

A PIRÂMIDE INVERTIDA DO LOUVRE

PORTO, Cláudia Estrela

Arquiteta e Urbanista, doutora em Estruturas Espaciais pela Sorbonne, com Pós-Doutorado na Agência RFR, em Paris. Atualmente, atual Vice-Diretora da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília. Prof^a Dr^a do Programa de Pesquisa e Pós-Graduação da FAU - (PPPG-FAU/UnB), Departamento de Tecnologia.

E-mail: claudiaestrelaporto@gmail.com

UnB, Colina, Bloco H, Ap. 107. Asa Norte. CEP: 70904-108 – Brasília-DF, Brasil.
Telefone: (+55) 61 33071358; Fax: (+55) 61 32732070

Resumo:

A pirâmide invertida, situada na interseção de dois eixos de circulação do Louvre (Cour Napoléon e Cour Carrousel), é um prisma de vidro, cuja ponta para a 1,40 m do solo. O projeto, concebido pelo arquiteto Ieoh Ming Pei e inaugurado em 1993 é uma estrutura tensionada em cabos sob o peso do vidro, com a função de refletir a luz do dia para os espaços de exposição e comércio subterrâneos da galeria do Carrousel, além de constituir em si um elemento escultural.

A pirâmide proposta explora as vantagens dos cabos pré-tracionados e mostra ligações que exprimem a mestria de tolerância das forças. Ela é composta de três elementos distintos: o quadro perimetral, a cobertura em vidro e o lustre.

O primeiro elemento, constituído por quatro vigas metálicas, soldadas entre si no canteiro, se caracteriza por sua grande rigidez, necessária para limitar as flechas às quais está submetido no plano horizontal pela ação da pré-tração das camadas de cabos suportando a cobertura em vidro. Além disso, absorve o peso dos vidros e acolhe os equipamentos de iluminação, ventilação e desenfumaçamento.

A cobertura em vidro está suspensa por uma dupla malha de cabos totalmente independentes, que asseguram sua estabilidade: cabos principais e cabos funiculares, ancorados no quadro perimetral.

O lustre, por sua vez, é composto por 112 losangos de vidro, fixado uns aos outros por peças mecânicas da indústria aeronáutica - cruz em aço inoxidável fixadas sobre rótulas que atravessam o vidro. Para obter as quatro faces planas, um sistema de tirante, composto de cabos muito finos fixados no centro de cada painel de vidro, os religa a uma "biela volante" suspensa à viga perimetral. A estabilidade do conjunto é assegurada pelos vidros, suspensos entre si por estas cruzes de aço, sem intervenção de juntas, seguindo o princípio da construção do vidro estrutural.

Este artigo mostra a análise e a concepção dessa estrutura leve tensionada, desenvolvida pelo engenheiro Peter Rice e pela equipe de sua agência de estudos RFR¹, em Paris, na qual foi usado o princípio de "Tensegrity".

Palavras-chave: pirâmide, estrutura tensionada, malha em cabos, vidro.

LOUVRE'S INVERTED PYRAMID

Abstract:

Situated at the intersection of two circulation axes of the Louvre Museum (Cour Napoléon and Cour Carrousel), the inverted pyramid is a glass prism, which points to 1.4m from the ground. The project designed by architect leoh Ming Pei and opened in 1993 is a structure tensioned by cables under the glass weight, with the function to reflect sunlight to the underground exposition and commercial spaces of the Carrousel gallery, besides being *per se* a sculptural element.

The proposed pyramid explores the benefits of the pre-tensed cables and shows its connections, expressing meaningfully the tolerance of forces. It is composed by three distinct elements: the perimeter frame, the glass ceiling (the roof) and its chandelier (the light-fixture).

The first element, composed by four metallic beams, welded in each other on the construction site, is characterized by its great rigidity necessary to limit its deflection to which is submitted at the horizontal plane by the pre-tension action of cable layers supporting the glass ceiling. Such element also absorbs the glass' weight, receives lighting, ventilation, and the equipment for smoke removal.

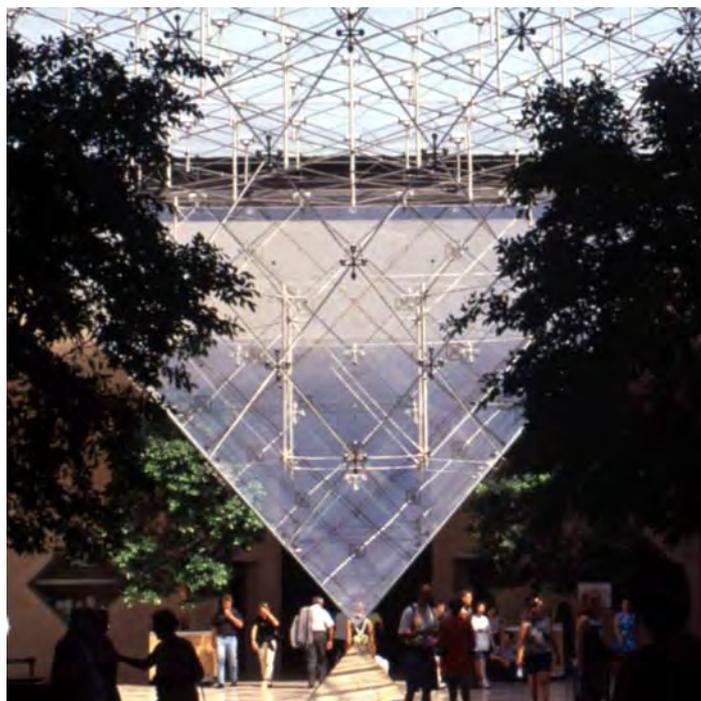
A double cable mesh completely independent suspends the glass ceiling, ensuring its stability: principal and secondary cables are anchored to the perimeter frame.

The chandelier itself is constituted by 112 pieces of glasses in the shape of diamonds. Such glass pieces are attached to each other by mechanical pieces produced by the aeronautic industry – a stainless steel cross attached by hinges that pass through the glasses. To obtain four plane faces, a tension system composed by very thin cables attached to the center of each glass panel reconnects – independent of the perimeter frame – with the "bielle volante". The total stability is ensured by glasses independently suspended by the stainless steel crosses, without joint interventions, by the structural glass construction principal.

This article shows the analysis and the conception of this light and tensioned structure developed by the engineer Peter Rice and a team from his study agency RFR in Paris, on which was used the principle of "Tensegrity."

Key-words: pyramid, tensioned structure, cable mesh, glass.

¹ A agência de estudos RFR é uma agência de engenharia, fundada em 1981, em Paris, por Peter Rice, Martin Francis e Ian Ritchie (suas iniciais formam o nome de RFR) para desenvolver a estrutura em vidro da Cidade da Ciência e da Indústria, em La Villette. A agência rapidamente se especializou em estruturas leves e não convencionais, utilizando diversos materiais. RFR tem uma participação ativa no estudo do vidro estrutural, assim como no desenvolvimento das estruturas têxteis tensionadas.



Informações Gerais

Programa: Pirâmide invertida do Louvre

Orçamento: 14 MF

Início do projeto: 1988

Conclusão: 1993

Cliente: Établissement public du Grand Louvre

Arquiteto/Engenheiro: Ioh Ming Pei (Pei Cobb Freed & Partners) e Peter Rice (desenvolvimento estrutural)

Escritório de Controle: Véritas

Escritório de Estudos Técnicos: RFR

Empresas: Eiffel Construction Métallique, SIV

Fornecedores: vidros (SIV), cabos principais (Trefil Europe), cabos secundários (Sarma) e peças moldadas (ATS)

Papel de RFR: concepção, cálculo, desenho e controle de execução.

O projeto

a) História

Após ter colaborado² com a agência RFR na realização da pirâmide do Louvre³, o arquiteto Ioh Ming Pei recorre novamente à genialidade do engenheiro Peter Rice para realizar uma segunda pirâmide, invertida desta vez, no interior do Louvre.

² Na fase de desenho de execução e de fabricação da pirâmide.

³ Desenho (1983-1985), construção (1986-1988).

O projeto da pirâmide do Louvre tinha como objetivo a renovação do museu como uma grande galeria e centro de arte, removendo escritórios governamentais ali existentes. Para iluminar a praça formada pela interseção das galerias subterrâneas do *Carrousel*, Pei imaginou uma pirâmide de vidro com o cume dirigido para o céu que, cobrindo uma grande área, proporcionaria melhor acesso público às coleções de arte. A forma completamente transparente da pirâmide também não interferiria nas belas fachadas de pedra do edifício.

Na realidade, a pirâmide invertida sempre fez parte do projeto Pei (1984). Ao projetar a grande pirâmide, Pei tinha em mente o plano urbanístico global das áreas da *Cour Napoléon* (sobre a qual está a Grande Pirâmide) e da *Cour Carrousel* (ao longo da qual foram inaugurados os novos espaços comerciais do Louvre), principalmente os diferentes níveis, os eixos de circulação e seus encontros. O destino dos espaços delimitados por estes grandes eixos ainda não haviam sido definidos, mas estava claro que o princípio do projeto sempre foi o de iluminar com a luz natural os corredores subterrâneos principais.

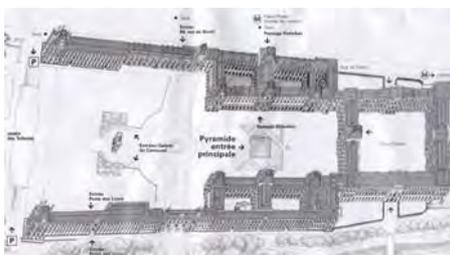


Fig. 1 - Axinométrica do Louvre

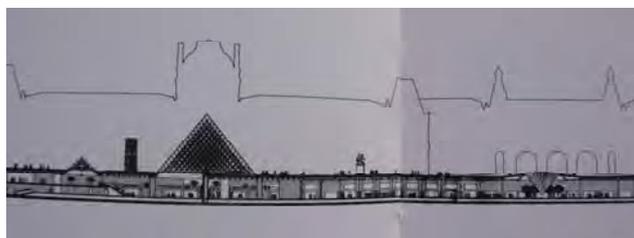


Fig. 2 – Corte mostrando a Pirâmide do Louvre e a Pirâmide Invertida

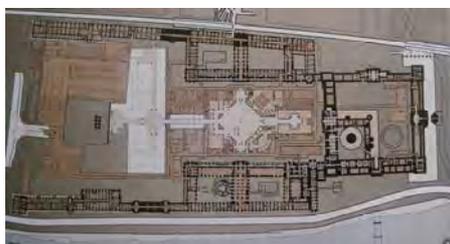


Fig. 3 – Planta do nível inferior do Louvre



Fig. 4 – Cour Napoléon, onde se situa a Grande Pirâmide



Fig. 5 – Cour Carrousel, onde se situa a Pirâmide Invertida

Assim, a pirâmide invertida, situada na interseção de dois eixos de circulação do Louvre (*Cour Napoléon* e *Cour Carrousel*), concebida como um lustre que reflete a luz do dia nos espaços de exposição e de comércio subterrâneos, responde à função de fonte luminosa e, além disso, constitui em si um elemento escultural excepcional. Vista de longe, ela chama a atenção e se torna um ponto de referência. Sua base de 13,30m de lado se situa no nível do teto da praça, sua ponta para a 1,40m do solo. Sua presença é marcante, animando a praça cujo pé-direito é relativamente baixo (7,50m aproximadamente).

Peter Rice intervém no projeto desde o início. Em 1984, quando ensinava na Universidade de Pennsylvania, nos EUA, ele iniciou uma série de estudos com sua equipe de Nova York, diretamente ligados à equipe Pei. Este primeiro projeto será retomado em

1988-1989 pela equipe francesa de RFR, resultando no “Dossier de Consultation des Entreprises”⁴ em março de 1991 e na conclusão da obra em 1993.

A forma piramidal invertida assegura uma melhor penetração da luz que vem refletir sobre as paredes de vidro inclinadas à 45°. Mas as características do prisma invertido, fechado, pedem um tipo de estrutura diverso do da grande pirâmide. Várias propostas foram estudadas, levando em conta a disposição da estrutura, sua concentração nas diferentes partes do volume da pirâmide e as superfícies fictícias que ela cria em relação à sua forma poliédrica fixa (conjunto da superfície de vidro).

Num primeiro momento, Pei, a partir da forma piramidal já imaginada por ele, trabalha o aspecto uniforme ou não das linhas de cabos no interior do volume. Surgem 19 proposições, dentre elas a estrutura em arco tenso, em malha tridimensional, em cabos catenária, estrutura com diversos tipos de tramas (quadrada, estrelada circunferencial, que atravessa, na forma estelar que atravessa, à concentração geométrica densa, à concentração geométrica central no volume), estrutura de móbile, três modelos de estrutura em *tensegrity*, sistema sem torsão, solução triangulada, sistema com o cabo de sustentação perpendicular, estrutura orientada e estrutura no exterior.

Em 1988, a partir de uma maquete realizada por ele, Peter Rice sugere a exploração de uma nova solução, com quatro pilares centrais no lugar de um eixo central imaginado inicialmente. Sua pesquisa se concentra nos pilares, no estado dos fios e no sistema de tirantes no plano horizontal, uma vez que a fixação pontual já é um tema desenvolvido por ele e sua equipe. A complexidade da interface entre a trama de concreto e o vidro é reduzida pela integração de um quadro perimetral. Os oito pontos de contato da obra com o concreto são posicionados e imobilizados antes da montagem da estrutura cabos-vidro.

Se, por um lado, do ponto de vista estrutural, a equipe RFR se debruça sobre as soluções viáveis, por outro, faz-se marcante o trabalho de Andrew Gorczynski, da equipe Pei, que desempenha um notável trabalho de efeito de transparência do vidro, já desenvolvido para a primeira pirâmide e agora aperfeiçoado para a segunda, invertida. O bizotamento das placas de vidro tem, por exemplo, o efeito de projetar os pequenos elementos do espectro solar sobre o solo.

Nasce, assim, uma pirâmide que explora as características e vantagens dos cabos pré-tensionados, com ligações que exprimem o domínio da tolerância de carga. É esta proposição que será desenvolvida a seguir.

b) Solução adotada

b.1. Estrutura elementar

⁴ DCE ou Dossier de Consultation des Entreprises (Dossiê de Consultação das Empresas) fecha a fase de estudos e constitui o ponto de referência utilizado pelas empresas de construção. Ele é composto de uma nota de cálculo completa sobre todas as partes do projeto, desde o cálculo das estruturas até a justificativa dos detalhes construtivos. Ele é composto também do Caderno de Cláusulas Técnicas Particulares (CCTP), onde todos os aspectos técnicos do projeto são descritos (características dos materiais de construção, revestimentos, respeitando os critérios construtivos e de segurança). Faz parte um jogo completo das plantas, contendo as plantas gerais, as estruturas e os detalhes, assim como uma estimativa detalhada do custo da estrutura.

O volume é um poliedro que se decompõe em duas partes principais e estruturalmente independentes: a cobertura, pirâmide muito achatada que suporta a carga de pessoas, e a pirâmide invertida propriamente dita, que, protegida em parte dos efeitos do vento, se estabiliza pelo seu peso-próprio. Estas duas partes estão solidarizadas por uma viga metálica (3), apoiada sobre um console em concreto, que cintura a base. Esta viga absorve os esforços de ancoragem dos cabos, o peso do vidro da pirâmide invertida, os equipamentos de iluminação, ventilação e desenfumagem. A lógica estrutural e geométrica foi determinada a fim de se obter uma redução do número de conexões nos nós de ligações e de regulagem no sítio. Nota-se claramente uma estrutura primária e uma estrutura secundária para cada parte da obra.

As faces deste volume são em vidro e a estrutura que o sustenta, em aço inoxidável. Os vidros da superfície aberta (1), situados no nível do solo da praça do *Carroussel*, forma a cobertura do espaço interno e o protege das intempéries, quedas de objetos ou de pessoas. Os vidros das faces inclinadas (2) são suspensos em lustre sob o vidro das superfícies que os abrigam. A obra possui plano quadrado e repousa sobre o acrotério periférico da infra-estrutura em concreto através de apoios maleáveis.

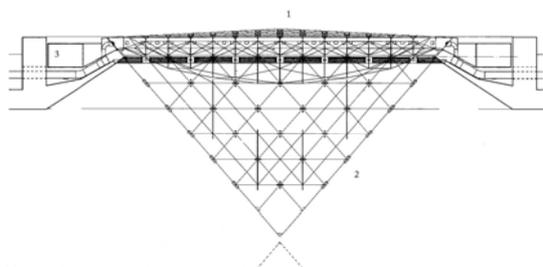


Fig.6 – Estrutura elementar da pirâmide invertida

Na base, isto é, na superfície superior da pirâmide invertida, a cobertura em vidro é mantida por uma dupla rede de cabos totalmente independente: cabos principais de sustentação em toda a largura da base e cabos secundários, menores, suportando, cada um, os módulos de vidro. A composição repousa sobre uma trama que facilita a concepção dos detalhes, dissociando os nós dos cabos primários das fixações dos cabos secundários. A forma piramidal da cobertura é muito achatada para assegurar a descida das águas. Os vidros são laminados e seus bordos, bizotados. Eles podem suportar a carga de pessoas andando sobre eles, mesmo que isto não ocorra. A inclinação dos panos de vidro os torna vantajosos em termos de reflexão da luz. Os espaços situados atrás das superfícies envidraçadas sendo mais escuros que o céu, os panos de vidro se tornam, assim, muito refletivos. Uma grande quantidade de vidro se encontra desta forma refletida na direção dos corredores subterrâneos enquanto que a pirâmide se mostra extremamente luminosa em virtude dos valores relativos da luz nestes espaços.

A estrutura da pirâmide propriamente dita é quase inteiramente em cabos tensionados sob o peso do vidro. Cada face da pirâmide é uma cortina de vidro suspenso desde seu bordo superior à estrutura periférica em concreto, segundo o princípio das estufas de La Villette⁵. A inclinação das faces é mantida por uma série de pequenos cabos fixos ao centro de cada módulo de vidro em forma de losango. Esses cabos estão ligados ao sistema de estiramento primário constituído por quatro “bielas volantes” centrais e pelos

⁵ A este respeito, ver: Rice, Peter; Dutton, Hugh, *Le Verre Structurel*, Editions du Moniteur, Paris, 1990.

cabos principais. Cada módulo de vidro está preso ao módulo superior através de uma fixação em forma de cruz. O elemento vertical retoma o peso próprio enquanto que o elemento horizontal prevê a rotação eventual de um módulo em torno de seu eixo vertical. Cada nó é uma adaptação do parafuso articulado com cabeça esférica desenvolvido para o projeto das estufas de La Villette.



Figs. 7, 8, 9 e 10 – Estufas de La Villette, Paris: detalhe da fachada e do parafuso articulado com cabeça esférica

b.2. Composição da pirâmide invertida

A pirâmide invertida é composta de três elementos distintos: o quadro perimetral (75 T), a cobertura em vidro (21 T) e o lustre (15 T).

b.2.1. O quadro perimetral

O conjunto da pirâmide é solidarizado por um quadro perimetral, para melhor se acomodar aos movimentos da ossatura em concreto. Embora o quadro perimetral esteja apoiado verticalmente em apenas oito pontos centrais deslizantes (A na Fig. 11), estes apoios possuem um mínimo de pontos de bloqueio para que a ossatura possa ser mantida na posição. Horizontalmente, todos os apoios estão livres, salvo dois entre eles, apontados por uma flecha na Fig. 11. Os quatro apoios de ângulo (B na Fig. 11) absorvem apenas certas cargas dissimétricas importantes. A obra inteira repousa assim unicamente em oito apoios do tipo neopreno (1 apoio fixo, 1 apoio guiado e 6 apoios livres).

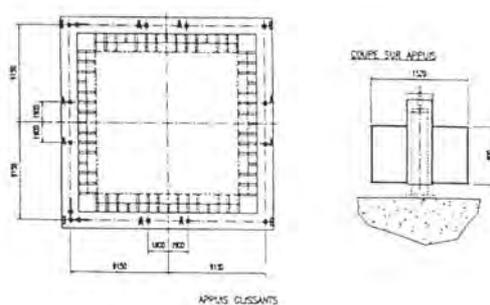


Fig. 11 – Quadro perimetral apoiado em 8 pontos centrais deslizantes

Constituído por quatro vigas metálicas de 18m de comprimento e aproximadamente 20 T cada uma, soldadas entre si no canteiro, o quadro perimetral se caracteriza por sua grande rigidez, necessária para limitar as flechas às quais está submetido no plano horizontal pela ação dos cabos pré-tracionados que suportam a cobertura em vidro. Por outro lado, tem função de tornar a pirâmide o mais independente possível dos movimentos dos apoios em concreto. Além disso, ele absorve o peso dos vidros e acolhe

os equipamentos de iluminação, ventilação e desenfumaçamento. Desta forma, a transferência de esforço entre a obra e a infra-estrutura em concreto fica limitada a simples descidas de cargas verticais, retomadas no nível do acrotério em concreto sob o quadro de apoio.

Estas vigas se dividem em duas partes aparafusadas entre si. Uma parte interior que forma o quadro de sustentação propriamente dito, servindo de âncora para os cabos das membranas tracionadas, e o quadro de apoio que transfere os esforços da obra para a infra-estrutura em concreto armado.

Uma grande precisão de fabricação foi obtida na usina. Todos os pontos de fixação dos cabos só podiam ter uma tolerância de um milímetro.

b.2.2. A cobertura em vidro

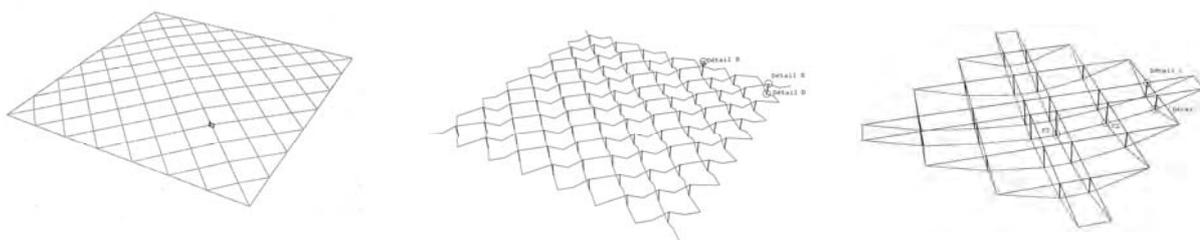
A cobertura é composta de três camadas de cabos em aço inoxidável, de bielas e de peças moldadas, igualmente em aço inoxidável, e de 21 T de vidro. Sua declividade é de 5%.

Situada no nível do solo, no meio de uma rotatória, a cobertura não é normalmente acessível ao público. Entretanto, foram consideradas para o cálculo uma sobrecarga normal de 1,5 KN/m², uma sobrecarga acidental excepcional de 5 KN/m² (devido a intrusão de pessoas sobre a cobertura), além da carga da neve, repartida uniformemente ou dissimetricamente sobre toda a cobertura. Apesar do lustre se situar completamente no interior da galeria, a carga de vento levada em consideração para a estabilidade da estrutura foi de 45 km/h no caso de vento normal e de 60 km/h no caso de vento extremo.

Esta cobertura, uma pirâmide quase plana, é composta de volumes de vidro, quadrados perfeitos cujos lados medem 1,34m. Eles são realizado com vidro temperado e laminado, constituído de 3 camadas de 10mm de vidro branco recozido, com os bordos bizotados que difratarão a luz. Um “quadripé”, a cada ângulo do painel, o mantém no lugar. O apoio do vidro ao nó em forma de quatro pés é feito através de peças em alumínio em forma de “U”, colocadas em seus quatro ângulos na usina. Estas peças em alumínio são inclinadas para dar a declividade de 5% à cobertura, e se apóiam no alto do “quadripé”; a impermeabilização sendo assegurada pela junta de silicone. Os movimentos diferenciais entre os vidros foram determinados e não criam esforços excessivos nas juntas de silicone de 10mm. Este “quadripé” está apoiado sobre uma biela estabilizada por cabos que se apóiam, por sua vez, sobre uma camada de cabos horizontais, graças à aplicação do princípio de *tensegrity*⁶ desenvolvido nos anos 50 pelo engenheiro americano Richard Buckminster Fuller.

⁶ *Tensegrity* ou *tensional integrity* é um tipo de estrutura baseada no equilíbrio entre tração e compressão de seus componentes. Nesse sistema, a matéria comprimida aparece ilhada no meio de um oceano de matéria tensionada. Numa estrutura *tensegrity* as barras comprimidas estão conectadas entre si por meio de peças tracionadas. Esse tipo de estrutura possui certas particularidades: as peças estão em pura compressão ou tração, o que significa que a estrutura só romperá com a dilatação dos cabos ou das conexões; as peças são pré-tracionadas ou pré-carregadas, o que possibilita a rigidez dos cabos quando tracionados; estabilidade mecânica, o que possibilita aos membros permanecer em tração/compressão quando as cargas aumentam. Devido a esses fatores, nenhuma peça estrutural está submetida ao momento de flexão. Isso pode produzir estruturas rígidas excepcionais por sua massa e pelas seções em cruz de seus componentes. Uma qualidade estética dessas estruturas é a transparência visual.

A geometria da estrutura da cobertura foi pensada de forma a evitar a concentração de detalhes de ligações num mesmo ponto, o que acarretou essas duas estruturas distintas: uma primária e outra secundária espaçadas no plano. Os elementos em compressão nunca estão colocados lado a lado; mas sim ligados por elementos tensionados. Desta forma, duas camadas de cabos pré-tracionados, totalmente independentes, ancorados no quadro perimetral, asseguram a estabilidade da cobertura.



Figs. 12, 13 e 14 – Painéis de vidro, estrutura secundária e estrutura primária da cobertura

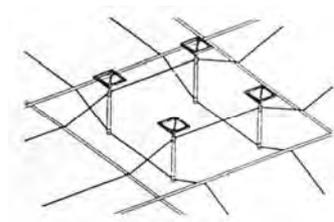


Fig. 15 – Esquema de estabilidade dos cabos secundários

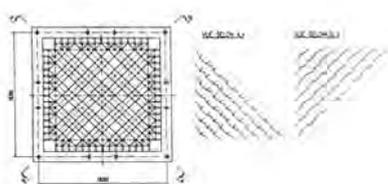


Fig. 16 – Cabos secundários

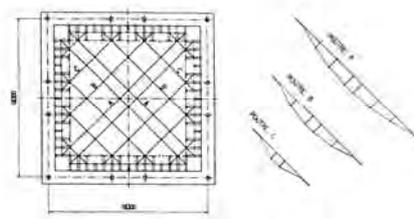


Fig.17 – Cabos principais e funiculares

Estrutura primária (cabos principais e cabos funiculares): é constituída de uma trama de cabos horizontais pré-tracionados e ancorados na viga perimetral, tensos com os cabos funiculares por intermédio de bielas verticais cuja altura varia em função do momento fletor. As cargas uniformes são absorvidas pelos cabos funiculares, enquanto que as cargas não uniformes são absorvidas pela mudança da geometria do cabo pré-tracionado.

Os cabos principais, de 32mm de diâmetro, são quase horizontais e se cruzam em dois planos espaçados de 40mm. Eles sofreram uma pré-tensão no canteiro de forma que, no final da montagem das camadas de cabos secundários, sua tensão real fosse de 300 KN. Uma vez que os cabos secundários se apóiam sobre estes cabos principais (ver Fig. 15), uma tensão elevada dos cabos principais diminui a flecha sob a ação destes cabos secundários.

Os cabos funiculares de 22,2mm de diâmetro estão dispostos sob os cabos principais e absorvem os esforços verticais. Bielas principais ligam esses cabos aos cabos principais, assegurando a distância entre eles. Tanto as bielas como as peças para apertar os cabos, com limite de elasticidade alto, são de aço inoxidável. A tensão desses cabos é muito baixa, suficiente apenas para dar uma contra-flecha de 40mm no centro da cobertura. Os cabos de uma mesma camada se cruzam em dois planos espaçados de 40mm. As peças

para apertar os cabos, presas às bielas principais e a cada uma das extremidades dos cabos, seguram e impedem o deslizamento de dois cabos ortogonais no plano horizontal.

Estrutura secundária: ancorada igualmente sobre a viga perimetral, repousa, com sua geometria de trama, diretamente sobre a estrutura primária. É a rede de cabos secundários que suporta os painéis de vidros da cobertura através de bielas situadas nos ângulos dos painéis. Essas bielas são tensas na parte inferior por uma rede de cabos numa direção e estabilizadas na parte superior por uma segunda rede de cabos ortogonal à primeira.

A metade dos cabos paralelos entre si estão abaixo dos cabos principais, mas, na direção ortogonal, todos os outros cabos estão acima dos cabos principais. Essas duas famílias de cabos estão unidas por bielas secundárias, sobre as quais estão fixados os apoios em forma de “quadripé”.

A camada dos cabos secundários, de 12,7mm de diâmetro, transmite diretamente as cargas da cobertura sobre as “vigas em cabos”. Todos os cabos paralelos à direção AA (ver Fig. 16) provocam uma reação vertical para baixo sobre os cabos principais; e todos os cabos paralelos à direção BB provocam uma reação vertical para cima. Bielas secundárias asseguram o espaçamento destes cabos secundários. Por outro lado, os “quadripés”, fixados no prolongamento destas bielas, servem de suporte para os vidros da cobertura. Uma das dificuldades do projeto foi tensionar estes cabos secundários, cuja tensão é da ordem de 20 KN horizontalmente. Também foi extremamente difícil manter as bielas verticais, condição indispensável para que a parte superior dos “quadripés” ficasse estritamente na horizontal, assegurando o apoio dos vidros.

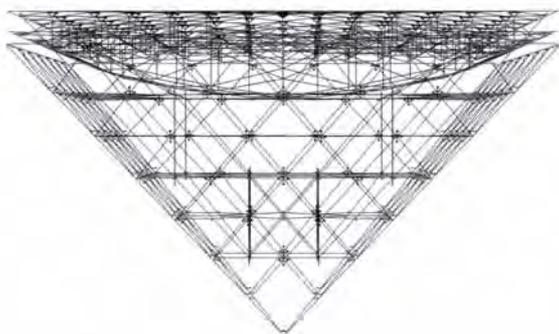


Fig. 18 – A estrutura suporte da cobertura é separada da estrutura suporte da pirâmide



Fig. 19 – Quadripés de apoio dos vidros da cobertura

b.2.3. O lustre

Os vidros do lustre, por serem transparentes, são visíveis de longe, formando as perspectivas das avenidas convergentes em direção à praça da pirâmide. O partido adotado conduz à captação da luz direta do sol e sua difusão por intermédio das nuvens; permite também jogar com a sua difração sobre os bordos bizotados dos vidros e a superfície refletiva entre as faces do lustre.

Este vidro é branco, como o da cobertura, e laminado (2 espessuras de 9,5mm). Trata-se de um vidro temperado, pois ele deve ser perfurado e transmitir os esforços. A projeção

horizontal do lustre corresponde exatamente à da cobertura, mas pelo fato da inclinação das faces, os bordos são fortemente bizotados para que, uma vez terminada a montagem, eles fiquem rigorosamente verticais. As dimensões das diagonais dos losangos são de 1,9m (como o quadrado da cobertura) e 2,9m.



Fig. 20 – Vidros da cobertura

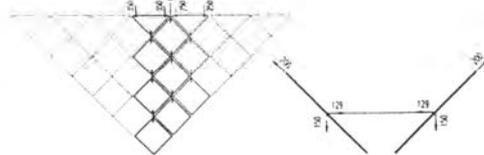


Fig. 21 – Esquema do lustre

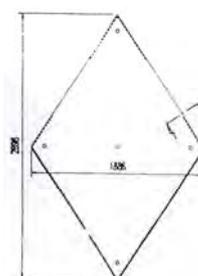


Fig. 22 – Vidros do lustre

Estes vidros desempenham um papel estrutural, pois são eles que, unidos uns aos outros, são fixados ao quadro perimetral. Os cabos horizontais apenas equilibram as faces adjacentes, ligando os centros dos volumes de vidro. Os oito cabos verticais centrais (bielas principais) permitem a criação de uma zona central, sem cabos horizontais, originando assim um eventual acesso central no interior do lustre. Apenas as massas destes cabos estabilizam o lustre sob eventuais ações laterais do vento. A ponta inferior do lustre, ou seja, os quatro volumes de vidro ligados entre si, pode ser desmontada graças a um aparelho previsto para este fim.

O volume é composto por 112 losangos de vidro, fixados uns aos outros pelos ângulos através de peças mecânicas da indústria aeronáutica – cruz em aço inoxidável fixadas sobre rótulas que atravessam o vidro. Estas peças mecânicas asseguram a repartição dos esforços de tração no vidro, e cada painel de vidro é puxado pelo centro por um cabo muito fino preso a uma biela volante, mantida pela viga perimetral. A forma dessas peças de união provém do losango dos painéis de vidro e elas se distanciam aproximadamente 50mm da face interior. Esse distanciamento entre a estrutura e vidro acentua a impressão de leveza do plano transparente do vidro.

Os panos de vidro são suspensos em cadeia desde a vida perimetral por meio de barras de torção que asseguram a flexibilidade do apoio, a barra de torção sendo menos atravancador que um sistema de molas. Este princípio de suspensão tem por finalidade garantir a perfeita repartição dos esforços nos furos superiores como o amortecimento dos choques no caso de quebra acidental de um vidro.

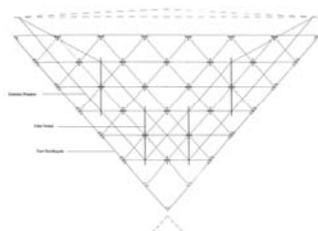


Fig. 23 – Elevação do lustre

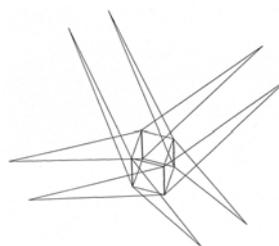


Fig. 24 – Estrutura primária – Faces inclinadas

A estrutura das faces inclinadas da pirâmide se decompõe em dois sistemas distintos. Um **sistema primário** de cabos ancorados na viga perimetral e suportando, no centro do volume da pirâmide, quatro bielas metálicas verticais, situadas no plano sobre as diagonais do quadrado da base da pirâmide, mais ou menos a 1,40m do centro. A essas bielas são fixados cabos de aço inoxidável de 5mm de diâmetro, constituindo a **estrutura secundária**, que absorvem a deformação das faces sob o seu peso próprio, exercendo sobre as peças de suspensão do painel de vidro uma tração em direção ao interior da pirâmide.

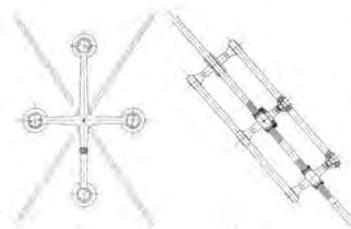
Resumindo, a **estrutura primária** comporta oito grandes bielas verticais mantidas pelos cabos sobre os quais se apóiam uma **estrutura secundária**, composta de cinco camadas de cabos muito finos que mantêm as faces do vidro planas.



Fig. 25 – Vista do lustre



Fig. 26 – Detalhe do cubo virtual e da estrela de aço que une as placas de vidro do lustre



Figs. 27, 28 e 29 – Cruz de aço inoxidável: estrelas que unem os vidros do lustre

A estabilidade do conjunto é assegurada pelos vidros, suspensos entre si pelas cruces de aço, sem intervenção de juntas, seguindo o princípio da construção do vidro estrutural. O esforço é transmitido do vidro a uma rótula montada na espessura do vidro, então o eixo da rótula distribui este esforço para as duas estrelas localizadas de cada lado do plano dos vidros. Estas estrelas, em aço inoxidável, apenas transmitem esforços normais, e são muito finas.

Os vidros são fixados no quadro perimetral por meio de amortecedores. Este quadro perimetral absorve a componente do peso dos vidros transmitida pelo vidro estrutural; as componentes horizontais se equilibrando pela sua malha de cabos horizontais de diâmetro de 3,5mm. Estes cabos retomam a componente do peso do volume do vidro no

meio. No caso de quebra de um dos volumes, os esforços se repartem nas outras fileiras por um leve deslocamento. São os amortecedores que suspendem as fileiras de vidro na viga perimetral e dão a flexibilidade necessária quando o esforço excede o valor normal. Por isso, eles são pré-tracionados para agirem como apoios fixos sob os esforços reais das fileiras verticais de vidro e se tornarem apoios elásticos quando surge um aumento de carga, o que pode acontecer quando um vidro quebra. Neste caso, as cargas passam de uma fileira vertical para a outra por intermédio dos ramos horizontais das estrelas.

O conjunto do sistema é perfeitamente estável sob o seu peso próprio, apesar da ausência de silicone entre os vidros e do fato das ligações serem rótulas. Ele é igualmente estável sob os esforços horizontais, em parte devido à massa das oito barras de diâmetro de 60mm dispostas no interior da pirâmide, em parte pelas “costuras” dispostas nos ângulos que engastam parcialmente os vidros de duas faces adjacentes. Os quatro vidros formando a ponta da pirâmide são solidarizados por estas costuras e este conjunto é previsto desmontável.

No que concerne a montagem do lustre e a precisão da fabricação dos vidros, as empresas foram confrontadas a reais dificuldades. De fato, nenhuma regulagem é possível no momento da fixação dos vidros entre si nas fileiras verticais. A tolerância máxima de entre-eixo dos furos é de 0,5mm. No caso de quebra de um dos volumes, os esforços se repartem de uma fileira para outra através de ramificações horizontais das estrelas, como já dissemos acima, e também neste caso o jogo é reduzido. A junta entre os volumes de vidro é de 10mm. Todos os esforços mostram bem o extremo de precisão, de fabricação dos volumes de vidro e da montagem do lustre no canteiro.

É muito difícil obter a planaridade das faces, pois se os vidros em losango estão equilibrados horizontalmente no seu centro de gravidade, isto não se aplica para todos os volumes triangulares superiores e para os quatro vidros da ponta. Essa dissimetria cria diferentes reações sobre as estrelas e obrigou uma regulagem severa ao longo do comprimento dos cabos horizontais de diâmetro de 3,5mm.

As galerias iluminadas pela pirâmide invertida fazem parte de um espaço comercial aberto ao público. Entretanto, a ponta do lustre não é acessível. Ela é protegida por um “pyramidon” em pedra, o cume deste estando dirigido para o alto.

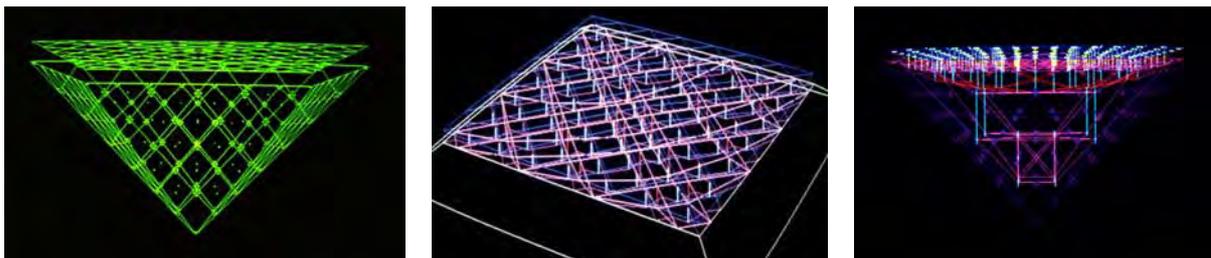
c) Informática

Uma geometria particular como esta escapa às investigações gráficas tradicionais. Não foi necessário modelisar o conjunto da obra. RFR trabalhou com quatro modelos informáticos diferentes: um para a cobertura, um para o cabo, um para a malha da base e um último para a estrutura das faces inclinadas. O programa foi o mesmo utilizado para as nuvens do Arco de La Défense⁷, chamado FABLON. Sua particularidade reside no fato de utilizar um método de cálculo conhecido teoricamente sob o nome de “Dynamic Relaxation”.

⁷ As Nuvens do Grande Arco de La Défense, inaugurada em Paris em 1990, é um projeto concebido por Johan-Otto Von Spreckelsen e desenvolvido por Peter Rice e Paul Andreu. Trata-se de uma estrutura têxtil tensionada, cuja superfície é formada por duas membranas com planos e formas irregulares. Cada uma das duas membranas é mantida na posição, sendo tensionada contra o banzo inferior de onze vigas em cabos convexas. A membrana é tensionada sobre estas vigas com ajuda de bielas volantes e sua superfície é pontuada de discos em vidro.

Se, por um lado, RFR teve um enorme trabalho calculando e desenhando todas as peças, a concepção e realização da obra só foram possíveis pela experiência adquirida anteriormente com os projetos de La Villette, da Grande Pirâmide e das Nuvens do Arco de La Défense⁸.

As peças metálicas, por exemplo, eram esculpidas na argila, mostradas ao arquiteto Pei, e depois desenhadas.



Figs. 30, 31 e 32 – Modelos computacionais da estrutura da pirâmide invertida

d) Sistema de Manutenção

É necessário um acesso para limpar os vidros e as peças metálicas, substituir os panos de vidros quebrados e dar manutenção às juntas de silicone. A limpeza das paredes exteriores não apresenta problema particular. A cobertura da pirâmide é acessível do exterior e pode suportar o peso de uma pessoa. As faces inclinadas, por sua vez, são acessíveis a partir de uma plataforma telescópica individual.

As faces internas são acessíveis através dos quatro elementos de vidro formando a ponta da pirâmide que podem ser desmontados. Através deste furo, pode-se penetrar na pirâmide pelo centro, entre as bielas verticais suspensas, e com o auxílio de uma plataforma telescópica fazer a limpeza dos painéis de vidro inclinado e da face inferior dos vidros que compõem a cobertura. Os projetores são acessíveis através de grelhas que se abrem para trocar as lâmpadas.

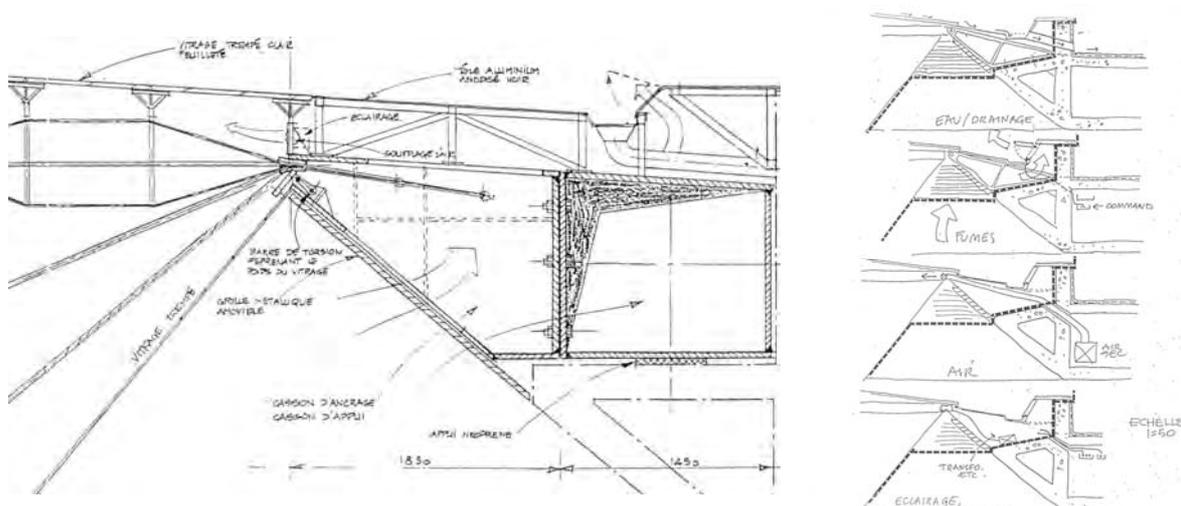
e) Iluminação, insuflamento do ar, água pluvial e desenfumaçamento.

Com o objetivo principal de ressaltar a obra e sua estrutura, além da luz emitida a partir de um trilho técnico, incluído aí também o insuflamento do ar, foi previsto um sistema de luminária halógena de baixa tensão colocada nas peças de suporte do vidro.

As bocas do sistema de insuflamento do ar seco permitem controlar a higrometria do ar em contato com a subface do vidro de superfície para limitar os riscos de condensação. O volume interior da pirâmide é ventilado independentemente da sala, ligeiramente em sobrepressão, com tratamento contra a poeira do ar.

⁸ Todos desenvolvidos pelo engenheiro Peter Rice.

A água da chuva escorre sobre as faces inclinadas a 5% da superfície envidraçada e é recolhida em cada canto numa calha em aço inoxidável. Foi pensado também um sistema acionado através de um comando para a retirada da fumaça da pirâmide.



Figs. 33 e 34 – Sistema de manutenção: escoamento de água, insuflamento do ar, desenfumação e iluminação

f) Conclusão

Uma obra dessa envergadura, com todos os elementos pré-fabricados, necessita de rigor extremo para a montagem e regulagem de todas as peças no sítio. Além disso, a regularidade das juntas entre os painéis depende da ordem da montagem e das tolerâncias admitidas, que devem ser estabelecidas com precisão. Outra característica marcante é a qualidade dos detalhes, percebidos principalmente pelos visitantes no nível da galeria: os das faces inclinadas sendo mais visíveis que os das faces de superfície.

Sem romper com a tipologia da pirâmide principal, ela mostrou a possibilidade de trabalhar arquitetonicamente os detalhes, inspirados na otimização da transferência de cargas, no desenho e no acabamento dos componentes em ligas leves.

Podemos dizer que estamos diante de um projeto que desafia arquitetonicamente e tecnicamente as empresas construtoras e os engenheiros, ambos se superando em sua execução. A empresa Eiffel, seus fornecedores e parceiros tiveram, muitas vezes, de criar dispositivos intelectuais e materiais incríveis para dominar obstáculos quase intransponíveis. Cabe também ressaltar o papel determinante dos operários das usinas e da equipe de montagem.

Referências Bibliográficas

1. *Architectures Capitales – Paris 1979-1989*, Electa Moniteur, Paris, 1987, p. 29 a 51.
2. Bardsley, Henri, “La conception Technique de La Pyramide Inversée en Verre”, *Annales de l’ITBTP*, novembro 1994, 9 p.
3. Blassel, Jean-François, “Structure and Architecture”, *A+U – Architecture and Urbanism*, nº 327, novembro 1997, p. 98 a 105.
4. “Construire en Verre”, *Detail*, fevereiro 1995, p.21.
5. Entrevista com Henry Bardsley, realizada em 14.01.1993 por Catherine Millon. Documento interno de RFR, 5 p.
6. “La Pyramide Inversée”, *Annales des Ponts et Chaussées*, nº 71, 1994, p.177.
7. “La Pyramide Inversée – Un miroir em suspension”, *Le Moniteur Architecture – AMC*, nº 26, novembro 1991, p. xxi
8. “La Pyramide Inversée du Grand Louvre”, *Travaux*, nº 710, junho 1995, p.24 a 27.
9. “Les Architectes du Grand Louvre”, *Connaissance des Arts*, nº 500, novembro 1993, p.10 a 11.
10. “Peter Rice – La Pyramide Inversée”, *l’ARCA*, nº 86, outubro 1994, p. 46 a 49.
11. Rice, Peter; Dutton, Hugh, *Le Verre Structurel*, Editions du Moniteur, Paris, 1990.
12. “The Profession: Glazing Systems - Evanescent Architecture”, *Architectural Record*, junho 1995, p.36 a 39.

Crédito das Ilustrações: Fig. 1 (site Louvre), Figs. 2 e 3 (*Architectures Capitales*, p. 46,47 e 48), Fig. 4 (Arquivo Cláudia Estrela Porto), demais imagens (Arquivo Agência RFR, Paris).