



O NOVO MUSEU DE ARTE, ARQUITETURA E TECNOLOGIA

Rui Furtado^a, Miguel Pereira^b

^{a,b} *Afaconsult*

Resumo. O MAAT, Museu de Arte, Arquitetura e Tecnologia, situado a Nascente do Museu da Eletricidade e junto ao rio Tejo em Lisboa foi promovido pela Fundação EDP e teve recentemente a sua inauguração em Outubro de 2016. Como requisitos para a sua estrutura portante realça-se a necessidade de adaptação à arquitetura complexa de formas curvilíneas e a procura pela eliminação de elementos estruturais verticais no interior dos espaços de exposição. O artigo pretende descrever as principais soluções estruturais desta obra, a sua análise estrutural, bem como os processos adotados para a sua construção.

1. Introdução

Com uma arquitetura complexa de formas curvilíneas, no MAAT, entre outros espaços técnicos, encontram-se três grandes e fluidos espaços expositivos que representam uma área expositiva de cerca de 3000m², num total de cerca de 7500m² de área bruta interior. Esses três espaços são integrados e interligados, podendo funcionar combinados entre si ou totalmente independentes (“Oval Gallery”, “Main Gallery” e “Project Room”). A abordagem estrutural baseou-se num espaço totalmente aberto, com paredes estruturais, que para além de maximizar a escala e flexibilidade das exposições, permitiu que o Museu se enchesse de luz, potenciando a experiência dos visitantes.

A principal sala de exposição, a “Oval Gallery”, consiste num espaço de duplo pé-direito que se abre a partir da entrada principal, que aproveita a altura de 8m e engloba uma área de cerca de 800m², à qual se associa uma galeria rampeada e espaço de circulação, ao longo da curva sinuosa que desce pelo interior do edifício desde o átrio de entrada (cota +6,00m) até piso térreo (cota +1,20).

Conceptualmente, o percurso pedonal da frente ribeirinha (“Fig. 1”) vai-se transformando, à medida que se levanta até se tornar na cobertura pedonal e ciclável do edifício, uma praça que poderá funcionar como espaço multiusos com uma vista panorâmica de 360°, regressando

depois à cota baixa (média +3,60m), onde se funde com a paisagem envolvente do Museu da Eletricidade e do passeio ribeirinho.



Fig. 1: Vista ribeirinha do edifício

2. Soluções estruturais

2.1 Descrição sumária da estrutura

A estrutura do museu apresenta um comprimento de cerca de 160m, sendo a sua largura variável entre 60 e 20m. As áreas técnicas dos lados Poente e Nascente são separadas da restante estrutura por juntas de dilatação, ficando o corpo principal central com um comprimento de 120m.

Os elementos estruturais verticais são maioritariamente compostos por paredes e núcleos em betão armado, sendo de destacar as paredes com curvatura variável que delimitam os vários espaços de exposição. Todas as estruturas de cobertura do edifício principal, bem como as estruturas de pavimento das zonas acessíveis ao público são metálicas e mistas. As principais estruturas metálicas que compõem o edifício são os pavimentos do piso 1, a claraboia da “Main Gallery”, a cobertura da “Oval Gallery”, o arco de suporte à cobertura do lado Sul e a estrutura de suporte à fachada Sul.

As áreas técnicas adjacentes ao edifício principal são integralmente em betão armado.

2.2 Estrutura do piso 1

A estrutura dos pavimentos do piso 1 é composta por lajes mistas em betão com chapa metálica colaborante apoiadas sobre vigas metálicas. A ligação das vigas metálicas às lajes é materializada por conectores tipo perno, conferindo-lhes um funcionamento misto.

Na zona da entrada principal os vãos máximos a vencer pelas vigas são de 16.7m entre a parede mais a sul e a parede da zona central e de 15.4m entre esta parede e a parede mais a Norte. Tendo em conta que a parede intermédia não abrange todas as vigas, algumas delas apoiam-se indiretamente numa outra viga metálica “perpendicular”. As vigas metálicas são compostas por perfis IPE500, HEB500, ou em alguns casos em perfis reconstituídos soldados

(PRS) com 500mm de altura, sendo o vão a vencer pela laje colaborante de 2.50m na direção perpendicular às vigas.

Para a laje que se apoia nestas vigas prevêem-se duas soluções distintas. Nas zonas públicas do edifício pretende-se um pavimento em betão aparente polido que incorpore no seu interior um sistema de tubagens para pavimento radiante e uma camada de isolamento acústico. Mediante estas exigências optou-se por um pavimento com chapa colaborante e laje de betão com 20cm de espessura, com intercalação do isolamento acústico entre os dois elementos. O isolamento é interrompido sobre as vigas metálicas para que se possa materializar a ligação mista entre a laje e as vigas (“Fig. 2”). A utilização da chapa colaborante permite, além do apoio para o isolamento acústico, evitar a utilização de cofragem entre vigas metálicas para execução da laje de betão.

Nas zonas periféricas do edifício preconiza-se uma laje mista tradicional com chapa colaborante com 13cm de espessura apoiada diretamente sobre os perfis metálicos.

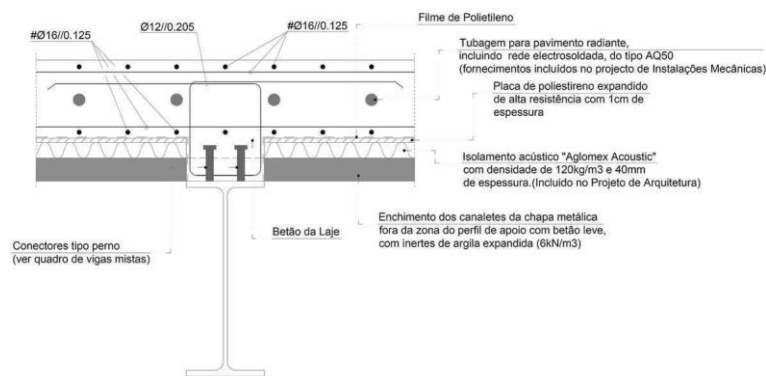
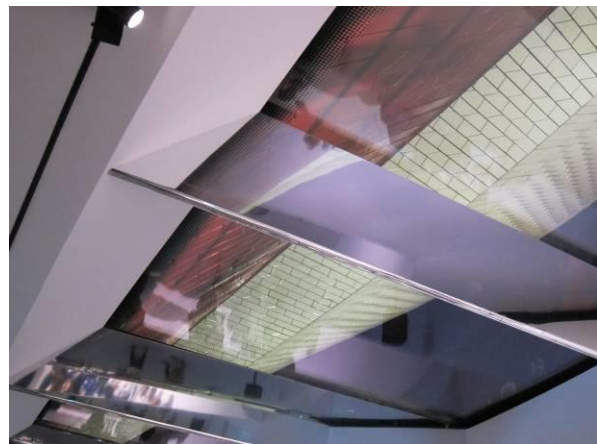


Fig. 2: Pormenor da laje do piso 1

2.3 Cobertura da “Main Gallery”

Na zona da claraboia sobre a “Main Gallery” pretende-se uma estrutura que sirva de apoio aos vãos envidraçados da claraboia e que minimize a obstrução à passagem de luz natural. Utilizaram-se vigas metálicas “I” em perfis reconstituídos soldados com 20cm de largura e com alturas variáveis entre 565mm e 785mm consoante o vão a vencer, que atinge um máximo de 16.5m. Por imperativo arquitetónico o banzo inferior das vigas é eliminado no atravessamento da claraboia, formando nesta zona vigas em “T” (“Fig. 3”).



a) Estrutura metálica

b) Vista interior final da claraboia

Fig. 3: Claraboia da “Main Gallery”

Além do suporte aos vãos envidraçados estas vigas servem também de apoio à estrutura de pavimento do restaurante que se situa imediatamente a Norte da claraboia e a uma cota 2.0m mais elevada. Esta é uma estrutura ligeira em vigas IPE e “pilares” tubulares apoiados sobre as vigas metálicas. Sobre as vigas IPE adotou-se uma laje mista com chapa colaborante com 13cm de espessura total.

2.4 Cobertura da “Oval Gallery” e do “Project Room”

Para libertar a maior sala de exposições (“Oval Gallery”) de quaisquer elementos verticais de apoio visíveis a cobertura desta zona vence um vão máximo na direção Norte-Sul de 25.7m. Utilizam-se treliças metálicas tipo “Pratt” espaçadas de 5m, com um rácio vão-altura de aproximadamente 12 e com apoio simples nas paredes periféricas da sala.

Na cobertura sobre o “Project Room” prevêem-se também treliças afastadas de 5m apoiadas em paredes de betão sendo o vão máximo neste caso de 26.8m. Tendo em conta que a altura disponível para colocação das treliças não é suficiente para o vão em causa, incluiu-se uma nova treliça com 19.2m de vão na direção perpendicular que confere um apoio elástico intermédio às restantes treliças (“Fig. 4”).



a) “Oval Gallery”



b) “Project Room”

Fig. 4: Treliças de cobertura

A ligação entre as treliças de cobertura e o coroamento das paredes de betão é estabelecida através de pilares metálicos que em determinados locais são complementados por contraventamentos em cruz (“Fig. 5”). Esta solução resultou da decisão de não prolongar o coroamento das paredes de betão até à laje cobertura com cota variável, reduzindo deste modo a interligação entre os trabalhos de execução da estrutura metálica e da estrutura de betão armado.



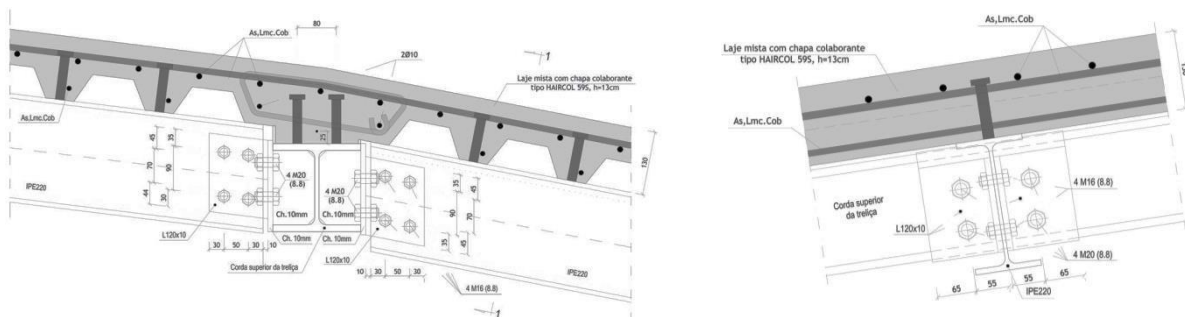
a) Núcleo lateral

b) Núcleo central

Fig. 5: Travamentos da cobertura

Sobre as treliças apoiam-se madres IPE220 espaçadas de 2.5m que vencem o vão de 5m. Sobre as madres preconiza-se uma laje mista com chapa colaborante com 13cm de espessura total, o que lhes confere um comportamento misto relevante.

Todas as treliças e madres são inclinadas e paralelas à superfície variável que compõe o revestimento final da cobertura. Deste modo consegue-se minimizar o enchimento a aplicar sobre a laje e maximizar o pé direito dos espaços. Todas madres são posicionadas com a sua face superior 2.5cm acima da face superior das treliças que lhes servem de apoio, de modo a garantir que a espessura da laje não é afetada pela inclinação da cobertura na interseção com o banzo superior do perfil da treliça (“Fig. 6”).



a) Alçado lateral

b) Alçado frontal

Fig. 6: Pormenor das madres de cobertura

2.5 Arco de suporte à cobertura do lado sul

Tendo em conta a impossibilidade de introduzir qualquer elemento vertical na “Main Gallery”, para a zona de cobertura mais a Sul sobre o restaurante dispõe-se apenas de um alinhamento de apoio vertical constituído pela parede Sul da “Oval Gallery”. Desde esta parede até à sua extremidade Sul a cobertura terá que vencer um vão máximo de 25.0m. Tendo em conta que a altura de teto disponível não permite vencer este vão em consola, revelou-se necessário incluir um apoio intermédio na direção Poente-Nascente.

Nas fases iniciais de projeto optou-se pela introdução de uma treliça do tipo “Pratt” com desenvolvimento entre o piso 1 e a cobertura, vencendo um vão máximo de 40m. Embora esta solução cumprisse o objetivo de não introduzir elementos verticais na “Main Gallery” (piso 0), a presença de perfis robustos na varanda do restaurante (piso 1) tinha um impacto expressivo, quer na vista sobre o Rio Tejo a partir da varanda, quer na leitura arquitetónica da fachada sul (“Fig. 7”).



Fig. 7: Solução inicial – Treliça na varanda do restaurante

Com o objetivo de procurar também eliminar a presença de qualquer elemento estrutural visível ao nível da varanda do restaurante, optou-se por substituir a treliça por um arco posicionado num plano inclinado a 32.4° com a vertical e inserido na geometria curva do teto da varanda e da fachada Sul. Sobre o arco apoiam-se treliças do tipo “Pratt” nos mesmos alinhamentos das treliças da “Oval Gallery” que vencem um vão máximo de 14m entre a parede de apoio e o arco e de 12m em consola a Sul do arco. Note-se que, embora estas treliças estejam sobre os mesmos alinhamentos das treliças da sala adjacente, optou-se por não conferir continuidade de momentos sobre a parede que lhes serve de apoio. Deste modo as treliças de ambos os lados têm comportamento estrutural independente e passam a ser isostáticas, o que garante um conhecimento mais preciso das cargas aplicadas sobre o arco.

O arco que se desenvolve entre o piso 1 e a cobertura tem os seus pontos de arranque do lado Poente à cota +6.60 e do lado Nascente à cota +5.60, sendo que o seu ponto mais alto, posicionado sensivelmente a meio vão, se situa à cota +14.55. O seu vão livre é de 73m entre pontos de apoio, apresentando um rácio vão-flecha de 7.3 medido no plano do arco.

A configuração do arco não é circular nem parabólica, mas sim a correspondente ao antifunicular das cargas aplicadas. Sendo assim, o arco é composto por segmentos retos de perfil com mudança de inclinação na interseção com as treliças.

A determinação da geometria final do arco passou numa primeira fase pela determinação exata das forças exercidas pelas treliças de cobertura sobre o arco perante a ação de todas as cargas permanentes e da sobrecarga uniformemente distribuída. Impondo as coordenadas dos pontos de arranque, chegada e de cota máxima é possível, por aplicação da estática gráfica, determinar a cota de todos os pontos de aplicação de cargas de modo a que a configuração final do arco seja o antifunicular das cargas aplicadas (“Fig. 8”).

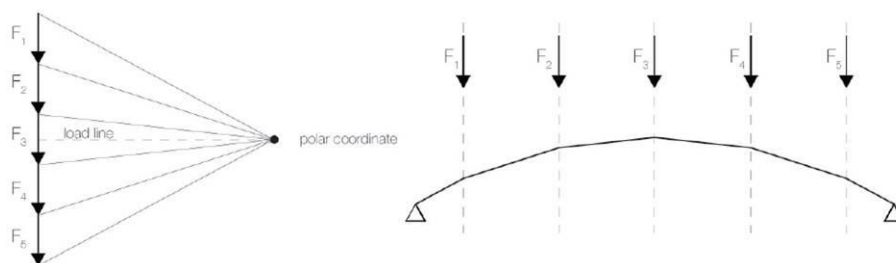


Fig. 8: Estática gráfica

A secção utilizada para o arco é tubular redonda com 711mm de diâmetro exterior e 60mm de espessura (CHS 711x60) acabada a quente de acordo com a norma EN10210 em aço S355NH. A adoção de uma secção tubular prende-se com a sua elevada resistência à encurvadura, permitindo a otimização do seu dimensionamento. A utilização de um perfil

acabado a quente permite ainda minimizar as imperfeições de fabrico, o que se afigura como vantajoso do ponto de vista da verificação de segurança pela possibilidade de adoção da curva de encurvadura a da NP EN 1993-1-1 [1].

De modo a reduzir o comprimento de encurvadura do arco, materializou-se uma treliça no seu plano mediante a introdução de diagonais, perfis ao nível da laje de cobertura e perfis ao nível da cota inferior do teto (“Fig. 9”). Esta treliça permite ainda conferir a resistência necessária para fazer face a eventuais carregamentos assimétricos. O esforço axial de cálculo máximo instalado no arco obtido através do modelo global de elementos finitos foi de 35.1MN, sendo este valor muito semelhante à estimativa obtida através do método gráfico.

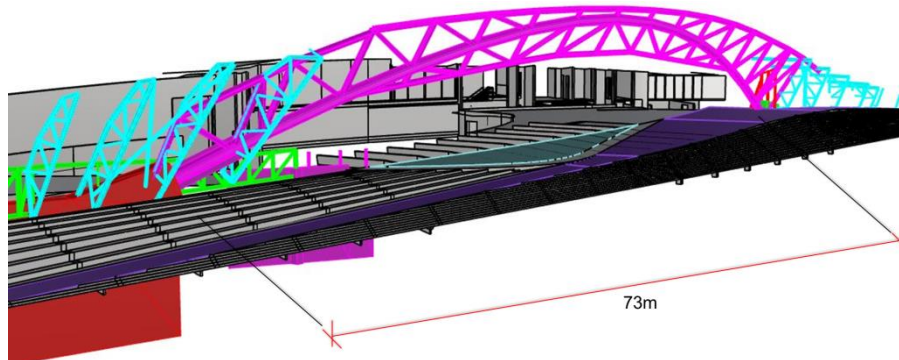
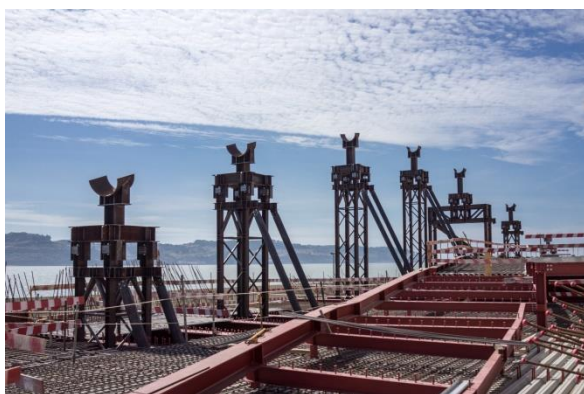


Fig. 9: Solução final – Arco treliçado

Os apoios do arco são compostos por paredes de betão armado com 1.20m de espessura, desligadas da restante estrutura e orientadas em planta segundo a projeção horizontal dos troços de arranque do arco. Estas paredes são interligadas ao nível das fundações por uma viga de betão pré-esforçada com secção 2.10x2.00m, garantindo deste modo o autoequilíbrio das forças horizontais introduzidas pelo arco.

Tendo em conta que o arco é estabilizado lateralmente através das treliças que nele se apoiam, tornou-se necessário garantir o escoramento ao longo do seu comprimento em pontos estudados e definidos em fase de projeto. Para tal utilizaram-se torres de escoramento compostas por perfis metálicos, para as quais foi necessário prever fundações dedicadas (“Fig. 10”).



a) Apoios provisórios



b) Arco escorado

Fig. 10: Montagem do arco

Ao arco foi conferida uma contraflecha de fabrico com o intuito de eliminar parcialmente as deformações devidas às ações permanentes após entrada em carga.



a) Vista geral da estrutura completa

b) Ligações do arco

Fig. 11: Estrutura de suporte à cobertura do lado sul

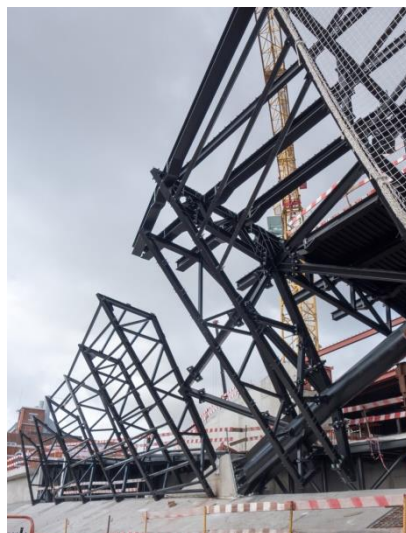
2.6 Fachada sul

As principais funções da estrutura de suporte da fachada sul são a de apoio das peças cerâmicas dispostas ao longo da geometria de curvatura variável pretendida pela Arquitetura e a de absorver as cargas horizontais resultantes das ações do vento e do sismo.

Utilizam-se elementos verticais em treliça metálica com espaçamento de 5.0m que, consoante a sua localização, funcionam em consola apoiados na estrutura de betão do edifício ou são suspensos das treliças que apoiam no arco. Estes elementos verticais são posicionados no interior das superfícies limite da fachada a uma distância mínima de 30cm da face exterior das peças cerâmicas. Entre os alinhamentos verticais são dispostas madres em perfil SHS100x5 com afastamento máximo de 1.0m onde são fixos os elementos em alumínio de suporte das peças cerâmicas (“Fig. 12”). A utilização de perfis tubulares para as madres revela-se como sendo a mais adequada para resistir quer aos esforços de flexão resultantes das ações gravíticas e horizontais, quer aos esforços de torção resultantes da excentricidade do revestimento final em relação ao seu eixo.



a) Zona lateral

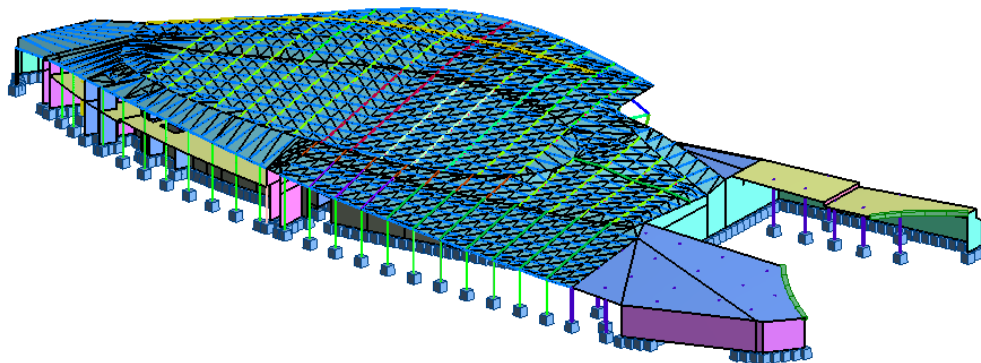


b) Zona central

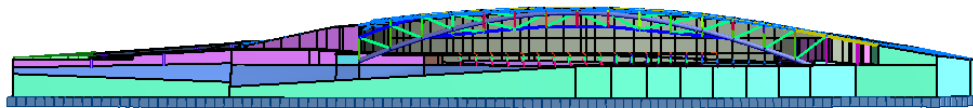
Fig. 12: Estrutura de suporte da fachada sul

3. Análise e dimensionamento

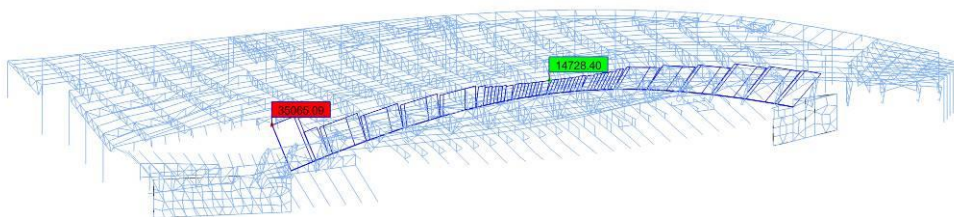
A determinação de esforços e deformações dos vários elementos estruturais foi efetuada recorrendo a um modelo global da estrutura composto por elementos finitos de casca no caso das lajes e paredes estruturais e barras no caso dos pilares, vigas e treliças (“Fig. 13”).



a) Vista geral do modelo de cálculo



b) Alçado sul do modelo de cálculo



c) Diagrama de esforço axial no arco (ELU)

Fig. 13: Modelo de cálculo tridimensional de elementos finitos

Ao nível da cobertura, a fendilhação da laje mista devida aos esforços de tração resultantes da estabilização lateral do arco, bem como a fluência do betão, provocam importantes redistribuições de esforços entre a estrutura de betão e a estrutura metálica. De modo a atender a estes fenómenos, a verificação de segurança de todos os elementos estruturais foi efetuada recorrendo a diferentes variantes do modelo atrás descrito em que, além da análise habitual com o módulo de elasticidade médio do betão, se efetuaram também análises com redução da rigidez de membrana da laje de cobertura nas zonas fendilhadas e com redução da rigidez do betão para atender à fluência. Pela especificidade do seu comportamento estrutural, alguns elementos foram também estudados recorrendo a modelos parciais. Como exemplo refere-se a determinação do momento crítico das vigas de apoio da claraboia sul para o fenómeno de bambeamento, para a qual se utilizou um modelo parcial de elementos finitos de casca com análise de encurvadura (“Fig. 14”).

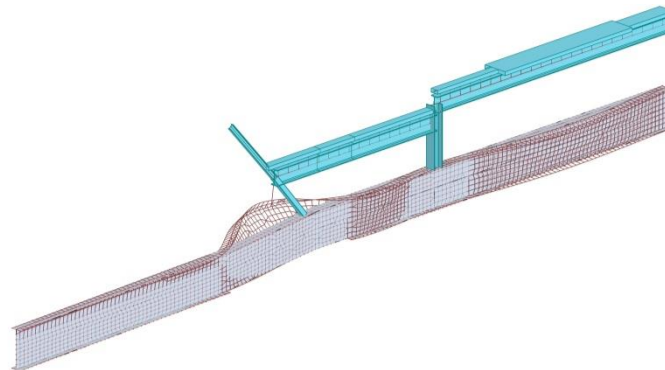


Fig. 14: Modo de bambeamento das vigas da claraboia sul

4. Conclusões

A complexa geometria do edifício e a necessidade de criação de amplas zonas sem qualquer elemento estrutural vertical constituíram um importante desafio para a definição das soluções estruturais, destacando-se em particular as seguintes situações:

1. Apoio da cobertura do lado sul composta por um arco esbelto e de elevado vão que permitiu a materialização da fachada de forma peculiar sem que seja visível qualquer elemento estrutural
2. Vigas esbeltas para apoio da claraboia da “Main Gallery” permitindo obter uma solução de elevada transparência visual
3. Treliças de cobertura sem apoios intermédios, libertando os espaços expositivos de quaisquer elementos estruturais verticais, conferindo-lhes uma elevada flexibilidade.

Realça-se também o cuidado especial na análise e dimensionamento dos diferentes elementos que, pela complexidade do funcionamento estrutural, conduziu à necessidade de utilização de diferentes modelos analíticos e análise de sensibilidade à variação das propriedades dos materiais com o tempo.

Referências

- [1] “NP EN 1993-1-1 Eurocódigo 3 – Projeto de estruturas de aço Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios”, 2010.