

Mobilidade das arquiteturas têxteis e tensoestruturas

Mobility of textile architectures and tenso-structures

Sasquia Hizuru Obata

Mestre em Engenharia Civil – Universidade de São Paulo;
Doutora em Arquitetura e Urbanismo – Universidade
Presbiteriana Mackenzie; Professora Titular – Faculdade
de Engenharia e Artes Plásticas da FAAP e da Universidade
Cruzeiro do Sul.
São Paulo, SP [Brasil]
sasquia@terra.com.br

Carlos Egídio Alonso

Doutor em Estruturas Ambientais Urbanas – Universidade
de São Paulo; Professor Titular – Universidade Presbiteriana
Mackenzie/Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da
Universidade de São Paulo
São Paulo, SP [Brasil]
caralonso@mackenzie.com.br

As arquiteturas têxteis ou tensoestruturas são definidas como construções leves que podem ter mobilidade – quando projetadas para não terem a permanência intrínseca da construção convencional – ou possuírem partes móveis. Como uma obra industrializada ou pré-fabricada tais construções se traduzem em etapas de montagem e instalação, o que aumenta a adesão a produtos transportáveis os quais podem facilmente conter partes móveis. Devido a essas características e em face da identificação prévia da diversidade de soluções arquitetônicas neste artigo, apresentam-se possibilidades projetuais de mobilidade de partes da construção que, por meio de ilustrações, têm o objetivo de fornecer um repertório da prática e do aproveitamento da condição de leveza e aderência aos espaços transformáveis das tensoestruturas e arquiteturas têxteis.

Palavras-chave: Arquitetura têxtil. Tensoestrutura. Mobilidade.

The textile architectures or tenso-structures are defined as light constructions capable of having mobility – when designed to lack the intrinsic permanence of conventional constructions – or of possessing movable parts. As in industrialized or prefabricated works, these constructions are executed in assembly and installation stages. This increases the adherence to transportable products, which may contain moving parts. Due to these characteristics and in view of the previous identification of the diversity of architectural solutions, in this article, project possibilities of mobility of construction parts are presented by means of illustrations, with the objective of furnishing a repertoire of practices and the means of exploiting condition of lightness and adherence of tenso-structures and textile architectures in transformable spaces.

Key words: Textile architecture. Tenso-structure. Mobility.

1 Introdução

1.1 Contextualização da mobilidade das arquiteturas têxteis e tensoestruturas

A mobilidade vista sob referenciais históricos arquitetônicos tem em Friedman (2006) o manifesto modernista de 1958. No caso das construções, na diretriz desse manifesto, determina-se seguir os movimentos voluntários da população com a mesma mobilidade e dinâmica com que ocupam e desocupam os espaços. Um exemplo dessa mobilidade são as coberturas instantâneas (Figura) que foram propostas pelo grupo de arquitetos, Archigram, formado inicialmente em 1961, por Peter Cook, Mike Webb e David Greene e complementada em 1967 por Ron Herron, Warren Chalk e Dennis Crompton com várias aplicações arquiteturas têxteis (DREW, 1973).

A mobilidade e a portabilidade das edificações fazem parte da história dos povos e, segundo Escrig e Sanchez (2002), a arquitetura antiga era móvel decorrente do caráter nômade dos povos e da, conseqüente, necessidade de desocupação das cavernas.

Uma diversidade de arquitetos pode ser citada como referencial, mas quanto à aplicação e formalização estruturada da mobilidade, menciona-se Richard Buckminster Fuller por sua filosófica busca pela leveza e flexibilidade das construções, chegando a propostas visionárias, como a cúpula geodésica sobre uma área urbana, em 1968 (Figura 2), também se destaca, no item 2 deste artigo, o arquiteto Frei Otto.

Hodiernamente, a mobilidade e a possibilidade de serem portáteis são características de eficiência de habitabilidade das construções e pontos interessantes de eficácia energética e conforto ambiental. Vislumbra-se que no futuro haverá construções com enfoque arquitetônico de plataformas de espaços, cidades móveis e caminhos que podem se transformar conforme as funções e necessidades de espaços e em localidades diversas.

Esta condição futura e as buscas atuais pela mobilidade das obras arquitetônicas decorrem em parte das demandas energéticas e ecológicas quanto à proteção ambiental e, portanto, de construções inteligentes.

Sob outro ponto de vista, a mobilidade passa a noção oposta de eternidade e durabilidade que

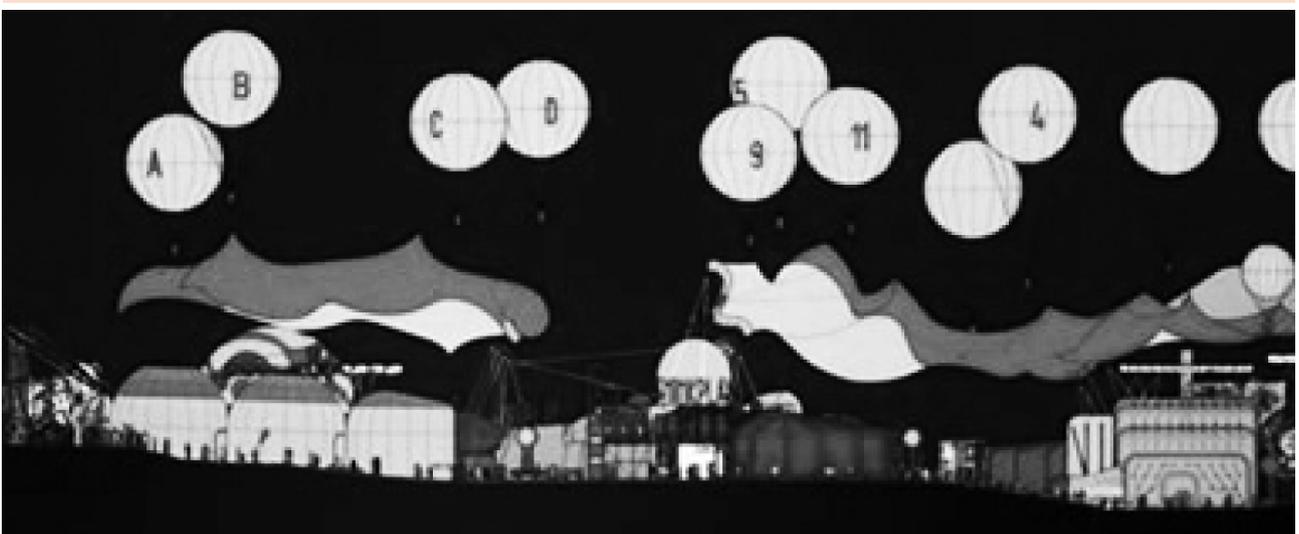


Figura 1: Cidade instantânea do grupo de arquitetos Archigram com membranas suspensas por balões

Fonte: Archigram (1969).



Figura 2: Geodesic Dome City, projeto de 1968 do arquiteto Buckminster Fuller

Fonte: Fuller (1968) apud Visionary Architecture (2010).

as obras convencionais transmitem, permitindo a aderência integral da estética formal ao tempo, este último, fugaz e mutante e, de adaptação entre funcionalidade e imaginação. Segundo Escrig e Sanchez (2002) ela pode corresponder à arte e ao partido arquitetônico.

No que concernem às arquiteturas têxteis e tensoestruturas, a condicionante de mobilidade é incidente decorrente da condição de construções leves e de flexibilidade. A leveza dessas obras possibilita que a aplicação de mecanismos e automações seja viabilizada sem grandes impactos na motorização e na energia envolvida. Outro ponto importante refere-se à flexibilidade do têxtil, dependendo de sua constituição, permite a repetição de movimentos de dobramento e desdobramento ou inflar e desinflar, no caso de estruturas pneumáticas, sem que o material entre em ruptura por fadiga.

Quando a mobilidade for condicionante projetual e estabelecida como requisito, recomenda-se a aplicação do conceito desde a concepção por representar grandes impactos nas fases iniciais, e medianos, nas compatibilizações projetuais, no uso e manutenção. Nesse sentido, cita-se que a mobilidade deve ser a diretriz, principalmente na busca do partido arquitetônico, na composição da equipe projetual e dos custos de mecanização e automação quando requerido.

Entretanto, muitas vezes, a decisão de adoção de mobilidade – mesmo que permita a flexibilização do espaço, ganhos energéticos e condicionamento térmico em regiões de climas adversos – pode ser um ato político e de atendimento a impactos diversos.

Um exemplo recente de impacto diverso e inverso à adoção da mobilidade arquitetônica ocorreu no desenvolvimento do Estádio Nacional de Pequim (Figura 3), cuja mudança da cobertura, mesmo com a obra em andamento e o projeto executivo contemplando uma cobertura retrátil em membrana, as autoridades chinesas decidiram alterar o plano inicial, excluindo a cobertura retrátil de automação deslizante, inclusive reduzindo o vão em balanço dos 24 semipórticos¹.



Figura 3: Visão frontal dos semipórticos projetados por Herzog e De Meuron Architekto

Fonte: National Geographic Channel/Brasil (2008).

A justificativa da intervenção, mesmo tendo sido contemplado no projeto a diversidade de riscos e as obras em andamento estarem de acordo com o projetado, foi entendida como uma medida política de proteção, divulgada publicamente como sendo decorrente da necessidade de redução do peso em face dos problemas sísmicos locais, bem como da diminuição do volume de aço utilizado.

2 Formas de mobilidade das arquiteturas têxteis e tensoestruturas

Uma forma de aplicação de mobilidade e de definição de espaços foi desenvolvida por Martins (1998) em sua tese sobre o projeto de um teatro móvel, múltiplo e transformável, na qual destaca que as estruturas de membrana são leves e podem ser projetadas para montar, desmontar e transportar. Por possuírem mecanismos para esse fim e variedade formal e tipológica podem conduzir a espaços de usos múltiplos, além de terem um forte potencial

compositivo, de modulação e de transformação que os espaços cênicos exigem e trazerem em si o conteúdo do ser ambulante e de portabilidade.

Relacionando-se a condição de mobilidade das arquiteturas têxteis e tensoestruturas às formas de movimentos que podem ser projetados, menciona-se a publicação de Otto (1971 apud WALTER, 2006), pelo Instituto de Estruturas Leves (*Institut for Leightweight Structures*), na qual apresenta uma matriz de movimentos relacionada ao sistema construtivo de coberturas classificadas como conversíveis e ilustradas a seguir no Quadro 1.

Sistema construtivo	Tipo de movimento	Direção do movimento			
		Paralelo	Central	Circular	Perimetral
Membrana apoiada em estrutura fixa	Puxadas ou içadas				
	Enrolada				
Membrana apoiada em Estrutura móvel	Deslocada ou transladada				
	Dobrada				
	Rotacionada				
Construção rígida	Deslocada ou transladada				
	Dobrada				
	Rotacionada				

Quadro 1: Matriz de movimentos de coberturas conversíveis*

**Institut for Leightweight Structures, Univ. Stuttgart, IL5 Convertible Roofs.*

Fonte: Otto (1971) apud Walter (2006).

Do Quadro 1, a partir da classificação do sistema construtivo podem-se definir os tipos de movimentos e a direção correspondente; porém, o quadro proposto por Otto (1971) apud Walter (2006) não contempla a combinação de movimento nem as recentes tecnologias que estão proporcionando mobilidade para as estruturas pneumáticas e a condição de mudança de forma e desempenho de modo ativo, que na época era somente concebida como de definição de forma e sustentação pneumática.

Dado esse entendimento a proposta de adaptação às inovações tecnológicas recentes, seria a classificação, de modo mais amplo, pela mobilidade, sendo a do Quadro 1 específica da forma de movimentação.

Portanto, a mobilidade, também pode ser definida pela condição de movimento e transformação de forma que podem ser basicamente de duas formas, ou seja, conversível ou retrátil, em que:

- As obras conversíveis são as que a forma é transformada por conversão, e na qual ocorrem mudanças, tais como de dobrar e desdobrar, de inflar e desinflar.
- As obras retráteis² são as que possuem mecanismos que permitem movimentos para terem partes ocultadas ou recolhidas ou para ficarem aparentes.

Essas formas de mobilidade são também denominadas atualmente de arquiteturas cinéticas³ e inseridas no termo criado pelo arquiteto Nicholas Negroponte, no fim dos anos 60, de arquitetura responsiva⁴, como sendo arquitetura que responde e reage de modo inteligente ou arquitetura *soft*, por não ser estática e fixa; portanto, no sentido contrário da rigidez e dureza das construções convencionais.

3 Disposições construtivas e de escolha da mobilidade

Neste item, a condicionante de mobilidade para as arquiteturas têxteis e tensoestruturas será determinada entre “conversível” e “retrátil”, como definidas anteriormente, e apresentando-se para cada mobilidade as descrições de disposições construtivas básicas e exemplos de aplicações.

3.1 Obras conversíveis

Para as “obras conversíveis”, em que a mudança de formato se dá na própria forma da superfície da tensoestrutura ou arquitetura têxtil, a escolha recai sobre duas formas, a saber: quanto ao tipo pneumático ou quanto ao dobrável.

No “tipo pneumático”, há a opção por todos os tipos de têxtil, sendo a escolha definida em razão da opacidade e transparência, da resistência e do padrão estético quanto à cor e ao tato. Assim,

- Para pneumáticos com exigência de transparência ou de transparência controlada indica-se o Etileno Tetrafluoretileno (ETFE), o Cubo Aquático de Pequim (Figura 4) e o Eden Park (Figura 5), em que membranas internas e intermediárias podem ser movimentadas e a



Figura 4: O sistema em parede dupla de ETFE no Cubo Aquático, no período noturno, efeito de uma caixa azul brilhante pela instalação de *Lights Emitting Diode* (LED), projetado pela empresa Herzog & De Meuron Architekten

Fonte: PTW apud Gonchar (2008).



Figura 5: Vista externa do Eden Park, projetado por Nicholas Grimshaw and Partners

Fonte: The Eden Project (2001).

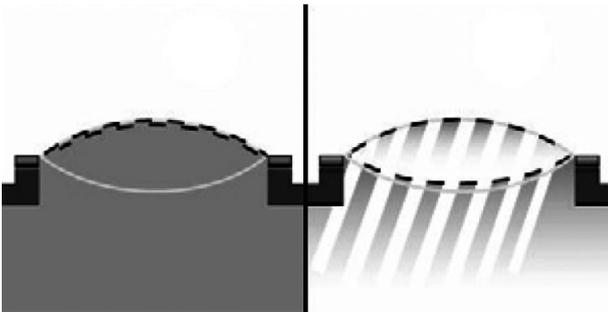


Figura 6: Aplicação de três filmes de ETFE em posição horizontal e o controle automatizado de movimentação do filme intermediário

Fonte: Bassignana (2006).

pressão dos colchões pode ser alterada como ilustrado na Figura 6.

- Para pneumáticos com exigência de cores diversas e de contato físico comprovado, indica-se o Cloreto de Polivinila, ou em inglês, *Polyvinyl Chloride* (PVC), veja as umbrelas pneumáticas de Osaka, Figura 7.
- Para pneumáticos estruturais, mas de curvaturas reduzidas indica-se o Politetrafluoretileno (PTFE).

Para o “tipo dobrável”, como ordenamento neste artigo, são adotadas as seguintes definições quanto à forma de dobramento: total ou parcial, do têxtil de vedação, e parcial ou total, do conjun-



Figura 7: Mush-balloon na Expo de 1970, em Osaka, projeto das empresas Tanero Oki Architects, Engineers Shigeru Aoki Research Office e a Architen Landrell Associates Ltd

Fonte: Tensinet (2009).

to da estrutura e vedação, que podem ser também definidos como pantográficos de abertura total ou parcial.

Quanto às estruturas pantográficas, essas têm a flexibilidade de serem temporárias, permitindo a montagem e desmontagem, conforme a necessidade.

Tais tipologias básicas podem ser combinadas formando-se dobramentos mistos e complexos. Como resultado das pesquisas realizadas quanto a aplicações desses dobramentos, pode-se ainda apresentar uma classe considerando-se o sentido do dobramento, ilustrados, a seguir, e conforme as indicações:

- Dobramento em faixas simétricas ou dobramento pregueado ou plissado⁵, veja a Figura 8 ilustrando uma cobertura desmontável para piscina dos arquitetos Escrig e Sanchez (2008); a Figura 9, mostrando a cobertura de uma estufa e, mais adiante, as Figuras 15 a 17 apresentam outros exemplos.
- Dobramento pontual suspenso ou dobramentos pontuais suspensos, como mostrados na Figura 10, estrutura na ruína de Stifskirche, como na Figura 11, domo inflável e dobrável, como nas Figuras 18 a 20, Estádio Rothenbaun, e na Figura 21, Plaza de Toros.



Figura 8: Vista da cobertura desmontável-temporária

Fonte: Escrig e Sanchez (2008).



Figura 9: Estufa-viveiro com cobertura dobrável em faixas

Fonte: Van der Hoeven (2007).

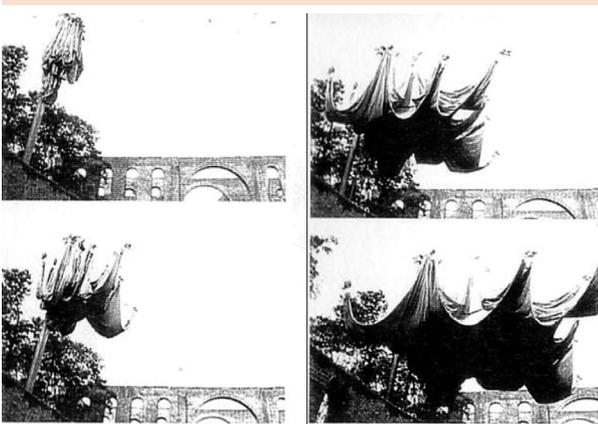


Figura 10: Estrutura conversível projetada por Frei Otto, cobrindo em quatro minutos cerca de mil metros quadrados na ruína de Stifskirche, na Alemanha

Fonte: Otto e Rash (1995).

- Dobramento de base de apoio central são estruturas do tipo guarda-chuva ou guarda-chuva, conforme: a Figura 12, Mesquita Al- Hussein

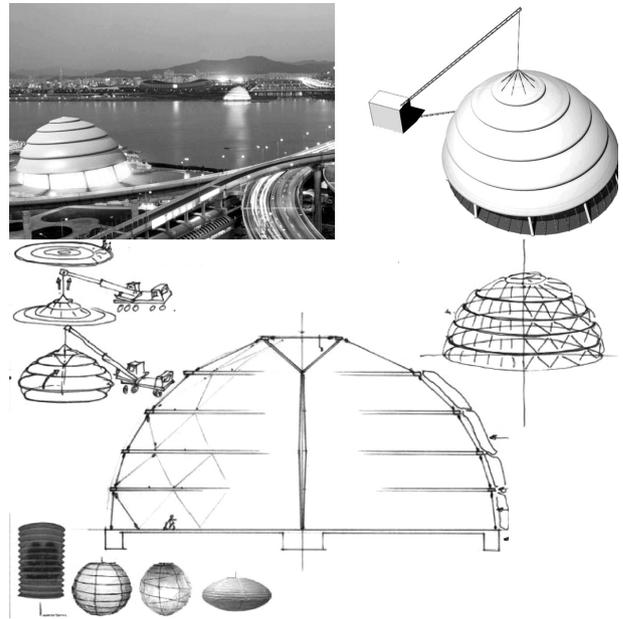


Figura 11: Domo inflável temporário, projeto da empresa Inflate Products Ltd

Fonte: Inflate Products Ltd (2007).

no Cairo; a 13, Mesquita *Prophet's Holy*, e a 14, tipologia de dobramento central e suspensão, reservatório de água em PVC.

- Dobramento nas bordas, mostrado na Figura 22, cobertura de um clube nas ilhas Canárias.
- Dobramento pantográfico, com ou sem a possibilidade de montagem e desmontagem, conforme exemplos apresentados nas Figuras 23 a 25 e também nas de 30 e 31, Pavilhão da Venezuela Expo 2000.

3.1.1 Exemplos de concepções de obras conversíveis

Algumas aplicações são apresentadas, a seguir, e parte delas foi coletada no portfólio de projetos desenvolvidos por Escrig e Sanchez (2008), especialistas em estruturas conversíveis do tipo dobráveis.

As Figuras 15 (a) e (b) apresentam as etapas de dobramentos da cobertura do Auditório La Alameda, em Jaen, Espanha, formada por arcos metálicos. Para estudos das movimentações e compatibilidade dos dobramentos, os projetistas



Figura 12: Etapas de abertura das *umbrellas* da Mesquita Al-Hussein no Cairo, Egito, projeto da empresa SL-RASCH GmbH

Fonte: SL-Rasch GmbH (2008).

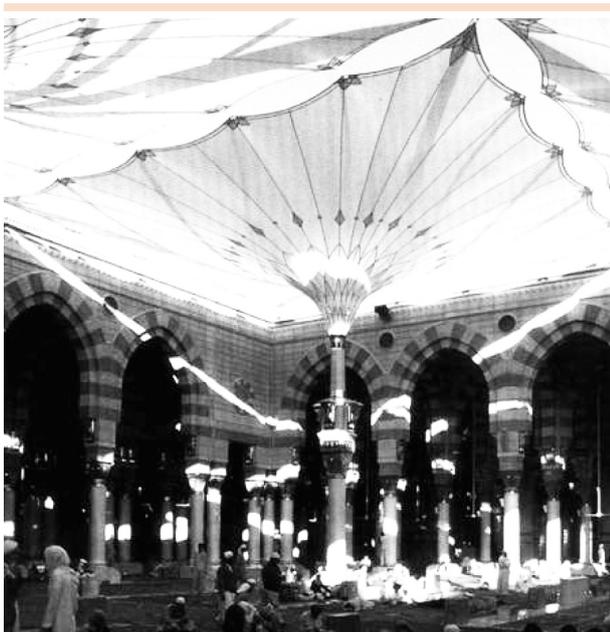


Figura 13: Mesquita *Prophet's Holy*, Medina, projetada pelo arquiteto Bodo Rash

Fonte: Otto e Rasch (1995).

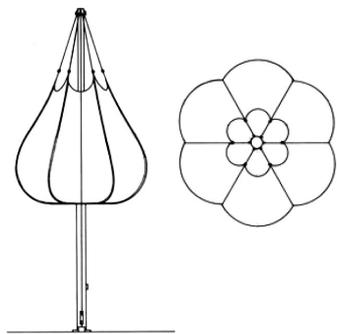


Figura 14: Reservatório de água em PVC, projetado pela empresa SL-Rasch GmbH

Fonte: SL-Rasch GmbH (2008).

optaram pelo suporte dos modelos reduzidos que foram desenvolvidos parte em madeira. Na Figura 16 apresenta-se o Auditório já em uso.

Projetada em 1987 pelo escritório SL-Rasch GmbH (2008), a cobertura da Mesquita Quba,

em Medina, consiste em uma estrutura treliçada tubular em alumínio que apoia em cada uma de suas extremidades as membranas. As membranas possuem a função de sombreamento tendo, portanto, a malha de tecido aberta. Para um melhor desempenho, foram aplicadas membranas sobrepostas, em dupla camada.

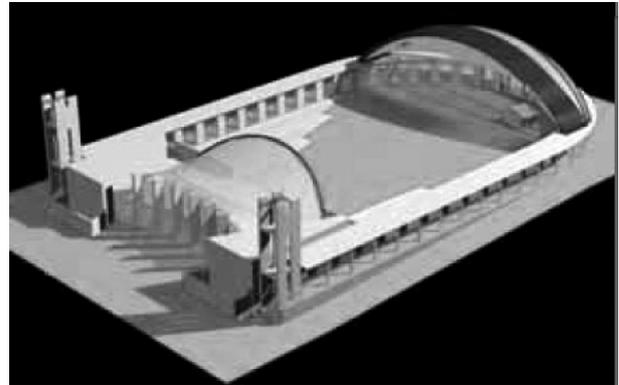
Na Figura 17, apresentam-se as etapas de desdobramento que se desenvolvem sob cabos guias e de conexões da sustentação do sistema, as membranas, por suas vezes, são suspensas e uniformemente fixadas em cabos retráteis.

A cobertura do Estádio Rothenbaum – *Rothenbaum Tennis Court* –, em Hamburgo, desenvolvido pelo escritório Architen Landrell, em membrana de PVC branco e tecido base de poliéster, em decorrência da alta flexibilidade e resistência requerida nas movimentações de dobramento e desdobramento, bem como do devido tensionamento na posição coberta. A cobertura tem um vão total de 102 metros, sendo a parte dobrável com diâmetro de 63 metros; como complemento, todo entorno possui uma estrutura fixa de suporte da parte retrátil, mas igualmente coberta com membrana de poliéster e PVC.

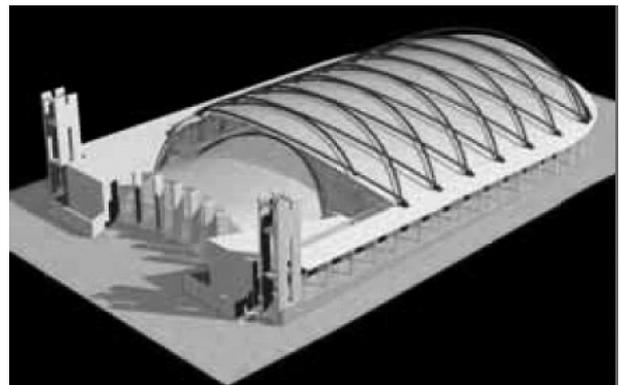
Na Figura 18, tem-se a cobertura central totalmente fechada, na qual se destaca os cabos de sustentação da cobertura de borda e os cabos guias e de sustentação da cobertura conversível.

Na posição da membrana fechada com abertura total do vão da cobertura do estádio, percebe-se que o ponto de sustentação não é central, mas deslocado e, da mesma forma, não se nota a sombra da cobertura sobre a quadra, Figura 19.

Portanto, destaca-se neste projeto que o dobramento pode ser controlado e posicionado conforme a incidência solar e não simplesmente para abrigar das condições climáticas e das adversas. As fases de fechamento dessa cobertura estão ilustradas na Figura 20, Estádio Rothenbaum, e na 21, cobertura da Plaza de Toros que possui uma co-



(a)



(b)

Figura 15: (a) e (b) Etapas de fechamento da cobertura do auditório *La Alameda*, em Jaen, Espanha, projeto de Escrig-Sanchez

Fonte: Fabric Architecture (2006).



Figura 16: Vista do auditório *La Alameda* de Escrig-Sanchez

Fonte: Escrig e Sanchez (2008).

bertura suspensa e conversível com recolhimento somente no ponto central.

O projeto da cobertura do Clube Robinson, nas Ilhas Canárias (Figura 22) foi desenvolvido

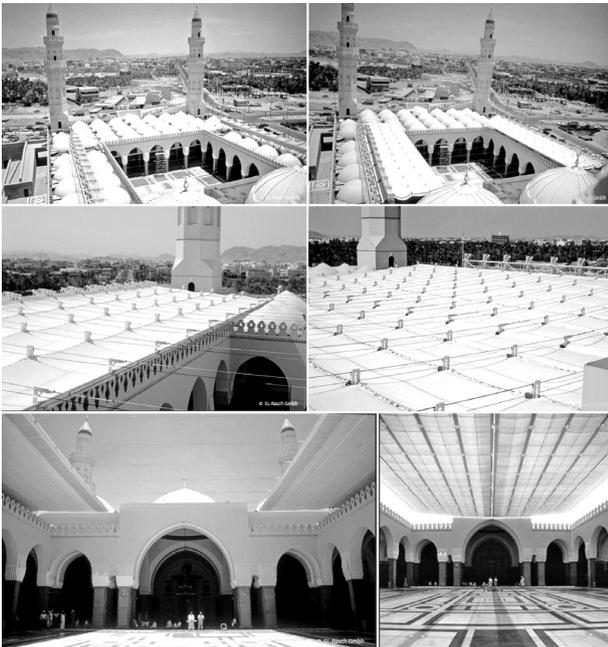


Figura 17: Cobertura da Mesquita Quba, em Medina, projetada pela empresa SL-Rasch GmbH

Fonte: SL-Rasch GmbH (2008).



Figura 18: Vista lateral superior da cobertura fechada do Estádio Rothenbaum, desenvolvido pelo escritório Architen Landrell

Fonte: DDASSOC (2007).

com o intuito de abrigar um auditório para 500 pessoas com uma área de 350 metros quadrados. A cobertura conversível é suspensa por nove eixos de cabos de aço inoxidável para resistir às condições de ventos salinos. O dobramento dela ocorre na borda, e as laterais possuem conexões móveis para que no momento de tensionamento da cobertura em estado de membrana aberta não ocorram dobras e enrugamentos, bem como vençam até os



Figura 19: Vista superior do Estádio Rothenbaum, em Hamburgo, na posição da membrana aberta - Rothenbaum Tennis Court, desenvolvido pelo escritório Architen Landrell

Fonte: Space Modular (2007).

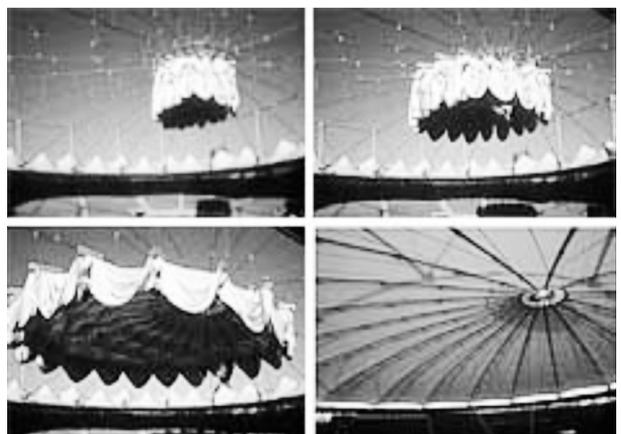


Figura 20: Fases da membrana conversível do Estádio Rothenbaum, desenvolvido pelo escritório Architen Landrell

Fonte: Space Modular (2007).



Figura 21: Projeto do arquiteto Juan Monjo Carrió, Plaza de Toros, de Zaragoza, Espanha

Fonte: II Simposio LatinoAmericano de Tenso-Estructuras (2008).

limites e de encontro com a própria construção que possui beirais. Para suportar as movimentações, a membrana é em poliéster, coberta com PVC e, quando totalmente aberta, nota-se que nos pontos de fixação das conexões metálicas optaram-se pelo reforço em outra cor de membrana e na forma de estrelas.

Já no projeto de cobertura do tipo pantográfica desenvolvido pelos arquitetos Escrig e Sanchez (1994) para o Complexo Desportivo de San Pablo, em Sevilla, a opção adotada foi uma cobertura dobrável e desmontável, consolidada em dois módulos pantográficos que se acoplam, como pode ser visto nas Figuras 23 (a) e (b), sendo na Figura 23 (a) a locação centralizada na piscina vazia, e em 23 (b), a abertura do segundo módulo de cobertura no momento de abertura. Em estágio de montagem pré-acoplamento uma das coberturas fica sobre bases de apoio de extremidade que só passam a se contraventar mutuamente quando conectadas.

Figura 23 (a) Figura 23 (b)

Figura 23 (c) Figura 23 (d)

Figura 23 (e)

Figura 23: De (a) a (e) Complexo Desportivo de San Pablo, em Sevilla, projeto da dupla Escrig e Sanchez

Fonte: Escrig e Sanchez (2008).

Percebe-se, tanto nas Figuras 23(b) como em 23(c) e 23(d), que a estrutura metálica de sustentação fica na parte exterior e a membrana é suspensa por conexões e cabos na estrutura metálica como pode ser observado na Figura 23(e), após a montagem e já em uso.

A linha de estruturas pantográficas com membranas dos arquitetos Escrig e Sanchez ori-



(a)



(b)



(c)

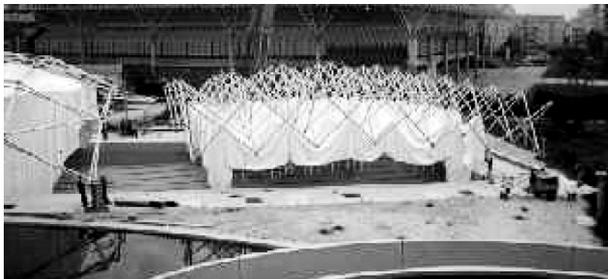
Figura 22: (a) a (b), respectivamente a área descoberta do Robinson Club, projetada pela empresa SL-RASCH GmbH, com destaques aos cabos inoxidáveis e a cobertura fechada, com as estrelas correspondentes aos pontos de conexões metálicas e, finalmente, a (c), ilustra a vista superior da cobertura

Fonte: SL-RASCH GmbH (2008).

ginou-se antes mesmo do projeto do Complexo San Pablo, anteriormente descrito. A dupla desenvolveu, ainda em 1993, os estudos de estruturas



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 22: (a) a (b), respectivamente a área descoberta do Robinson Club, projetada pela empresa SL-RASCH GmbH, com destaques aos cabos inoxidáveis e a cobertura fechada, com as estrelas correspondentes aos pontos de conexões metálicas e, finalmente, a (c), ilustra a vista superior da cobertura

Fonte: SL-RASCH GmbH (2008).

pantográficas geminadas, Figura 24, por meio de modelos reduzidos e protótipos para estudos das movimentações e só então lançaram as bases para o projeto do complexo de San Pablo.

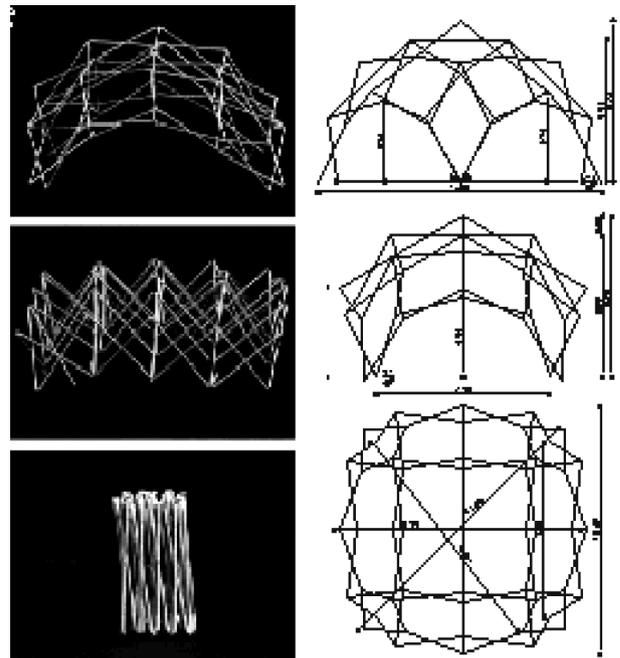


Figura 24: Primeiro projeto da dupla Escrig e Sanchez para estruturas conversíveis

Fonte: Escrig e Sanchez (2008).

As Figuras 25 (a) e (b) apresentam duas das etapas de movimentações da cobertura da arquibancada em Stuttgart, Alemanha, projetada pelo escritório SL-RASCH GmbH. A estrutura conversível pantográfica de barras de alumínio é dobrável em módulos com cobertura em têxtil de poliéster com cobertura de PVC (SL-RASCH GmbH, 2008).

No estado totalmente aberto, e conforme apontamentos feitos na imagem pelo autor deste estudo, notam-se, na Figura 25 (c), cabos freios para evitar a sucção em decorrência das ações de ventos como podem ser notados no término de cada módulo estrutural, bem como cabos de contraventamento dos módulos na parte superior. Tais condicionantes construtivas devem ser destacadas, uma vez que as estruturas conversíveis ou

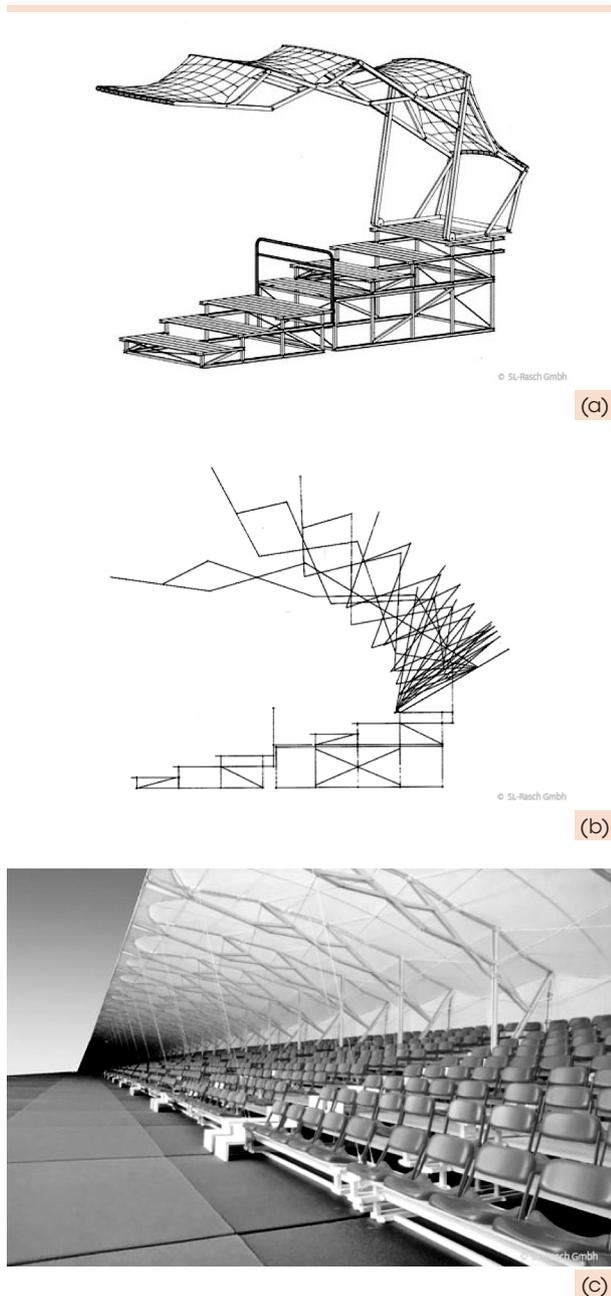


Figura 25: De (a) a (c), cobertura de arquibancada em Stuttgart, projetada pela empresa SL-RASCH GmbH

Fonte: Adaptada de SL-RASCH GmbH. (2008).

dobráveis devem ser estáveis em qualquer condição de forma, em cada uma das infinitas fases, tanto em sua montagem como em desmontagem, como também em seu estado final e em uso.

A Associação da Expo 70, no Japão, na cidade de Osaka, em 1970, por meio da parceria en-

tre as empresas *Tanero Oki Architects, Engineers Shigeru Aoki Research Office* e a *Architen Landrell Associates Ltd.* desenvolveram uma proposta de guarda-chuvas pneumáticos (Figura 7) para espaços públicos em climas temperados, de verões amenos e invernos frios, indicados para uso permanente ou para construções temporárias e que se seguem as descrições principais, segundo a Tensinet (2009).

A expectativa de vida útil proposta para os balões-cogumelos de Osaka foi, no mínimo, cinco anos, dependendo do tipo de material, que poderiam ser em têxtil de poliéster coberto com PVC ou mesmo de membrana de vinil.

As dimensões básicas para a formação de cogumelos pneumáticos com 20 metros de diâmetro, e 19, de altura, conforme elevação e planta na Figura 26. A área destinada a todo o projeto foi 1.550 metros quadrados.

Os balões-cogumelos são formas em cones invertidos e suspensos por 45 cabos que passam do topo ao mastro pelo centro do balão. São fechados internamente por costuras e também contidos por uma trama interna de cordas, como mostra a Figura 27. As curvaturas de cada gomo variam da extremidade ao centro e quando aberto geram as maiores tensões nos cabos de sustentação, comparável aos cabos de protensão de peças em concreto protendido.

A pressão interna de ar nos balões é de 150 mmAq ou 1.500 Pa em estado aberto e entre 100 a 50 mmAq ou 1.000 a 500 Pa, durante a operação de abertura ou fechamento. As ações de vento foram projetadas para uma velocidade de 15 m/s, quando aberto e de 60 m/s, quando fechado, isso considerando a localização do Japão, ou seja, uma região de tufões e rajadas intensas de ventos. Outras opções projetuais seriam possíveis como o aumento da rigidez dos balões para combater o efeito das vibrações (*flutter*) pelo aumento da pressão interna, ou simplesmente aumentar as resistências dos ma-

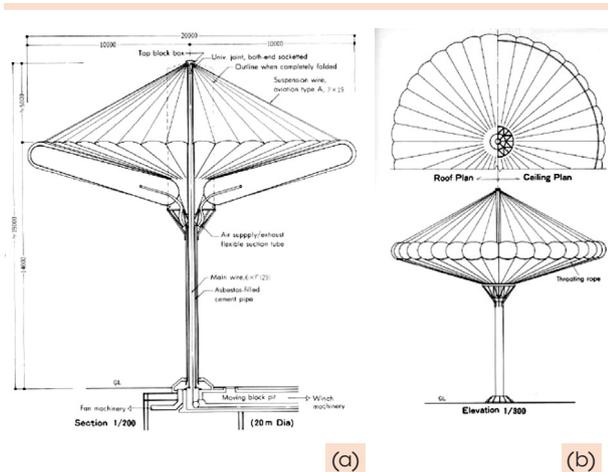


Figura 26: (a) e (b) Elevações e planta da *Mush-balloon*, na Expo de 1970, projeto das empresas *Tanero Oki Architects, Engineers Shigeru Aoki Research Office* e a *Architen Landrell Associates Ltd.*
 Fonte: Tensinet (2009).

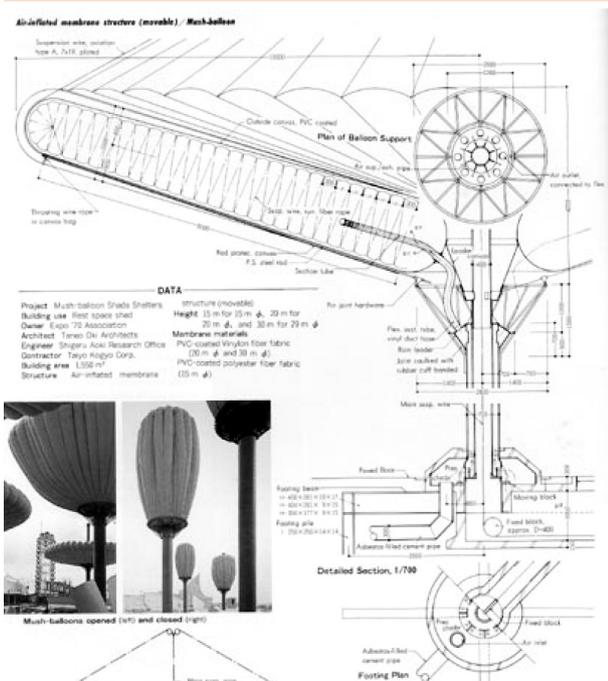


Figura 27: Sistema de costuras internas da *Mush-balloon* na Expo de 1970, projeto das empresas *Tanero Oki Architects, Engineers Shigeru Aoki Research Office* e a *Architen Landrell Associates Ltd.*
 Fonte: Tensinet (2009).

teriais como um todo. Dessas alternativas, a de maior viabilidade econômica é a possibilidade de controle do fechamento, portanto a adotada, e que se encontra ilustrada nas Figuras 28 (a) e



Figura 28: (a) e (b) Situação de maior resistência da *Mush-balloon* aos ventos e fases de fechamentos, respectivamente ilustrados, projeto das empresas *Tanero Oki Architects, Engineers Shigeru Aoki Research Office* e a *Architen Landrell Associates Ltd.*
 Fonte: Tensinet (2009).

(b) que mostram as fases de movimentações das *Mush-balloons*.

Para que o procedimento de encher ou o de esvaziar não gerassem distorções de tensões entre os cabos de sustentação e as membranas, bem como a perda de forma – a qual também implicaria maiores ações dos ventos e maior vulnerabilidade do sistema estrutural, utilizou-se um sistema automatizado em que são monitorados esses extremos por um *software* de controle. O que permitiu a compatibilidade entre as tensões nos cabos e a pressão e ventilação nos balões.

Na Figura 29, encontra-se ilustrado o esquema de controle, de um lado a pressão e ventilação nos balões, e de outro todo o sistema de cabos em roldanas até um motor e, ambos os extremos controlados por um sistema automatizado.

O Pavilhão da Venezuela da Expo 2000, em Hannover, é uma estrutura conversível composta por um pilar central que apoia a cobertura e também o elevador central e dezesseis asas ou pétalas (Figura 30).

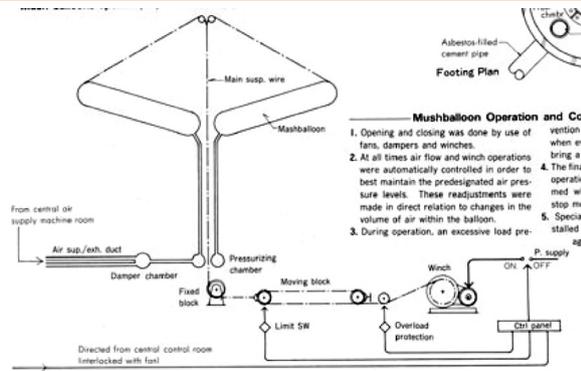


Figura 29: Esquema do sistema de controle automatizado dos balões e dos cabos, projeto das empresas *Tanero Oki Architects, Engineers Shigeru Aoki Research Office* e a *Architen Landrell Associates Ltd.*

Fonte: Tensinet (2009).

As asas são automaticamente controladas por meio da movimentação de hastes cilíndricas de acionamento pneumático (Figura 31) para proporcionar a variabilidade do sombreamento, bem como a ventilação requerida, ou mesmo, a total cobertura do edifício, que dura 100 segundos. Quando fechado possui um diâmetro de 32 metros, e aberto, de 40 metros. O têxtil é pré-tensionado de cobertura de PTFE (SL-RASCH GmbH, 2008).

3.1.2 Novas concepções para obras conversíveis

As obras conversíveis têm como perspectiva de tecnologia construtiva a aproximação a equipamentos automatizados. Uma série de estudos já foi realizada buscando-se as obras com estruturas conversíveis e coberturas em membranas e têxteis com base em forma geodésicas móveis. Tais estruturas poderão ser construídas por meio de treliças com nós cilíndricos que permitem a rotação e de barras retráteis, quando a forma exigir.

Apesar dos estudos estarem em andamento no momento em diversas universidades do mundo, ainda não se constata essa tipologia consolidada em um grande volume de edificações, justificando a perspectiva de tecnologia de impacto de um

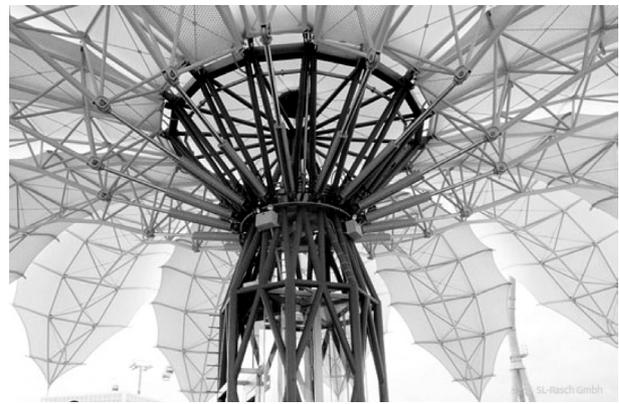


Figura 30: Asas do Pavilhão da Venezuela EXPO 2000, Hannover, projetado pela empresa SL-RASCH GmbH

Fonte: SL-RASCH GmbH. (2008).



Figura 31: Hastes de controles de movimentações do Pavilhão da Venezuela EXPO 2000, Hannover, projetado pela empresa SL-RASCH GmbH

Fonte: SL-RASCH GmbH. (2008).

futuro próximo e, portanto, que trarão novas concepções para as obras conversíveis.

A Figura 32 apresenta a constituição básica e de formação da conversão da estrutura que é representada em um conjunto de barras que podem ser conectadas em nós cilíndricos ajustáveis e móveis, podendo se transformar em uma cúpula ou em uma superfície cilíndrica.

Outro modelo de estrutura conversível, desenvolvido na Universidade Técnica de Munique, com o princípio de treliças móveis, é apresentado na Figura 33.

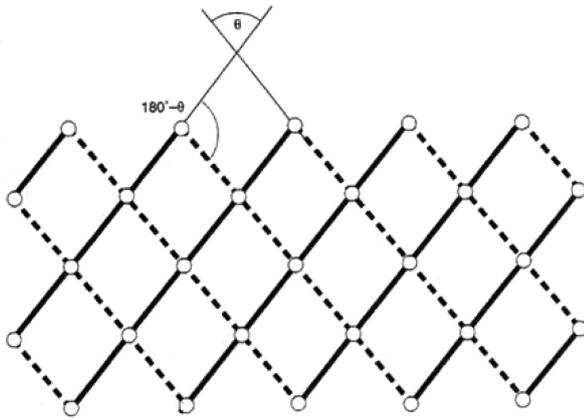


Figura 32: Sistema básico de mobilidade de barras

Fonte: Walter (2006).

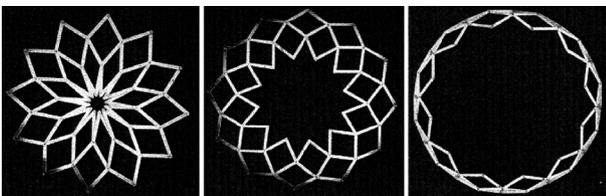


Figura 33: Modelo de estrutura conversível de treliças móveis

Fonte: Walter (2006).

Outro estudo sobre o desenvolvimento de estruturas conversíveis tem como princípio os modelos de simulações dos ângulos dos elementos, como a cúpula dos estudos de Frank Jensen, sob orientação do Prof. Sergio Pellegrino, na Universidade de Cambridge, Figura 34.

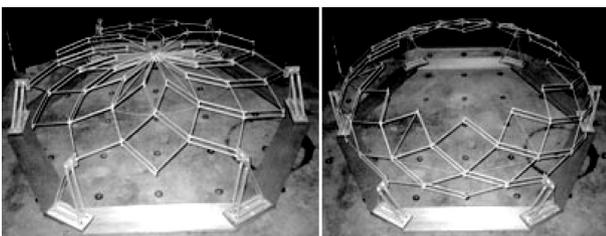


Figura 34: Cúpula com habilidade de conversão, estudos de Frank Jensen, sob orientação do Prof. Sergio Pellegrino - Deployable spherical structure

Fonte: Jensen e Pellegrino (2007).

Atualmente, as estruturas hábeis ao dobramento ou de conversibilidade elevada estão já em

uso em ambientes inóspitos ou de alta periculosidade, como indicado no *site* do Departamento de Estruturas da Universidade de Cambridge, *Deployable Structures Laboratory* (JENSEN; PELLEGRINO, 2007), ou seja, são estruturas que podem mudar a forma, a partir de outra muito compacta até uma expandida.

Essa condição de alta conversibilidade pode ser uma exigência em razão do transporte, armazenamento ou devido a qualquer outra condição que exija a ocupação limitada de espaço. Um exemplo de alta concentração e de ampla expansão pode ser o de uma bomba, ou a concepção dos raios solares.

Na engenharia aeroespacial, há as antenas de aeronaves, as quais são elementos compactamente alojados ou concentrados em um ponto que para seu uso e lançamento devem automaticamente ser desdobradas e expandidas ao estado final de utilização em poucos segundos.

3.1.3 Disposições construtivas para obras conversíveis

Após essas apresentações de aplicações e, portanto, de comprovado levantamento de condicionantes de projetos, a seguir, encontram-se as disposições construtivas para as arquiteturas têxteis e tensoestruturas conversíveis e com dobramentos sucessivos.

Para esses tipos de dobramentos, a indicação de uso de estruturas auxiliares e cabos guias são imprescindíveis e facilitam a adoção da automação e manutenção. Quanto à disposição de escolhas dos materiais para as obras conversíveis por dobramentos indica-se basicamente:

- Para dobráveis com exigência de transparência ou de transparência controlada indica-se o ETFE.
- Para dobráveis com exigência de translucidez elevada indica-se o tecido de poliéster com cobertura de PVC transparente.

- Para dobráveis com exigência de cores diversas e de contato físico comprovado, indica-se o tecido de poliéster com cobertura de PVC colorido.

Percebe-se que a disposição do PTFE é limitada, pois sua base têxtil é em fibra de vidro que não permite dobramentos, podendo ser indicada quando a estrutura de apoio é dobrável, e a vedação, fixa. A mesma situação é válida para as placas e lâminas, por isso, são classificadas como obras de estruturas retráteis com vedação leve.

3.2 Obras retráteis

Para as “obras retráteis” que em sua grande maioria são deslizantes de forma simétrica, ocasionalmente em decorrência das condições locais ou até pela forma requerida, opta-se pela não simetria.

Para os casos de obras retráteis com superfícies que não são simétricas, os projetos exigem dimensionamentos diferenciados pelos esforços assimétricos e tensões diferenciadas e ainda, no caso de automação, há que buscar considerações que levem a um resultado de desempenho adequado dos mecanismos e trilhos.

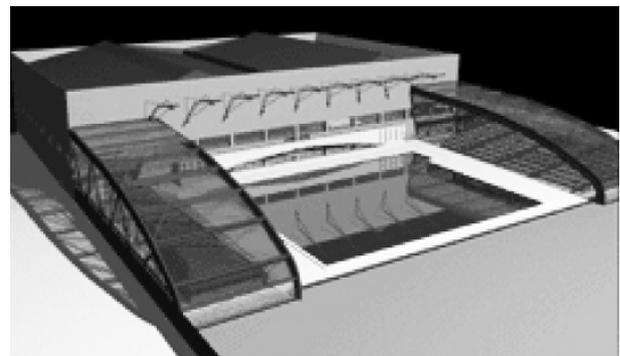
A disposição construtiva básica das obras retráteis é a constituição de uma estrutura de apoio retrátil para a membrana ou o têxtil, ou seja, trata-se de um conjunto de arquitetura têxtil ou tensoestrutura que tem como apoio uma estrutura com mobilidade.

Portanto, a escolha do material vedante da obra não fica condicionada a mobilidade, podendo ser escolhido conforme as condicionantes básicas de projeto, como as condições de forma e resistência.

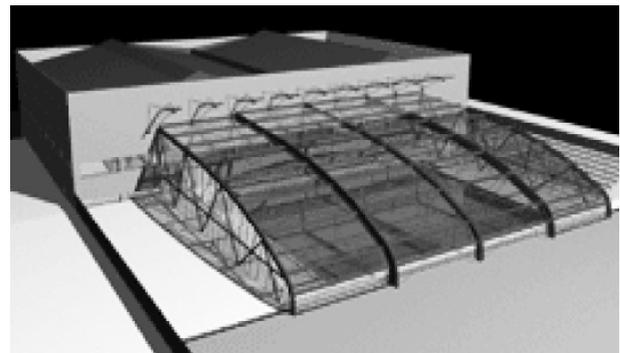
3.2.1 Exemplos de concepções de obras retráteis

Um exemplo de cobertura retrátil, de estrutura móvel e cobertura fixa em membrana translú-

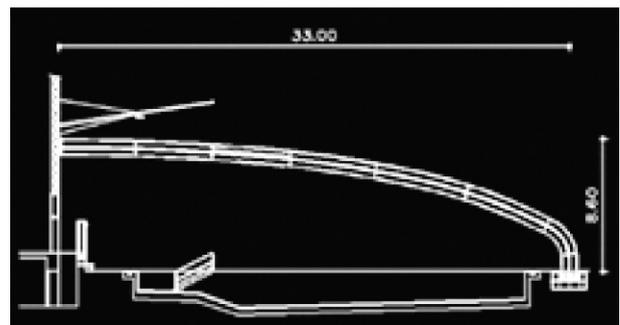
cida sobre painéis de estrutura metálica biapoiada nos trilhos deslizantes, pode ser representado pelo projeto de 1996, dos arquitetos Escrig e Sanchez para o Complexo Desportivo Hytasa, em Sevilla, Espanha. Nesse projeto, a cobertura retrátil corresponde aos dois painéis centrais que deslizam sobre para cada um dos extremos, conforme ilustra a Figura 35 (a) e (b), e na (c) é possível constatar o posicionamento dos trilhos guias.



(a)



(b)



(c)

Figura 35: (a) e (b) Posições da cobertura e em (c) o detalhe em corte do sistema do trilho no piso e na parede projetado por Escrig e Sanchez

Fonte: Escrig e Sanchez (2008).

A cobertura retrátil do Estádio Cardinal, em Glendale, no Arizona (Figura 36), nos Estados Unidos, projeto do arquiteto Peter Eisenman, corresponde a mais recente obra nesse tipo de cobertura, possuindo dois painéis móveis pesando 550 toneladas cada um e cerca de 100 metros de vão.

O sistema de fechamento e abertura foi adotado para atender o condicionamento do ar no verão que é muito intenso. O tempo de abertura total é de 12 minutos, ou seja, uma velocidade de 8,5 metros de painel por minuto. Na Figura 37, a cobertura encontra-se fechada e nota-se a luminosidade interna.

A estrutura é composta de treliças metálicas em forma hélice apoiadas por torres de con-



Figura 36: Imagem do projeto de abertura da cobertura retrátil e detalhe do campo retrátil/deslizante, do Arizona Cardinals, 2007, projeto do arquiteto renomado, Peter Eisenman

Fonte: Arizona Cardinals (2007).



Figura 37: Vista interna do estádio coberto, Arizona Cardinals, 2007, projeto do arquiteto Peter Eisenman

Fonte: Arizona Cardinals (2007).

creto, Figura 38, e com cobertura de membrana de PTFE.

Sobre as treliças em forma de hélice encontram-se os trilhos que percorrem a cobertura retrátil, como pode ser conferido na Figura 39 (a) e na (b).

Na Figura 40 (a) e (b), encontram-se uma das torres de apoio das treliças de sustentação e em detalhe os cabos de apoio que foram utilizados para posicionar a estrutura treliçada durante a construção do estádio.



Figura 38: Fase de construção do Arizona Cardinals, 2007, nota-se as treliças de apoio da cobertura retrátil e as torres de apoio, projeto do arquiteto Peter Eisenman

Fonte: Arizona Cardinals (2007).



Figura 39: Vista dos detalhes construtivos do projeto do arquiteto Peter Eisenman, Arizona Cardinals, 2007. Trilhos guias da cobertura retrátil em (a) e passagem de manutenção dos trilhos em (b)

Fonte: Arizona Cardinals (2007).



Figura 40: Vista da construção do *Arizona Cardinals*, 2007, projeto do arquiteto Peter Eisenman. Torre de apoio em (a), e detalhe dos cabos para içar a treliça de apoio em (b)

Fonte: Arizona Cardinals (2007).

3.2.2 Novas Concepções para Obras Retrátéis

A Figura 41 demonstra o primeiro modelo de estrutura retrátil com movimento e tem como referência o movimento de abertura e fechamento circular do Departamento de Estruturas da Universidade de Cambridge, *Deployable Structures Laboratory*.

Cada um dos dois painéis é constituído de uma fração circular com a borda correspondente a uma parte do arco externo da estrutura e onde se encontra o ponto pivô do movimento. Os pontos centrais do eixo da cobertura são os que geram as aberturas, deslocando-se para um arco circunscrito na cobertura. A concepção desse tipo de cobertura retrátil parte de uma divisão uniforme de parte da circunferência da cobertura e cada um dos painéis pode ter ampliadas suas dimensões, como ilustra a Figura 42, gerando divisões menores.

Essa concepção estrutural, indicada por Jensen e Pelegrino (2007), como coberturas retráteis planares, pode ser entendida como de aderência às estruturas em membranas, pois se tratam de elementos de superfície que podem ser constituí-

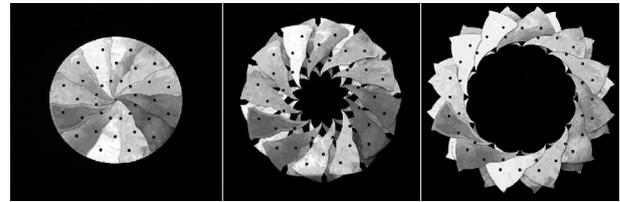


Figura 41: Primeiro modelo de estrutura plana retrátil, do *Deployable Structures Laboratory*

Fonte: Jensen e Pelegrino, 2007.

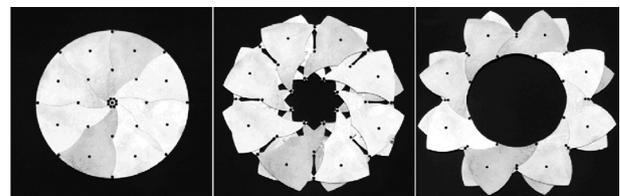


Figura 42: Segundo modelo de estrutura plana retrátil do *Deployable Structures Laboratory*

Fonte: Jensen e Pelegrino, 2007.

dos por estruturas de barras, podendo ser cobertas com membranas e filmes, justificando a eficiência da automação pela leveza que pode proporcionar em relação a outras tecnologias convencionais.

3.2.3 Disposições construtivas para obras retrátéis

Como para as obras retrátéis, não se está indicando o dobramento da membrana, mas somente a movimentação da estrutura de apoio de uma arquitetura têxtil ou tensoestruturas, a disposição construtiva fica condicionada aos custos preliminares das membranas, aos relativos da base e estrutura de movimentação e aos do sistema de automatização. Salienta-se, ainda, que devem ser analisadas as relações construtivas entre os tipos de materiais disponíveis.

4 Considerações finais

A mobilidade das arquiteturas têxteis e tensoestruturas representam uma condicionante formal de projeto dessa tipologia construtiva e que

deve ser sistematizada com outras condicionantes como a tipologia do material, as características técnicas, a forma e complexidade da superfície, as condições visuais da obra, as técnicas e detalhes construtivos. Uma forma de sistematizar a condicionante da mobilidade em projetos de arquiteturas têxteis e tensoestruturas é a utilização e aplicação de disposições construtivas. E como fator decisivo pode ser apoiado em exemplos de aplicações, entendendo-se que se trata de uma tecnologia construtiva e de montagem específica, proposta apresentada neste artigo.

Pode-se destacar que a mobilidade nos exemplos apresentados toma posição de diferencial e conduz a obra a um *status* de marco ou mesmo de arquitetura icônica.

Por meio deste artigo, pode-se constatar a aderência das arquiteturas têxteis e tensoestruturas à condicionante de mobilidade nos projetos analisados, o que sugere a preferência dos arquitetos em não utilizar construções sólidas e de grande massa, cujas condições estáticas e permanentes se contrapõem às de mobilidade e de facilidade de montagem e desmontagem, que podem ser usadas segundo as necessidades do momento e em uma grande velocidade, que as obras em que se usa esse conceito arquitetônico possuem.

Notas

- 1 Segundo o *National Geographic Chanel/Brasil* (2008), esta mudança incidiu somente sobre a estrutura metálica de fechamento, pois toda a infraestrutura de concreto já se encontrava consolidada em seis módulos com juntas flexíveis e a mudança foi decorrente do impacto do acidente no aeroporto de Paris, Charles De Gaulle, em 23 de maio de 2004, no qual 30 metros de uma estrutura em arco de concreto ruíram provavelmente por causa da qualidade dos materiais ou mesmo erro executivo e não pela variação térmica ou gradiente térmico elevado entre o interior e exterior, razões amplamente divulgadas e cogitadas (VIEW – reOrbit, 2008). Sendo a decisão pela mudança da forma do estádio de Pequim, muito mais pela possível aderência da forma da estrutura perante o sentimento geral e ao que o público e a mídia poderiam fazer e comentar.
- 2 Por opção, adotou-se o conceito do dicionário, mas com um sentido particular, quando aplicado à propriedade de retratibilidade, assim, o termo retrátil, segundo o Grande

Dicionário Larousse Cultural da Língua Portuguesa (1999), corresponde à propriedade de retrair-se, encolher-se, contrair-se, mas quando aplicado à propriedade de retratibilidade, por exemplo, a dos materiais, a retração não se dá por dobramento e sim pela aproximação intersticial; portanto, diferenciando-se de conversão enquanto mudança de forma.

- 3 A arquitetura cinética ou *kinetic architecture*, na Wikipedia, mesmo não sendo uma bibliografia de atendimento ao rigor científico, é indicada como um novo campo de projetos de construções, sendo estruturalmente mecanizada, transformando-se conforme o clima ou a necessidade. (EN. WIKIPEDIA.ORG, 2008a).
- 4 A arquitetura responsiva ou *responsive architecture* ou ainda *soft architecture machines*, conforme a Wikipedia, define-se como a área que estuda os projetos de estruturas que mudam a forma do edifício, de acordo com as necessidades dos usuários ou em razão da mudança do clima (EN. WIKIPEDIA.ORG, 2008b).
- 5 O termo pregueado ou plissado refere-se à tradução do vocábulo em inglês *pleated*.

Referências

- ARCHIGRAM. *Instant City*. 1969. Disponível em: http://www.archigram.net/projects_pages/instant_city_4.html. Acesso em: 5 jul. 2007.
- ARIZONA CARDINALS. News, blogs, scores, schedules, photos. Disponível em: <http://www.azcentral.com/sports/cardinals/>. Acesso em: 26 mar. 2007.
- BASSIGNANA, M. *Structural glass skins and applications*. Speech in 4th Annex 44 Forum/TORINO/29 march 2006. Disponível em: http://annex44.civil.aau.dk/Annex%2044%20Forum/meetings/4th%20Annex%2044%20Forum/15_Bassignana.pdf. Acesso em: 11 ago. 2008.
- DREW, P. *Tercera generación – la significación cambiante de la arquitectura*. Tradução de Justo G. Beramendi. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, S.A, 1973.
- ESCRIG, F., SANCHEZ, J. Mobility as requirement for future architecture. In: THE DESIGN OF MEMBRANE AN LIGHTWEIGHT STRUCTURES. Editado por Mollaert, Hebbelinck e Haase. Belgium: VUB Brussel University Press, 2002.
- DDASSOC. Rothenbaun. Disponível em: <http://www.ddassoc.co.uk/people/gsayner.shtml#>. Acesso em: 7 jul. 2007.
- EN.WIKIPEDIA.ORG. Kinetic Architecture. Disponível em: http://en.wikipedia.org/wiki/Kinetic_Architecture. Acesso em: 1º ago. 2008a.
- EN.WIKIPEDIA.ORG. Responsive Architecture. Disponível em: http://en.wikipedia.org/wiki/Responsive_architecture. Acesso em: 1º ago. 2008b.

ESCRIG, F., SANCHEZ, J. *Proyectos*. Disponível em: <<http://personal.telefonica.terra.es/web/escrig-sanchez/proyectos.htm>>. Acesso em: 5 ago. 2008.

FABRIC ARCHITECTURE. *Publication – Fabric Architecture*. Mar/Apr 2006. Disponível em: <www.ifai.com/Home/fabric_archive/index.cfm?pdf=/0306FA_DigitalEdition.pdf>. Acesso em: 5 ago. 2008.

FRIEDMAN, Y. *Pro Domo*. Barcelona: ACTAR Centro Andaluz de Arte Contemporáneo, 2006. 390 p.

GONCHAR, J. *Inside Beijing's big box of blue bubbles*. Disponível em: <<http://continuingeducation.construction.com/article.php?L=5&C=418>> in Originally published in the July 2008 issue of *Architectural*>. Acesso em: 19 ago. 2008.

II SIMPOSIO LATINOAMERICANO DE TENSO-ESTRUTURAS, 2008, Caracas. Venezuela. Disponível em: <<http://www.grupoestran.com/simposio/monjo.html>>. Acesso em 5 ago. 2008.

INFLATE PRODUCTS LTD. 2007. Disponível em: <<http://www.inflate.co.uk/i-architecture.html>>. Acesso em: 4 jul. 2007.

JENSEN, F.; PELLEGRINO, S. *DSL – retractable roof structures*. Disponível em: <<http://www.civ.eng.cam.ac.uk/dsl/roof/planar/planar.html#13>>. Acesso em: 31 jun. 2007.

MARTINS, J. B. D. F. *Estruturas leves. Conexões com o espaço teatral. Projeto de um teatro móvel, múltiplo e transformável*. 1998. Tese (doutorado) – Escola Politécnica, USP, São Paulo. 1998.

NATIONAL GEOGRAPHIC CHANNEL/BRASIL. *O Estádio Nacional de Pequim*. 2008. Disponível em: <<http://www.natgeo.com.br/especiais/estadionacionaldepequim/gallery.asp>>. Acesso em: 3 ago. 2008.

GRANDE DICIONÁRIO LAROUSSE CULTURAL DA LÍNGUA PORTUGUESA. São Paulo: Editora Nova Cultural, 1999.

OTTO, F.; RASCH, B. *Finding form*. Munich: Edition Axel Menges, 1995.

SL-RASCH GmbH. *Special and lightweight structures – coversible roof*. Disponível em: <<http://www.sl-rasch.de/>>. Acesso em: 15 ago. 2008.

SPACE MODULAR. 2007. Disponível em: <http://space-modulator.jp/sm81-90/sm90_contents/sm90_e_curv02.html>. Acesso em: 6 jun. 2007.

TENSINET, Expo 1970 (Osaka). 2009. *Mush-balloon – TensiNet*. Disponível em: <<http://www.tensinet.com/database/viewProject/3839>>. Acesso em: 1º fev. 2009.

THE EDEN PROJECT. *The Eden Project*. 2001. Disponível em: <<http://www.eden-project.co.uk/reports.html>>. Acesso em: 3 mar. 2001.

VISIONARY ARCHITECTURE. *Geodesic Dome City (1968) – Buckminster Fuller 2010*. Disponível em: <<http://www.jahsonic.com/VisionaryArchitecture.html>>. Acesso em: 28 jan. 2010.

VAN DER HOEVEN. *Estufas Agrícolas e Galvanização a Fogo*. 2007. Disponível em: <http://www.vdh.com.br/mod_viv_retratil.html>. Acesso em: 4 jun. 2007.

VIEW – redOrbit. *Terminal Paris de Gaule reopen*. Disponível em: <http://www.redorbit.com/news/business/1317912/terminal_to_reopen_at_pariss_de_gaulle_structure_was_rebuilt/index.html>. Acesso em: 4 ago. 2008.

WALTER, M. *Convertible roofs*. 2006. Disponível em: <http://www.st.bv.tum.de/content/teaching/ferienakademie/handouts/14_walter_handout.pdf>. Acesso em: 10 maio 2007.

Recebido em 12 jul. 2010 / aprovado em 10 mar. 2011

Para referenciar este texto

OBATA, S. H.; ALONSO, C. E. Mobilidade das arquiteturas têxteis e tensoestruturas. *Exacta*, São Paulo, v. 9, n. 1, p. 103-123, 2011.

