

1 INTRODUÇÃO

O que têm em comum estruturas tão distintas como uma ponte suspensa, uma cobertura em rede de cabos, um balão atmosférico ou a vela de um barco? Por mais distintas que sejam em termos de uso, forma ou tecnologia, todas estas estruturas têm em comum o fato de dependerem, para seu funcionamento efetivo, de um adequado estado de esforços internos de tração.

Um caso emblemático é aquele das cordas dos arcos, ou então das cordas dos instrumentos musicais. Para funcionarem a contento, estes elementos devem estar **retesados**¹, e não **frouxos**. Um **estado de retesamento** é, de fato, essencial para o bom funcionamento de qualquer um dos tipos de estruturas exemplificados acima. Por esta razão, pode-se agrupar todos estes tipos embaixo de um único sistema estrutural, aquele das **estruturas retesadas**, numa alusão ao estado em que se encontra a corda de um arco.

Existem outras nomenclaturas de uso mais corrente, que também aludem ao particular estado de solicitação a que as estruturas retesadas se encontram, e que impõe a necessidade de algumas ressalvas. O termo '*tensoestrutura*', por exemplo, de uso já bastante consagrado no campo das coberturas de cabos e membranas, é um anglicismo que introduz, em português, uma séria ambigüidade: se o termo *tension* designa apropriadamente, em inglês, os estados de tensões de tração a que as estruturas retesadas, como os cabos e as membranas, invariavelmente encontram-se sujeitas, em português o termo *tensão* abrange, genericamente, todos os estados de solicitação interna.

Neste sentido, também é inadequada a expressão "*estruturas tensionadas*" posto que neste estado encontram-se todas as estruturas. Também se torna inadequado falar de estruturas "*tracionadas*" ou "*protendidas*": muitas estruturas podem estar tracionadas sem caracterizarem sistemas retesados (isto é, sem dependerem desse estado para funcionarem efetivamente), e o termo "protendido" já encontra uso corrente no contexto de outros sistemas estruturais, de modo que sua adoção no campo das estruturas retesadas pode introduzir alguma confusão conceitual.

Alternativamente, ao invés de se ressaltar o *estado* característico deste tipo de estrutura, pode-se caracterizá-las segundo seu *comportamento*. Neste sentido, todas as estruturas exemplificadas acima podem ser classificadas como *sistemas flexíveis*, sofrendo mudanças drásticas de forma quando o padrão de carregamento a que estão submetidas é alterado (em contraposição, os sistemas rígidos, tais como as vigas e as cascas, não apresentam deformações consideráveis sobre a ação

¹ [CALDAS-AULETE, 1956] *Retesar* (v.t.): entesar, tornar tenso ou retesado, esticar, enrijar; pôr a direito. *Retesado* (adj.): entesado, enrijado, tenso, hirto, bem tesado. *Retesamento* (s.m.): ato ou efeito de retesar.

das cargas de serviço, mantendo uma forma próxima da original). A Figura 1-1 sugere, graficamente, esta distinção.

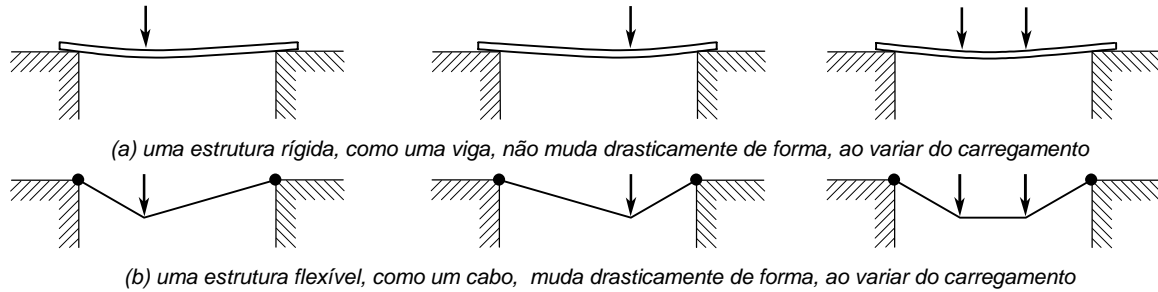


Figura 1-1. Distinção entre estruturas rígidas e flexíveis (Adaptado de SHODEK [1992]).

As classificações segundo o *estado* (estruturas retesadas) e o *comportamento* (estruturas flexíveis) são de fato equivalentes. Uma grande flexibilidade restringe a natureza dos esforços internos que as estruturas podem desenvolver, pois estas se tornam instáveis para esforços internos de compressão (assim, por exemplo, embora haja uma solução para o problema do equilíbrio do cabo retilíneo sujeito a forças de compressão nas extremidades, esta solução é instável; na prática, tudo se passa como se o material do cabo não tivesse rigidez à compressão), de modo que em estruturas flexíveis, os carregamentos externos devem ser equilibrados basicamente por meio de esforços de tração.

Outra caracterização importante diz respeito ao peso próprio. Os sistemas retesados são, geralmente, *estruturas leves*. O peso específico de uma estrutura retesada é, grosso modo, duas ordens de grandeza menor que o de uma estrutura em concreto armado e uma ordem menor que o de uma estrutura convencional de aço. No entanto, em contrapartida às vantagens advindas da redução de peso, os carregamentos devidos ao vento, principalmente os efeitos de instabilidades aeroelásticas, como o drapejamento, tornam-se críticos para o projeto deste tipo de estruturas.

Quanto aos elementos construtivos, as estruturas retesadas dividem-se basicamente em dois grandes grupos, as *estruturas de cabos* e as *estruturas de membrana*. Os cabos são elementos lineares, capazes de suportar carregamentos externos apenas desenvolvendo esforços axiais de tração. Membranas são elementos superficiais que equilibram os esforços externos desenvolvendo tensões de tração e cisalhamento, tangentes à sua superfície.

A distinção entre estes dois grupos não é nitidamente demarcada: as redes de cabos, por exemplo, têm um comportamento global muito semelhante ao das estruturas de membrana. Por outro lado, o tecido de uma membrana pode ser entendido como uma rede de cabos de malha muito fina. Cabos e membranas podem ainda aparecer combinados, gerando estruturas retesadas de tipo misto. Este

tipo de combinação tem-se tornado bastante freqüente, principalmente em estruturas pneumáticas, quando uma rede de cabos reforça a membrana de vedação.

As *estruturas pneumáticas* são as estruturas retesadas por excelência, posto que são as únicas em que é possível ter todos os elementos trabalhando submetidos à tração. Há três tipos básicos de estruturas pneumáticas: *estruturas insufladas*, *estruturas aspiradas* e *estruturas infladas* (HERZOG [1979] contempla ainda as velas, os pára-quadras e as bolinas como um quarto tipo, o dos *sistemas pneumáticos abertos*). Uma estrutura *insuflada* consiste de uma membrana fechando um espaço útil e suportada por uma pressão interna ligeiramente maior que a atmosférica. Em uma estrutura aspirada usa-se o princípio inverso, isto é, sub-pressão interna. Uma estrutura inflada, por sua vez, usa balões pressurizados, em forma de vigas, colunas, arcos, como elementos estruturais.

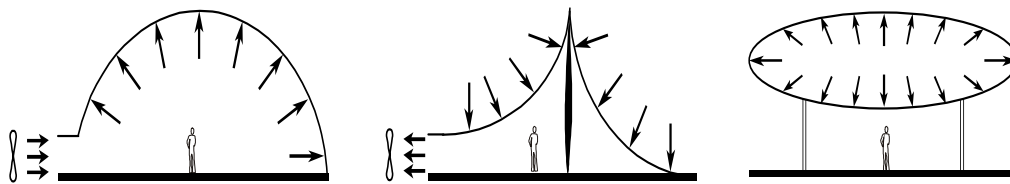


Figura 1-2. Esquema de estruturas pneumáticas.

As *estruturas tensegrity* e as *estruturas estaiadas* são tipos mistos de estrutura, combinando cabos tracionados –elementos típicos das estruturas retesadas– com outros elementos trabalhando à compressão ou à flexo-compressão. Porém, também para estas estruturas, a rigidez geométrica prepondera sobre outros fatores de rigidez. Além disso, sendo também elas muito leves, os carregamentos críticos são semelhantes aos das demais estruturas retesadas, de modo que é usual estudá-las em conjunto. De fato, rigorosamente falando, à exceção dos balões, todas as estruturas retesadas são mistas, pois os esforços internos de tração desenvolvidos por alguns elementos devem ser de alguma maneira equilibrados por meio elementos trabalhando à flexão ou compressão.

As estruturas retesadas podem ainda ser classificadas morfológicamente, dividindo-se então em *sistemas planos* e *sistemas espaciais*. Enquanto as membranas restringem-se aos sistemas espaciais, como tendas e balões, os cabos aparecem como elementos construtivos seja dos sistemas planos –como as pontes suspensas ou as treliças de cabos– seja em sistemas espaciais –caso das redes de cabos ou dos sistemas *tensegrity*.

Finalmente, devido à capacidade de vencer grandes vãos, as estruturas retesadas contribuem com grande parte das manifestações das chamadas “estruturas especiais”. Neste sentido, faz-se eco às palavras de Richard Bradshaw e colegas [BRADSHAW, 2002], em trabalho comemorativo do sesquicentenário da ASCE - *American Society of Civil Engineering*:

*"From the Georgia Dome in Atlanta, the Livestock Pavilion in Raleigh, and Madison Square Garden in New York, to the Olympic Stadium in Munich, and from the Pontiac Silverdome in Michigan to the Sydney Opera House in Australia and the Haj terminal in Saudi Arabia, **special structures** are landmarks and testimonials to the achievements of the structural engineering profession. They are what makes us most interested in and proud of our profession and what bind us together with the architects and architectural and construction engineers in appreciation of the art of structural design and construction".²*

Além do grande interesse prático, as estruturas retesadas constituem um campo instigante para o pesquisador. Por um lado, os elementos estruturais básicos (os cabos e as membranas) são provavelmente os elementos mais simples de serem formulados. Por outro lado –paradoxalmente– o comportamento estrutural destes elementos trabalhando em conjunto, por ser essencialmente não-linear, é quase sempre sinônimo de complexidade.

As dificuldades analíticas postas pelo comportamento não-linear das estruturas e a ausência de materiais adequados retardaram o uso moderno das estruturas retesadas. No que tange aos materiais, pode-se afirmar que apenas com os aços de alta resistência surgidos a partir do século passado, e dos materiais compósitos e sintéticos do nosso século é que as qualidades das estruturas retesadas puderam ser plenamente exploradas.

No que diz respeito à análise, embora o desenvolvimento teórico das estruturas retesadas não seja recente³, foi apenas com o advento dos computadores que os engenheiros puderam ombrear –em termos de capacidade de análise– com a flexibilidade de formas que as estruturas retesadas oferecem à imaginação dos arquitetos. A primeira vez que uma rede de cabos foi analisada por métodos computacionais foi por ocasião do projeto da cobertura das piscinas e do estádio dos Jogos Olímpicos de Munique (1972).

Os edifícios dos Jogos Olímpicos e das Feiras Mundiais sempre apresentaram novidades tecnológicas e ajudaram a disseminar o interesse do público por este tipo de estrutura. Anteriormente a Munique, tiveram particular influência as piscinas dos Jogos Olímpicos de Tóquio (1964), Pavilhão Alemão da Expo'67 em Montreal, os Pavilhões Americano e da Fuji na Expo'70 em Osaka. Mais recentemente, destacaram-se as tendas e pontes da Expo'92 em Sevilha.

Entre os arquitetos e engenheiros que lideraram o desenvolvimento das estruturas retesadas modernas, deve-se necessariamente citar *Frei Otto*, com propostas pioneiras em estruturas de cabos, membranas e pneumáticos, *Eero Saarinen* e *Kenzo Tange*, no campo das estruturas de cabos e

² Das estruturas citadas, apenas a cobertura da *Opera House* de Sydney (uma treliça espacial revestida por placas metálicas) não guarda relação com as estruturas retesadas!

³ Foi no contexto do estudo das cordas que surgiram as noções de harmonia, ainda na Grécia Antiga. Mais recentemente, muitos dos desenvolvimentos clássicos do cálculo foram obtidos ao longo dos estudos de Taylor, da família Bernoulli, de Lagrange, Euler, Laplace e Fourier sobre cordas, cabos e membranas.

Walter Bird, no campo dos pneumáticos. O pioneirismo da modelagem computacional das estruturas retesadas, por sua vez, coube a J.H. Argyris. Dentre as instituições responsáveis pela disseminação do interesse por este tipo de estruturas, por outro lado, destacam-se a *International Association for Shell and Spatial Structures*, e a *International Association for Wind Engineering*, que freqüentemente promovem conferências-chave no campo das estruturas de cabo e membrana⁴.

Porquanto essencialmente os mesmos tipos de análise estrutural sejam válidos para os diversos tipos de estruturas retesadas, em termos tecnológicos estes tipos constituem mundos bastante distintos, impossibilitando um tratamento unificado que se estenda muito além dos conceitos básicos, ligados ao papel que a rigidez geométrica joga na definição de seus comportamentos⁵.

Assim, muito embora este trabalho procure apresentar um panorama da evolução histórica e do problema de projeto e análise das estruturas retesadas, dadas a amplitude do tema e a necessidade se evitar um tratamento enciclopédico, enfatizam-se as coberturas de cabos e membranas, sendo outros tipos de sistemas retesados tratados *en passant*. Em particular, as pontes somente são discutidas no que diz respeito à sua evolução histórica. Além disso, tratam-se os aspectos arquitetônicos e tecnológicos do projeto com menor detalhe que os aspectos ligados à análise⁶. Não obstante estas limitações, espera-se que este trabalho sirva como um roteiro, a partir do qual venham a ser empreendidos estudos mais aprofundados, apontando para todas estas direções, tanto pela pesquisa individual como por parte do grupo de competência que paulatinamente vem se aglutinando em torno do tema.

⁴ Em um amplo trabalho de revisão, KNUDSON [1991] aponta como marcos os seguintes congressos e simpósios: “*Hanging roofs, metallic shell roofs and superficial lattice roofs*”, Paris (1962); “*On pneumatic structures*”, Stuttgart (1967); “*Tension structures and space frames*”, Tóquio (1971); “*Shells, membrane and space frames*”, Osaka (1986); “*Space structures for sports buildings*”, Pequim (1987) e o congresso de 30 anos da IASS “*10 years of progress in shell and spatial structures*”, Madri (1989). Mais recentemente ocorreram o “*IASS International Symposium*”, Toronto (1992), o “*IASS-ASCE International Symposium*”, Atlanta (1994) e a “*International Conference on Lightweight Structures in Civil Engineering*”, Varsóvia (1995).

⁵ As pontes, por exemplo, são –por via de regra– estruturas de maior dimensão e responsabilidade civil que as coberturas, requerendo análises estruturais complexas, que freqüentemente envolvem a consideração de efeitos aeroelásticos. Em certos aspectos, porém, as pontes são de concepção e análise mais simples que as coberturas, notadamente no que diz respeito à busca da forma e à determinação dos padrões de fabricação dos seus elementos.

⁶ No que diz respeito aos aspectos arquitetônicos e tecnológicos, pode-se remeter o leitor a uma série de trabalhos, listados aqui sem pretensão de exaustão da literatura. No campo das estruturas pneumáticas, destacam-se os livros *Pneumatic Structures – A Handbook for the Architect and Engineer*, de Thomas Herzog [HERZOG, 1977] e *Lufthallenhandbuch – Air Hall Handbook*, de Frei Otto [OTTO, 1982]. Quanto às membranas pretendidas e tendas em geral, não se pode deixar de remeter-se à obra pioneira de Otto, *Das Hängende Dach* [OTTO, 1958], ou as suas obras mais recentes, como *Findig Form: Towards Architecture of the Minimal* [OTTO, 1995]. Outra obra concisa porém elucidativa é *Soft Canopies*, de Maritz Vanderberg [VANDERBERG, 1997]. No que diz respeito às técnicas de montagem deste tipo de estrutura, um manual de relevo é *The IFAI Procedural Handbook for the Safe Installation and Maintenance of Tentage*, publicado pela *Industrial Fabric Association International* [IFAI, 1996]. Quanto às coberturas de cabos, além da obra pioneira de Otto, *Das Hängende Dach*, também permanece relevante *An Introduction to Cable Roof Structures*, de H.A. Buchholdt [BUCHHOLDT, 1985], enquanto que uma sinopse mais recente, enfatizando as estruturas estaiadas, é dada por Thornton e Ian Liddell em *Tensile Structures* (capítulo 20 de BLANC [1993]). Finalmente, dentre a literatura recente, além do já citado livro de OTTO [95], apontam-se os livros *Tensostrutture – Progetto e Verifica* de Massimo Majoviecky [MAJOVIECKY, 1994], *Introducción a la Arquitectura Textil*, de Juan Monjo Carrió [CARRIÓ, 1990] e *Tensioned Fabric Structures: A Practical Introduction*, editado por R.E. Schaefer [SCHAEFER, 1996], que contemplam tanto aspectos tecnológicos quanto aqueles de projeto e de análise.

Buscando contribuir com o progresso do estado da arte das estruturas retesadas, antecipa-se a sistematização dos futuros trabalhos segundo as seguintes linhas de pesquisa:

- *Aspectos Teóricos e Computacionais*, envolvendo a formulação de novos elementos finitos, métodos de análise e modelos constitutivos, e desenvolvendo novas ferramentas computacionais;
- *Aspectos Tecnológicos*, envolvendo a caracterização, a experimentação e desenvolvimento de protótipos de sistemas estruturais retesados, de novos métodos construtivos e materiais;
- *Aspectos Formais, Funcionais, Econômicos e Históricos*, estimulando enfoques multidisciplinares;
- *Metodologias de Projeto*, integrando o conhecimento desenvolvido em todas estas linhas.

Estas linhas de pesquisa deverão ser perseguidas no âmbito dos laboratórios de Mecânica Computacional (LMC) e de Estruturas e Materiais (LEM) do Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações (PEF) da Escola Politécnica da USP, procurando-se envolver alunos dos cursos de pós-graduação em Engenharia de Estruturas, junto ao PEF, e em Arquitetura e Urbanismo, junto à Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da USP.