

EXEMPLOS DE COBERTURAS CURVAS RETICULADAS PARA GRANDES VÃOS

Núbia dos Santos Saad Ferreira

FEMEC, UFU, Caixa Postal 593 38400-902 Uberlândia-MG
nssferreira@mecanica.ufu.br

Francisco Antonio Romero Gesualdo

FECIV, UFU, Caixa Postal 593 38400-902 Uberlândia-MG
gesualdo@ufu.br

Domingos Alves Rade

FEMEC, UFU, Caixa Postal 593 38400-902 Uberlândia-MG
domingos@ufu.br

Resumo: *A existência de numerosas cúpulas reticuladas, destinadas a cobrir grandes áreas, construídas em todo o mundo, comprova que as estruturas de cobertura em formato de cúpulas apresentam características vantajosas no que diz respeito ao comportamento estrutural, além de destacada beleza arquitetônica. A geometria desse sistema estrutural mostra-se favorável quanto ao recebimento e distribuição de cargas, oferecendo condições para que a cobertura trabalhe de forma uniformizada, com relação à solicitação de seus elementos estruturais, possibilitando a padronização dos mesmos. Neste trabalho é feita uma mostra de expressivas realizações deste tipo estrutural, com apresentação de algumas das mais belas e grandiosas cúpulas construídas com diferentes materiais estruturais, em âmbito internacional. Através do levantamento bibliográfico realizado, constata-se que as cúpulas reticuladas têm sido amplamente utilizadas, permitindo a execução de projetos arquitetônicos de ousadas coberturas.*

Palavras-chave: *Estruturas de Cobertura, Cúpulas Reticuladas, Grandes Vãos Livres.*

1. INTRODUÇÃO

Uma das formas mais eficientes de sistemas construtivos e, talvez a mais antiga, é o arco. Gordon (1991) cita que há evidências de que já se construíam arcos de tijolos e pedras no Egito e na Mesopotâmia, em 3600 a.C. Mais tarde, os romanos iniciaram a construção de arcos usando misturas de materiais semelhantes ao concreto.

Os sistemas estruturais tridimensionais com formato em planta do tipo elíptico ou circular, têm um aliado altamente favorável: a geometria. A forma geométrica promove uma distribuição de esforços com certa uniformidade, onde ocorre a predominância de solicitações axiais. Observa-se, também, que a relação deslocamentos/vão é pequena.

O sistema de cúpulas reticuladas pode ser usado com diferentes materiais e, na maioria dos casos, ressalva-se a vantagem da pré-fabricação dos elementos da malha, que apresentam certo grau de padronização, favorecendo a industrialização das construções (Avram and Anastasescu, 1984).

A humanidade utiliza madeira em edificações há muito tempo, havendo importantes exemplos de estruturas históricas, mas este uso não se deu para grandes estruturas. Tal realidade foi mudada com o desenvolvimento do estudo deste material, principalmente com o advento da madeira laminada colada, que possibilitou a execução de peças com formatos e tamanhos antes impossíveis de serem executados, tornando-a competitiva com o aço e o concreto (Takenaka Corporation, 2002).

Embora uma expressiva quantidade de cúpulas reticuladas exista em diversos países, conforme será evidenciado neste trabalho, observa-se que, no Brasil, não é prática corrente o emprego deste tipo estrutural. Há, portanto, o interesse em se difundir sua utilização, o que demanda o desenvolvimento de metodologias de projeto e construção, em conformidade com as normas brasileiras. E, neste sentido, há particular interesse no emprego da madeira, que é justificado por diversos fatores de natureza econômica, ambiental e social.

Neste trabalho, apresenta-se, simplificada, parte da consulta bibliográfica realizada pelos autores, como etapa preliminar ao desenvolvimento da tese de doutorado da primeira autora, com a mostra de diversas cúpulas que se destacaram em âmbito mundial.

2. EVOLUÇÃO DAS CÚPULAS NO MUNDO

Há dois mil anos, cúpulas em alvenaria tinham diâmetros inferiores a 10 metros. No século vinte, os projetos estruturais passaram por um rápido progresso e, com isso, foram sendo construídas, em larga escala, cúpulas de diversos tamanhos (Takenaka Corporation, 2002).

As cúpulas para grandes vãos foram surgindo paralelamente ao avanço tecnológico, notadamente o da informática, que tem possibilitado o cálculo global e a realização de estruturas tridimensionais, destinadas à cobertura de grandes áreas livres.

Através do levantamento bibliográfico realizado, constata-se que grande parte das maiores cúpulas reticuladas existentes, situa-se na Europa, América do Norte e Japão.

Apresentam-se, a seguir, alguns exemplos de cúpulas famosas, distribuídas por regiões, segundo o material empregado (alvenaria, concreto, aço e madeira laminada colada), na sequência do seu surgimento no contexto histórico do tipo estrutural em apreço.

Acrescenta-se que, segundo Takenaka Corporation (2002), com as novas tecnologias existentes, tais como estruturas de cobertura com membranas infladas por ar e com cabo de aço estirado, têm-se conseguido executar coberturas com vãos livres superiores a 200 metros.

2.1 Cúpulas em Alvenaria

Considera-se como protótipo para a concepção das grandes e famosas cúpulas históricas e da atualidade, o *Treasury of Atreus*, situado na cidade de Mycena, na Grécia, construído em 1400 a.C., em alvenaria, com aproximadamente 15 metros de diâmetro. Depois deste, as coberturas em formato de cúpula foram empregadas na arquitetura de praticamente todas as obras de edificação destinadas a igrejas e mesquitas, assumindo, assim, um simbolismo religioso em diversas regiões do mundo (Takenaka Corporation, 2002).

Na Figura (1) estão ilustrados exemplos de cúpulas em alvenaria com destaque mundial, tendo alguns de seus dados apresentados na Tab. (1). Tais realizações estão mostradas sob ordenação cronológica.



Figura 1: (a) *Pantheon*; (b) *Hagia Sophia*; (c) *Santa Maria del Fiore*; (d) *San Pietro*; (e) *St. Paul's Cathedral*.

Fonte: Takenaka Corporation (2002).

Tabela 1: Dados de algumas das principais cúpulas construídas em alvenaria.

Material	Denominação	Ano ⁽¹⁾	Localização	Vão ⁽²⁾ (m)
Alvenaria	<i>Pantheon</i>	124	Roma – Itália	43
	<i>Hagia Sophia</i>	537	Istambul – Turquia	32
	<i>Santa Maria del Fiore</i>	1420	Florença – Itália	42
	<i>San Pietro</i>	1593	Roma – Itália	42
	<i>St. Paul's Cathedral</i>	1710	Londres – Inglaterra	33

(1) Ano de Construção (2) Diâmetro da Área Coberta

Fonte: Takenaka Corporation (2002).

2.2 Cúpulas em Concreto Armado

As coberturas em concreto armado são estruturalmente racionais, pois o concreto trabalha resistindo bem à compressão e, o aço, à tração. Desta forma, estas podem ser moldadas em formatos e modulações variados, com elementos estruturais reticulados ou de superfície, conforme ilustra a Fig. (2), cujas obras são caracterizadas na Tab. (2).

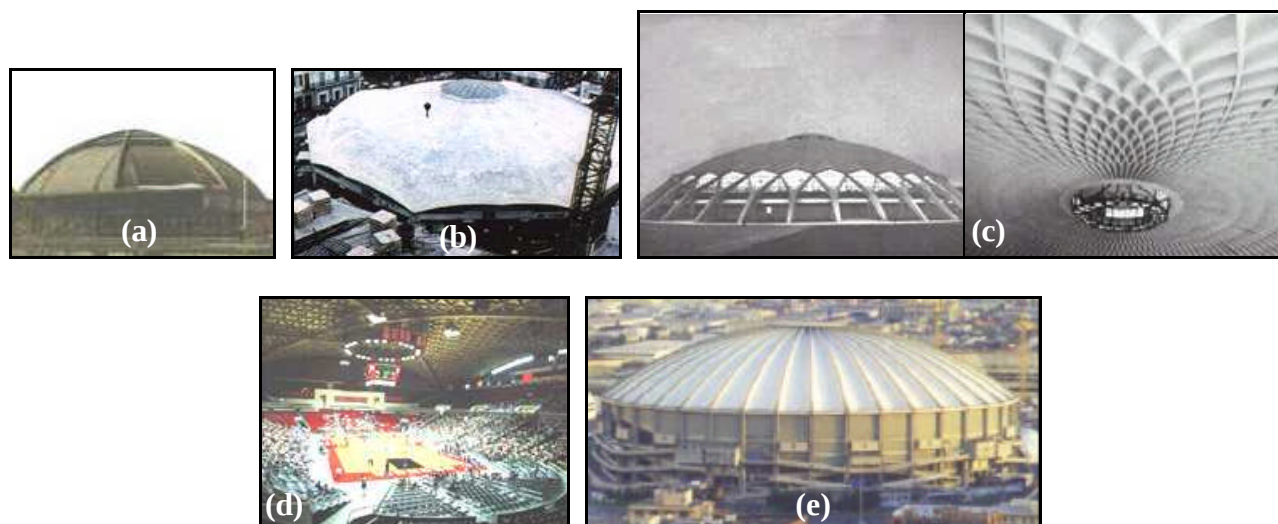


Figura 2: (a) *Leipzig Market*⁽¹⁾; (b) *Algeciras Market*⁽¹⁾; (c) *Palazzetto dello Sporto*⁽²⁾; (d) *Georgia Stadium*⁽²⁾; (e) *King Dome*⁽¹⁾.

Fonte: ⁽¹⁾Takenaka Corporation (2002); ⁽²⁾Columbia University (2002).

Tabela 2: Dados de algumas das principais cúpulas construídas em concreto armado.

Material	Denominação	Ano ⁽¹⁾	Localização	Vão ⁽²⁾ (m)
Concreto Armado	<i>Leipzig Market</i> ⁽³⁾	1928	Leipzig – Alemanha	76
	<i>Algeciras Market</i> ⁽³⁾	1933	Algeciras – Espanha	48
	<i>Palazzetto dello Sporto</i> ⁽⁴⁾	1957	Roma – Itália	80
	<i>Georgia Stadium</i> ⁽⁵⁾	1963	Atenas – Grécia	122
	<i>King Dome</i> ⁽³⁾	1976	Seattle – EUA	202

(1) Ano de Construção (2) Diâmetro da Área Coberta

Fonte: ⁽³⁾Takenaka Corporation (2002); ⁽⁴⁾Nervi (1963); ⁽⁵⁾Columbia University (2002).

2.3 Cúpulas em Aço

Sabe-se que o aço oferece maior resistência à compressão e à tração que o concreto, e com isso possibilita a construção de estruturas mais esbeltas, que normalmente são executadas com reticulados tridimensionais. Com a possibilidade de se calcularem estruturas tridimensionais com precisão, é possível obter-se uma variedade de formas para as mesmas, revelando-se, atualmente uma predominância pela utilização de estruturas em aço. Na Figura (3), são apresentadas famosas cúpulas reticuladas com este material, estando alguns de seus dados contidos na Tab. (3).



Figura 3: (a) *AstroDome*⁽¹⁾; (b) *Louisiana Super Dome*⁽²⁾; (c) *Toronto Sky Dome*⁽²⁾; (d) *Fukuoka Dome*⁽²⁾; (e) *Osaka Dome*⁽²⁾; (f) *Nagoya Dome*⁽²⁾; (g) *Dinosaur Museum*⁽³⁾; (h) *Botanic Garden of Wales*⁽⁴⁾; (i) *Oita Main Stadium*⁽³⁾; (j) *Sapporo Dome*⁽²⁾; (k) *Big Eye*⁽²⁾.
 Fonte: ⁽¹⁾Columbia University (2002); ⁽²⁾Takenaka Corporation (2002); ⁽³⁾Kurokawa (2003); ⁽⁴⁾AHA (2003).

Tabela 3: Dados de algumas das principais cúpulas construídas em aço.

Material	Denominação	Ano ⁽¹⁾	Localização	Dimensões (m)	
				D ⁽²⁾	L x C ⁽³⁾
Aço	<i>Astrodome</i> ⁽⁴⁾	1965	Houston – EUA	196	-
	<i>Louisiana Super Dome</i> ⁽⁴⁾	1975	New Orleans – EUA	207	-
	<i>Toronto Sky Dome</i> ⁽⁴⁾	1989	Toronto – Canadá	208	-
	<i>Fukuoka Dome</i> ⁽⁴⁾	1993	Fukuoka – Japão	212	-
	<i>Osaka Dome</i> ⁽⁴⁾	1997	Osaka – Japão	167	-
	<i>Nagoya Dome</i> ⁽⁴⁾	1997	Nagoya – Japão	187	-
	<i>Dinosaur Museum</i> ⁽⁵⁾	2000	Fukui – Japão	8792 m ²	
	<i>Botanic Garden of Wales</i> ⁽⁶⁾	2000	Londres – Inglaterra	-	60 x 125
	<i>Oita Main Stadium</i> ⁽⁵⁾	2001	Oita – Japão	51830 m ²	
	<i>Sapporo Dome</i> ⁽⁴⁾	2001	Sapporo – Japão	218	-
	<i>Big Eye</i> ⁽⁴⁾	2001	Oita – Japão	274	-

⁽¹⁾ Ano de Construção ⁽²⁾ Diâmetro da Área Coberta ⁽³⁾ Largura x Comprimento da Área Coberta
 Fonte: ⁽⁴⁾Takenaka Corporation (2002); ⁽⁵⁾Kurokawa (2003); ⁽⁶⁾AHA (2003).

2.4 Cúpulas em Madeira Laminada Colada

Quando se trata de estruturas de madeira, construídas com peças curvas, existe uma limitação devida aos comprimentos convencionais que atingem algo em torno de quatro metros, ou superiores, mas sempre com restrições. Assim, é necessário compor a estrutura através de elementos de comprimentos menores, formando um conjunto reticulado de barras.

A construção de cúpulas em madeira para vencer grandes vãos livres (com diâmetros superiores a 150 m) somente foi possível com o advento da madeira laminada colada, que permitiu a inserção deste material de forma competitiva no cenário até então dominado pelo aço e pelo concreto.

O uso da madeira é justificado por suas características positivas relacionadas com a estética, conforto térmico, economia e, sobretudo, pelo baixo consumo de energia necessária para o seu emprego. O aço gera durante sua produção 5320 kg/m³ de dióxido de carbono, contra 120 kg/m³ do concreto e apenas 16 kg/m³ da madeira. A madeira armazena cerca de 250 kg/m³ de dióxido de carbono absorvido durante a fase de crescimento da árvore. Além disso, a madeira é um material estrutural renovável, podendo ser obtida a partir de florestas artificiais, sendo, neste caso, denominada de madeira de reflorestamento (Natterer, 1994).

Nas Figuras (4) e (5), são mostrados alguns exemplos de grandes e famosas cúpulas reticuladas construídas com madeira laminada colada, obtidas a partir da consulta bibliográfica realizada, sendo algumas de suas características apresentadas na Tab. (4).

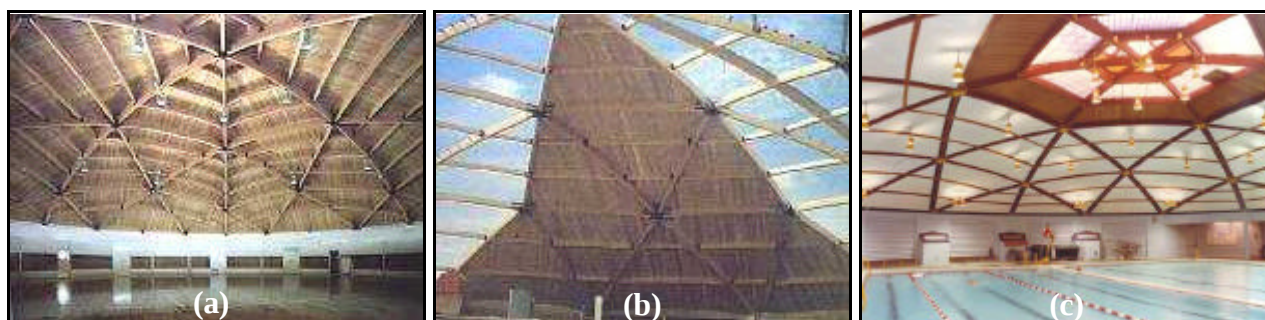


Figura 4: (a) *Gymnasium Dome*; (b) *Swimming Pool*; (c) *Columbia Park Pool*.
 Fonte: WWSI (2002).

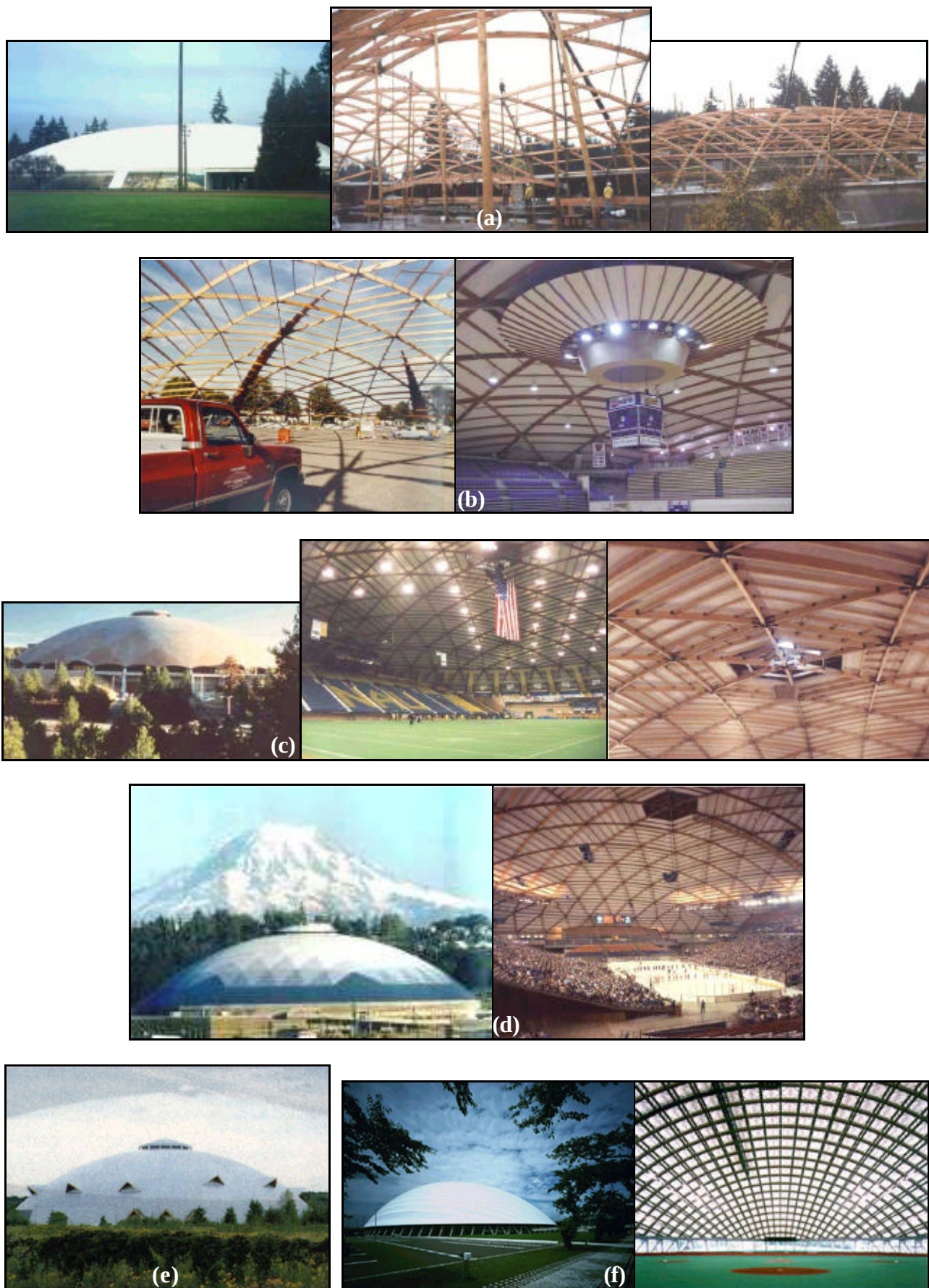


Figura 5: (a) *Charles Wright Academy*⁽¹⁾; (b) *Chiles Center*⁽¹⁾; (c) *Arizona Skydome*⁽¹⁾; (d) *Tacoma Dome*⁽¹⁾; (e) *Michigan University Stadium*⁽²⁾; (f) *Odate Jukai Dome*⁽²⁾.
Fonte: ⁽¹⁾WWSI (2002); ⁽²⁾Takenaka Corporation (2002).

Tabela 4: Dados de algumas das principais cúpulas construídas em madeira laminada colada.

Material	Denominação	Ano ⁽¹⁾	Localização	Dimensões (m)	
				D ⁽²⁾	L x C ⁽³⁾
Madeira Laminada Colada	<i>Gymnasium Dome</i> ⁽⁴⁾	-	Ashiro – Japão	37	-
	<i>Swimming Pool</i> ⁽⁴⁾	-	Wyoming – EUA	40	-
	<i>Columbia Park Pool</i> ⁽⁴⁾	-	Oregon – EUA	40	-
	<i>Charles Wright Academy</i> ⁽⁴⁾	-	Washington – EUA	-	43 x 67
	<i>Chiles Center</i> ⁽⁴⁾	-	Oregon – EUA	92	-
	<i>Arizona Skydome</i> ⁽⁵⁾	1977	Arizona – EUA	153	-
	<i>Tacoma Dome</i> ⁽⁴⁾	1981	Tacoma – EUA	162	-
	<i>Michigan University Stadium</i> ⁽⁶⁾	1982	Marquette – EUA	160	-
	<i>Odate Jukai Dome</i> ⁽⁶⁾	1997	Odate – Japão	178	-

⁽¹⁾ Ano de Construção ⁽²⁾ Diâmetro da Área Coberta ⁽³⁾ Largura x Comprimento da Área Coberta
 Fonte: ⁽⁴⁾WWSI (2002); ⁽⁵⁾Taylor (2002); ⁽⁶⁾Takenaka Corporation (2002).

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O grande número de cúpulas encontrado através da pesquisa bibliográfica realizada, representa uma garantia prática da eficiência das cúpulas reticuladas, no que se refere ao seu comportamento estrutural, além de evidenciar aspectos de notória e agradável beleza arquitetônica.

Vários tipos estruturais têm sido utilizados para construir cúpulas e, sem dúvida, o avanço tecnológico com o desenvolvimento de softwares para o seu cálculo tridimensional, tem permitido aos projetistas a concepção e realização de projetos cada vez mais arrojados e ousados.

Acrescenta-se que, a partir da investigação bibliográfica efetuada, também foi possível coletar informações a respeito do sistema construtivo empregado em algumas coberturas, além de outros dados técnicos como o tipo de ligação utilizado.

Dado o exposto, considera-se de fundamental importância a investigação realizada, para o desenvolvimento de uma metodologia de projeto de sistemas estruturais em formato de abóbada reticulada, que constitui o objeto do trabalho de pesquisa que vem sendo desenvolvido pelos autores.

4. REFERÊNCIAS

- AHA - Anthony Hunt Associates Ltd., 2003, “National Botanic Garden of Wales - Middleton Hall Carmarthenshire”, <http://www.anthonyhuntassociates.co.uk>, 17 set.
- Avram, C. and Anastasescu, D., 1984, “Space Structures - Development in Civil Engineering, 9: Particular Structures”, Elsevier Science Publisher, Amsterdam, Cap.5, pp 101-137.
- Columbia University, 2002, “Timeline: Importat Precedents in Stadium Design”, <http://www.columbia.edu/cu/gsap/bt/domes/timeln/timeline.html>, 15 fev.
- Gordon, J.E., 1991, “Structures or Why Things don’t Fall Down”, Penguin Books, London.
- Kurokawa, K., 2003, “Fukui Prefectural Dinosaur Museum”, <http://www.kisho.co.jp/worksandprojects/index.html>, 13 ago.
- Natterer, J., 1994, “Lightweight Structures in Timber”, Anais do Pacific Timber Engineering Conference - PTEC 94, Gold Coast Australia.
- Nervi, P.L., 1963, “Nuevas Estructuras”, Gustavo Gili, Barcelona, 168 p.
- PBS - Public Broadcasting Service, 2003, “Building Big: Domes”, http://www.pbs.org/wgbh/buildingbig/wonderstructure/astrodome2_dam.html, 17 jul.
- Takenaka Corporation, 2002, “Architecture Engineering Construction – Sports Facilities (Domes and Stadiums)–Multi Purpose Facilities”, http://www.takenaka.co.jp/takenaka_e/dome_e, 30 mar.

Taylor, S.E., 2002, “Links for Engineered Wood Structure Design”, http://www.eng.auburn.edu/users/staylor/wood_links.html, 3 out.
WWSI – Western Wood Structures Inc, 2002, “Workin Wonders with Wood”, <http://www.westernwoodstructures.com/index.html>, 21 nov.

5. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.

EXAMPLES OF CURVED FRAMEWORK COVERINGS FOR LONG SPANS

Núbia dos Santos Saad Ferreira

FEMEC, UFU, P.O. box 593 38400-902 Uberlândia-MG
nssferreira@mecanica.ufu.br

Francisco Antonio Romero Gesualdo

FECIV, UFU, P.O. box 593 38400-902 Uberlândia-MG
gesualdo@ufu.br

Domingos Alves Rade

FEMEC, UFU, P.O. box 593 38400-902 Uberlândia-MG
domingos@ufu.br

Abstract: *The existence of numerous framework domes all over the world proves that dome-shaped structures have many advantages for covering large areas. The architectural elegance and good structural behavior are the main characteristics of the system. The geometry is tremendously favorable in terms of transfer loads from the members to the columns and also represents an advantage because of the regularity of member's lengths and joints. This paper shows some expressive realizations of this structural pattern, featuring some of the most beautiful and magnificent made of different structural materials. Comprehensive bibliographical research has shown that the framework domes have been used in several countries, allowing for the accomplishment of daring architectural projects of coverings.*

Keywords: *Covering Structures, Framework Domes, Long Spans.*