

Sistemas Estruturais para Coberturas de Estádios e Centros Esportivos

*Esdras Pereira de Oliveira¹
Nelson Szilard Galgoul²*

Resumo

O objetivo deste trabalho é classificar os sistemas estruturais de cobertura de estádios mais comuns, descrever suas características e o funcionamento de cada sistema estrutural.

Palavras-chave: Estrutura de Cobertura de Estádios, Cabos, Treliças e Arcos.

1 Introdução

O Brasil será sede da Copa do Mundo de 2014. Em virtude das novas exigências da FIFA os estádios brasileiros terão que passar por reformas para adequação às novas exigências ou mesmo serão demolidos para construção de novos estádios. Tendo em vista a grande diversidade de sistemas estruturais existentes, os diferentes tipos de funcionamento estrutural diante das cargas e o custo variado, a abordagem do tema é justificada diante deste momento histórico.

Um dos elementos mais importantes da estrutura dos estádios no que diz respeito ao impacto visual é a sua cobertura. Em virtude disso, a cobertura é a parte que requer maior atenção por parte dos arquitetos e projetistas objetivando dotá-la de linhas harmoniosas e equilibradas, conferindo um aspecto de leveza, maximizando o efeito visual a ela associado. Além disso, tem-se buscado um campo visual desobstruído, limitando a utilização de pilares interiores, obrigando que o sistema de suporte da estrutura seja exterior à estrutura.

Para que tais características sejam alcançadas deve-se atentar às características inerentes a cada sistema estrutural. Sendo assim, este trabalho descreve as características dos principais sistemas estruturais para coberturas de estádios e centros esportivos objetivando auxiliar aos construtores e projetistas na escolha do sistema estrutural mais adequado diante das variáveis envolvidas.

2 Tipos Estruturais mais comuns

Os tipos estruturais mais comuns aplicados em estádios, caracterizados por grandes vãos, são soluções alternativas devido à ineficiência da viga para resistir

ao momento. O momento aumenta com o quadrado do vão, necessitando que a altura da seção aumente na mesma magnitude para resistir ao esforço. Isso acarreta o aumento do peso próprio da estrutura que por sua vez aumenta o momento. Assim, sempre se faz necessário o uso de vigas altas para resistirem ao momento atuante, o que se torna muitas vezes inviável e indesejável.

Devido à ineficiência da viga para vencer grandes vãos foram desenvolvidos outros sistemas estruturais para suportarem a estrutura e tornarem o combate ao momento mais eficiente. Abaixo são discriminadas estas soluções alternativas.

- Os sistemas estruturais em treliças cujos elementos são submetidos preponderantemente às forças axiais;
- Os sistemas estruturais em cascas, que bem projetados, são submetidos apenas à compressão (não utilizado em estádios);
- Os sistemas estruturais em cabos, cujos elementos resistem apenas às tensões de tração;
- Os sistemas estruturais em arcos, cujos elementos em arcos trabalham à compressão.

3 Sistema Estrutural em Cabos

As estruturas em cabos, compostas por elementos capazes de vencer grandes vãos, atualmente têm sido muito utilizadas como modelo estrutural nas coberturas dos estádios mais modernos. Suas características são:

- leveza;
- suscitam uma impressão de amplidão do espaço;
- pequena curvatura confere suavidade ao contorno da estrutura;

1 esdraspo@yahoo.com.br

2 Professor da Universidade Federal Fluminense. nsg@suporte-cp.com.br

- é um sistema estrutural mais econômico.

Os sistemas estruturais em cabos para cobertura de estádios são divididos em categorias de acordo com o modo como suportam a cobertura (BULCHHOLDT, H. A. 1999).

- Cabos Simplesmente Suspensos; (simply suspended cables)
- Feixe de Cabos Pré-tensionados; (pretensioned cable beams)
- Rede de Cabos Pré-tensionados; (pretensioned cable nets)
- Cabos Tensionados em Coberturas Sinclásticas; (tensioned straight cables)
- Membranas Tensionadas com Cabos. (tensegric shells)

3.1 Cabos Simplesmente Suspensos

Esse tipo de sistema estrutural em cabos se refere a coberturas suportadas por uma única camada de cabos desprovidos de pré-tensão. Neste sistema estrutural as ações atuantes na cobertura são primeiramente transportadas pelo material constituinte da cobertura e depois transferidas para os cabos. As estruturas de cabos simplesmente suspensas podem ser auto-equilibradas ou não.

Em uma estrutura auto-equilibrada as forças nos cabos são equilibradas internamente e posteriormente são transmitidas a uma estrutura rígida e depois encaminhadas ao solo. Já em uma estrutura que não é auto-equilibrada, os cabos não são capazes de auto-equilibrar as forças provenientes da cobertura, necessitando da ajuda de pontos de ancoragem, para os quais transferem as forças.

No que diz respeito à forma das estruturas de cobertura dos estádios, em geral são formados por planos circulares ou elípticos. Os cabos são suspensos radialmente e ancorados em um anel de compressão localizado no perímetro externo do estádio e no centro em um anel de tração. Para coberturas com outras formas, combinações de arranjos são utilizadas, como por exemplo, em uma cobertura em forma de elipse são utilizadas disposições de cabos radiais nas extremidades e uma disposição de cabos paralelos na parte retangular do centro.

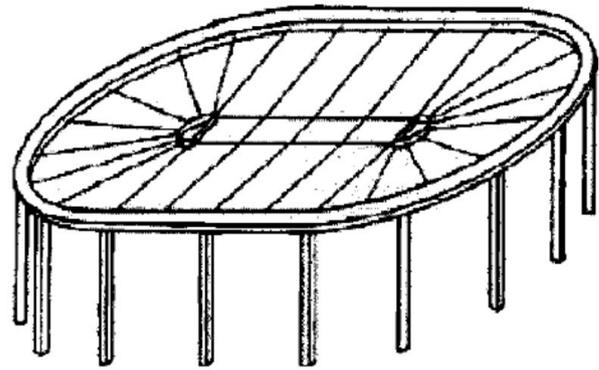
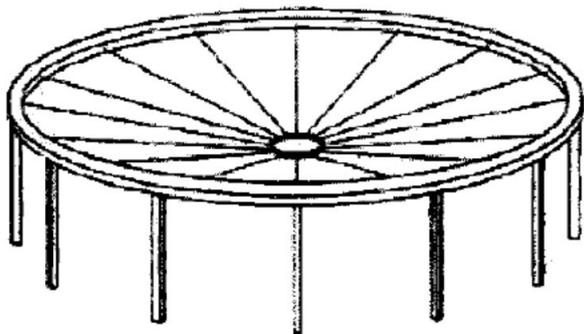


Figura 1 – Cobertura com disposição radial e paralela dos cabos.

Conforme foi dito anteriormente, os cabos das estruturas de coberturas em cabos simplesmente suspensos não apresentam pré-tensão. Isso faz com que o sistema estrutural fique mais barato e fácil de ser instalado, entretanto por não apresentar nenhuma rigidez, a estrutura fica suscetível a grandes deformações devido aos carregamentos e grandes movimentos devido à carga de vento. Para amenizar esses efeitos indesejáveis o material constituinte da cobertura deve apresentar peso elevado, utilizando-se geralmente o concreto.

O Oakland-Alameda Coliseum é um exemplo deste tipo de sistema estrutural. Possui a forma circular com cerca de 128 m de diâmetro, sendo composto por uma estrutura de aço que sustenta o anel de compressão superior aos quais são ligados os cabos radiais que suportam o material de revestimento da cobertura.



Figura 2 – Oakland-Alameda Coliseum, Califórnia, Estados Unidos.

3.2 Feixe de Cabos Pré-tensionados

Similar à estrutura de cabos simplesmente suspensos, diferencia-se pela adição de feixes de cabos com curvatura reversa aos cabos simplesmente suspensos. Esses cabos com curvatura reversa podem assumir três configurações diferentes: convexa,

côncava e convexa-côncava. Os cabos pré-tensionados conferem à estrutura maior rigidez vertical e lateral, que são somadas à rigidez do material constituinte da cobertura. Os cabos são pré-tensionados com uma pré-tensão tal que, sob quaisquer carregamentos, os cabos estejam tensionados.

Havendo dois conjuntos de cabos com curvatura oposta um ao outro, faz com que a estrutura seja capaz de suportar as cargas de cima para baixo e de baixo para cima. Quando atuam cargas de cima para baixo o feixe de cabos convexo é o mais solicitado e quando as forças atuam de baixo para cima o feixe de cabos côncavo é o mais solicitado, conforme pode ser observado nas figuras a seguir.

Uma configuração especial dentro do grupo de feixe de cabos pré-tensionados são os cabos treliçados. Esta configuração apresenta-se com dois conjuntos de

cabos com curvatura oposta um ao outro, um convexo e um côncavo, ligados por cabos diagonais, formando triângulos pré-tensionados.

Os sistemas estruturais com feixe de cabos pré-tensionados são os mais populares entre os demais sistemas de estruturas com cabos, pois são eficientes, de fácil instalação e podem ser empregados para cobrir planos de diversas formas. Em estruturas de coberturas circulares e elípticas os feixes de cabos são configurados em diferentes padrões parecidos com as configurações de cabos simplesmente apoiados. A figura a seguir apresenta as principais configurações utilizadas.

Esse tipo de estrutura necessita de cuidados especiais com relação à fase de montagem, pois a pré-tensão nos cabos causa grandes deformações e rotações na estrutura. Deste modo para assegurar o efeito da pré-tensão dos cabos na estrutura é necessário à realização



Figura 3 – Estrutura de cabos com curvatura convexo-côncava.

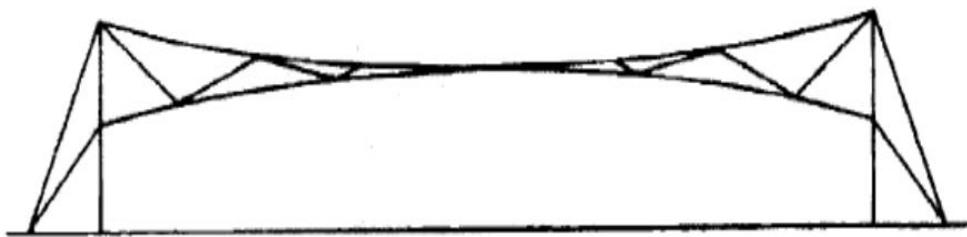


Figura 4 – Estrutura de cabos treliçados.



Figura 5 – Disposições mais comuns de feixe de cabos pré-tensionados.

de uma análise estrutural no domínio do tempo. Esta análise considera cada etapa de pré-tensão dos cabos da estrutura da cobertura e seus efeitos causando deformações na estrutura. Assim, através da observação das deformações das estruturas de ancoragem dos cabos, pode-se planejar a instalação da estrutura de modo que ao final do processo de pré-tensão dos cabos a estrutura assuma a configuração desejada.



Figura 6 – Estádio de Gottlieb Daimler, Stuttgart, Alemanha.

3.3 Rede de cabos pré-tensionados

O sistema estrutural com rede de cabos pré-tensionados são caracterizados por uma rede de cabos pré-tensionados dispostos no espaço para formar uma superfície única. A superfície é formada por cabos de curvatura oposta, assim a superfície assume a forma anticlástica ou sela. As superfícies anticlásticas são superfícies de dupla curvatura, ou seja, suas curvaturas possuem sinais contrários.

Esse tipo de estrutura requer alguns cuidados especiais na concepção estrutural e da forma:

- os cabos devem ser acomodados de modo que não haja o cruzamento de cabos de mesma curvatura, pois impede a aplicação da tensão

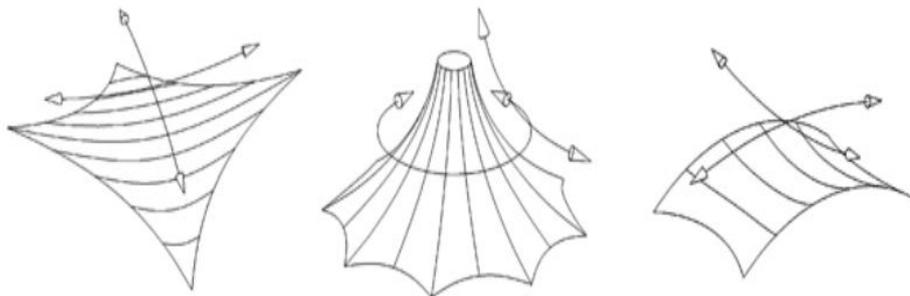


Figura 7 – Superfícies anticlásticas.

adequada no cabo, além de deixar a região frouxa sujeita a grandes movimentos que podem danificar o revestimento;

- em grandes coberturas as áreas planas devem ser evitadas, pois a pouca rigidez de tais áreas suscita vibrações na cobertura.
- quanto à sua forma podem ser classificadas como:
 - parabolóides hiperbólicos (Hypar) – Selas;
 - tendas cônicas ou multi-cônicas – normais (“umbrellas” – guarda-chuvas) ou invertidas (cálices);
 - suportadas por arcos ou quadros– internos ou externos.

O suporte da rede de cabos se dá por meio de um mastro central e cabos de borda ou através de estruturas rígidas como arcos e quadros. A rede de cabos suportada através de um mastro central e cabos de borda tendem a ser menos rígida e requer detalhes mais complicados do que aquela suportada por arcos e quadros rígidos. Devido a isso para grandes coberturas são utilizadas, mais comumente, suportes de arcos e quadros, sendo os suportes com Mastros e cabos de borda mais utilizados em estruturas temporárias, pois podem ser facilmente transportadas.



Figura 8 – Rede de cabos suportada por mastros centrais e cabos de borda, Estádio Olímpico de Munich, Alemanha.

1.1 Cabos tensionados em coberturas sinclásticas

O sistema estrutural com cabos tensionados em coberturas sinclásticas é constituído por cabos tensionados com mesmo sinal de curvatura e tecidos tracionados. Suas vantagens são:

- a capacidade de resistir a cargas para baixo e para cima;
- a eliminação de alguns cabos, algumas bráçadeiras de cruzamento e ancoragens;
- conexões simplificadas entre o tecido e os cabos e fácil instalação.
- menor custo que os sistemas anteriormente apresentados;
- fácil análise estrutural e busca pela forma.

Esse sistema estrutural necessita de altas pré-tensões nos cabos para enrijecer a estrutura contra as deformações. O tecido aplicado na cobertura também precisa ser tracionado na mesma direção dos cabos. Apesar da tração aplicada ao tecido da cobertura, este não é capaz de resistir adequadamente a cargas concentradas, surgindo grandes deformações que devem ser consideradas na fase de projeto, principalmente no que diz respeito à drenagem das águas das chuvas e da neve.



Figura 9 – Rede de cabos suportada por arco, ring de patinação no gelo, Munich, Alemanha.



Figura 10 – Milenium Dome, Inglaterra.

1.2 Membranas tensionadas com cabos

O sistema estrutural de membranas tensionadas com cabos é constituído de cabos tracionados e barras comprimidas formando uma estrutura auto-equilibrada no espaço. Tal estrutura é executada através do alongamento dos elementos de compressão e do encurtamento dos elementos de tração uns reagindo contra os outros.

Existem várias configurações possíveis para esse tipo de estrutura, sendo a forma da estrutura determinada por programas específicos. As formas são determinadas de modo que os elementos de compressão e de tração tenham tamanho idêntico, com o objetivo de se obter fácil execução.

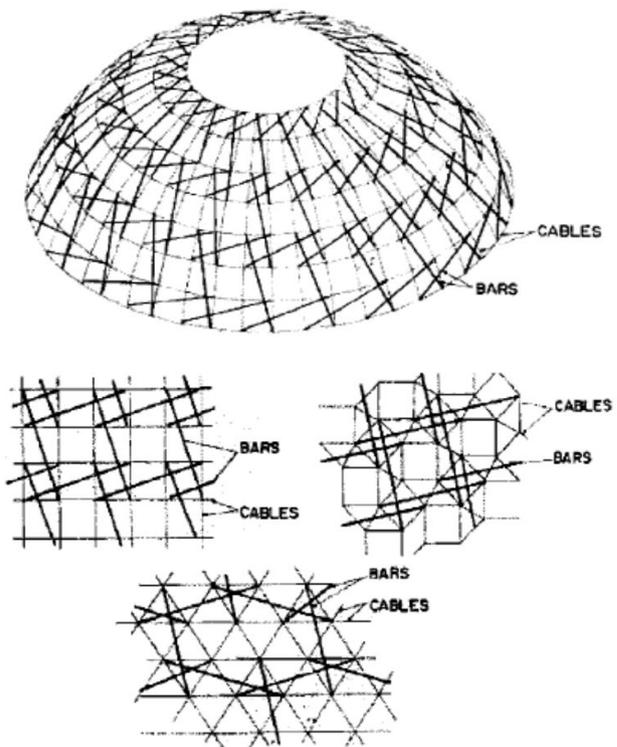


Figura 11 – Membrana tensionada com cabos em forma esférica e disposições variadas.

A incorporação de elementos rígidos de compressão tornou o sistema estrutural muito mais rígido do que aqueles compostos somente por cabos, além de torná-lo menos suscetível a grandes deformações, comum nas outras estruturas compostas somente por cabos. Também possibilitou curvaturas com perfil mais baixo, o que implica em cargas de vento e neve mais amenas e conseqüentemente economia no dimensionamento dos elementos estruturais, além de formar superfícies com áreas menores e, por conseguinte economia no custo dos tecidos.

4 Sistema Estrutural em Treliças

As estruturas em treliças são estruturas que incluem uma ou mais unidades triangulares constituídas de membros delgados retos cujas extremidades são conectadas em juntas chamadas de nós.

As forças externas e as reações a essas forças são consideradas atuando nos nós. Tais forças são transmitidas aos membros resultando em forças de tração ou compressão.

O sistema em treliça trabalha de tal forma que quando um determinado elemento da treliça atinge sua capacidade máxima de carga, outros elementos da treliça passam a suportar cargas adicionais, redistribuindo a carga, fazendo com que o sistema trabalhe de forma integrada. Assim, o conjunto de triângulos da treliça garante a indeformabilidade e a integridade da estrutura.

As estruturas em treliças consistem nos sistemas tradicionais amplamente conhecidos e utilizados na engenharia. Existem diversos modelos de estruturas em treliças sendo cada uma mais adequada para determinados tipos de vãos e funções.

As treliças podem ser planas ou espaciais. As treliças espaciais são formadas por duas malhas, uma

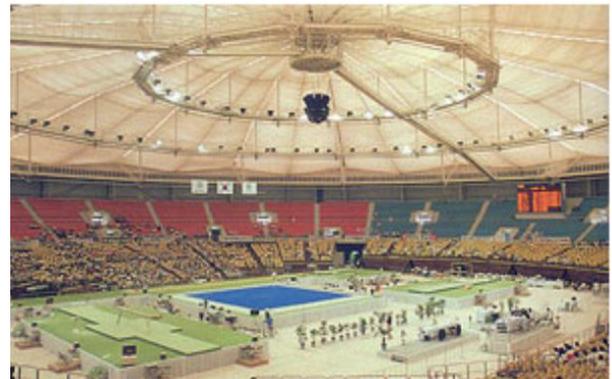


Figura 12 – Olympic Park Gymnastics Arena, Coreia do Sul.

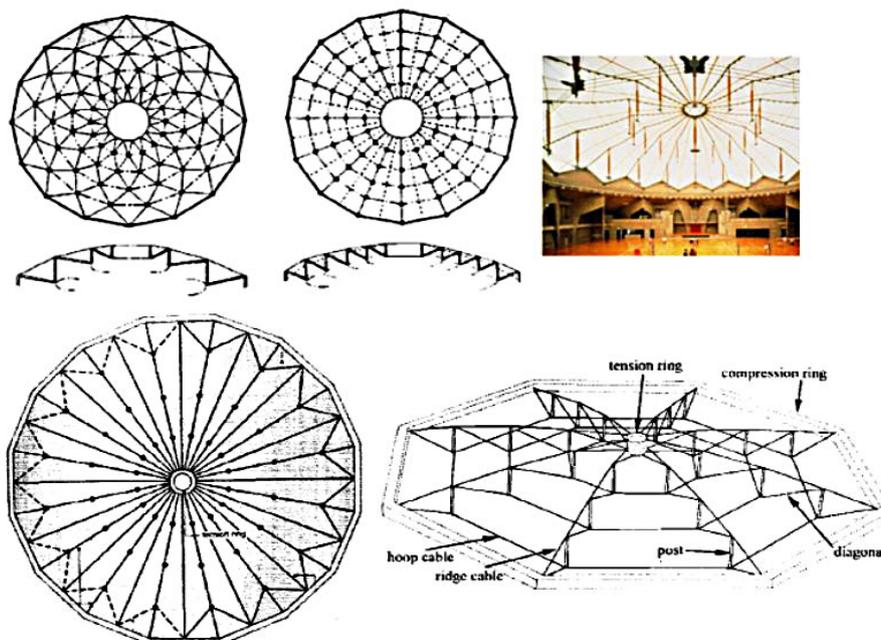


Figura 13 – Amagi Dome in Suzenji, Japão.

interna e outra externa, constituídas de polígonos regulares, principalmente triângulos, quadrados, retângulos, hexágonos e octógonos.

As diagonais interligam as malhas interna e externa, formando um conjunto de triângulos equiláteros, isósceles, e em casos especiais retos ou escalenos. O conjunto de diagonais conectadas aos polígonos das malhas interna e externa formam poliedros ou partes de poliedros.

Para a concepção de treliças espaciais buscam-se principalmente os sólidos platônicos ou poliedros regulares, pois possuem todas as faces, ângulos e ângulos entre faces iguais. Tais poliedros são formados a partir de triângulos, quadrados e pentágonos.



Figura 14 – Poliedros regulares formadores das malhas espaciais.

Esse tipo de sistema estrutural é o mais utilizado em sistema de cobertura de estádios. Possui o conhecimento acerca do do comportamento estrutural bastante difundido. São muito baratos e eficientes, de fácil instalação e manutenção.

5 Sistema Estrutural em Arcos

Os arcos são estruturas cujo elemento estrutural principal segue um eixo que possui formato curvo. São utilizados para vencer grandes vãos, por isso são muito utilizados em pontes, estádios e ginásios esportivos. Também proporcionam uma impressão arquitetônica marcante para a estrutura.

Os arcos podem ser classificados de acordo com a sua aparência ou de acordo com a sua forma sendo esta função de seus carregamentos. Em função do carregamento dos arcos, a forma que otimiza a capacidade estrutural dos arcos de acordo com as cargas são as seguintes:

- catenária: adequado para suportar cargas de caráter permanente;
- parabólica do 2º Grau: adequado para suportar cargas permanentes e outras cargas uniformemente distribuídas;

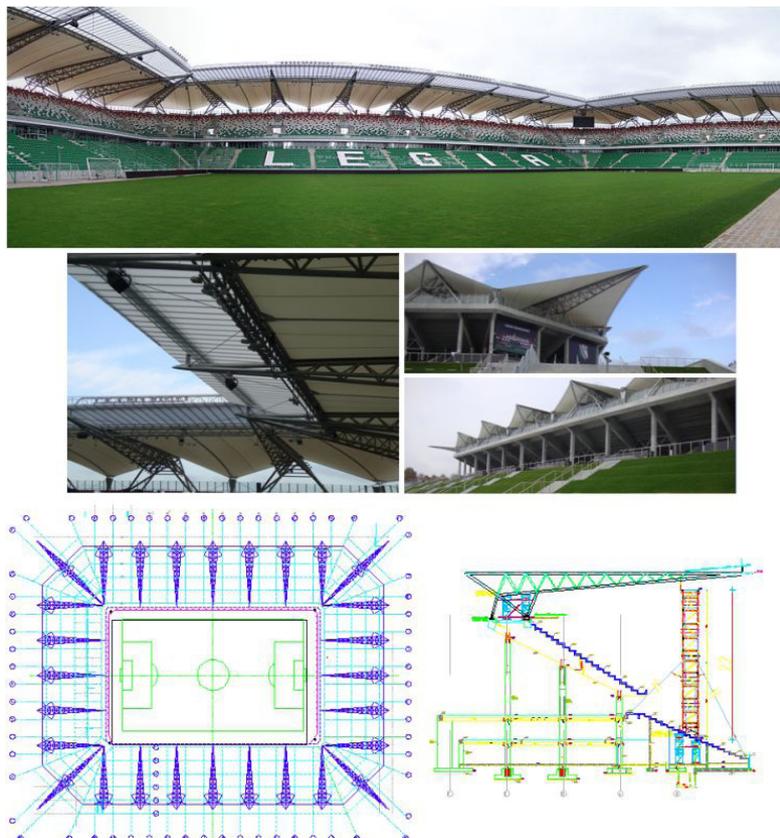


Figura 15 – Estádio Légia Varsóvia, Polônia.

- elíptica: adequado para suportar cargas que aumentam em direção às extremidades do arco (cargas progressivas e triangulares);
- triangular: adequado para suportar carga pontual no centro do arco;
- trapezoidal: adequado para suportar duas cargas pontuais concentradas ao longo da trajetória do arco;
- poligonal: adequado para suportar cargas concentradas ao longo do desenvolvimento curvo.

O comportamento estrutural do arco vai depender do tipo de carregamento, da forma, das condições de vínculo de seus apoios (se simples, móveis ou engastados, ou a combinação destes tipos dois a dois) e do grau de elasticidade, se isostático ou hiperestático.

No que diz respeito aos apoios, somente arcos triarticulados, rotulados em cada um dos dois apoios e mais uma rótula central, são isostáticos. Os demais arranjos e combinações de vínculos implicam necessariamente em sistemas estruturais hiperestáticos.

Na medida em que se aumenta a curvatura da estrutura o efeito da flexão tende a ser anulado. A forma ideal que anula a flexão é a forma que obedece à mesma equação que define a linha de pressão para o carregamento atuante. Entretanto, como no sistema estrutural também atuam cargas acidentais (variáveis) como sobrecargas, ações mecânicas, eólicas, cargas devido à variação de temperatura, recalque ou ereção, torna-se impossível definir uma única equação para a

linha de pressão. Assim, o que é feito na prática, é que a forma da curva obedece à equação da linha de pressão para as cargas permanentes. E, quando atuam cargas acidentais surgem momentos fletores e forças cortantes de pequena magnitude, ainda assim justificando a aplicação de arcos para vencer grandes vãos.

O carregamento estático permanente, que define a equação da linha de pressão e conseqüentemente a forma da curva, equivale na maioria dos casos, a mais da metade do carregamento total deste tipo de estrutura, resultando em ampla economia de material mesmo que não se leve em consideração os fatores positivos referentes à própria curvatura dos arcos, que é a razão entre a altura da flecha e o vão.

No arco pleno ou semicírculo, a altura equivale à metade do vão; no arco abatido, a altura será sempre menor que o raio, que é metade do vão; no arco sobrelevado, a altura será sempre superior ao raio ou à metade do vão. Quanto maior for a altura do arco, menor será a reação horizontal e quanto menor for essa altura, maior será a componente horizontal da resultante reação, tangente à curva de origem. Assim, conclui-se que quando o ângulo de encontro da curva representativa do eixo do arco tende ao ângulo reto, a reação horizontal será nula, como no caso dos arcos plenos. Nos demais casos serão necessários contrafortes ou tirantes para combater as reações horizontais.

No que diz respeito às flechas devido às cargas acidentais, no caso de sobrecarga concentrada normal, haverá a aparição de uma flecha central e duas corcovas

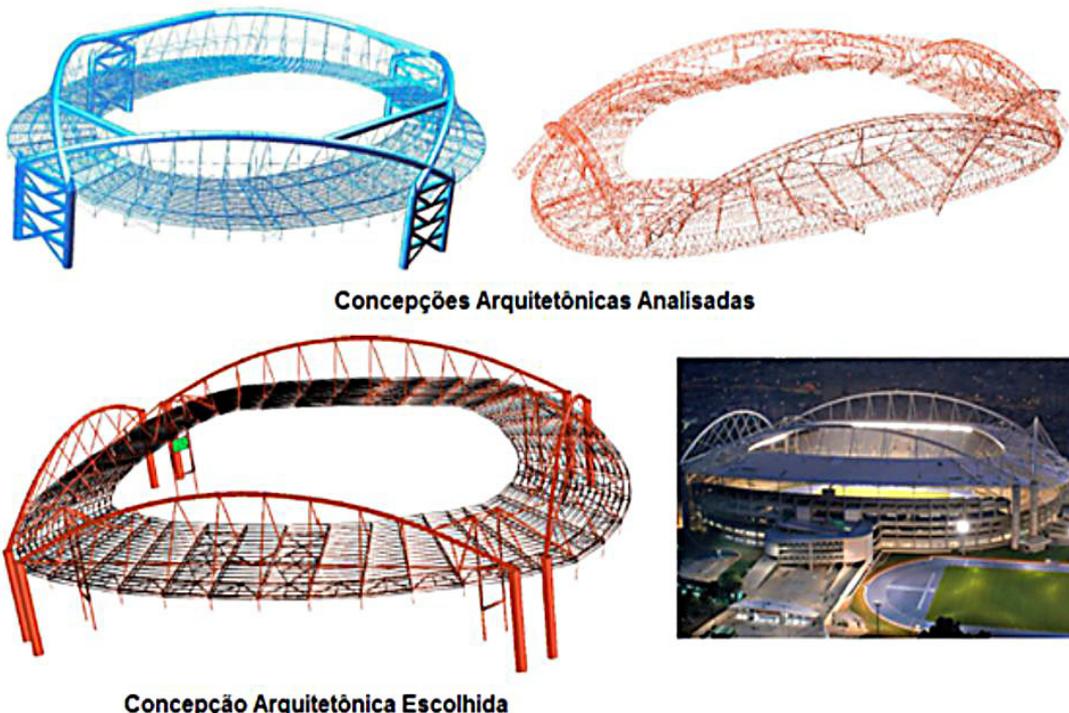


Figura 16 – Estádio Olímpico João Havelange (Engenhão), Rio e Janeiro, Brasil.

extremas; em caso de resultante de carga eólica lateral haverá uma flecha na face exposta à carga e uma corcova na face oculta; quando houver variação térmica positiva, aparecerá uma corcova; uma carga térmica negativa implicará numa flecha e no caso de uma diferença de recalque ou ereção de apoio ocorrerá como consequência uma mudança do eixo da curva induzindo a flexão.

6 Conclusões

Conforme o objetivo proposto, este artigo apresentou os principais sistemas estruturais utilizados em estruturas de coberturas de estádios e centros esportivos, suas características e funcionamento. Assim, é esperado que este trabalho sirva de subsídio para outros trabalhos futuros, provendo informações básicas acerca dos sistemas estruturais mais utilizados em estádios e centros esportivos.

7 Referências Bibliográficas

- ESDRAS P. OLIVEIRA (2012). Sistemas estruturais de coberturas de estádios. Universidade Federal Fluminense (UFF). Dissertação de mestrado.
- JORG SCHLAICH, Rudolf Bergemann. Light Structures.
- BUCHHOLDT, H.A. (1985). An Introduction to Cable roof Structures. Cambridge, Cambridge University Press. 257p.
- KATHERINA S. (2004). Wide Span Cable Structures. University of California, Berkeley. Dissertação de Mestrado.
- HIZURU OBATA, SASQUIA. Arquitetura Têxtil: Aplicações em Coberturas de Eventos Exacta [en línea] 2008, 6 (Julio-Diciembre) <<http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=81011748009>>