementos operacionais que de uma forma inequívoca expressaram e definiram o que esperavam tecnicamente do edifício – o melhor edifício do género no mundo.

Na fase de projecto a equipa confrontou as soluções com as mais rigorosas e avançadas ferramentas de análise e cálculo e submeteu-as de uma forma de absoluto compromisso com as legislações e normas nacionais ou estrangeiras de forma a conduzirem a resultados seguros e de reduzido impacto ambiental.





Instalações Eléctricas

O projecto de Instalações e Equipamentos Eléctricos inclui uma grande diversidade de sistemas que permitirão ao edifício possuir soluções seguras, economicamente optimizadas e acima de tudo integradas com a arquitectura.

Podemos salientar:

- Alimentação e distribuição de energia;
- Iluminação normal, de emergência e infra estruturas para iluminação cénica;
- Alimentação de equipamentos diversos;
- Infra estruturas telefónicas e para sistema estruturado de cablagem;
- Infra estruturas para sistemas de distribuição e captação de som e imagem;

Uma das principais particularidades do projecto das instalações eléctricas é a grande interacção com diversas instalações, nomeadamente: as instalações mecânicas, cénicas, hidráulicas e de segurança. Por este motivo, a comunicação e coordenação inter-especialidade são cruciais, de forma a permitir uma adequada integração do conjunto.

De uma forma geral, as áreas técnicas encontram-se disseminadas por todo o edifício, conferindo-lhe assim uma versatilidade importante, num edifício deste tipo.

A alimentação normal de energia eléctrica ao edifício será realizada através de uma rede de média tensão sendo portanto considerada a instalação de um posto de transformação constituído por dois transformadores em paralelo (2x1250 KVA).

O abastecimento de energia de emergência será utilizado para assegurar as funções essenciais ao funcionamento do edifício sendo previsto para o efeito um grupo gerador constituído por um motor diesel e alternador com uma potência nominal de 630 KVA. Esta fonte de energia será utilizada quer por equipamentos de segurança contra incêndio (desenfumagem, bombas de incêndio, pressurizações, elevadores e iluminação de emergência), quer pelos sistemas associados aos espectáculos que deverão ser mantidos em caso de falha de energia pública.

O edifício disponibilizará também de um sistema de abastecimento ininterrupto de energia, do tipo UPS que possibilitará garantir a alimentação eléctrica aos equipamentos de informática considerados essenciais ao funcionamento do edifício. Este sistema terá uma potência de aproximadamente 30 KVA.



Como componente intrínseco da arquitectura, as soluções luminotécnicas tiveram um papel importante que se traduziu pela utilização de sistemas tecnologicamente avançados e por métodos de cálculo e análise sofisticados. Dentro da diversidade preconizada pela arquitectura salientam-se as soluções de iluminação através de tectos de policarbonatos ou de chapa metálica perfurada.

Associada às soluções luminotécnicas encontra-se a iluminação de emergência que permitirá assegurar em caso de emergência a iluminação ambiente, a iluminação nos corredores e caminhos de fuga e a iluminação do tipo sinalização do sentido de saída normal e de emergência.

Ainda interligada aos sistemas de iluminação, mas com uma componente específica e que contou com uma abordagem especializada, é a iluminação cénica que permitirá pôr à disposição da Casa da Música sistemas profissionais para a realização de espectáculos do nível ambicionado.

Como foi dito anteriormente, a versatilidade é uma das características mais privilegiadas num edifício deste tipo. Neste sentido foi projectado um sistema profissional de áudio e vídeo que permitirá a captação, emissão e projecção de imagens e som profissional por todo o edifício, incluindo a praça exterior.

No que diz respeito aos sistemas de segurança contra intrusão, serão previstos sistemas de controlo de acessos e um circuito interno e externo de vídeo vigilância. Está ainda preconizado um sistema de difusão de som ambiente que poderá ser usado também para comunicações e anúncios gerais ou de emergência para o público.

O controlo de todos os sistemas e equipamentos descritos será centralizado numa sala de segurança através de um sistema de gestão técnica centralizada que permitirá o seu controlo e monitorização remota.

Instalações Mecânicas

A Casa da Música terá ao seu dispor um conjunto de soluções de climatização que permitirão condições ideais de conforto e qualidade de ar interior.

Os sistemas previstos incluem:

- Sistemas de Produção e Distribuição de água refrigerada e água quente;
- Sistemas de Ventilação e Ventilação de Emergência;
- Sistemas de Tratamento Ambiente;

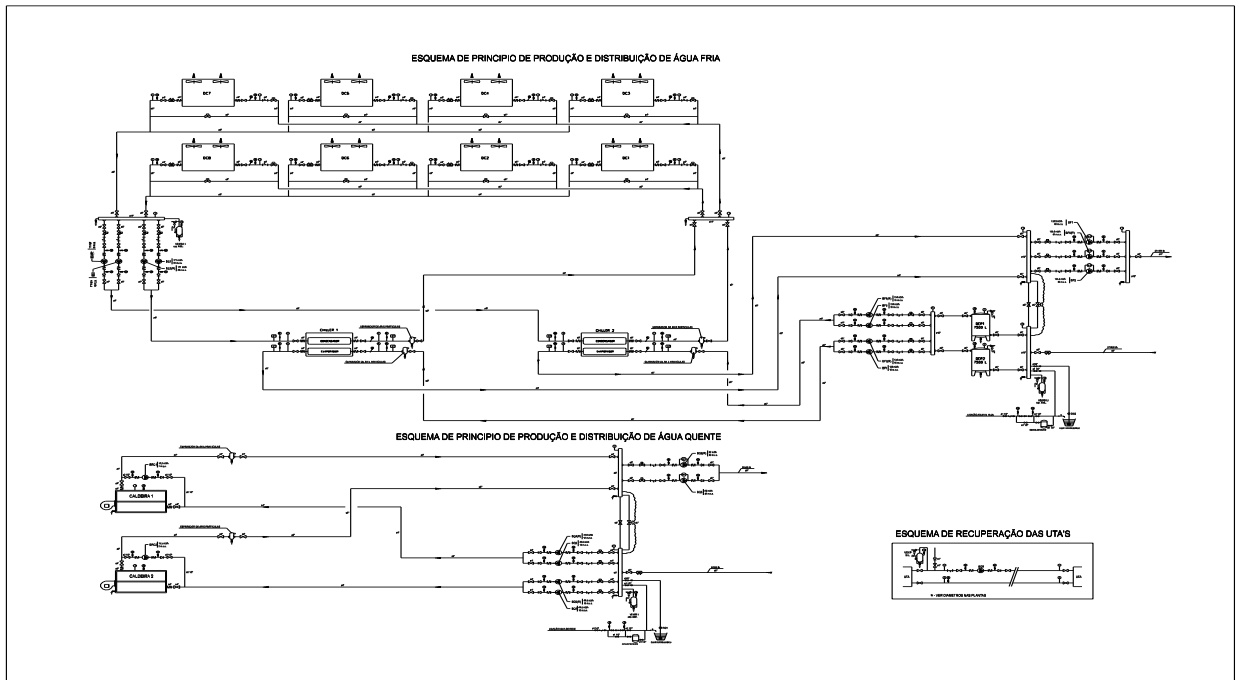
O sistema de produção de água refrigerada será constituído por dois Grupos de Produção (chillers) arrefecidos a ar por intermédio de unidades do tipo dry collers colocados no exterior do edifício, que permitirão o arrefecimento dos condensadores de uma forma remota. Os chillers estão localizados numa área técnica do Piso -3. A potência dos grupos produtores de água refrigerada é de 2x780Kw, correspondendo a sua soma a 80% da carga máxima espectável considerando a simultaneidade de funcionamento dos diferentes espaços na carga total.

A produção de água quente será assegurada através de duas caldeiras com queimadores de gás, localizadas no Piso 9 (último piso). A potência de aquecimento instalada é de 2x750 Kw.

A distribuição de água quente e fria será garantida por intermédio de grupos bombagem e linhas de distribuição a cada ponto de consumo.

Os sistemas de ventilação compreendem diversas componentes, desde a ventilação higiénica para assegurar a salubridade do ar interior até soluções de evacuação de fumos e pressurização de vias de evacuação em caso de emergência.





Os sistemas de tratamento ambiente incluem uma variedade de soluções que vão desde os comuns ventiloconvectores até aos sistemas displacement (Grande Auditório) ou de pavimentos radiantes. O Grande Auditório constitui-se como o local principal de todo o Complexo, facto pelo qual foi alvo de concepção, a todos os níveis, excepcionalmente cuidada.

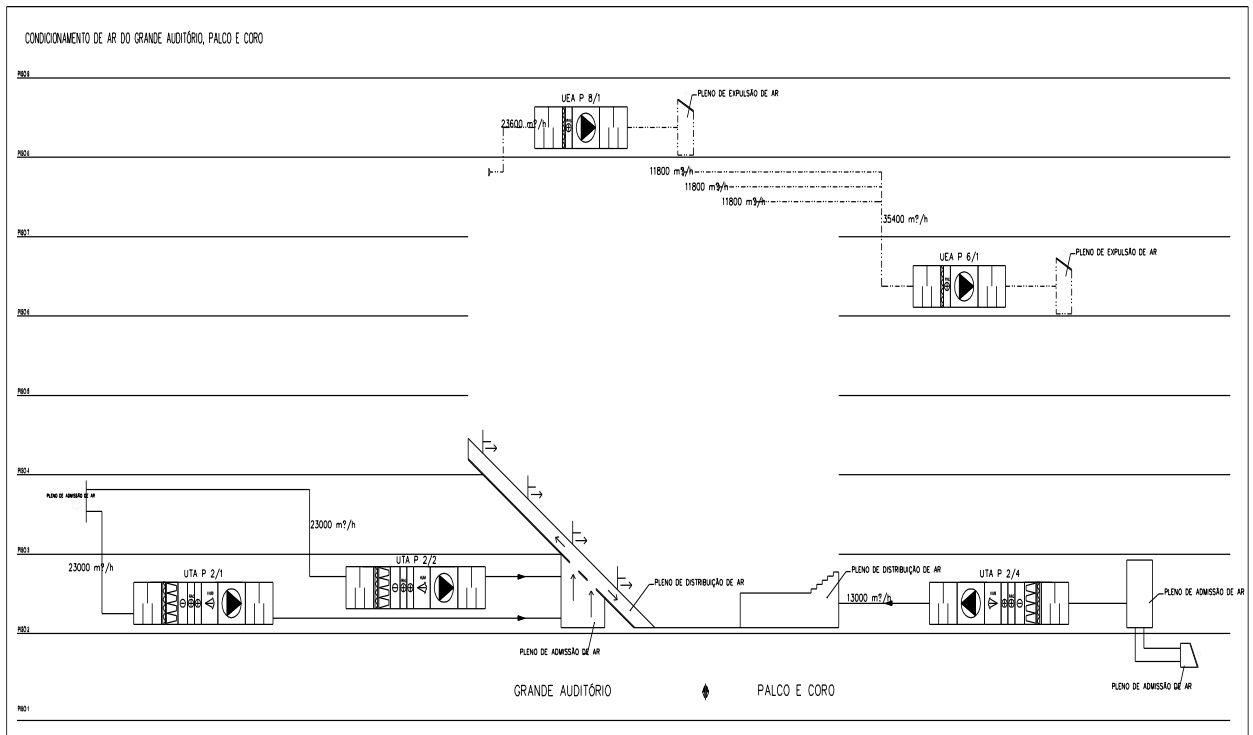
No que respeita às Instalações Mecânicas, será de referir que este local tem como condicionalismo base o facto de ser uma sala com índice acústico NC 15, pelo que toda a instalação foi dimensionada de modo a respeitar este requisito.

O sistema de tratamento ambiental previsto tem em conta a Arquitectura do local, em particular o seu elevado pé-direito, realizando-se a insuflação de ar junto à zona de ocupação, a baixa velocidade e com temperaturas próximas da temperatura ambiente pretendida (Sistema “displacement”).

Este modo de funcionamento permite uma economia de energia substancial, pois diminui significativamente o volume de ar a tratar, tirando partido da estratificação natural da temperatura do ar no interior do local.

O dimensionamento dos sistemas foi baseado no caudal de ar de insuflação por pessoa (12 l/s.pessoa) e funcionará sempre com 100% de ar exterior (ar novo).





A generalidade dos espaços terá o tratamento ambiente assegurado por unidades de tratamento de ar específicas associadas a sistemas de volume de ar variável. Este sistema permitirá um controlo de temperatura individual para cada espaço e, face aos sistemas tradicionais, tem a vantagem de estar associado a soluções de menor consumo energético.

O grande desafio que os projectistas enfrentaram foi sem dúvida a integração destes sistemas com a arquitectura de forma a não constituírem uma limitação, mas sim um ponto de partida para soluções arrojadas. Esta interligação proporcionou uma vasta coexistência de diferentes sistemas e soluções de engenharia aliadas a uma das grandes preocupações presentes - a busca de conceitos energéticos de alto rendimento associados a um cuidado na utilização de tecnologias de baixo impacto ambiental

Como componente essencial do conceito, a acústica teve um papel preponderante no desenvolvimento dos sistemas de climatização, estando presente desde o desenvolvimento dos conceitos e filosofias. A verificação acústica impôs apertadas restrições e condicionalismos aos sistemas que resultaram em soluções compatíveis com a performance fora de série do edifício.





Instalações Hidráulicas

As Instalações Hidráulicas constituem-se como um elemento central das instalações técnicas da Casa da Música. À semelhança de um edifício tradicional, as instalações compreendem:

- Rede de Abastecimento de Água;
- Rede de Drenagem de Águas Residuais;
- Rede de Drenagem de Águas Pluviais;
- Rede de Gás;
- Produção de Águas Quentes Sanitárias;
- Rede de Incêndio Armada;
- Rede de Sprinklers;



O abastecimento de água ao edifício será proveniente da rede pública e devido aos baixos valores de pressão dinâmica verificados na zona, foi necessário prever a infra estruturação do edifício com meios próprios de reserva e pressurização da rede. Assim, consideraram-se duas alimentações distintas: uma para abastecimento de um reservatório de incêndio e outra para adução de um reservatório de água de consumo, ambos situados no Piso -3.



O dimensionamento foi feito de modo a garantir o abastecimento à Casa da Música por um período de 24 horas, em caso de falha no abastecimento público. O volume útil disponível no reservatório de betão armado, localizado no Piso -3, é de 40000 litros.



Uma das particularidades do edifício é, sem dúvida, a cobertura global da área coberta por uma rede de sprinklers. Este facto deve-se à singularidade da arquitectura e possibilita um grau de segurança contra-incêndio fora de comum em edifícios desta natureza e que motivou a necessidade de instalação de um depósito reserva com 296 000 litros.

Estatísticas – Edifício dos Auditórios

Área de Construção	20.136 m ²
Volume de Betão Branco	17.000 m ³
Volume de Betão Cinzento	4.000 m ³
Área Total de Cofragem à vista	27.500 m ²
Área Total de Cofragem não à vista	38.000 m ²
Cofragem / Área de Construção	3.25 m ² / m ²
Cofragem / m ³ de betão	3.12 m ² / m ³
Aço em varão	3.300 ton
Aço em varão / Área de Construção	164 kg / m ²
Aço em varão / m ³ de betão	157 kg / m ³
Aço de construção	520 ton

Estatísticas – Parque de Estacionamento

Área de Construção	28.500 m ²
Volume de Betão Cinzento	14.000 m ³
Área Total de Cofragem à vista	44.500 m ²
Área Total de Cofragem não à vista	9.000 m ²
Cofragem / Área de Construção	1.88 m ² / m ²
Cofragem / m ³ de betão	3.82 m ² / m ³
Aço em varão	1.700 ton
Aço em varão / Área de Construção	60 kg / m ²
Aço em varão / m ³ de betão	121 kg / m ³

