

Fabiano de Oliveira Jota

COBERTURAS COM REDES DE CABOS EM MALHA QUADRADA

Busca da Forma, Padronização de Corte e
Ajustes de Borda

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Programa de Pós-Graduação - PPG
Tecnologia da Arquitetura e do Urbanismo

Fabiano de Oliveira Jota

Coberturas com Redes de Cabos em Malha Quadrada: Busca da Forma, Padronização de Corte e Ajustes de Borda

Dissertação de Mestrado

Orientadora

Dr^a. Cláudia Estrela Porto

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Programa de Pós-Graduação - PPG
Tecnologia da Arquitetura e do Urbanismo

Brasília, 2004.

Fabiano de Oliveira Jota

Coberturas com Redes de Cabos em Malha Quadrada:
Busca da Forma, Padronização de Corte e Ajustes de Borda

Dissertação de Mestrado

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Programa de Pós-Graduação - PPG
Tecnologia da Arquitetura e do Urbanismo

Banca examinadora:
Dr^a. Cláudia Estrela Porto
Dr. Jaime Gonçalves de Almeida
Dr. Ruy Marcelo de Oliveira Pauletti

Aprovação em ____ / ____ / _____

RESUMO

O presente trabalho insere-se no campo das coberturas retesadas. Dedicase ao estudo de um tipo específico de redes de cabos: redes em que o cruzamento dos cabos é fixo sempre à mesma distância, possibilitando sua pré-fabricação, as quais podem substituir membranas pela característica de deformarem-se tridimensionalmente assumindo formas anticlásticas a partir de seu estado inicial plano.

Uma extensiva revisão da bibliografia sobre o uso de redes de cabos de aço em coberturas arquitetônicas e sobre modelagem física em projetos de coberturas retesadas é apresentada na primeira parte do texto.

Através de uma metodologia baseada em comparação gráfica de modelos físicos de baixo custo, demonstra-se o potencial dos ajustes por deslizamento em borda como recurso suplementar das fases de busca da forma e padronização de corte em projetos de coberturas com redes em malha quadrada.

Palavras-chave: estruturas retesadas, redes de cabos de aço, redes de cabos em malha quadrada, modelagem física.

ABSTRACT

The present work is inserted in the tension structures research field. It is dedicated to study a specific kind of cable nets: nets with same cable segment length between cross clamps, this way, easily assembled and applied as membranes through tridimensional deformations of squares, assuming anticlastic shapes.

An extensive literature survey is presented concerning structures with cable nets in architectural applications and physical modelling in design of tension structures.

Using graphic comparative methodology with cheap physical models, this study intends to demonstrate the potential of sliding adjusts on edges as supplementary resource of form-finding and cutting pattern stages in building with square cable nets.

Keywords: tension structures, cable nets, square cable nets, physical modelling.

PREFÁCIO

O presente trabalho foi realizado entre agosto de 2003 e julho de 2004, com auxílio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Alagoas - FAPEAL.

Agradeço à orientadora do trabalho, Dra. Cláudia Estrela Porto, e aos professores Dr. Ruy Pauletti (USP), Dr. Vinícius Arcaro (Unicamp) e Dr. Athail Pulino (UnB), por disponibilizarem importante material de referência.

O interesse final deste trabalho vai além do objeto aqui pesquisado, devido à inexistência de estudos no Brasil sobre redes em malha quadrada, ele é básico para outras pretensões nesse campo de estudo. Muito há o que se pesquisar sobre o uso de redes de cabos em malha quadrada em coberturas arquitetônicas utilizando materiais comuns da construção civil e sobre técnicas executivas extensíveis a firmas construtoras e profissionais em geral.

A criação de uma rede estrutural retesada é apenas a primeira etapa na construção dessas coberturas; modelagem e análise matemática, bem como a vedação eficiente da rede de modo econômico e duradouro talvez sejam os maiores desafios a serem encarados pelos pesquisadores e profissionais da área em nosso país.

Fabiano de Oliveira Jota

Brasília, julho de 2004.

ÍNDICE DE TÍTULOS

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	4
1.2 Estrutura Geral.....	4
2. REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA	6
2.1 Coberturas com Cabos	6
2.1.1 Histórico.....	6
2.1.2 Classificação das Coberturas com Cabos.....	12
2.2 Coberturas com Redes de Cabos Protendidos	18
2.2.1 Princípios Básicos.....	18
2.2.2 Componentes Básicos.....	20
2.2.3 Formas de Construção	24
2.2.4 Configurações de Malha.....	31
2.2.5 Vedações da Malha	34
2.3 Modelagem Física em Coberturas Retesadas.....	40
2.3.1 Generalidades	40
2.3.2 Aplicação em Coberturas Retesadas	42
2.3.3 Meios de Modelagem	44
2.2.4 Busca da Forma para Redes em Malha Quadrada.....	48
2.2.5 Padronização de corte para Redes em Malha Quadrada	51
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	53
3.1 Busca da Forma.....	54
3.2 Padronização de Corte	55
3.3 Ajustes de Borda.....	57
3.4 Verificação	57
4. TRABALHOS COM MODELOS	60
4.1 Tipo 01	60
4.2 Tipo 02	62
4.3 Tipo 03	64
4.4 Modelo em Escala Real	65
4.5 Experimentos	67
5. RESULTADOS	71
6. DISCUSSÃO	81
7. CONCLUSÃO.....	88
8. BIBLIOGRAFIA.....	90

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Ilustração 1 - Afresco de Pompéia. 59 A.C.	7
Ilustração 2 - Velarium de coliseu. Versão baseada no uso de rede suspensa de cordas.....	9
Ilustração 3 - Velarium de coliseu. Versão com Vigas e cordas	9
Ilustração 4 - Pavilhões em Nizjny-Novgorod.	11
Ilustração 5 - Arena de Raleigh. Vista externa e gráfico estrutural.	12
Ilustração 6 - Exemplos de coberturas suportadas por cabos.	14
Ilustração 7 - Exemplo de cobertura suspensa simples.	15
Ilustração 8 - Trelças de cabos protendidos em coberturas. Cabos de suspensão e estabilização....	16
Ilustração 9 - Ligação típica entre cabos de uma rede.....	16
Ilustração 10 - Exemplos de coberturas com rede de cabos.	17
Ilustração 11 - Exemplo de estrutura <i>tensegrity</i> . Cable Dome de David Geiger.....	18
Ilustração 12 - Estabilidade anticlástica em uma rede de cabos.	20
Ilustração 13 - O cabo de aço e seus componentes.	21
Ilustração 14 - Grampos, sapatilhas e soquetes chumbadores.	22
Ilustração 15 - Conectores para cruzamento de cabos.....	23
Ilustração 16 - Arena Escandinava, Suécia, 1969.	25
Ilustração 17 - Pavilhão de São Cristóvão, Brasil, 1960.	26
Ilustração 18 - Concha acústica Sidney Myer.	27
Ilustração 19 - Ginásios da olimpíada de Tóquio, 1966.....	27
Ilustração 20 - Igreja evangélica de Bremen-Grolland, Alemanha, 1961.....	29
Ilustração 21 - Pavilhão de exposições da Alemanha Ocidental em Montreal. 1967.	30
Ilustração 22 - Complexo Olímpico de Munique, 1972.	30
Ilustração 23 - Redes de cabos em malhas triangulares.	32
Ilustração 24 - Redes de cabos em malhas hexagonal e quadrada.	33
Ilustração 25 - Deformação das redes de cabos em diferentes malhas sob carga vertical uniformemente distribuída.	33
Ilustração 26 - Sistema de vedação da Arena de Raleigh.	35
Ilustração 27 - Sistema de fixação e junção dos painéis de vedação da cobertura do complexo olímpico de Munique.	36
Ilustração 28 - Heart Tent. Fixação do vidro na rede	37
Ilustração 29 - Interior da sede do IL.....	38
Ilustração 30 - Pista de patinação de Munique. Sistema de vedação da rede.	39
Ilustração 31 - Interior do Palácio de Esportes de Jeddah.....	39
Ilustração 32 - Modelos suspensos do Panteão. Estudos do IL	41
Ilustração 33 - Modelo suspenso de Antonio Gaudi. Colonia Güell.....	41
Ilustração 34 - Modelo de tecido elástico suportado por cabos e lamelas.....	45
Ilustração 35 - Modelos com tecidos elásticos. Reticula de deformações.....	45
Ilustração 36 - Modelo de correntes e arames. 1956.....	46
Ilustração 37 - Modelos de arame.	47
Ilustração 38 - Modelos de filmes líquidos. Superfícies mínimas.	48
Ilustração 39 - Modelos de filmes líquidos. Registro da forma.....	50
Ilustração 40 - Medidor de cotas altimétricas.	51
Ilustração 41 - Simplificação da malha e representação final.	52
Ilustração 42 - Exemplificação do cálculo de áreas discordantes.....	59
Ilustração 43 - Tipo 01. Aspectos gerais de projeto.	60
Ilustração 44 - Tipo 01. Etapas de padronização de corte.....	61
Ilustração 45 - Tipo 02. Aspectos gerais de projeto.	62
Ilustração 46 - Tipo 02. Etapas de busca da forma.....	63
Ilustração 47 - Tipo 03. Aspectos gerais de projeto.	64
Ilustração 48 - Desenho executivo de padrão de corte do modelo em escala 1:1.....	66
Ilustração 49 - Modelo em escala real.....	67
Ilustração 50 - Conectores no modelo real x conectores no modelo de linha.....	67
Ilustração 51 - Padrão de corte 02 x padrão de corte 01.	69
Ilustração 52 - Rede com malha rotacionada em 45°.	70
Ilustração 53 - Estrutura da sede do IL em testes.....	85

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Tipo 01. Comparação geral de modelos. Vista lateral.....	71
Gráfico 2 - Tipo 01. Comparação geral de modelos. Vista de topo.....	72
Gráfico 3 - Tipo 01. Comparação entre configurações do modelo de linha. Vista lateral.	73
Gráfico 4 - Tipo 01. Comparação entre configurações do modelo de linha. Vista de topo.	74
Gráfico 5 - Tipo 01. Comparação entre configurações da estrutura em escala real. Vista lateral.	74
Gráfico 6 - Tipo 02. Comparação geral de modelos. Vista frontal.	75
Gráfico 7 - Tipo 02. Comparação geral de modelos. Vista lateral.....	76
Gráfico 8 - Tipo 02. Comparação geral de modelos. Vista de topo.	77
Gráfico 9 - Tipo 03. Comparação geral de modelos. Vista frontal.	78
Gráfico 10 - Tipo 03. Comparação geral de modelos. Vista lateral.	78
Gráfico 11 - Tipo 03. Comparação geral de modelos. Vista de topo.	79

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Modelos computadorizados x Modelo de lycra	71
Tabela 2 - Modelos computadorizados x Modelo de linha - PC 01.....	72
Tabela 3 - Modelos de linha x Modelo de lycra	73
Tabela 4 - Estrutura real x Modelo de linha - PC 01	75
Tabela 5 - Modelo computadorizado x Modelo de lycra	76
Tabela 6 - Modelo de linha x Modelo de lycra.....	76
Tabela 7 - Modelo computadorizado x Modelo de linha.....	77
Tabela 8 - Modelo computadorizado x Modelo de lycra.....	79
Tabela 9 - Modelo de linha x Modelo de lycra.....	79
Tabela 10 - Modelo computadorizado x Modelo de linha	80
Tabela 11 - Área discordante x Unidade de contorno referencial	80

1. INTRODUÇÃO

Em uma época de profundos questionamentos sobre a atuação destrutiva do ser humano em seu meio ambiente, sustentabilidade é um termo que expressa bem o objetivo de repensar nossos modelos. A tecnologia das estruturas retesadas¹ é uma resposta à busca por modelos construtivos mais limpos e eficientes.

Na construção de amplos espaços cobertos, especialmente em determinadas tipologias arquitetônicas, os gastos com fundações, estrutura e cobertura chegam a determinar os custos finais da obra. Como alternativa econômica, o desenvolvimento das coberturas com cabos e membranas foi voltado para uso nas construções onde espaços de grandes vãos livres são necessários; de fato, quanto maior o vão, mais econômico é esse sistema se comparado a outros tipos estruturais. Em vãos acima de 30 metros, segundo Vandenberg (1998, p. 18), certamente é menor o custo por metro quadrado de uma estrutura retesada relativamente às outras opções disponíveis. A otimização da estrutura pela busca da forma ideal² e solicitação dos materiais segundo a natureza de cada um deles, leva a uma grande economia de custo e de recursos naturais (ROLAND, 1964, p. 3).

No Brasil, essa nova modalidade construtiva encontra alguns obstáculos à sua difusão, tais quais a permeabilidade das membranas sintéticas à radiação infravermelha³ e seus especializados processos de manufatura⁴.

¹ Como é bem explicado em (PAULETTI, 2003, p.1) o termo em português mais adequado para designar o estado de tração em que devem se encontrar as estruturas de cabos e membranas é **retesamento** e não **tensionamento**, uma vez que **tensão**, em português, refere-se a todos os estados de solicitação dos materiais.

² Em 1964, forma ideal certamente referia-se à superfície mínima de determinado perímetro, caracterizada pela distribuição uniforme de tensões por toda superfície. No presente texto, refere-se a uma configuração que bem satisfaça os requisitos formais, estruturais e econômicos do projeto.

³ A radiação infravermelha implica em transferência de calor, tolerada e até desejada em climas frios, porém, potencialmente prejudicial ao conforto ambiental de espaços cobertos no Brasil.

⁴ Vandenberg (1998, p. 13) aponta como um problema da tecnologia das estruturas retesadas.

Em nosso país, é padrão o uso das membranas sintéticas em projetos de coberturas retesadas. Para os consumidores, construtores e profissionais da construção civil em geral, isso representa uma dependência de firmas especializadas para a manufatura da membrana; ademais, isso representa uma dependência de materiais importados, já que, apesar do interesse da indústria nacional em produzir membranas arquitetônicas de melhor qualidade, querendo-se um material sintético para uma estrutura duradoura, de boa performance estética e estrutural, deve-se recorrer ao uso de produtos importados. Ainda assim, a necessidade de constante limpeza das membranas de PVC⁵, mesmo importadas, persiste como um problema a ser resolvido pela indústria⁶.

Em relação ao uso de cabos como elemento estrutural em coberturas retesadas, é crescente importância dos sistemas *tensegrity*⁷. Apesar de muito interessantes e de seu uso ser cada vez mais freqüente em projetos de grandes coberturas de vão livre, esse tipo estrutural apresenta sérios inconvenientes tais quais: a necessidade de extrema precisão dimensional dos elementos estruturais, de cálculos estruturais complexos, do desenvolvimento de conectores específicos para cada obra em particular e de grandes superfícies para vedação das áreas formadas entre os cabos da estrutura, o que leva ao uso associado de membranas sintéticas ou de rede em malha para tal fim.

No que se refere às coberturas com redes de cabos em malha, a maioria das obras foram construídas nas décadas de 1960 e 1970, época em que não havia membranas resistentes o suficiente para se empregar estruturalmente em coberturas de grandes vãos. Atualmente têm sido pouco construídas pelo mundo, sendo o

⁵ Abreviação para polivinil clorido.

⁶ Filmes de PVF (Polivinil fluorido, desenvolvido e produzido pela Dupont, registrado comercialmente como Tedlar) vêm sendo incorporados a algumas membranas importadas revestidas com PVC, apresentando bons resultados na diminuição do acúmulo de sujeira e no aumento da longevidade.

⁷ Explicados adiante no item 2.1.2, página 17.

principal fator para isso o aparecimento de membranas sintéticas de grande durabilidade e resistência.

As redes de cabos em malha consistem em esqueletos estruturais construídos com material padrão da indústria nacional, equipamentos e mão de obra comum, disponíveis em qualquer região, que podem ser cobertos com diversos tipos de materiais, segundo as exigências climáticas do local e disponibilidade econômica para a obra, podendo ser reparados ou trocados futuramente sem a necessidade de desmontagem da estrutura.

O tipo específico de redes em malha, utilizando malha regular, quadrada, apresenta tecnologia de projeto e construção da rede totalmente diversa de todos os outros tipos de estruturas retesadas. Por sua capacidade de deformar-se de estado plano em tridimensional, de modo bastante uniforme, apenas por mudança geométrica dos ângulos de cruzamento dos cabos, as redes em malha quadrada substituem as membranas em todas as suas aplicações estruturais, podendo ser totalmente pré-fabricadas, transportadas em rolos e montadas sem necessidade de andaime, como membranas. Ademais, a mesma tecnologia aplicada às redes de cabos em malha quadrada pode ser utilizada para a construção de espaços enclausurados com redes abertas de pequena dimensão de malha em zoológicos e aviários, ou em redes de proteção para espaços esportivos.

Em nosso país, nenhuma estrutura desse tipo⁸ foi jamais realizada. É possível projetar e construir coberturas com redes em malha de modo prático e econômico; de modo mais adaptado à realidade do mercado e da grande maioria dos

⁸ Refere-se ao tipo específico das redes em malha quadrada, uma vez que algumas coberturas com redes de cabos montadas no ar já foram realizadas, sendo a mais recente delas, único exemplar remanescente, encontrada em São José do Rio Pardo-SP, trabalho do arquiteto Luiz Paulo Cobra Monteiro e dos engenheiros Luiz C. Almeida e Vinícius F. Arcaro, o qual mantém em <<http://www.arcaro.org/epidauro>> detalhada documentação sobre vários aspectos da referida obra.

profissionais da construção civil no Brasil? O presente estudo almeja contribuir na resposta dessa questão.

1.1 Objetivos

Considerando-se que o projeto de estruturas retesadas envolve a resolução de três problemas, quais sejam, determinação da configuração inicial de equilíbrio (*form-finding*), definição do modelo de corte (*cutting-pattern*) e análise da estrutura submetida às ações (*load analysis*) (OLIVEIRA / BARBATO, 2002, p. 4), o presente trabalho aborda os dois primeiros problemas no contexto das coberturas com redes de cabos em malha quadrada. Limitando-se ao estudo das etapas preliminares de projeto, apresenta a tecnologia desenvolvida nas décadas de 1960 e 1970 utilizando modelos físicos de precisão, assim como experimenta procedimentos rápidos com modelos físicos de baixo custo e precisão refinados por ajustes de borda.

O objetivo específico deste trabalho é estudar o processo de ajustes por deslizamento em borda como etapa suplementar do projeto de definição geométrica das redes retesadas em malha quadrada.

O objetivo geral é contribuir para o preenchimento de uma grande lacuna encontrada nas pesquisas realizadas no Brasil sobre estruturas retesadas: nenhuma obra nacional dedica atenção, sequer menciona, à tecnologia e as potencialidades desse tipo específico de rede de cabos que já serviu de base para a realização de grandes obras; espera-se que a mesma tecnologia possa servir, hoje, a finalidades bem mais comuns, porém, de maneira bem mais econômica.

1.2 Estrutura Geral

Para dar ao leitor uma visão geral do trabalho, a estrutura do texto é dada a seguir:

Na primeira parte do texto, uma bibliografia de referência é apresentada, tratando de vários assuntos relacionados ao tema, entre eles, a construção de coberturas arquitetônicas com cabos de aço, o uso de redes em malha e modelagem física.

Em seguida, os procedimentos adotados para a realização da pesquisa são descritos tendo em vista o objetivo específico do trabalho: o estudo sobre o processo de ajustes por deslizamento em borda como etapa suplementar do projeto geométrico de estruturas retesadas com redes em malha quadrada.

Na seção seguinte, são apresentados os resultados da comparação dos dados obtidos nas fases do projeto geométrico, busca da forma e padronização de corte.

Na seção discussão, os resultados são explicados e analisados, bem como é discutida a pertinência do presente estudo para aplicações na construção civil.

Finalizando o trabalho, as conclusões da pesquisa são resumidas, bem como é sugerido um direcionamento para pesquisas futuras sobre redes de cabos em malha quadrada.

2. REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA

Será apresentada uma revisão bibliográfica sobre coberturas com cabos, coberturas com redes de cabos em malha e sobre modelagem física aplicada ao projeto de coberturas retesadas, buscando-se informações relacionadas ao objeto do estudo na literatura existente sobre o assunto.

2.1 Coberturas com Cabos

Estruturas primitivas utilizando cordas e membranas freqüentemente aparecem como ponto de partida para o estudo das coberturas retesadas modernas. A seguir, um breve histórico sobre coberturas com cordas e cabos; em seguida, uma classificação do campo de estudo objetivando identificar onde se enquadra o tipo específico das redes de cabos em malha quadrada.

2.1.1 Histórico

Coberturas utilizando peles de animais são realizadas há dezenas de milhares de anos pelo homem. Acampamentos pré-históricos com mais de 40.000 anos foram descobertos em Moldova, Rússia (HATTON, 1979, p. 3). Em algum momento do passado, cordas foram adicionadas para amarrar essas peles e prender estacas, permanecendo, a partir daí, sempre presentes em tendas com peles ou tecidos. As primeiras referências sobre coberturas utilizando cordas, possivelmente organizadas em rede, são as coberturas dos anfiteatros gregos e romanos. Sabe-se que os teatros gregos já possuíam grandes toldos para proteção da platéia (OTTO, 1958, p. 10), sabe-se também que, assim como em Roma, eram marinheiros os construtores e operadores dessas estruturas. Em Roma, o uso do *velum* ou *velarium* foi largamente difundido nas cidades. Segundo escritores romanos, esses toldos feitos

de tecido estendiam-se não só sobre teatros, como também sobre pátios interiores, ruas (como ainda hoje se faz em Sevilha) e praças, para proteger o cidadão contra o vento, a chuva e o sol (SIMÕES, 2002, p. 2). A palavra vela (de barco), como conhecemos, é derivada da latina *velarium*, que para os romanos significava uma só coisa.

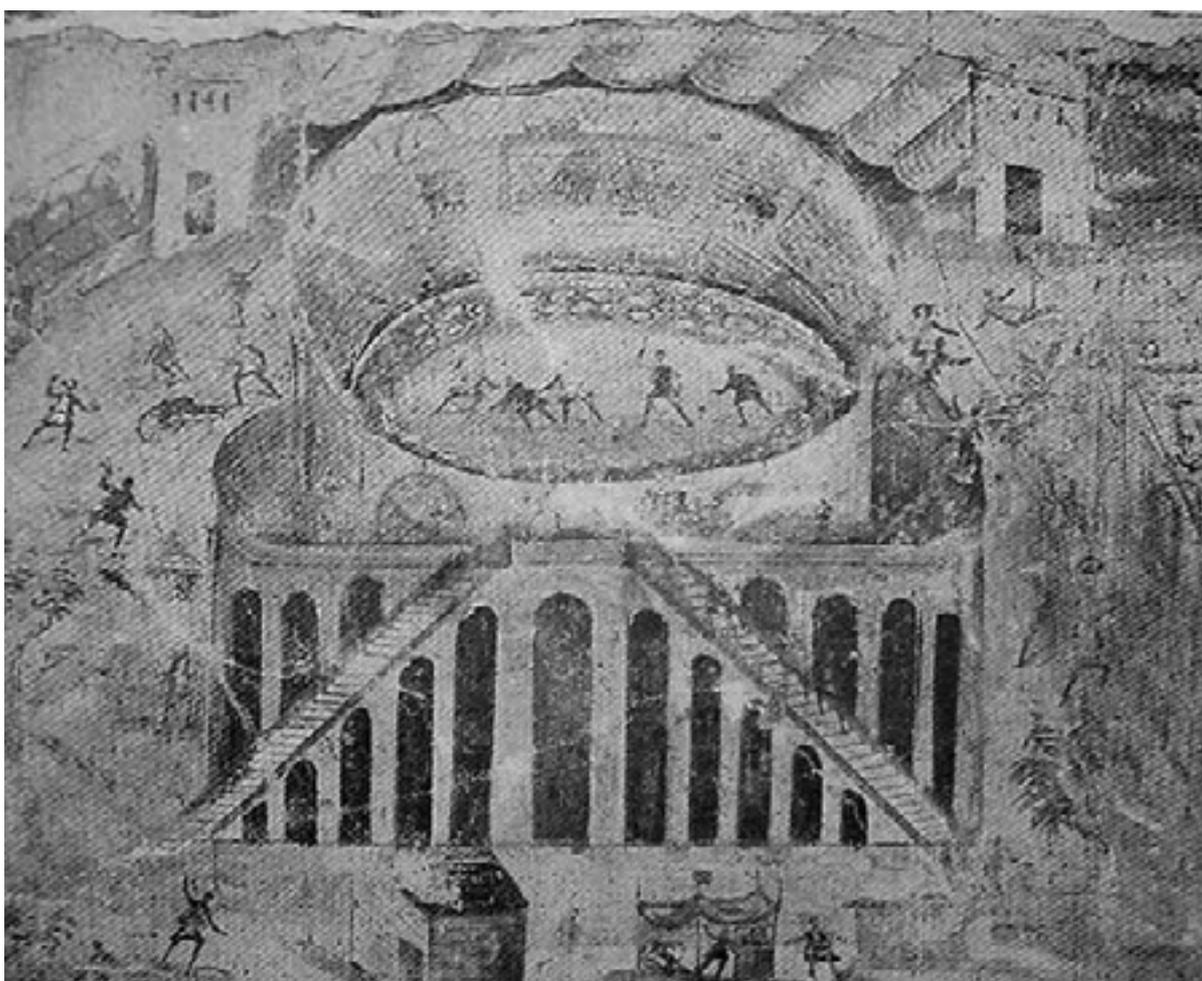


Ilustração 1 - Afresco de Pompéia. 59 A.C. Reproduzida de (HATTON, 1979, p.114)

Cabos sustentando vigas de madeira criam a estrutura que suporta uma cobertura de tecido ou couro pendendo sobre a arquibancada de um anfiteatro.

A tecnologia dos barcos à vela e a grande experiência dos marinheiros foi utilizada para construir grandes coberturas nas cidades romanas antigas. Os coliseus e anfiteatros romanos possuíam, em sua maioria, coberturas suspensas retráteis construídas e operadas por marinheiros, segundo comentários da literatura romana,

supostamente introduzidas em 69 A.C. (HATTON, 1979, p. 113). A retratibilidade era necessária devido à incapacidade de se construírem coberturas têxteis capazes de resistir a ventos fortes e neve. Mesmo o grande Coliseu de Roma, um edifício de planta oval com 189 metros de eixo maior, 155 metros de eixo menor e 47 metros de altura, em seu auge, foi provido com uma complexa cobertura de lona para os espectadores (SECRETS OF... , 1997).

Segundo a versão mais difundida da provável configuração dessa extraordinária estrutura, cento e vinte mastros, dispostos radialmente, serviam de ancoragem para uma rede de cordas suspensas que suportavam tecidos retráteis. Essa proposta de uma rede de cordas suspensa sobre a arena é mais antiga e corroborada pela grande maioria dos estudiosos, entre eles, Hatton (1979), Salvadori (1990), Macaulay (1974) e Drew (1979). As principais vantagens desse sistema seriam: a capacidade de cobrir toda a arquibancada, o uso de mastros menores, o menor peso da estrutura e uma menor solicitação de cargas nos mastros. As desvantagens concentrar-se-iam na dificuldade de construção da estrutura e na dificuldade de recolhimento da lona, baseando-se o processo em cordas relativamente frouxas como guia. O equilíbrio da estrutura dependeria de um anel de tração central onde as forças radiais seriam anuladas, mantendo-a suspensa.

De acordo com novos estudos, as estruturas de cobertas dos anfiteatros seriam constituídas por vigas em balanço sustentadas por cordas em tração. Essa proposta defendida pelo historiador de arquitetura Rainer Graefe, estaria formalmente de acordo com pinturas encontradas nas ruínas de Pompéia, onde linhas verticais projetam-se acima da estrutura, e com outras ilustrações antigas de anfiteatros onde podem ser vistas linhas horizontais, como vigas em balanço, com tecidos pendendo entre elas (SECRETS OF... , 1997).

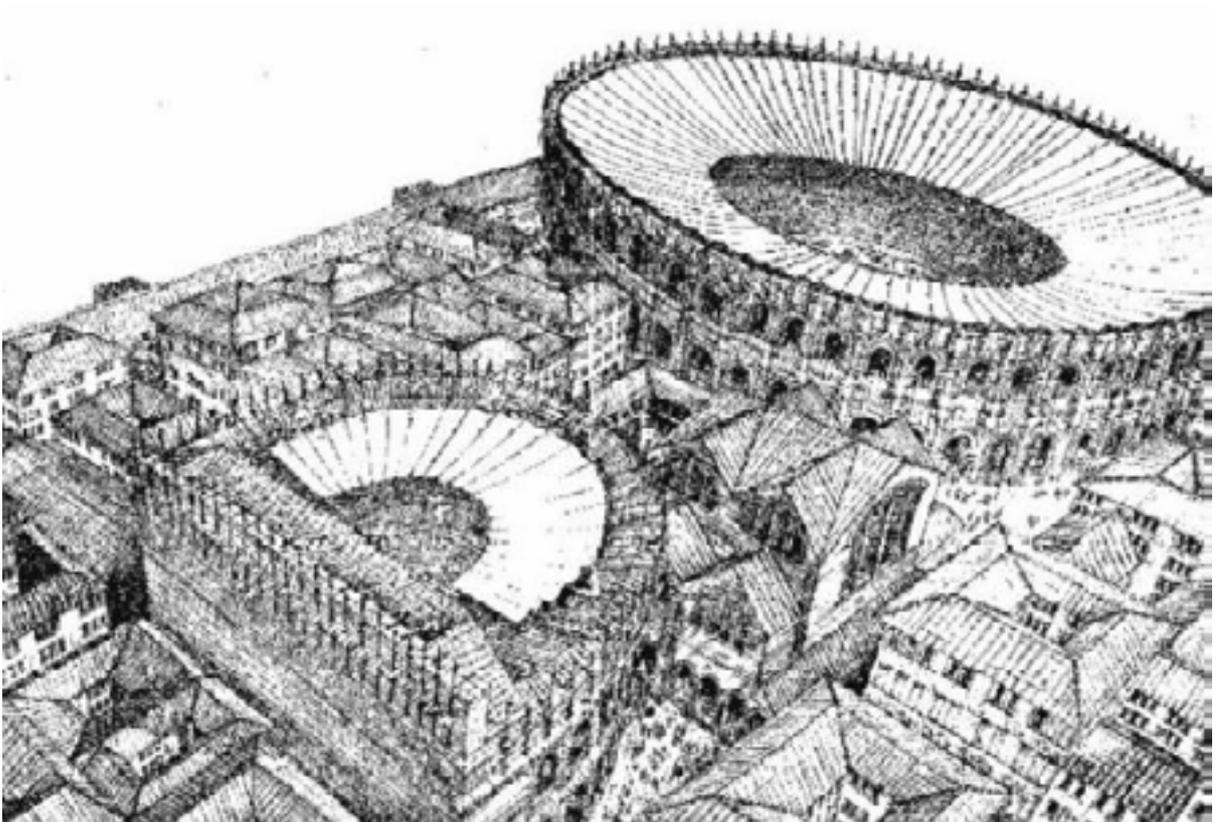


Ilustração 2 - Velarium de coliseu. Versão baseada no uso de rede suspensa de cordas. Reproduzida de (SIMÕES, 2002, p. 4)

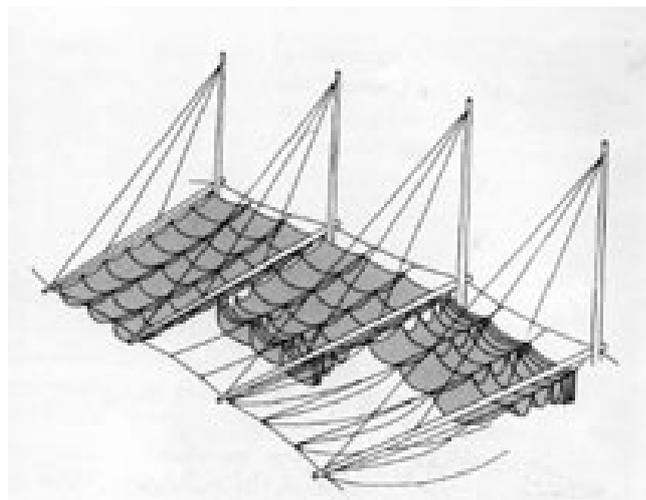


Ilustração 3 - Velarium de coliseu. Versão com Vigas e cordas. Reproduzida de <<http://www.redskyshelters.com/tensilehistory.html>> Acesso em 04/2003.

A membrana utilizada na cobertura poderia ser de tela tecida ou couro. O couro, apesar de mais pesado, era, na época, um material mais resistente e mais barato

que o tecido de fibras. Várias referências apontam seu uso como principal material para a construção de tendas em Roma, entre elas, o fato de o cronista romano, Plínio, falar sobre quantas peles de bezerro são necessárias para fazer uma tenda, e do termo latino para acampar ser *sub pellibus*, ou seja, sob peles.

A tecnologia do uso de cordas em coberturas parece ter permanecido estagnada nos séculos subseqüentes à sua aparição na antiguidade clássica. Porém, os novos materiais e tecnologias industriais do final do século XIX propiciaram uma revolução na engenharia civil utilizando cabos, expressa, entre tantas outras formas, no aparecimento dos cabos de aço e das primeiras pontes suspensas modernas (VANDENBERG, 1998, p. 15). Como defende Drew (1979 *apud* PAULETTI, 2003, p. 11), o aparecimento das modernas coberturas com cabos tracionados parece derivar das pontes suspensas modernas, como trabalhos na Tchecoslováquia, em 1824, e na França, em 1840, apontam.

Os pavilhões da exposição de Nizjny-Novgorod, em 1896, consistem na primeira cobertura utilizando membranas em malha (OTTO, 1985, p. 72). Nessa obra, foram utilizadas fitas de aço extrudado que se cruzam formando superfícies suspensas por estruturas metálicas e cobertas por placas metálicas (IASS, 1963, p. 176). Esses pavilhões projetados pelo arquiteto russo Vladimir G. Shookhov⁹, no entanto, não revolucionaram formalmente ou estruturalmente a construção de coberturas com membranas até então existentes, apenas substituíram a lona pela referida malha metálica. De fato, essa cobertura metálica suspensa, não retesada, reproduz as formas típicas dos circos itinerantes existentes (PAULETTI, 2003, p. 12).

⁹ O fato de V.G. Shookhov não ser considerado o precursor do moderno desenvolvimento das coberturas retesadas, pela maioria dos autores, talvez se dê pelo isolamento a que seu trabalho foi submetido nas primeiras décadas do século XX. A extensiva pesquisa de Frei Otto sobre o assunto, realizada na década de 1950, apesar de mencionar obras de bem menor importância, não o alcança. É bem provável que sua obra tenha sido publicada no Ocidente apenas em 1963.

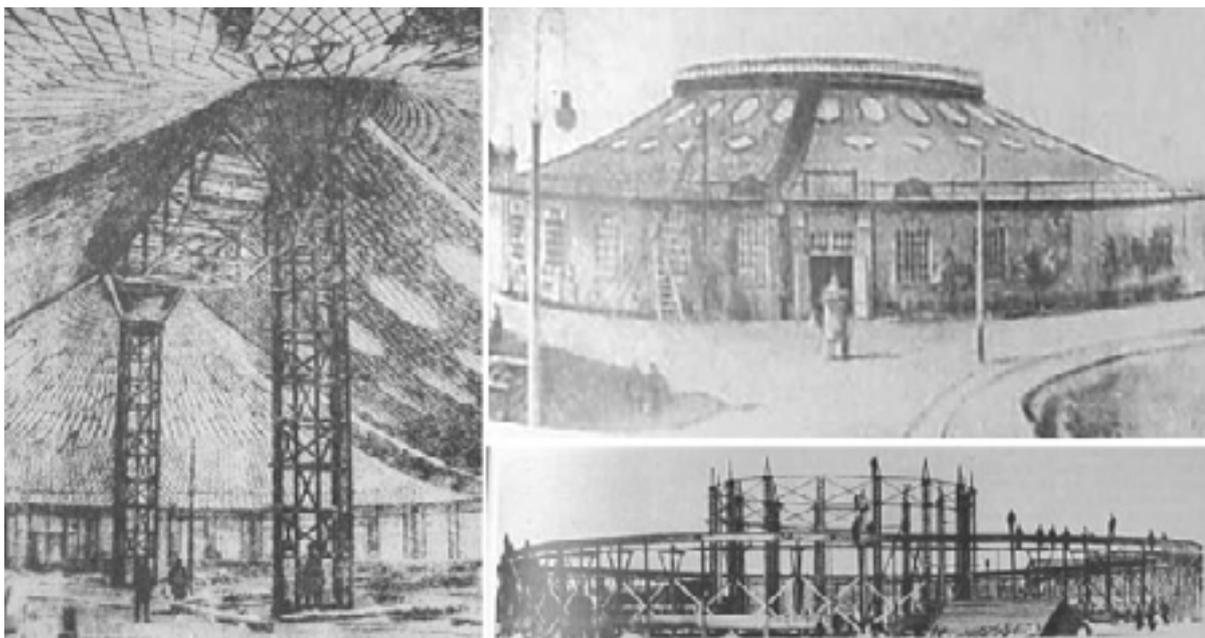


Ilustração 4 - Pavilhões em Nizjny-Novgorod. Reproduzida de (IASS, 1963, p. 176).

Na ilustração podem ser vistos o aspecto interior e exterior dos pavilhões.

À esquerda, o interior do pavilhão oval com sua trave principal, perímetro oval rígido e malha metálica suspensa.

À direita, o pavilhão circular: abaixo, em construção; acima, finalizado.

A construção da Arena de Raleigh, no início da década de 1950, é considerada o marco para o início do desenvolvimento da tecnologia de coberturas retesadas que evolui aos dias de hoje. Apesar de trabalhos anteriores¹⁰ já prenunciarem o que estava por vir, o retesamento, chave para a criação de superfícies leves estáveis, só foi percebido e aproveitado de modo consciente na construção dessa revolucionária obra terminada em 1953 nos EUA. O retesamento dos cabos não se deu de modo premeditado, mas sim, em consequência da utilização da forma com curvaturas em sentidos opostos que, além de atenderem à intenção arquitetônica do projetista, resolviam o problema de escoamento de água pela cobertura (OTTO, 1958, p. 93). Com um vão livre máximo de 97m, a cobertura utiliza uma rede de cabos de aço

¹⁰ Entre esses trabalhos se destacam em ordem cronológica: Armazéns de Grãos de Albany, EUA, por A. Dürbeck, 1932; Pavilhão de Exposição da Indústria Automotiva, Chicago, pela firma Stewart, 1933; Pavilhão da Feira de Zagreb, Iugoslávia, por Bernard Laffaille, 1937 (OTTO, 1958, pp. 23-25).

dispostos ortogonalmente entre dois arcos de concreto, formando uma superfície tridimensional com dupla curvatura inversa, anticlástica.

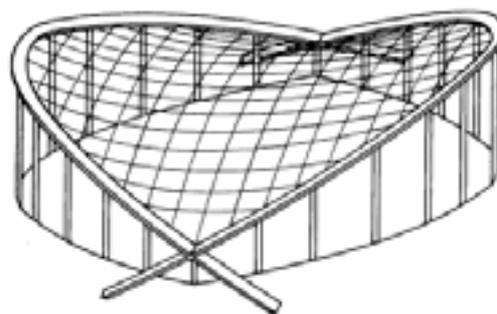


Ilustração 5 - Arena de Raleigh. Vista externa e gráfico estrutural. Reproduzida de (TIBERT, 1999, p. 5).

Esse projeto, idealizado pelo arquiteto russo Matthew Nowicki em 1950, tendo sido levado a cabo após a morte prematura de Nowicki pelo arquiteto William Deitrick, e executado pelo engenheiro Fred Severud, foi um marco que despertou a atenção de jovens arquitetos e engenheiros por todo o mundo (VANDENBERG, 1998, p. 17).

O desenvolvimento das coberturas retesadas com cabos, iniciado na Arena de Raleigh, estende-se aos dias de hoje. No entanto, apesar desse desenvolvimento apresentar-se gradativo, pela construção de algumas importantes obras, as inovações substanciais nas técnicas de construção foram introduzidas pelo uso de redes em malhas quadradas, por Frei Otto, em 1961, e pela aplicação das estruturas *tensegrity*, por David Geiger, em 1986.

2.1.2 Classificação das Coberturas com Cabos

Segundo a classificação de Engel (1977, pp. 60-85), os sistemas estruturais de cabo¹¹ podem ser divididos em:

¹¹ Essa classificação encontra-se em uma obra sobre os sistemas estruturais em geral. A divisão do autor, quando detalhada graficamente, abrange quase todas as situações possíveis em estruturas com cabos.

- Sistemas de cabos paralelos
- Sistemas de cabos radiais
- Sistemas de cabos biaxiais
- Treliças de cabos

Segundo a classificação de Frei Otto, encontrada em Roland (1964, pp. 7-8), os sistemas estruturais tracionados podem ser divididos em:

- Estruturas tracionadas lineares
- Estruturas tracionadas superficiais
- Estruturas tracionadas espaciais

As estruturas tracionadas lineares consistem em estruturas de estais e cabos catenários, utilizadas em pontes ou coberturas, como elemento suportante de partes rígidas, tais quais tabuleiros, treliças e lajes, onde o elemento linear caracteriza o predomínio de uma dimensão sobre as demais.

As estruturas tracionadas superficiais, no que se refere ao uso de cabos de aço, são aquelas em que elementos repetidos formam superfícies, sendo claramente distinto o predomínio de duas dimensões sobre uma terceira. Elas podem subdividir-se em:

- Superfícies planas pretensas
- Superfícies de uma curvatura
- Superfícies de duas curvaturas em mesmo sentido¹² (sinclásticas)
- Superfícies de duas curvaturas em sentidos opostos¹³ (anticlásticas)

Já as estruturas tracionadas espaciais não possuem nenhuma dimensão claramente predominante sobre as outras. Incluem diversos tipos estruturais, alguns deles ainda

¹² Um bom exemplo de curvaturas em um mesmo sentido é visto em superfícies esféricas. Para se construir coberturas com superfícies sinclásticas, são utilizados cabos suspensos entre um anel externo, por exemplo, ou uma rede de cabos reforçando uma cobertura inflável de membrana.

¹³ Explicadas no item 2.2.1.

não utilizados na prática, explicados em (ROLAND, 1964. pp. 106-111). Nessa categoria estão incluídos os mastros enrijecidos por cabos e as estruturas *tensegrity*. Segundo a classificação de Krishna (1978 *apud* TIBERT, 1999, p. 9), a qual, dada sua maior difusão entre os estudiosos do assunto, toma-se aqui como base para ilustrações e breves explicações de cada um dos casos em particular, o campo das estruturas de cobertas utilizando cabos de aço pode ser dividido em duas grandes classes:

- Estruturas suportadas por cabos (estaiadas)
- Estruturas suspensas de cabos.

As estruturas suportadas por cabos, em termos gerais, são parecidas com as pontes suspensas, onde cabos tracionados suportam partes rígidas como vigas ou lajes, as quais respondem pela maior partes dos carregamentos. Os cabos possuem a função apenas de suportar uma cobertura rígida, geralmente de treliça metálica, que consiste na estrutura de coberta propriamente dita. Espera-se que os cabos permaneçam em tração, mesmo sob forte sucção de ventos, pela ação do peso próprio da parte rígida.

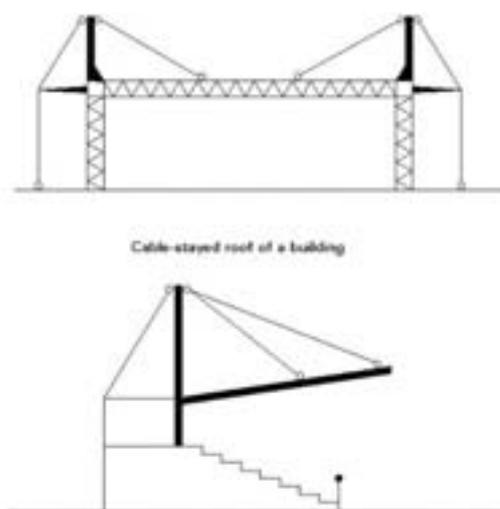


Ilustração 6 - Exemplos de coberturas suportadas por cabos. Reproduzida de (SPECIAL SINGLE ...) Disponível em (<http://www.kuleuven.ac.be/bwk/materials/education/master/wg14/10602.htm>) Acesso em: 04/2003.

Já nas coberturas suspensas de cabos, os carregamentos da cobertura são absorvidos ou transpostos diretamente pelo sistema de cabos. Essa modalidade é subdividida em três tipos (BUCHHOLDT, 1985 *apud* TIBERT, 1999, p. 9):

- Coberturas suspensas simples
- Treliças de cabos protendidos
- Redes de cabos protendidos

As coberturas suspensas simples podem ser de curvatura simples ou dupla curvatura em mesmo sentido, sempre tendo a gravidade como agente modelador das formas assumidas pelos cabos, e sempre necessitando de pesos distribuídos por sua área ou ancoragens distribuídas ao longo dos cabos para se tornarem estáveis frente à sucção por vento. Estando suspensas livremente, sem necessidade de protensão extra, devem possuir um peso próprio entre 50 e 120 kg/m², incluído material de vedação, dependendo da forma da cobertura (ROLAND, 1964, p. 15).

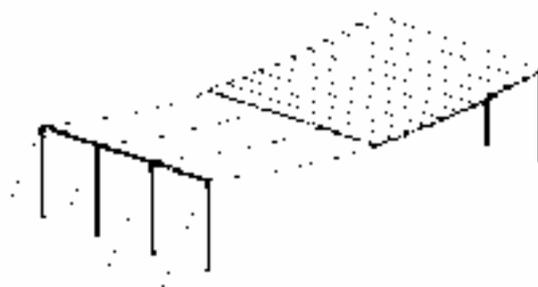


Ilustração 7 - Exemplo de cobertura suspensa simples. Reproduzida de (TIBERT, 1999, p. 10)

Na ilustração são vistas placas que conferem peso e estabilidade ao conjunto de cabos em disposição catenária, suspensos entre pontos opostos. Essas placas, em geral, são a base do próprio recobrimento da estrutura suspensa.

As treliças de cabos protendidos são configurações planas onde dois cabos são enrijecidos por barras (curvatura côncava), por cabos (curvatura convexa), ou por combinações dos dois casos, que os conectam, graças à disposição em curvatura inversa existente entre dois cabos principais e ao tracionamento destes. No primeiro caso, o cabo de estabilização encontra-se acima do cabo de suspensão; no segundo

caso, encontra-se abaixo; no terceiro caso, encontra-se parcialmente acima e parcialmente abaixo do cabo de suspensão (ENGEL, 1977, p. 68).

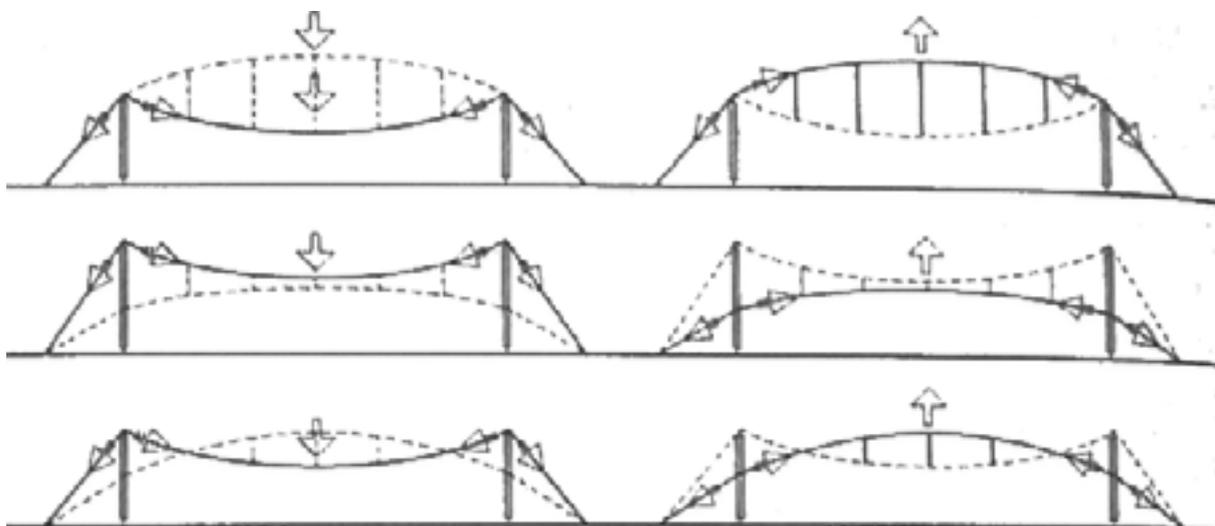


Ilustração 8 - Treliças de cabos protendidos em coberturas. Cabos de suspensão e estabilização.
Reproduzida de (ENGEL, 1977, p. 68).

A ilustração apresenta a disposição dos cabos principais em treliças de cabos protendidos. À esquerda, a disposição dos cabos de suporte; à direita, dos cabos de estabilização. Acima, treliça com elementos em compressão entre os cabos principais; ao centro, treliças com elementos em tração entre os cabos principais; abaixo, treliças mistas.

Já as redes de cabos protendidos, em seu estado final, são estruturas tridimensionais onde os cabos de suporte e os cabos de protensão encontram-se em uma mesma superfície, formando uma rede, uma malha. (BUCHHOLDT, 1985 *apud* TIBERT, 1999, p. 12).

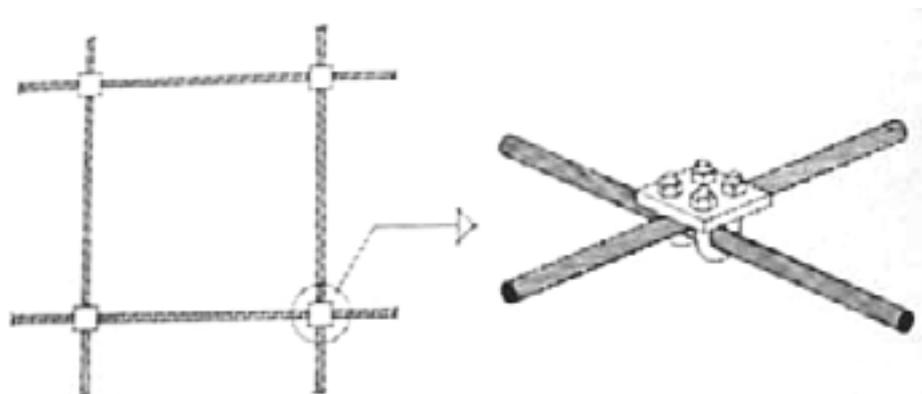


Ilustração 9 - Ligação típica entre cabos de uma rede. Reproduzida de (VANDENBERG, 1998, p. 34).

Os elementos principais, os cabos, podem ser ligados a outros cabos ou a elementos rígidos¹⁴ por meio de conectores, dando forma a um conjunto estável predominantemente sob estado de tensão de tração.

As redes são estruturadas a partir de elementos interligados com certa frequência, o que leva a um comportamento próximo ao de uma membrana, onde um nó liga os cabos, normalmente apenas dois, em um ponto do espaço tridimensional. Isso possibilita grande economia de gasto com conectores, já que, pelo uso repetido, podem ser vantajosamente pré-fabricados.

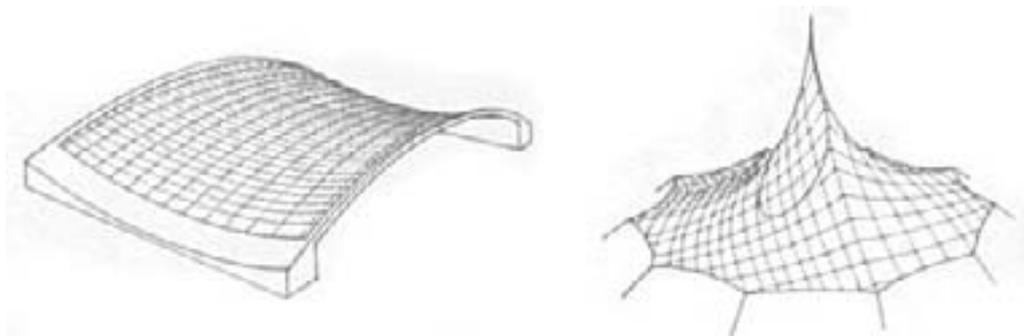


Ilustração 10 - Exemplos de coberturas com rede de cabos. Reproduzida de (VANDENBERG, 1998, p. 21)

À esquerda, uma estrutura com perímetro rígido e cabos cruzados ortogonalmente.

À direita, uma estrutura com cabos de borda, perímetro flexível, e malha com cabos cruzados em ângulos variados.

Nos dois exemplos, a constante amarração entre os cabos confere à rede um caráter de superfície inteira, um comportamento de membrana. As estruturas em malha devem ser dispostas em configuração tridimensional anticlástica objetivando rigidez e estabilidade frente aos ventos, como deve ser uma membrana em semelhante aplicação (BUCHHOLDT, 1985 *apud* TIBERT, 1999, p. 12).

Estruturas *Tensegrity* - Uma contração de *tensional integrity*, esse termo refere-se a um novo tipo de estruturar coberturas retesadas em que a forma da estrutura é garantida pela interação entre uma rede contínua de cabos tracionados e um

¹⁴ Os elementos rígidos podem ser: perímetros rígidos, *flying masts*, mastros e ancoragens.

conjunto de elementos comprimidos (DEIFELD/PAULETTI, 2002, p. 3), utilizando cabos de aço como matéria principal de um milimétrico bem articulado conjunto tridimensional de elementos em tração e elementos em compressão (anel e barras de compressão). Em uma verdadeira estrutura *tensegrity*, poucos elementos não interligados, em puro estado de compressão, estão suspensos por uma rede de cabos em puro estado de tração (ROBBIN, 1996, p. 25).

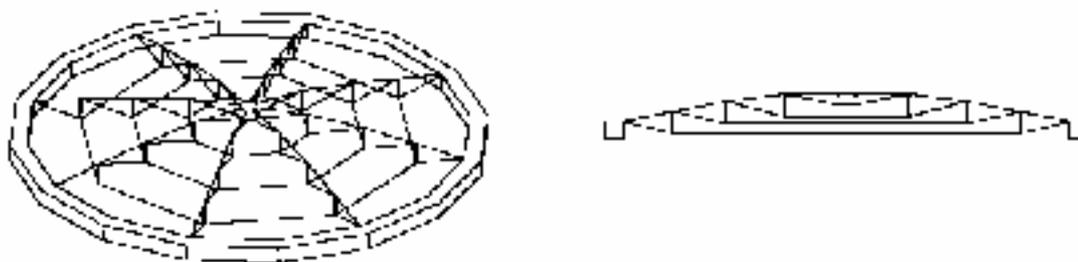


Ilustração 11 - Exemplo de estrutura *tensegrity*. Cable Dome de David Geiger. Reproduzido de (TIBERT, 1999, p. 16).

A cobertura é suportada por um anel de compressão circular de onde partem cabos de aço que se interligam e suportam barras de compressão, cuja repetição ordenada pela área coberta vem originar três anéis interiores de tração, também circulares. As forças resultantes da tração dos cabos de aço são absorvidas pelo anel de concreto, não restando a necessidade de ancoragens externas.

Para Engel (1977, p. 78), essas estruturas são consideradas sistemas de treliças radiais de cabos com elevação em direção ao centro, o que, de fato, chega a representar a maioria dos sistemas *tensegrity* utilizados em coberturas, tais quais os domos construídos por David Geiger para as Olimpíadas de Seul de 1988.

2.2 Coberturas com Redes de Cabos Protendidos

2.2.1 Princípios Básicos

Os princípios básicos que regem o projeto de coberturas com redes de cabos, em termos gerais, são os mesmos que regem o projeto de coberturas com membranas;

de fato, a distinção entre esses tipos não é nitidamente demarcada (PAULETTI, 2003, p. 2).

A seguir, os princípios básicos para o projeto de coberturas retesadas de membranas e redes de cabos.

Retesamento - Diz-se que uma estrutura é protendida, retesada no caso aqui estudado, quando é necessário aplicar tensões antes de submetê-la às ações das cargas normais de trabalho (ROLAND, 1964, p.9). Por utilizarem materiais delgados e flexíveis, e pelo fato de necessariamente trabalharem sob tração, sendo desprezíveis sua resistência à flexão e compressão, essas estruturas leves de membrana devem ser enrijecidas por um constante estado de retesamento, uma vez que frouxas estarão vulneráveis a efeitos aerodinâmicos por ação de vento (SCHOCK, 1997, p. 9).

Formas Anticlásticas - Superfícies planas retesadas resistem muito pouco a deformações por cargas aplicadas; mesmo seu peso próprio lhe causa grandes deformações, o que as torna inadequadas para aplicação em coberturas arquitetônicas. De modo semelhante, o mesmo acontece em superfícies curvadas apenas em uma direção, por exemplo, uma cobertura suspensa simples¹⁵, onde se verifica uma certa instabilidade e muita sensibilidade a mudanças de distribuição de cargas (OTTO, 1958, p. 15).

As formas anticlásticas, ou seja, superfícies com dupla curvatura em sentidos inversos, são as únicas utilizadas em estruturas retesadas de redes de cabos em malha, uma vez que, protendidas, podem resistir a grandes cargas aplicadas, com deformações relativamente muito pequenas (ROLAND, 1964, p. 9).

¹⁵ Uma cobertura desse tipo pode ser realizada com o acréscimo de peso morto para se tornar estável frente às cargas provenientes do vento.

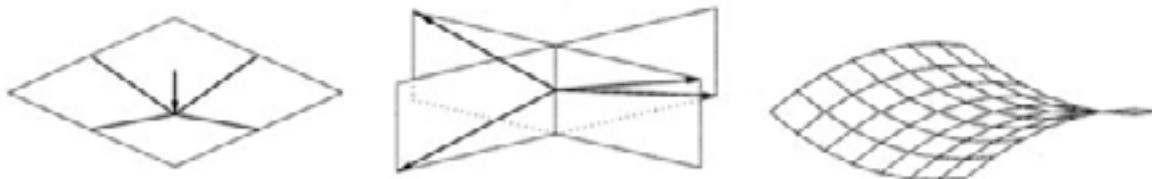


Ilustração 12 - Estabilidade anticlástica em uma rede de cabos. Reproduzida de (Schierle, 2002, p. 2)

À esquerda, em uma rede plana, determinado ponto apresenta grande variação ao sofrer uma carga em sentido perpendicular.

Ao centro, o ponto de cruzamento entre dois cabos é estabilizado no espaço pela disposição anticlástica dos mesmos.

À direita, uma rede de cabos apresenta estabilidade em todos os pontos de cruzamento graças a sua forma anticlástica.

Ancoragem - Grosso modo, o peso de uma estrutura do tipo aqui estudado é duas ordens de grandeza menor que uma de concreto e uma ordem menor que uma de estrutura metálica convencional (PAULETTI, 2003, p. 2). Assim, a cobertura deve ser firmemente ancorada no solo ou em perímetros rígidos para manter sua estabilidade e a segurança de seus usuários, uma vez que todas as cargas atuantes na superfície serão transmitidas aos elementos de ancoragem. Particularmente, a ação dinâmica dos ventos é responsável por alguns dos efeitos indesejáveis e colapsos parciais em estruturas retesadas (BUCHHOLDT, 1985 *apud* TIBERT, 1999, p. 28).

2.2.2 Componentes Básicos

De um modo geral, os componentes básicos para a construção de uma rede de cabos em malha podem ser encontrados em qualquer comércio de ferragens. Cabos de aço de alta resistência, grampos, sapatilhas, manilhas e esticadores são alguns dos elementos comuns da construção civil que podem compor uma estrutura retesada de cabos de aço. Havendo interesse por melhor acabamento, melhor desempenho e maior segurança, componentes específicos podem ser desenvolvidos por um engenheiro mecânico ou importados de fabricantes especializados situados principalmente nos Estados Unidos e na Europa.

Cabeamento - Certamente é o principal material de uma cobertura de rede de cabos. Apesar de poderem ser construídos com materiais como poliéster, fibra de vidro ou fibra de carbono (PAULETTI, 2003, p. 187), os mais comuns são feitos com arames de aço.

Os cabos de aço podem ser compostos por elementos em disposição paralela ou em espiral. Fios paralelos são utilizados, principalmente, como estais de pontes suspensas quando se necessita nenhuma ou pouca deformação por elasticidade do material (OTTO, 1958, p. 61). Atualmente, cabos de fibra de carbono, com elasticidade zero, vêm sendo utilizados em diversas aplicações com muito êxito, uma vez que dispensam qualquer trabalho de pré-estiramento para estabilização dimensional, são imunes à corrosão e são mais leves que o aço (NOVÁK, 2002, p. 9). No entanto, os cabos espiralados de aço, os únicos fabricados no Brasil, devem continuar sendo os mais utilizados em redes de cabos, dado seu custo moderado e sua comum fabricação.

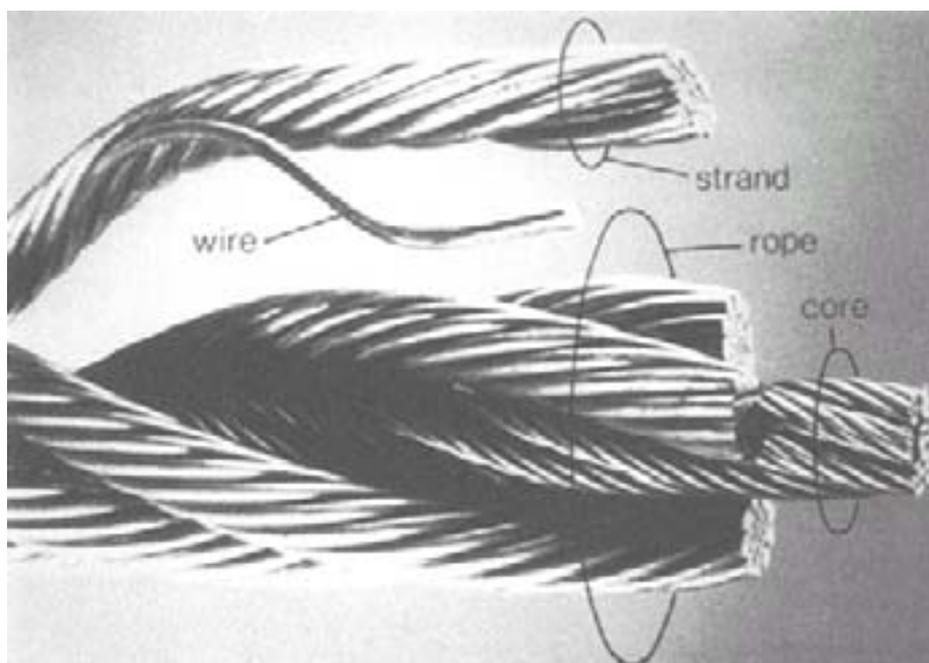


Ilustração 13 - O cabo de aço e seus componentes. Reproduzida de (Costello, 1997 *apud* Tibert, 1999, p. 17)

O termo “construção de um cabo de aço” (espiralado) refere-se à quantidade de pernas, o número de arames de cada perna, sua composição e o tipo de alma. Os arame de aço (wire) são os menores elementos de tração de um cabo, juntos, dispostos helicoidalmente, formam as pernas (strand), que por sua vez, dispostos de modo semelhante ao redor de uma alma (core), formam o cabo propriamente dito (rope). Com o aperfeiçoamento das técnicas de fabricação, desenvolveram-se máquinas e técnicas de confeccionar todas as pernas do cabo de uma só vez, possuindo todas as camadas um só passo, ou seja, a mesma distância por volta completa de uma perna em torno do centro do cabo, o que evita corrosão interna por atrito. No que se refere ao tipo alma interna do cabo, podem ser de aço, conferindo-lhe maior resistência, ou de fibra, conferindo-lhe maior flexibilidade. No entanto, sua finalidade principal é garantir que as pernas estejam posicionadas de modo que os esforços sejam distribuídos uniformemente entre elas (CIMAF CABOS S/A, 2002, p.13). Os principais acessórios dos cabos de aço são as sapatilhas e os grampos para criar laços de ponta. Outra forma de criar laços é encomendar os cabos com laços de fábrica ou utilizar soquetes chumbadores.

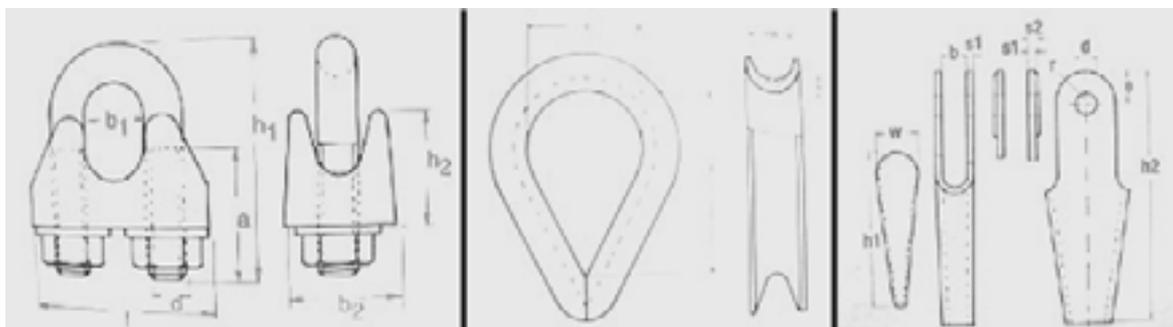


Ilustração 14 - Grampos, sapatilhas e soquetes chumbadores. Reproduzida de (CARL STAHL, 2002, pp. 61- 65).

Conectores - Os conectores servem para fixar os cabos em elementos rígidos ou em cabos de borda, assim como conectar cabos nos pontos de cruzamento de malha.

Conectores soldados em mastros e perímetros de aço devem ser dimensionados por engenheiro mecânico. Conectores pré-fabricados como manilhas, ganchos, olhais e anéis, podem ser adquiridos com base na bitola do cabo correspondente.

Para se criar uma malha de cabos interligados é necessário fazer uso de conectores específicos que permitam cruzamento concêntrico dos cabos, prendendo-os firmemente; se forem utilizadas malhas quadradas, desejando-se maior precisão e melhor desempenho em estruturas de grande porte, esses conectores devem permitir a rotação dos cabos e facilitar a mudança dos ângulos de cruzamento (TIBERT, 1999, p. 26).

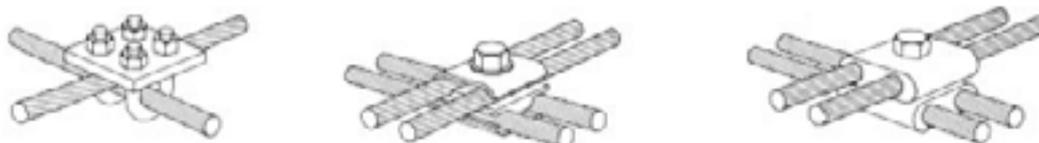


Ilustração 15 - Conectores para cruzamento de cabos. Reproduzida de (BUCHHOLDT, 1985 *apud* TIBERT, 1999, p. 26)

À esquerda, conector simples.

Ao centro, conector para cabos gêmeos.

À direita, conector para cabos gêmeos permitindo rotação dos cabos sobre o eixo concêntrico.

A construção de redes de cabos de aço em malha quadrada pode utilizar a indústria de cabos de aço a seu favor. Baseado em desenhos precisos de padronização de corte dos cabos, esses podem ser encomendados de fábrica já com laços e marcações prensadas. O terceiro caso da ilustração 15 é um bom exemplo disso: todos os cabos vêm marcados de fábrica, com a distância padrão de malha e tamanho final de cada um deles; com um simples parafuso, dois cabos são fixos para formação da rede.

Esticadores - Esticadores comuns podem ser utilizados para gerar a tração final de um cabo. Tendo-se em conta o pouco encurtamento de corda que proporcionam, os cabos devem ser conectados a um esticador desse tipo já com um certo nível de

tração, para que o encurtamento gerado pela tração final seja menor que a capacidade total do esticador. Outros equipamentos de tração como talhas, catracas de tração, ou guinchos de alavanca podem ser utilizados para gerar a tensão inicial.

2.2.3 Formas de Construção

As coberturas com redes de cabos podem ser divididas, segundo a forma de sua construção, em: coberturas com redes construídas no ar e coberturas com redes montadas em solo. Projetos utilizando perímetros flexíveis têm a rede de cabos usualmente montada em solo; projetos com perímetros rígidos podem ter a rede tanto montada em solo como no ar (BUCHHOLDT, 1985 *apud* TIBERT, 1999, p. 15).

As primeiras, as redes montadas no ar, cujas técnicas construtivas foram desenvolvidas ao longo da década de 1950, fazem uso de um perímetro existente, normalmente rígido, em sua posição final no edifício. A partir desse perímetro, cabos são suspensos ligando pontos opostos, e, posteriormente, cabos de tração são dispostos ortogonalmente, formando, desse modo, uma malha com duas camadas de cabos os quais dão origem a linhas geodésicas¹⁶ na superfície (TIBERT, 1999, p.65).

Hatton (1979, p. 118), fazendo referência à construção da Arena de Raleigh, exemplifica bem esse processo construtivo: a rede de cabos de aço foi montada cabo por cabo, sendo primeiramente postos os cabos de suporte, unindo os arcos parabólicos e, depois, os cabos de tração unindo extensões entre um mesmo arco. A intersecção entre dois cabos foi fixa com presilhas metálicas. A malha, formada por polígonos quadrangulares de aproximadamente 1,90 x 1,90m, que seria posteriormente coberta com uma manta fibrosa revestida com pintura de alumínio

¹⁶ Linha geodésica é aquela que une dois pontos sobre determinada superfície fazendo o menor percurso possível.

com garantia de dez anos, recebeu uma cobertura com chapas metálicas perfiladas atendendo às normas construtivas dos EUA.



Ilustração 16 - Arena Escandinava, Suécia, 1969. Reproduzida de (TIBERT, 1999, p. 126)

Na ilustração, após a fixação dos cabos no anel elíptico de concreto, vê-se a rede de cabos sendo recoberta com chapas metálicas perfiladas. Em cada cruzamento de cabos, uma presilha do tipo simples, vista na ilustração 15 à esquerda, fixa o ponto de cruzamento na intersecção dos percursos geodésicos dos cabos.

Ainda na década de 1950, em decorrência do sucesso dessa obra, vários projetos surgiram com propostas influenciadas por seu *design* e seu funcionamento estrutural, vindo criar a consistência de um movimento tecnológico que chega com plena força aos dias de hoje.

No Brasil, como sucessores imediatos, seguindo a fórmula construtiva encontrada na obra de Raleigh, surgiram o Pavilhão de Exposições do Rio Grande do Sul em São Paulo, em 1954, e o Pavilhão da Exposição Internacional de Indústria e Comércio de 1960, conhecido como Pavilhão de São Cristóvão, na cidade do Rio de Janeiro (PAULETTI, 2003, p. 27). No Brasil, ainda hoje, esse processo de construção continua sendo a única forma considerada pelos engenheiros para a execução de projetos com redes de cabos de aço.



Ilustração 17 - Pavilhão de São Cristóvão, Brasil, 1960. Reproduzida de (PAULETTI, 2003, p. 28)

Um anel elíptico de concreto serve de perímetro tridimensional para a fixação dos cabos dessa cobertura de 250m de vão livre. Cabos de suporte são dispostos paralelamente ao eixo menor e os cabos de tração paralelamente ao eixo maior.

Como um dos raros exemplos de rede de cabos construída no ar com bordas livres, tem-se a concha acústica Sidney Myer, realizada em 1958 em Melbourne, Austrália. Nessa obra, utilizou-se mesmo processo de suspensão preliminar dos cabos de suporte, com posterior protensão por cabos de tração. A grande diferença em relação às obras anteriores é o fato de apresentar um feixe de cabos como elemento de perímetro da estrutura, em substituição aos arcos de concreto até agora vistos como base para fixação da malha.

Ainda seguindo a mesma linha construtiva de montagem no ar, a cobertura das piscinas olímpicas de Tóquio, em 1966, introduz o uso de cabos mestres catenários. Esses cabos principais são elementos de borda flexível que suportam uma rede de cabos partindo deles a um perímetro rígido de arcos semicirculares de concreto dispostos acima das arquibancadas (HATTON, 1979, p. 122).



Ilustração 18 - Concha acústica Sidney Myer. Reproduzida de (DREW, 1979 *apud* PAULETTI, 2003, p. 16) ; <<http://www.archmedia.com>> Acesso em 05/2004.

À esquerda, foto da época de inauguração; à direita, foto da reabertura após reforma em 2001.

Nas figuras, vê-se, em primeiro plano, a borda formada por um conjunto de cabos. Dessa borda, perpendicularmente partem cabos de suporte que seguem para fixação em um perímetro rígido disposto no solo atrás do palco. Em sentido ortogonal, cabos de tração partindo da lateral cruzam os cabos de suporte, tracionando-os, e são ancorados na lateral oposta, diretamente no solo.



Ilustração 19 - Ginásios da olimpíada de Tóquio, 1966. Reproduzida de <<http://www.ktaweb.com>> Acesso em 05/2004.

Em primeiro plano, o edifício das piscinas olímpicas de Tóquio, 1966.

A segunda maneira de se construir redes de cabos, processo que realmente interessa ao presente trabalho, é completamente diversa da anteriormente vista. Descoberta pelo arquiteto Frei Otto¹⁷ em 1958 (ROLAND, 1964, p. 160) e desenvolvida ao longo da década de 1960, no IL¹⁸, essa forma construtiva, apesar de exigir um maior trabalho nas fases de projeto, torna bem mais simples e rápida a construção real (VANDENBERG, 1998, p. 36); apesar de requerer uma cuidadosa padronização de corte e montagem dos cabos, permite utilizar malhas pré-fabricadas, inclusive industrialmente, em rolos, para a formação da rede (OTTO/RASCH, 1995, p. 94). A construção com redes pré-fabricadas industrialmente é uma boa maneira de se evitar erros de dimensionamento na posição das conexões, uma vez que os cabos são automaticamente mensurados por maquinário (TIBERT, 1999, p. 15).

Em 1961, Frei Otto foi convidado por Carsten Schröck a participar do projeto para uma igreja na cidade de Bremen-Grolland, Alemanha. O trabalho de Otto como colaborador consistia em determinar a forma estrutural mais favorável da cobertura, determinar o padrão de corte dos cabos, representar graficamente a solução adotada, bem como submeter modelos físicos de medição a diferentes estados de carga para obter dados para o início dos cálculos matemáticos do dimensionamento estrutural. Nessa ocasião, pela primeira vez, uma rede de cabos em malha com malha quadrada foi utilizada para cobrir um edifício. Ficou provado que uma rede plana do tipo poderia ser vantajosamente utilizada, pela capacidade apresentada de se deformar e gerar formas tridimensionais equilibradas a partir da mudança dos

¹⁷ Após uma viagem de estudos aos Estados Unidos, onde conheceu o projeto da Arena de Raleigh, de volta à Alemanha, dedica sua pesquisa de doutorado ao estudo das estruturas com cabos. Em 1954, publica *Das Hängende Dach* (As Coberturas Suspensas), a primeira publicação científica sobre o tema.

¹⁸ O Centro de Desenvolvimento da Construção Leve, criado em 1957 por Frei Otto, vem se tornar, em 1964, o Instituto de Estruturas Leves da Universidade Técnica de Stuttgart, IL.

ângulos de cruzamento dos cabos, com transformação dos quadrados formadores da malha em losangos, à medida que se distanciam dos eixos principais (ROLAND, 1964, p. 60). Essa propriedade de uma malha quadrada de desenvolver-se tridimensionalmente a partir de uma construção plana, aliada à possibilidade de pré-fabricação, transporte em rolos e montagem final como uma membrana, do solo, gera um grande potencial para a realização de coberturas retesadas, desde logo identificado por Frei Otto, que, a partir da obra de Bremen-Grolland, dedica-se ao desenvolvimento de técnicas utilizando esse tipo de rede de cabos em obras de coberturas com grandes vãos, visto que, na época, não havia membranas resistentes o suficiente para serem utilizadas estruturalmente devido às enormes cargas de tração atuantes nessas superfícies. Desse modo, foi concebido o uso de redes de cabos atuando como membranas estruturais capazes de resistir às maiores tensões exigidas em obras de grandes vãos (ROBBIN, 1996, p.12).

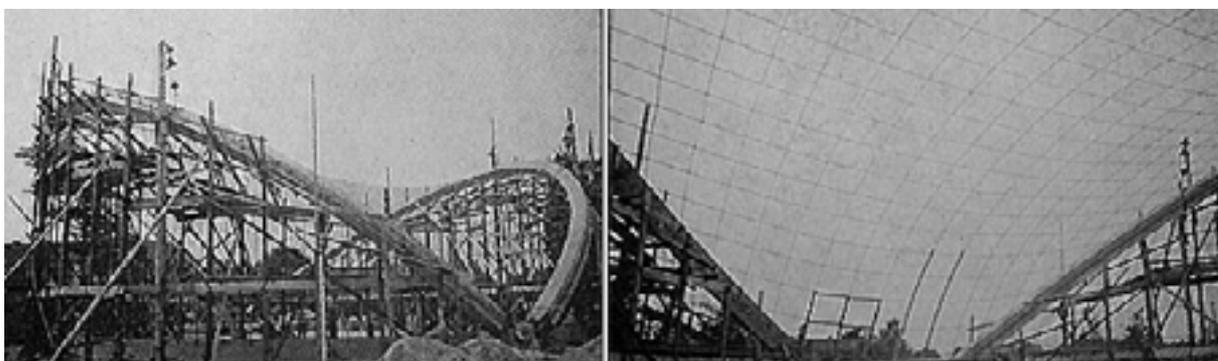


Ilustração 20 - Igreja evangélica de Bremen-Grolland, Alemanha, 1961. Reproduzida de (ROLAND, 1964, p. 61).

Na obra escrita de Otto, podem ser vistas alternativas potencialmente revolucionárias para o uso de redes de cabos pré-fabricadas em coberturas retesadas. Suas idéias são concretizadas em duas obras memoráveis para a história da arquitetura: o Pavilhão Alemão da Exposição de Montreal de 1967 e o Complexo Olímpico de Munique de 1972, ambas utilizando malhas quadradas de cabos de aço de 1/2".

Quando, em 1967, o Pavilhão da Alemanha Ocidental na Exposição Internacional de Montreal foi terminado, utilizando uma malha de cabos padrão de 50 x 50cm e tendo levado apenas 13 meses entre o projeto do edifício e sua montagem definitiva no local, ficou claro o potencial desse sistema construtivo (OTTO/RASCH, 1995, p. 94).



Ilustração 21 - Pavilhão de exposições da Alemanha Ocidental em Montreal. 1967. Reproduzida de (ISHII, 1999, p. 124); (OTTO / RASCH, 1995, p. 99).

Na ilustração vê-se a malha quadrada de 50 x 50cm que serve como esqueleto estrutural externo para a cobertura do edifício. Abaixo, uma membrana sintética de poliéster revestido com PVC protege o interior contra as intempéries.



Ilustração 22 - Complexo Olímpico de Munique, 1972. Reproduzida de <<http://www.greatbuildings.com>> Acesso em 09/2002.

À esquerda, vista da cobertura do estádio olímpico. Painéis de acrílico são utilizados para vedar a rede de malha 75 x 75cm.
À direita, vista geral do complexo.

No caso da obra do Estádio Olímpico de Munique, a malha da rede de cabos foi realizada com cabos gêmeos, tanto para permitir o uso de parafusos como conexões concêntricas, quanto para facilitar a mudança dos ângulos de cruzamento na deformação da rede (SCHIERLE, 2001, p.10). O tipo de conexão de cabos utilizado nessa obra pode ser visto na ilustração 15, à direita; o tipo de vedação da malha é explicado no item 2.2.5.

2.2.4 Configurações de Malha

Sendo as redes em malha aquelas em que cabos de aço cruzados e interligados nos pontos de cruzamento geram uma superfície que pode ser utilizada estruturalmente em coberturas, e em uma série de outras aplicações da construção civil, tratando-se de malha, relevantes aspectos dizem respeito à quantidade de camadas de cabos necessários para formá-la (VANDENBERG, 1998, p. 22), à forma geométrica e à regularidade dimensional dos segmentos entre os pontos de cruzamento dos cabos (ROLAND, 1964, p. 15).

Na prática, as redes em malha regular aplicadas na construção de coberturas arquitetônicas se dá pela sobreposição de apenas duas camadas de cabos, sendo essa a maneira mais econômica em termos de material e tempo de trabalho; isso permite torções e deformações da rede que não são possíveis em malhas regulares com mais de duas camadas de cabos, como, por exemplo, em malhas triangulares formadas por três camadas, já que a terceira camada trava a mudança de ângulos; essa terceira camada, quando usada, serve apenas como elemento para conferir maior rigidez a uma rede de duas camadas já em seu local definitivo.

Foram construídas estruturas de rede de cabos com três e quatro camadas de cabos, em padrão triangular, em torres de resfriamento de usinas nucleares, mas

nenhuma aplicação em coberturas arquitetônicas de dupla curvatura é conhecida (WAGNER, 2003, p.3).

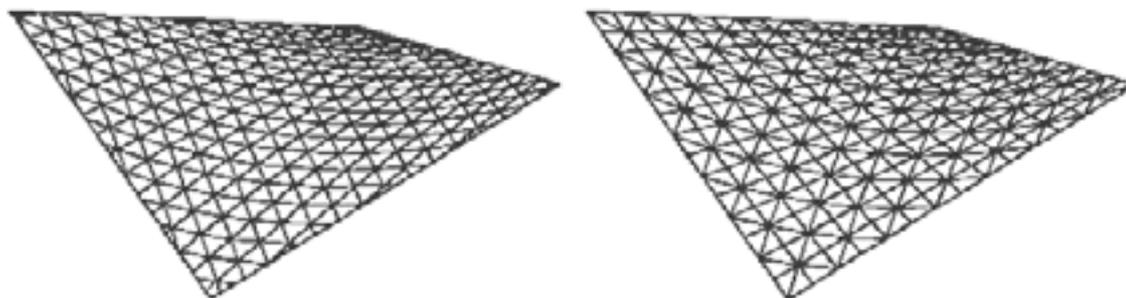


Ilustração 23 - Redes de cabos em malhas triangulares. Reproduzida de (WAGNER, 2003, p. 4).

À esquerda, uma rede com malha de três camadas de cabos.

À direita, uma malha com quatro camadas de cabos.

Em ambos os casos da ilustração 23, não é possível construir a rede plana regular e deformá-la posteriormente em uma superfície anticlástica; isso se torna possível apenas pela permissão de certa elasticidade para os cabos, o que é inviável na prática da construção com cabos de aço ou com outros materiais utilizáveis em construção civil.

Já as redes em malhas quadradas e hexagonais comportam-se de modo diferente: elas podem ser construídas planas e regulares, ou seja, possuindo todos os segmentos entre os nós com igual dimensão, e, como característica exclusiva, podem deformar-se tridimensionalmente em superfícies anticlásticas ou sinclásticas, de modo equilibrado, pela mudança dos ângulos entre os cabos, à medida que se afastam dos eixos principais de curvatura. No caso das malhas quadradas, o máximo de deformação é atingindo nas regiões que se afastam diagonalmente aos cabos da rede (ROLAND, 1964, p. 123); no caso das malhas hexagonais, o máximo de deformação é atingindo nos pontos altos (suspensão) e baixos (ancoragem) da estrutura (WAGNER, 2003, p.3).

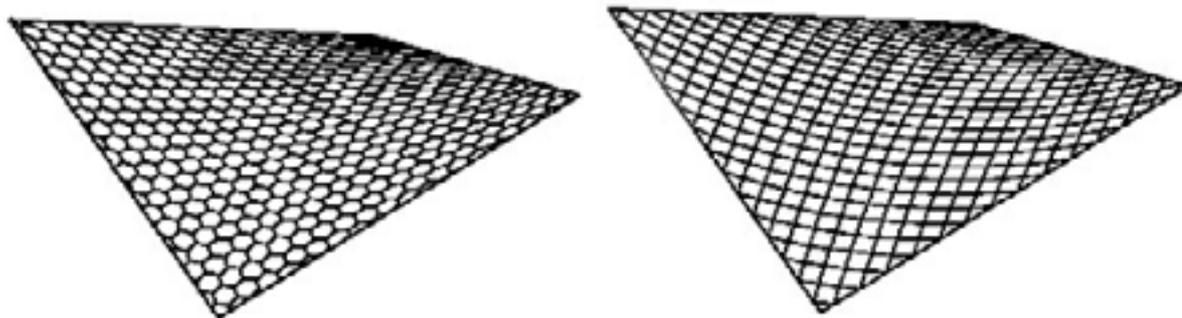


Ilustração 24 - Redes de cabos em malhas hexagonal e quadrada. Reproduzida de (WAGNER, 2003, p. 5).

A malha quadrada é a únicas utilizada na construção de coberturas retesadas com redes de cabos. Simples de ser construída pela simples sobreposição de duas camadas de cabos, essa configuração é a melhor dentre as malhas pré-fabricadas no que diz respeito à rigidez contra deformações quando possui os cabos orientados no sentido das maiores curvaturas, (WAGNER, 2003, p. 5).

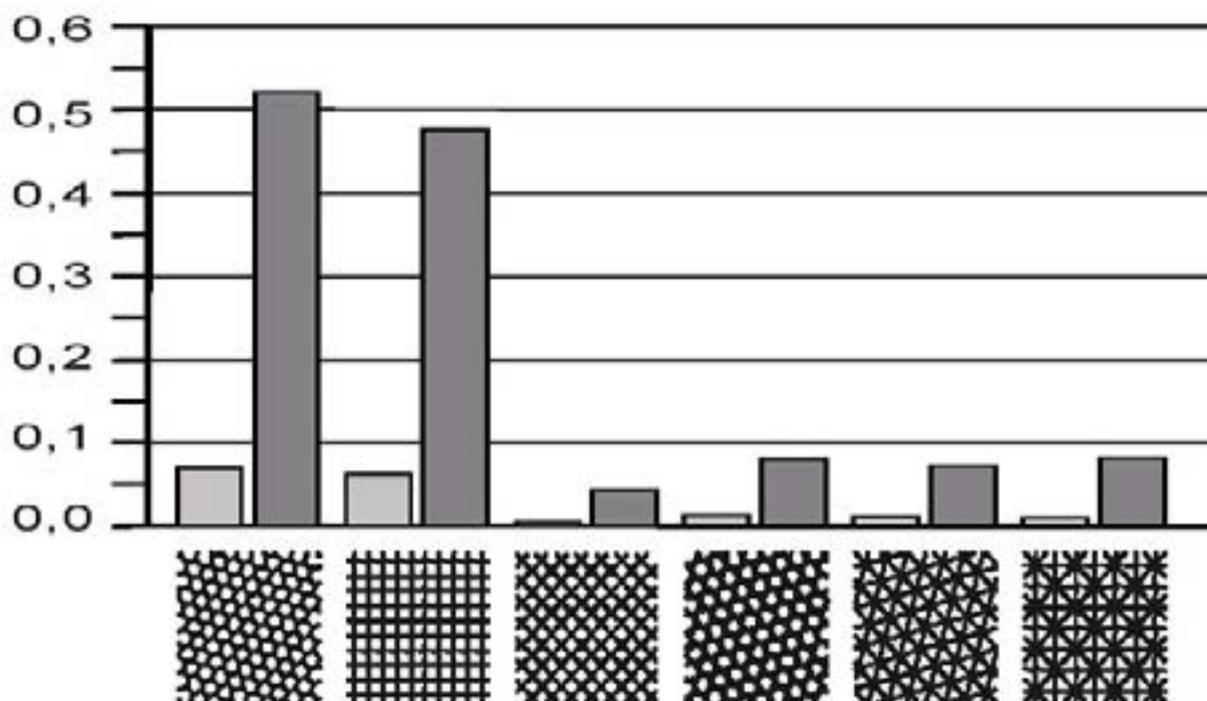


Ilustração 25 - Deformação das redes de cabos em diferentes malhas sob carga vertical uniformemente distribuída. Reproduzida de (WAGNER, 2003, p. 5).

Deformação mínima em cinza claro; deformação máxima em cinza escuro.

Na seqüência da esquerda para direita, tipos de malha: malha hexagonal, malha quadrada orientada no sentido das menores curvaturas, malha quadrada orientada no sentido das maiores curvaturas, malha com três camadas de cabos com os nós sobre o cruzamento de duas camadas, malha triangular com três camadas, malha triangular com quatro camadas.

Como já visto, ao contrário das redes em malha pré-fabricada, as redes de cabos construídas no ar possuem sua configuração de malha determinada pelo cruzamento tridimensional dos cabos de tração com os cabos de suporte, criando percursos geodésicos pela superfície da rede (TIBERT, 1999, p.65). Mesmo que a projeção de sua malha no solo seja ortogonal e uniforme, na realidade, as dimensões entre os nós e os ângulos de cruzamento mudam constantemente (ROLAND, 1964, p. 15), o que impossibilita sua pré-fabricação, ao tempo que exige cuidadosa inspeção das conexões, já que um erro de dimensionamento de 0,1% em segmento de cabo pode gerar diferenças de tensões da ordem de 50% (LEONHARDT /SCHLAICH, 1972b, *apud* TIBERT, 1999, p.65). Assim, uma forma de garantir precisão com o menor custo possível é utilizar redes com malhas quadradas (TIBERT, 1999, p.15).

2.2.5 Vedações da Malha

Suportados pela rede estrutural de cabos, diversos materiais podem ser utilizados como forma de vedação contra chuva e proteção solar. Otto (1958, pp. 68-77), já em 1954, descreve a possibilidade de utilização das estruturas de rede de cabos tensionados com fechamento à base de materiais rígidos como pranchas de madeira, concreto ou acrílico, assim como materiais flexíveis como membranas, mantas ou betume. O uso de materiais rígidos requer o uso de juntas capazes de absorver tensões resultantes das diferenças elásticas entre os materiais utilizados ou de acomodações da estrutura. Isso pode ser realizado por meio de sobreposições de painéis ou pelo uso de algum dispositivo flexível de junção (VANDENBERG, 1998, p. 35).

A seguir, os principais materiais utilizáveis para esse fim serão enumerados e sua utilização explicada sumariamente.

Chapas metálicas - As chapas metálicas perfiladas são uma recorrente forma de vedação das redes de cabos desde o aparecimento das coberturas com redes de cabos (VANDENBERG, 1998, p. 26). São fixadas diretamente nos cabos por meio de parafusos “U”, podendo trazer algum tipo de isolante térmico sobre uma camada simples ou entre duas camadas de metal, tipo “sanduíche”. Têm sido utilizadas sempre em redes de cabos com perímetro rígido e curvaturas suaves, entre 3% e 6% do vão. Coberturas como a da Arena de Raleigh (EUA), a da Arena Escandinava (Suécia) e a do teatro aberto Epidauro (Brasil), foram construídas com esse tipo de vedação bastante simples e eficiente em redes com perímetros rígidos e superfícies de pouca curvatura.

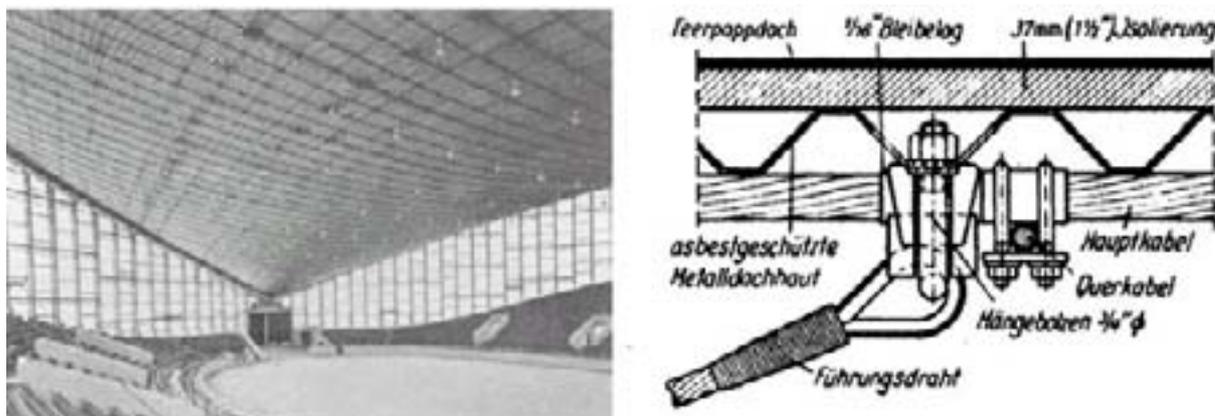


Ilustração 26 - Sistema de vedação da Arena de Raleigh. Reproduzida de (WAGNER, 2003, p. 1).

À direita, no detalhe, podem ser vistos: longitudinalmente, o cabo de suspensão e o cabo de estabilização contra o vento; e em corte, o cabo de tração, a chapa metálica perfilada, e as camadas isolantes da cobertura.

Painéis - Placas de concreto, painéis metálicos, sintéticos ou mistos podem ser utilizados como vedação de redes de cabos. No Domo Olímpico de Calgary, Canadá, painéis de concreto pré-moldado com juntas vedadas com concreto moldado *in situ* foram utilizados para cobrir um vão de 135 metros (VANDENBERG, 1998, p. 14).

Para cobrir o complexo olímpico de Munique das olimpíadas de 1972, utilizaram-se painéis de acrílico fixados e vedados com borracha neoprene, permitindo

acomodações da rede sem prejudicar a integridade do acrílico. O recobrimento, junção e suporte dos painéis, no entanto, além de custarem caro e permitirem aquecimento em determinadas áreas públicas, apresentam um resultado considerado feio por alguns autores. Assim, é improvável que venham ser novamente utilizados (TIBERT, 1999, p. 23). De forma semelhante, poder-se-iam utilizar painéis de policarbonato, chapas metálicas lisas ou painéis revestidos com alumínio.

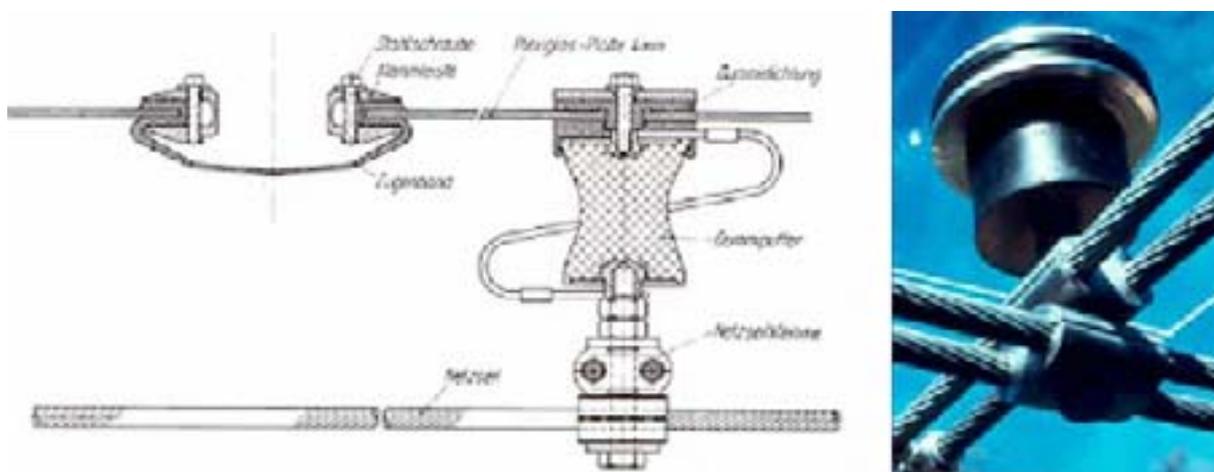


Ilustração 27 - Sistema de fixação e junção dos painéis de vedação da cobertura do complexo olímpico de Munique. Reproduzida de (SCHIERLE, 2001, p. 10).

À esquerda, no detalhe, podem ser vistos: em corte, os cabos gêmeos e presilhas, os painéis de acrílico, a junção dos painéis em neoprene, e os elementos de fixação dos painéis em cada ponto de cruzamento dos cabos, em neoprene e alumínio.

À direita, foto do detalhe de fixação dos painéis e cruzamento dos cabos.

Vidro - A vedação de redes de cabos com vidro é uma tarefa muito delicada que exige extrema precisão. De fato, existe apenas uma em todo o mundo¹⁹: a “*heart tent*”, cobertura da fonte do Clube Diplomático de Riyadh, Arábia Saudita. Desejando-se uma longevidade acima de 100 anos para a estrutura (OTTO, 2002), foram utilizados 2.020 painéis de vidro, 202 painéis para cada um dos 10 segmentos radiais da tenda, diretamente aplicadas sobre uma malha de cabos de aço

¹⁹ O Sony Center em Berlim é recoberto parcialmente com vidro, porém, essa estrutura de cabos, que não é do tipo rede de cabos em malha, possui elementos rígidos metálicos para suportar as peças de vidro.

inoxidável. Cada painel é fixado por oito presilhas, duas em cada aresta, deixando-se um pequeno espaço entre vidro e aço para evitar tensões no frágil material (VANDENBERG, 1998, p. 83), tendo em consideração a finalidade da cobertura apenas como proteção solar.

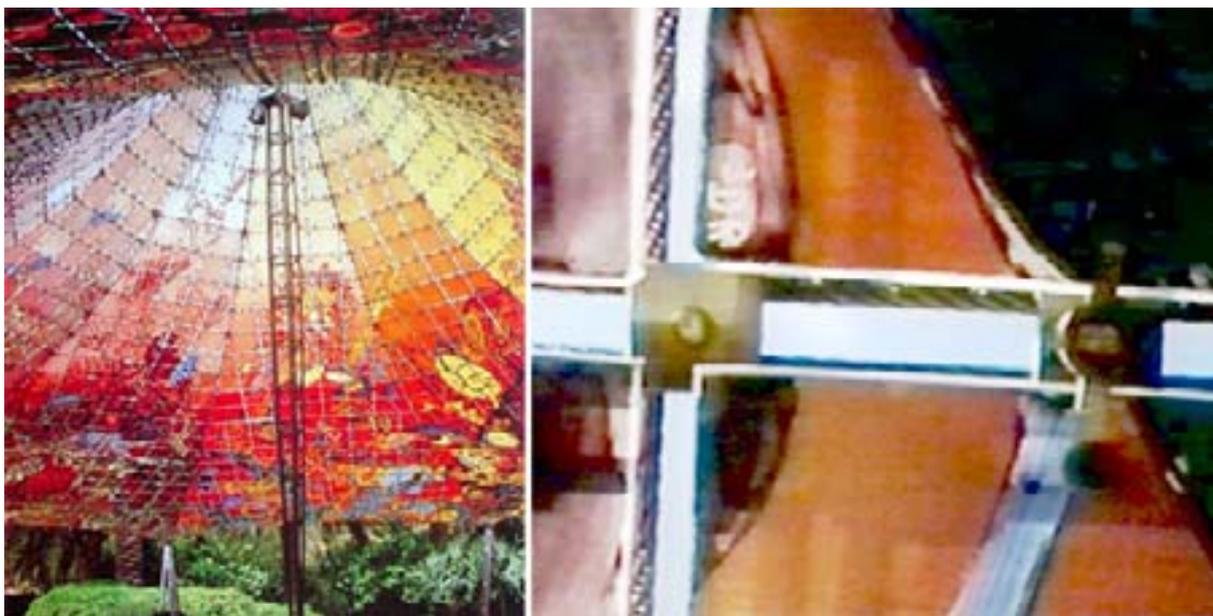


Ilustração 28 - Heart Tent. Fixação do vidro na rede. Reproduzida de (OTTO/RASCH, 1995, p. 88); (TENSION... , 1990).

À esquerda, vista interior.

À direita, detalhe da fixação do vidro nos cabos.

Madeira - Pode ser utilizada em forma de barrotes, fixados seguindo trajetórias dos cabos de aço, formando uma grade para fixação de vários tipos de materiais, inclusive tábuas de madeira que são largamente utilizadas (VANDENBERG, 1998, p. 29), fazendo uso de simples pregos, de maneira muito prática. Pode ser utilizada como vedação propriamente dita ou apenas como base para fixação ou sobreposição de outros materiais.

A sede do IL, Instituto de Estruturas Leves em Stuttgart, Alemanha, é um bom exemplo dessa aplicação. Criada como uma estrutura de teste para o pavilhão da Alemanha Ocidental em Montreal, em 1967, foi utilizada para pesquisas com recobrimentos permanentes durante dois anos, antes de ser instalada

definitivamente em seu local atual (OTTO/RASCH, 1995, p. 102). Apesar de terem sido estudados recobrimentos com painéis, acabou sendo utilizados barrotes de madeira de 1” por 3”, fixados à rede de cabos com ganchos “J”, que suportavam uma camada de tábuas que consistia na cobertura exposta. Sobre essa cobertura, camadas de isolante, compensado e cimento completavam a vedação (MEDLIN, 1999, p. 53).



Ilustração 29 - Interior da sede do IL. Reproduzida de (OTTO/RASCH, 1995, p. 104).

Membranas e filmes sintéticos - Podem ser utilizados de várias formas. Tomando-se uma grade de madeira como base, podem ser pregadas diretamente, dispensando-se prévia padronização do material, como pode ser visto na cobertura da pista de patinação de Munique construída por Jörg Schlaich (SCHIERLE, 2001, p.14).

Outra maneira, utilizada na obra do pavilhão alemão de Montreal de 1967, como pode ser visto na ilustração 21, é dispor uma cobertura de membrana sob a malha de cabos, suspensa por vários pontos distribuídos por toda superfície, deixando um espaçamento de aproximadamente 50cm entre os dois materiais, com finalidade de

evitar atrito e possível danificação da membrana (OTTO/RASCH, 1995, p. 96). Essa membrana deve estar retesada suficientemente para resistir aos efeitos aerodinâmicos do vento, mas não necessita contribuir estruturalmente para rigidez do conjunto.

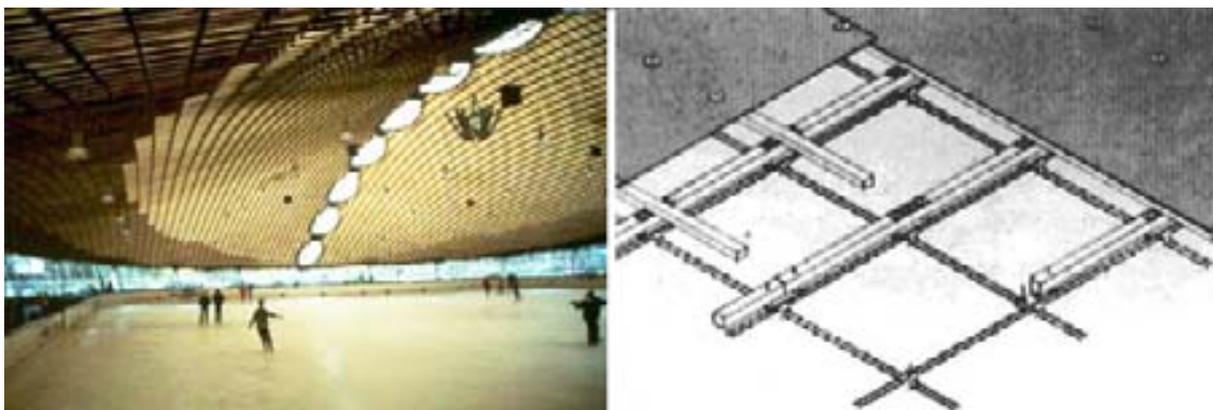


Ilustração 30 - Pista de patinação de Munique. Sistema de vedação da cobertura. Reproduzida de (SCHIERLE, 2001, p.14).

À esquerda, o interior do edifício.
À direita, o sistema de vedação da cobertura.

No caso do Palácio de Esportes de Jeddah de 1980, Arábia Saudita, duas camadas de membrana de PVC foram dispostas, uma acima e outra abaixo de uma malha de cabos, formando um colchão de ar que serve como isolante termo-acústico (TENSION... , 1990).



Ilustração 31 - Interior do Palácio de Esportes de Jeddah. Reproduzida de (OTTO/RASCH, 1995, p. 88); (TENSION..., 1990).

À esquerda, vista com apenas a camada externa de membrana de PVC.
À direita, finalizado, com a camada interna de PVC.

Atualmente, filmes de ETFE²⁰ vêm sendo incorporados às estruturas de redes de cabos formando colchões de ar entre a malha. Essa solução é particularmente interessante porque dispensa padronização de corte do filme para a formação do colchão, uma vez que o sistema básico consiste na sobreposição de duas camadas planas, que fixadas e vedadas nas bordas em um perímetro de perfis de alumínio, infladas com ar, adquirem a forma final de trabalho (ROBBIN, 1996, p. 104).

2.3 Modelagem Física em Coberturas Retesadas

2.3.1 Generalidades

Modelos físicos sempre foram uma das principais ferramentas de auxílio em projetos realizados pelo homem; assim também ocorreu em arquitetura e engenharia. Seja para apresentação e experimentação formal, para análises físicas, para extração de dados estruturais geométricos e de cargas, a modelagem física sempre veio servir a propósitos que, por outro meio, não podiam ser realizados.

Uma das notáveis descobertas envolvendo o uso de modelos físicos para estudos estruturais em construção civil foi realizada por Robert Hooke na década de 1670. Essa descoberta consistia na idéia de que a definição da forma de um arco livre de momentos poderia ser encontrada pela simples inversão de uma catenária, ou seja, pela inversão da geometria resultante de uma corda ou corrente suspensa entre dois pontos, sujeitas apenas ao seu peso próprio (PAULETTI, 2002, p. 2). A aplicação dessa descoberta em construção de coberturas coube inicialmente a Christopher Wren na construção da cúpula da catedral de Saint Paul, em Londres, entre 1697 e 1710. No entanto, foi Giovanni Poleni quem realizou os primeiros estudos com

²⁰ Etileno tetrafluoroetileno, registrado pela indústria química Dupont na década de 1970.

modelos de correntes suspensas; ele acrescenta pequenos pesos às correntes representando o peso de diferentes partes da cúpula (OTTO, 1985, p. 55).

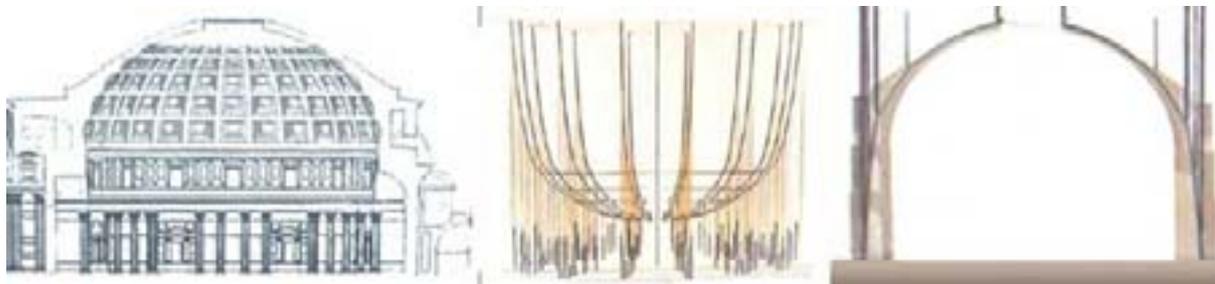


Ilustração 32 - Modelos suspensos do Panteão. Estudos do IL. Reproduzida de (OTTO/RASCH, 1995, pp. 152;153)

À esquerda, seção do domo em desenho.

Ao centro, modelo tridimensional suspenso. Escala de cor invertida.

À direita, modelo bidimensional suspenso. Fotografia girada em 180°. Escala de cor invertida.

Heinrich Hübsch, a partir de 1833, foi o primeiro a utilizar sistematicamente modelos suspensos para a construção de cascas, tendo utilizado esse novo método de definição da forma para construir várias igrejas. Antônio Gaudi e seus célebres modelos suspensos em três dimensões marcam, entre 1852 e 1926, uma nova fase na utilização do método de modelos suspensos, já que os utilizava para experimentação formal e estrutural, e não apenas para o desenho das formas (OTTO, 1985, p. 55).



Ilustração 33 - Modelo suspenso de Antonio Gaudi. Colonia Güell. Reproduzida de (OTTO/RASCH, 1995, p. 154)

À esquerda, modelo original trabalhado por 10 anos.

Ao centro, modelo suspenso reconstruído no IL.

À direita, pintura de Gaudi com base em fotografia de seu modelo.

Essas técnicas com modelos suspensos continuaram a ser desenvolvidas pelo trabalho de Frei Otto e do IL nas décadas de 1950, 60 e 70 para o estudo da forma de cascas delgadas (OTTO/RASCH, 1995, p. 62-63).

2.3.2 Aplicação em Coberturas Retesadas

Os primeiros projetos de coberturas com redes de cabos consideravam cabos suspensos entre dois pontos, posteriormente tracionados por cabos ortogonalmente dispostos. Essa disposição de um cabo sujeito a cargas uniformemente distribuídas, de cálculo estático relativamente sofisticado desde 1888 (PAULETTI, 2002, p. 3), possui fácil entendimento por parte dos calculistas. O cálculo de uma rede espacial de cabos interligados, no entanto, consiste em um problema mais complexo que o de sistemas planos. Assim, envolvendo a construção das primeiras obras de redes de cabos como a Arena de Raleigh, entre várias outras obras, fez-se presente o pioneirismo de engenheiros que, na época, não possuíam meios científicos de valorar com exatidão as cargas decorrentes de uma organização tridimensional de cabos interligados.

Devido à complexidade formal que assumiram as estruturas retesadas com o passar do tempo, principalmente pelo trabalho de Frei Otto, pioneiro em projeto e construção de estruturas retesadas de membrana e de redes de cabos em malha quadrada, a modelagem física foi o único meio capaz de resolver os problemas relativos à construção dessas estruturas²¹ até 1969, quando o Estádio Olímpico de Munique estava prestes a ser construído (LEONHARDT/SCHLAICH, 1972a, *apud*

²¹ Segundo (MONCRIEFF & TOPPING, 1990, *apud* OLIVEIRA/BARBATO, 2002, p. 7), excluem-se aqui as estruturas pneumáticas as quais, dada a simplicidade de suas formas e a dificuldade de obtê-las com modelos físicos, utilizou principalmente a modelagem geométrica como meio de realização. Porém, segundo as experiências com modelagem física descritas em (OTTO/RASCH, 1995, p. 60-61;113-126), a modelagem física pode ser aplicada com eficiência a projetos de estruturas pneumáticas de maior complexidade.

TIBERT, 1999, p.42). Notáveis procedimentos foram desenvolvidos por Otto e por pesquisadores do Instituto de Estruturas Leves para gerar dados científicos a partir de modelos reduzidos de precisão. No entanto, devido ao demorado e meticuloso trabalho, bem como às limitações e incertezas que sempre se apresentaram a essa abordagem, principalmente quando voltada a grandes projetos, foi inevitável sua gradual substituição pelos novos recursos computacionais utilizando equações matemáticas.

Seja em modelagem das formas anticlásticas, esforços dinâmicos e padronagem de corte para montagem das superfícies, o trabalho com modelos físicos reduzidos foi decisivo para o desenvolvimento e aceitação da tecnologia das estruturas retesadas, uma vez que, após várias realizações tendo por base estudos com modelos físicos e cálculos matemáticos aproximados, os engenheiros ficaram desafiados a calculá-las (PAULETTI, 2003, p. 18).

Ainda hoje, a maioria dos profissionais envolvidos em projetos e construção de estruturas retesadas utiliza modelos de tela fina de nylon nas fases preliminares de projeto, dado o fato da manipulação de modelos físicos, desde cedo, permitir uma fácil visualização do comportamento conjunto das várias partes de uma estrutura, do comportamento dos materiais e do processo de montagem da estrutura. O trabalho com modelos físicos permite uma avaliação de estabilidade sem a necessidade de descrição racional do fenômeno (WAGNER, 2003, p. 1).

Com o surgimento de métodos matemáticos, as decisões de projeto passaram a ser, gradativamente, tomadas com base em simulação numérica computacional, no entanto, nunca serão obsoletos os modelos físicos pela excelente visualização com eles conseguida (MONCRIEFF & TOPPING, 1990, *apud* TIBERT, 1999, p. 42). A utilização de modelos físicos deve persistir como meio auxiliar de análises

preliminares em grandes projetos, ou como meio executivo de baixo custo em pequenos projetos, visto que sua competitividade econômica deve perdurar por algum tempo (PAULETTI, 2003, p. 176).

Em projetos com redes de cabos em malha quadrada, a construção de modelos físicos ainda é a base para a construção inicial da malha em modelos numéricos computadorizados de grande complexidade (TIBERT, 1999, p. 74). Tendo-se em vista que uma malha quadrada em seu estado plano pode diferenciar-se em muito da mesma deformada tridimensionalmente; superfícies apresentando grandes curvaturas podem ser facilmente resolvidas numericamente com base em um arranjo preliminar da malha dado por um modelo físico (LEWIS/GOSLING, 1993 *apud* TIBERT, 1999, p. 47).

2.3.3 Meios de Modelagem

Os primeiros materiais utilizados para a construção de modelos de estruturas retesadas por Frei Otto foram tecidos elásticos, películas de borracha, fios e correntes finas. As técnicas e materiais evoluíram com o tempo, até atingir alto nível de refinamento em eficiência e precisão.

Tecidos elásticos e borracha - Foram utilizados como base para os primeiros estudos de forma de superfícies anticlásticas. Serviam como meio para manipulação na etapa de definição do projeto, como base para os desenhos de apresentação do projeto, e como base para a construção de modelos de medição, maiores e mais precisos (ROLAND, 1964, p. 1).

Desenhando-se um reticulado sobre um tecido ou sobre um filme de borracha em seu estado sem protensão, os níveis de deformação na superfície podem ser visualizados. Em uma distribuição homogênea de tensões, a vista de topo de um modelo tridimensional deve apresentar o mesmo reticulado que a vista de topo do

material plano em seu estado natural: as componentes horizontais não se deformam se apenas cargas verticais são aplicadas ao tecido (OTTO, 1958, p. 21). Assim, havendo apenas deformações verticais, há deformações no reticulado em vistas frontais, mas não de topo.

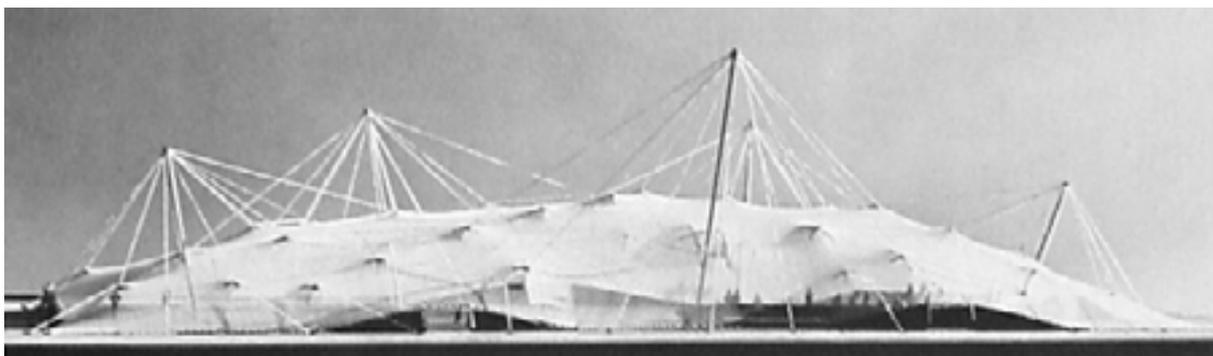


Ilustração 34 - Modelo de tecido elástico suportado por cabos e lamelas. Reproduzida de (OTTO/RASCH, 1995, p. 85)



Ilustração 35 - Modelos com tecidos elásticos. Retícula de deformações. Reproduzida de (TENSION..., 1990).

À esquerda, modelo com arco.

À direita, detalhe de um modelo com suporte em corcova.

Fios, correntes e arames - A execução de modelos com esses materiais tem início com a criação das bordas flexíveis com correntes finas. Em seguida, com um mesmo longo fio, inicia-se a construção da rede, tramando o fio entre os orifícios da corrente, começando dos pontos altos aos baixos, chegando-se à forma final com freqüentes reajustes das tensões da malha (OTTO, 1958, p. 108).

O fato de tratar-se de superfícies complexas em curvaturas opostas exige o uso de plantas de cotas de nível para descrição técnica dos projetos. Os modelos de correntes e arames criam uma base para a medição precisa de cotas de nível da superfície. Uma vez realizada a planta altimétrica, uma volumetria rígida pode ser gerada com materiais como madeira, gesso e alumínio, de igual geometria ao modelo de medições, que serve à fase de padronização de corte em projetos com membrana.

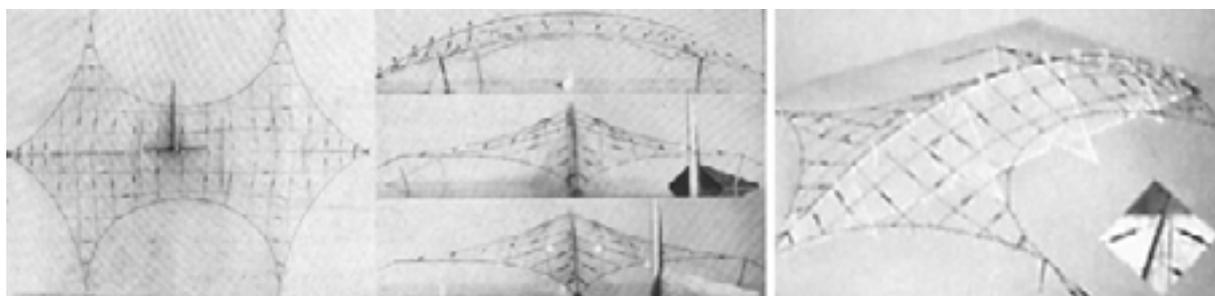


Ilustração 36 - Modelo de correntes e arames. 1956. Reproduzida de (ROLAND, 1964, p. 56); (OTTO/RASCH, 1995, p. 78).

À esquerda, vista de topo; ao centro, vistas frontal e laterais.
À direita, perspectiva.

No caso de projetos com redes de cabos em malha quadrada, são utilizados modelos retesados de arames como base executiva para o projeto. Esses modelos, que evoluíram do uso de fios e correntes, são utilizados para reprodução da forma, retesamento, medição de cargas e medição de cotas de nível. Modelos com arames e correntes são construídos com precisão; nos melhores casos a representação gráfica desses modelos atinge precisão de 0,1mm (ROLAND, 1964, p. 57).

Para projetos de redes de cabos em malha quadrada, os modelos com fios de arame são diferenciados em relação aos utilizados em projetos de coberturas retesadas em geral, devendo considerar desde o início, a topologia da rede, ou seja, a ligação entre os cabos e a distância entre os segmentos, como uma restrição no trabalho de busca da forma. Assim, o modelo é construído com malhas pré-fabricadas (MEDLIN,

1999, p. 52) e não com fios individuais, sob pena de apresentar diferenças dimensionais nos segmentos entre os nós.

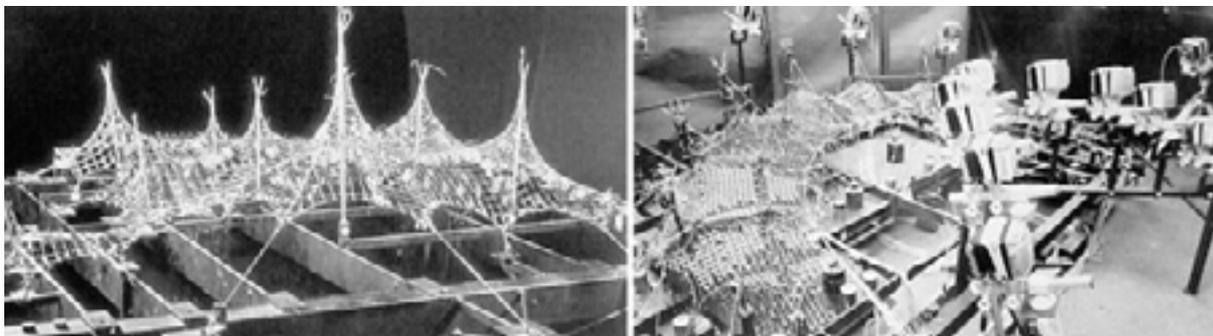


Ilustração 37 - Modelos de arame. Reproduzida de (OTTO/RASCH, 1995, pp. 96;107).

À esquerda, modelo de medições do pavilhão alemão em Montreal. Escala 1:75.

À direita, modelo de medições da cobertura do estádio olímpico de Munique. Esc. 1:125.

Esses modelos podem ser realizados com uma quantidade de cabos reduzida em relação ao modelo real por meio da utilização de uma malha grosseira. Assim, adotando-se um espaçamento real de 50cm, o espaçamento de malha no modelo de medição pode ser aumentado para um múltiplo de 50cm, em escala, reduzindo-se o número de arames.

Filmes líquidos - Na fase de busca da forma, o uso de modelos físicos foi elevado a um novo patamar de eficiência e sutileza quando, em 1963, Frei Otto descobriu que películas de líquidos, comumente reconhecidos como filmes de espuma de sabão, geram uma superfície mínima por meio de auto formação, unindo bordas fechadas de uma geometria qualquer (OTTO, 1985, p. 83).

Superfícies mínimas, claramente definidas matematicamente, são caracterizadas por criarem a menor superfície entre um dado perímetro, por apresentarem tensão igual em todos os pontos da superfície e por assumir formas anticlásticas ideais para a concepção de coberturas retesadas de membranas ou malha de cabos (OTTO/RASCH, 1995, p. 58). Como base da técnica de modelagem com filmes líquidos encontra-se a certeza de se conseguir as formas dos projetos sem regiões

sub ou super tensionadas. O desenvolvimento de métodos de definição da forma sempre foi acompanhado por uma acirrada discussão sobre distribuição isotrópica (uniforme) ou anisotrópica (não uniforme) de tensões pela superfície. Um argumento contra o uso de superfícies mínimas é o fato de não se poder construí-las com faixas de membranas ou filmes, já que a junção das faixas sempre quebrará a uniformidade da distribuição de tensões, sendo a superfície resultante ligeiramente diferente da superfície concebida (WAGNER, 2003, p. 2).



Ilustração 38 - Modelos de filmes líquidos. Superfícies mínimas. Reproduzida de (TENSION..., 1990).

À esquerda, uma superfície mínima com igual tensão por toda superfície é auto formada pela película líquida de espuma de sabão entre as arestas de dado perímetro.

Ao centro, uma configuração estável das tensões na superfície.

À direita, uma configuração prestes ao colapso: um pequeno distanciamento vertical dos dois aros dará origem a uma diferença de tensões na película não suportada pela mesma, que se romperá.

2.2.4 Busca da Forma para Redes em Malha Quadrada

Os procedimentos de busca da forma com modelos físicos para coberturas com rede de cabos em malha quadrada são, a princípio, os mesmos utilizados para coberturas com membranas em geral. Esses procedimentos foram sendo estabelecidos ao longo da década de 1960, chegando a certa padronização no final da década após o projeto do pavilhão alemão de Montreal em 1967, que demandou a construção de numerosos modelos completos e de partes específicas (OTTO/RASCH, 1995, p. 96). Os procedimentos utilizando técnicas de modelagem física podem ser encadeados da seguinte forma:

Etapa 1 - São feitos modelos com telas elásticas finas de nylon, como parte preliminar do estudo da forma, para se definir o projeto arquitetônico e estabelecer

os perímetros gerais das formas a serem construídas com membranas ou redes de cabos. A facilidade e flexibilidade de manipulação desses modelos favorecem seu uso como modelos brutos primários, sem muitas preocupações técnicas.

Etapa 2 - Definidos os perímetros e as formas básicas do projeto realiza-se um modelo com filmes líquidos que serve de base para o refinamento das formas (TIBERT, 1999, p. 42). Esses modelos devem ser feitos em uma escala bastante reduzida uma vez que há limitações dimensionais para a formação das películas.

- As bordas encontradas com o modelo de tela devem ser construídas com arames (se representarem elementos rígidos) ou fios bastante flexíveis (se representarem elementos flexíveis).
- Quando esse perímetro do modelo é imerso e retirado de um recipiente contendo água e algumas gotas de detergente ou fluidos para bolhas, a auto formação de uma membrana entre esses elementos de borda garante a validade da configuração encontrada com os modelos de tela.
- Se não for formada a película, devem ser realizados alguns ajustes nos elementos de borda ou na altura de alguns pontos fixos, para, novamente, submeter-se o modelo à imersão no líquido.
- Uma vez confirmada ou remodelada a forma pelo modelo de filme líquido, deve ser feito seu registro fotográfico para anotação dos contornos. Isso é realizado incidindo uma luz paralela sobre o modelo frente a um fundo quadriculado, de modo a projetar as reais dimensões do modelo na quadrícula sem distorções fotográficas (OTTO/RASCH, 1995, p. 58-59).



Ilustração 39 - Modelos de filmes líquidos. Registro da forma. Reproduzida de (OTTO/RASCH, 1995, pp. 58;76).

À esquerda, um modelo pronto para registro.

Ao centro, a máquina construída no IL para registrar fotograficamente modelos de filmes líquidos.

À direita, a projeção de luz paralela sobre um fundo quadriculado.

Etapa 3 - O modelo de medição é a base executiva do projeto e deve ser refinado até a melhor semelhança com os registros obtidos pela modelagem por filmes líquidos, ou seja, até a melhor distribuição de tensões. Em projetos de redes em malha quadrada, esse modelo deve ser realizado sobrepondo uma malha quadrada a um modelo de tela, ajustando-o à superfície deste e registrando o perímetro na malha para iniciar a reprodução da forma. A rede deve ser construída com arames como borda flexível ou elementos rígidos como borda rígida, e o modelo deve ser refinado por ajustes de borda, através do encurtamento e ajustes dos fios, e retesamento de cada arame individualmente até atingir a uniformidade de tensões na forma pretendida. Com base nesse modelo estimam-se as cargas atuando na estrutura, registram-se os pontos de mesmo nível para gerar uma planta altimétrica, auxiliar na padronização de corte (ROLAND, 1964, p. 58), e medem-se manualmente os segmentos de cabos para transposição de escala (MEDLIN, 1999, p. 52). Esses modelos devem ser construídos com fios não elásticos ou arames. Uma malha de precisão dimensional pode ser construída pela disposição e fixação dos fios sobre uma base quadriculada na escala desejada.

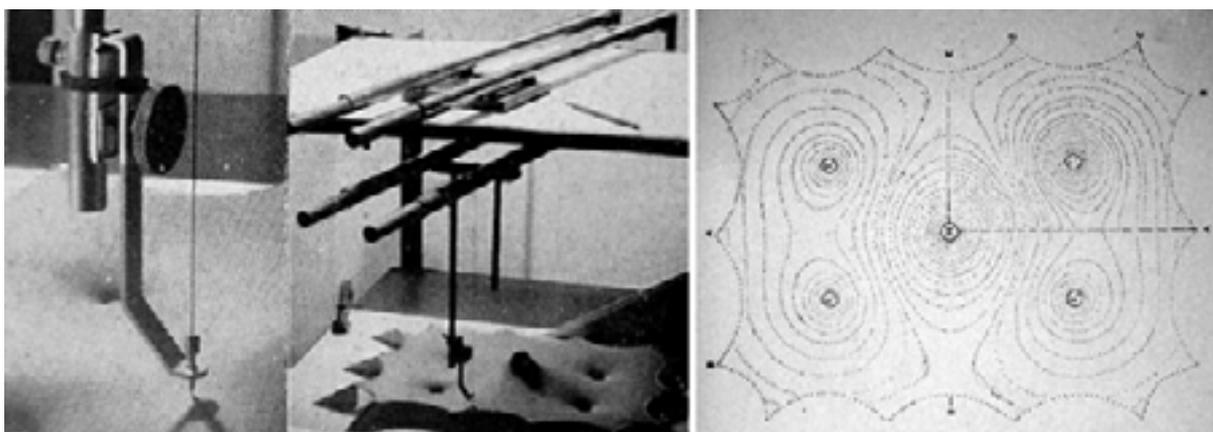


Ilustração 40 - Medidor de cotas altimétricas. Reproduzida de (ROLAND, 1964, p. 74).

2.2.5 Padronização de corte para Redes em Malha Quadrada

Os trabalhos de padronização de corte de superfícies de membranas realizados por Frei Otto utilizavam placas de alumínio fixadas verticalmente sobre uma base de mármore para reproduzir o perímetro tridimensional da superfície de interesse na volumetria. Esse contorno era preenchido com gesso, o qual seria moldado seguindo as linhas de nível da forma desejada (ROLAND, 1964, p. 57).

Tendo sido realizada essa base rígida, podiam ser representadas graficamente linhas geodésicas nas junções de faixa de lona e transpô-las em escala para um desenho executivo.

Para projetos de redes de cabos em malha o início da tarefa de padronização de corte é mais simples. O próprio modelo de medição, realizado geralmente com arame, é suficiente para se registrar e extrair as dimensões dos cabos, a organização dos elementos regulares da malha (quadrados), as dimensões dos segmentos não regulares da malha (ligados a perímetros) e as distâncias entre os pontos de fixação da malha no elemento de borda, ao longo deste. Um modelo físico de arame bem executado, ainda assim, apresenta pequenas diferenças em lados simétricos, validando-se a média aritmética entre pontos de simetria (ROLAND, 1964, p. 60).

Esses dados servem para a realização de desenhos de manufatura da rede, que podem ser representados graficamente em um plano, uma vez que a rede em malha quadrada, antes das deformações, é plana.

Caso tenha sido adotada no modelo uma simplificação da malha, multiplicando-se o espaçamento entre cabos, a planta final de padronização de corte inclui os cabos omitidos no modelo de medição. Na obra para as olimpíadas de Munique, apenas 1/4 dos cabos foi representado no modelo de medição (OTTO/ RASCH, 1995, p.107), significando um modelo com o número de cabos da malha quatro vezes menor que o desenho de padronização de corte, e um número de nós 16 vezes menor. Na obra do Palácio de Esportes de Jeddah de 1980, Arábia Saudita, apenas 1/5 dos cabos foi representado no modelo de medição, e no modelo computadorizado (TENSION..., 1990), significando, por sua vez, um modelo com o número de cabos da malha cinco vezes menor que o desenho de padronização de corte, e um número de nós 25 vezes menor. A simplificação da malha, uma maneira de economizar trabalho ou tempo de processamento na fase de busca da forma, deve ser corrigida na fase de padronização de corte, onde devem ser representados os comprimentos de cada cabo e o arranjo da malha no perímetro de borda.

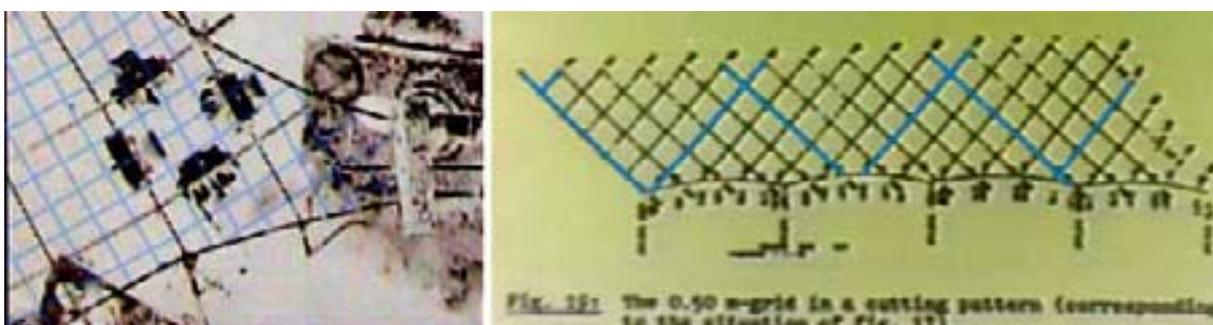


Ilustração 41 - Simplificação da malha e representação final. Base reproduzida de (OTTO/RASCH, 1995, p. 107); (TENSION..., 1990),

À esquerda, detalhe de um modelo de arame do complexo olímpico de Munique, esc. 1:125). Escala de cor invertida. Representação, em azul, dos cabos omitidos no modelo.

À direita, desenho executivo de padronização de corte, Palácio de Esportes de Jeddah. Escala de cor invertida. Destaque, em azul, para a proporção de cabos utilizados no modelo de arame, 1/5 do total.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, serão descritos os materiais e métodos empregados no estudo do processo de ajustes de borda como etapa suplementar do projeto geométrico de estruturas com redes em malha quadrada. Os níveis de tensão de linhas ou cabos nos modelos não serão objeto de interesse para o estudo, mas elementos com baixos níveis de retesamento serão inaceitáveis e explicitamente apontados, sempre que apareçam em algum dos modelos apresentados.

Na pesquisa, serão utilizados os seguintes materiais:

- Modelos físicos reduzidos de “grande” escala²² e baixo custo, realizados com tecido elástico (lycra), linhas com 100% de poliamida (nylon), cola instantânea, madeira, pregos e “percevejos” metálicos.
- Software Autocad²³.
- Modelo em escala real, construído com cabos de aço e tubos de aço galvanizado.
- Software para *form-finding* Tensocad²⁴.

A metodologia empregada será a seguinte:

- Busca da forma com modelo físico de tecido elástico (lycra).
- Padronização de corte por meio misto (físico, fotográfico e digital).
- Estudo da forma com modelo numérico computadorizado.
- Construção da forma com redes em malha quadrada, utilizando os desenhos de padronização de corte.
- Verificação da forma por comparação gráfica.

²² Com esses modelos de grande escala, substanciais melhoras são alcançadas em relação a modelos de pequena escala e diferentes problemas como ângulos dos mastros, conexões e limites da estrutura são resolvidos (MOLLAERT, 2003, p. 2)

²³ Autocad é produto registrado da Autodesk, Inc.

²⁴ Tensocad é produto registrado da Europe Engineering Division s.a.s.

3.1 Busca da Forma

O processo de busca da forma inicial será realizado de maneira sumária por meio de modelos de lycra realizados na escala de 1:10. O objetivo dessa etapa é gerar uma solução de equilíbrio que atenda à intenção de projeto. Uma vez realizada, fornecerá dados sobre o contorno aproximado de corte que deve ter uma malha quadrada para reproduzir a forma encontrada com modelagem em lycra.

Esse processo de busca da forma com modelagem em lycra poderia ser aperfeiçoado de várias maneiras. No entanto, o interesse deste estudo não é modelagem física de precisão, mais sim, a observação do potencial dos ajustes de borda na construção de redes em malha quadrada. Para poder observar o fenômeno de modo claro, este trabalho utiliza um método sumário para obtenção da forma a ser estudada.

As etapas do processo são resumidas a seguir:

- Desenho base do projeto arquitetônico, com os pontos de fixação e linhas de bordas, inclusive projeção de pontos e linhas situadas acima do plano de solo.
- Fixação do desenho base em uma prancha de madeira.
- Fixação dos elementos rígidos de suporte.
- Fixação do tecido em seus pontos de suporte e em seus pontos de ancoragem na prancha. Se a ancoragem for pontual utilizam-se apenas percevejos metálicos; se a ancoragem prolongar-se linearmente, uma linha interligando os percevejos deve ser criada com arame ou linha de nylon.
- Desenho dos contornos de borda no tecido, guiando-se pelo desenho base.
- Colagem de linha de nylon no tecido sobre o contorno de borda realizado na etapa anterior. A colagem deve ser feita pontualmente deixando-se um pequeno intervalo entre os pontos para permitir deformações do tecido. A

linha deve ser cortada com uma sobra de quinze centímetros após cada ponto de ancoragem, para permitir ser puxada manualmente até atingir o nível adequado de retesamento.

- Corte das sobras do tecido.
- Esticamento final das linhas.

3.2 Padronização de Corte

A etapa de padronização de corte de todos os modelos de malha quadrada aqui apresentados será realizada tomando-se como base a superfície inteira do modelo com lycra ou uma de suas partes simétricas. Esta servirá como gabarito para o registro manual de seu contorno tridimensional em uma rede de malha quadrada sobreposta e ajustada ao modelo. No presente trabalho, serão utilizadas redes de “seda” para pesca, de nylon, com malha de 11,5mm, escolhida por apresentar ótima flexibilidade, bem como regularidade dimensional e elasticidade desprezível na aplicação deste trabalho.

O uso de malhas finas nunca foi utilizado em modelos de precisão. De fato, a dimensão das malhas utilizadas nos modelos de arame de Frei Otto sempre foi múltipla, em escala, e não divisora das malhas a serem construídas na estrutura real. Essas redes prontas para pesca não conferem precisão ao processo, assim como não ajudará o uso de malhas de nylon²⁵ e o processo de registro fotográfico do contorno²⁶ da malha. Mas, como o que aqui se quer estudar é o potencial dos ajustes de borda como suplemento do projeto, considera-se adequada essa base de trabalho de baixa precisão.

²⁵ Desejando-se precisão é necessária a utilização de malhas construídas com fios metálicos.

²⁶ O registro fotográfico do perímetro pode dar margem a pequenas deformações no plano fotografado. Modelos de precisão de arame devem ser mensurados manualmente.

O objetivo desta etapa é gerar dados para construção de modelos com redes em malha quadrada formadas por linhas, fios ou arames. Os desenhos produzidos nessa fase serão diretamente utilizados na construção dos modelos de linha em escala 1:10, bem como de um modelo em escala real.

A padronização de corte segue os procedimentos resumidos a seguir:

- Análise inicial do padrão procurando orientar as linhas ortogonais da malha no sentido das maiores curvaturas, buscando tanto a melhor performance estrutural da rede²⁷ quanto as menores tensões possíveis para os cabos²⁸.
- Marcação de linhas geodésicas na lycra, representando os eixos de simetria do modelo, as maiores curvaturas da superfície e, caso a rede deva ser formada por partes interligadas, as junções de malha.
- Disposição de uma malha quadrada de nylon para pesca sobre a região do modelo de lycra a ser padronizada, coincidindo nó da malha sobre pontos de cruzamento das linhas geodésicas da lycra, e alinhamento dos quadrados sobre toda a extensão das linhas de simetria.
- Ajuste da malha sobre a superfície a ser padronizada.
- Marcação gráfica do contorno da região a ser padronizada na malha sobreposta e ajustada à superfície em lycra.
- Planificação da malha, procurando-se conseguir a perfeita disposição ortogonal entre as linhas da malha sobre um plano.
- Fotografia do contorno planificado marcado graficamente na malha.
- Reprodução gráfica do perímetro de contorno em meio digital, Autocad, transpondo-se a escala fotográfica para uma escala padrão.

²⁷ Wagner (2003, p. 4) conclui que a disposição de rede em malha com as menores deformações e com menor variação de forças atuando sobre os cabos é a que utiliza malha quadrada com os cabos orientados no sentido das maiores curvaturas.

²⁸ Otto (1958, p. 43) observa que as redes com seus cabos orientados no sentido das maiores curvaturas exigem menores forças de tração para que o sistema resulte rígido.

- Preenchimento do perímetro com hachura quadrada na dimensão desejada, preservando-se a orientação ortogonal da malha.
- Rebatimento de partes simétricas.
- Impressão da malha em escala 1:10 para a realização de modelos com linhas.

3.3 Ajustes de Borda

Com essa base de trabalho tão simples e com os procedimentos sumários adotados na busca da forma e padronização de corte, não se pode esperar obter dados de precisão para a execução de estruturas retesadas reais. Espera-se, no entanto, obter dados para a construção de modelos de precisão, ou mesmo obras reais de pequeno porte, desde que ajustes de borda sejam feitos ao longo dos pontos de ancoragem da malha. Os ajustes realizados nos modelos, exceto os explicitamente indicados, limitam-se ao deslizamento das presilhas de ancoragem ao longo da borda à qual se prendem. No presente trabalho, os ajustes experimentados e estudados serão apenas os ajustes por deslizamento em borda, ajustes por relocação, os quais não causam mudanças dimensionais nos elementos constantes na padronização de corte. Ainda que os ajustes por mudanças dimensionais nos segmentos de borda sejam o principal mecanismo utilizado no refinamento de modelos precisos de arame²⁹, e ainda que possam ser facilmente incorporados à construção real, no presente trabalho, serão considerados apenas como solução excepcional.

3.4 Verificação

A eficácia da modelagem em lycra na etapa de busca da forma será verificada por comparação gráfica com modelos computadorizados produzidos pelo software

²⁹ Os modelos de arame utilizados por Frei Otto eram refinados por ajustes de borda com mudanças dimensionais dos segmentos de cabos. Uma vez encontrada a melhor distribuição de tensões na malha, o modelo era mensurado manualmente. (MEDLIN, 1999, p. 52).

Tensocad v. 1.8, com parâmetros correspondentes ao do modelo físico, construídos com malha aproximada³⁰ de 50 x 50cm e distribuição isotrópica de tensões. O modelo computadorizado tentará reproduzir a forma obtida com o modelo físico apenas por refinamentos nas tensões das bordas flexíveis. No entanto, quando a forma numérica diferir muito da forma física, a uniformidade de tensões na malha será prejudicada e valores serão modificados no modelo numérico para uma aproximação satisfatória das formas.

Por não ser acessível à presente pesquisa recurso computacional capaz de simular o exato comportamento das redes de cabos de malha quadrada, muito menos de fornecer desenhos de padronização de corte, as plantas de padronização de corte produzidas no trabalho não terão referência para comparação. Sua maior ou menor validade poderá ser apenas estimada pela manipulação dos modelos para a reprodução das formas que serviram à sua realização: quanto mais rápido um modelo de linha for finalizado, e quanto mais aproximada for sua forma em relação à de lycra, referência para sua construção, provavelmente, mais preciso terá sido o desenho de padronização de corte utilizado na construção do mesmo.

Comparações Gráficas - A comparação gráfica entre modelos se realizará com auxílio do software Autocad, por sobreposição de fotografias extraídas de um mesmo ponto e com parâmetros semelhantes de câmera. Como forma de apurar e apresentar os resultados, sobre as fotografias serão desenhados os contornos dos modelos, ou de áreas dele, para sobreposição no ambiente gráfico do software Autocad; esses desenhos transpostos para uma mesma escala serão a base para as análises gráficas comparativas.

³⁰ O software Tensocad v. 1.8 utiliza o método da densidade das forças na busca da forma de estruturas de membrana. Não produz redes em malha quadrada, uma vez que, nele, não é possível estabelecer dimensões para os segmentos de cabos. Assim, esses segmentos variam em comprimento no equilíbrio das tensões.

Devido à existência de pontos comuns nos contornos dos modelos de determinado tipo (pontos de suporte e ancoragem), e à improbabilidade de congruência entre as formas resultantes, o principal aspecto a ser observado na comparação é a discordância de áreas de dado contorno em relação a outro, de referência. Essa discordância de áreas entre contornos sobrepostos será o parâmetro utilizado para se verificar as diferenças entre as formas com acuidade.

Para o cálculo das áreas discordantes será utilizada a fórmula: $Ad = At - I$

Ad - Área discordante

At - Área total (área de união das formas + ilhas surgidas pela sobreposição)

I - Intersecção das formas

A razão da área discordante (Ad) pelo contorno de referência (C) servirá como dado de referência absoluta, servindo para comparações entre modelos de tipos diferentes, expressando a quantidade de área discordante por unidade de contorno.

O contorno de referência será calculado somando o comprimento de todas as bordas flexíveis de um modelo. Para o cálculo de Ad / C de um modelo serão somadas as áreas discordantes e os contornos de borda flexível de todas as vistas analisadas: vista frontal, lateral e de topo. As bordas rígidas ficam fora do cálculo do contorno de referência por não serem suscetíveis a variações, desse modo, não interessando ao estudo. Assumem-se as unidades m e m^2 para os valores da comparação gráfica; para as tensões, serão utilizados os valores absolutos de entrada no software.

ÁREAS DISCORDANTES

Irregular x Triângulo (contorno referencial = $L \times 3 = 10,49$)

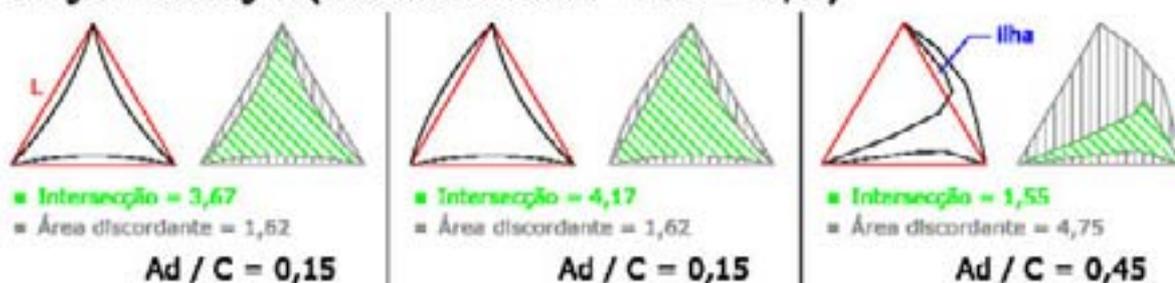


Ilustração 42 - Exemplificação do cálculo de áreas discordantes.

4. TRABALHOS COM MODELOS

4.1 Tipo 01

Os modelos do tipo 01 apresentam uma superfície formada entre seis bordas flexíveis, sendo quatro principais (B1) e duas acessórias (B2). Essa superfície é suportada por dois pontos fixos a três metros de altura, em escala 1:10, e ancorada em dois pontos na base.

Intenção de Projeto - Essa forma foi projetada para ser construída em escala real e para ser utilizada em experiências futuras sobre vedação da malha. Assim, exige proporções que facilitem os trabalhos que venham a ser realizados sobre ela, e permitam a passagem de pessoas sob a rede.

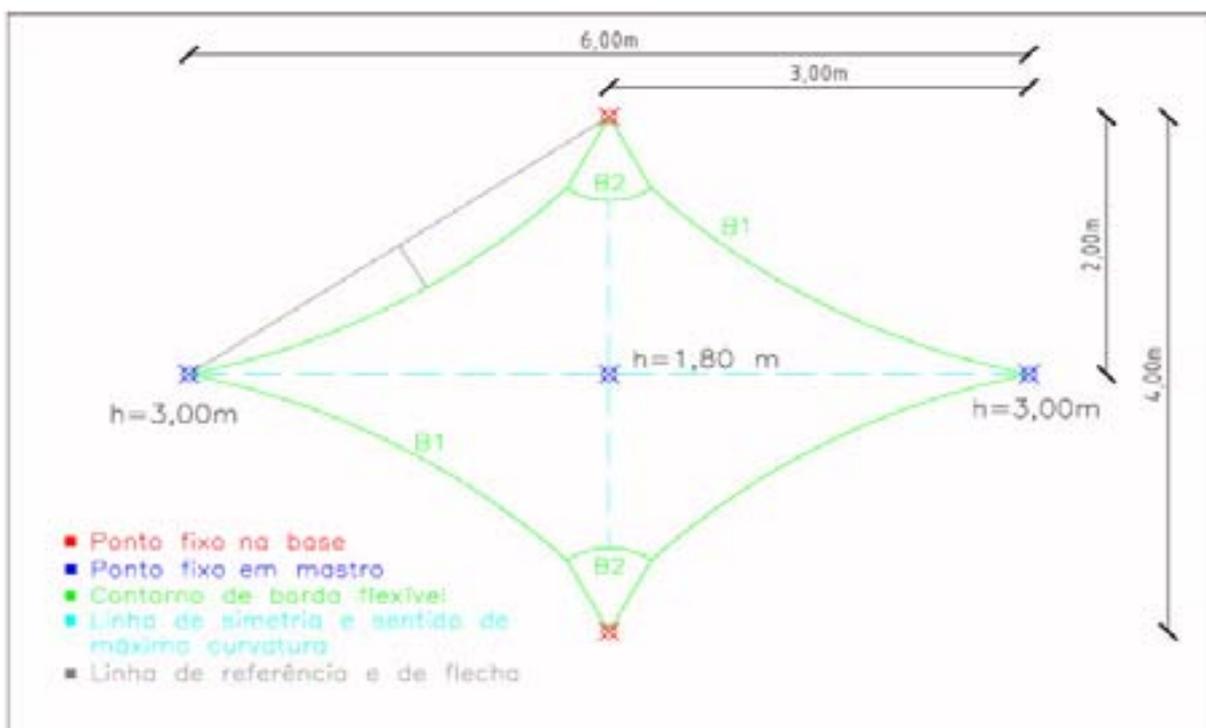


Ilustração 43 - Tipo 01. Aspectos gerais de projeto.

Busca da Forma - No trabalho com o modelo de lycra, uma base rígida foi marcada com os pontos de suporte e ancoragem da estrutura. Um tecido de lycra foi fixado entre dois elementos de madeira a exatos 30cm da base, e entre dois pontos baixos

fixados diretamente na base. Desde logo ficou clara a necessidade de esticar mais o tecido entre os pontos altos para atingir uma altura central de 1,80m, já que a distribuição uniforme de tensões tende a formar uma superfície mínima³¹, a qual não satisfaz os requisitos estabelecidos pela intenção de projeto. Assim, soube-se de antemão que o nível de retesamento dos cabos longitudinais é maior que o dos cabos transversais. Após poucos ajustes, foram realizados os procedimentos de marcação das bordas, colagem das linhas, retirada das sobras, tracionamento final das linhas de borda e ajustes finais do modelo.

Padronização de Corte - Devido à simetria biaxial do modelo foi padronizada apenas um quarto da superfície. Linhas geodésicas foram marcadas entre pontos opostos e malhas quadradas foram utilizadas para conseguir o contorno. Foram feitas as fotografias, a digitalização do perímetro, hachuras em escala com malha de 50cm, rebatimento das partes simétricas e impressão das plantas de corte em escala 1:10. Posteriormente, uma planta executiva foi realizada para a construção do modelo em escala real (ilustração 48).

Com poucos ajustes de borda, o modelo de linha foi considerado satisfatório, e fotografado para apresentação nos resultados. Nos modelos de linha, ficou patente a diferença de retesamento das linhas longitudinais em relação às transversais.



Ilustração 44 - Tipo 01. Etapas de padronização de corte.

Na seqüência da esquerda para a direita: marcação de linhas geodésicas e fixação de adesivo; disposição da malha de 11,5mm sobre a região a ser padronizada; planificação da malha e registro fotográfico do contorno plano; construção da rede de linha sobre impressão da planta final de corte em escala 1:10.

³¹ O contorno da superfície mínima assemelha-se ao contorno verde (1 x 1 x 8) do gráfico 1 da seção resultados.

4.2 Tipo 02

O tipo 02 possui uma superfície totalmente assimétrica, a qual é suspensa por um mastro central a 3 metros de altura, em escala 1:10, e cujas extremidades opostas chegam à base de duas maneiras distintas: são ancoradas pontualmente com cabos de borda ou são ancoradas linearmente em um semicírculo de 2,5 metros de raio. A estrutura é composta por um ponto alto, cinco bordas flexíveis e uma borda rígida.

Intenção de Projeto - A concepção da forma foi realizada sem qualquer objetivo funcional. Foi realizada apenas como uma demonstração das possibilidades de projeto utilizando coberturas retesadas.

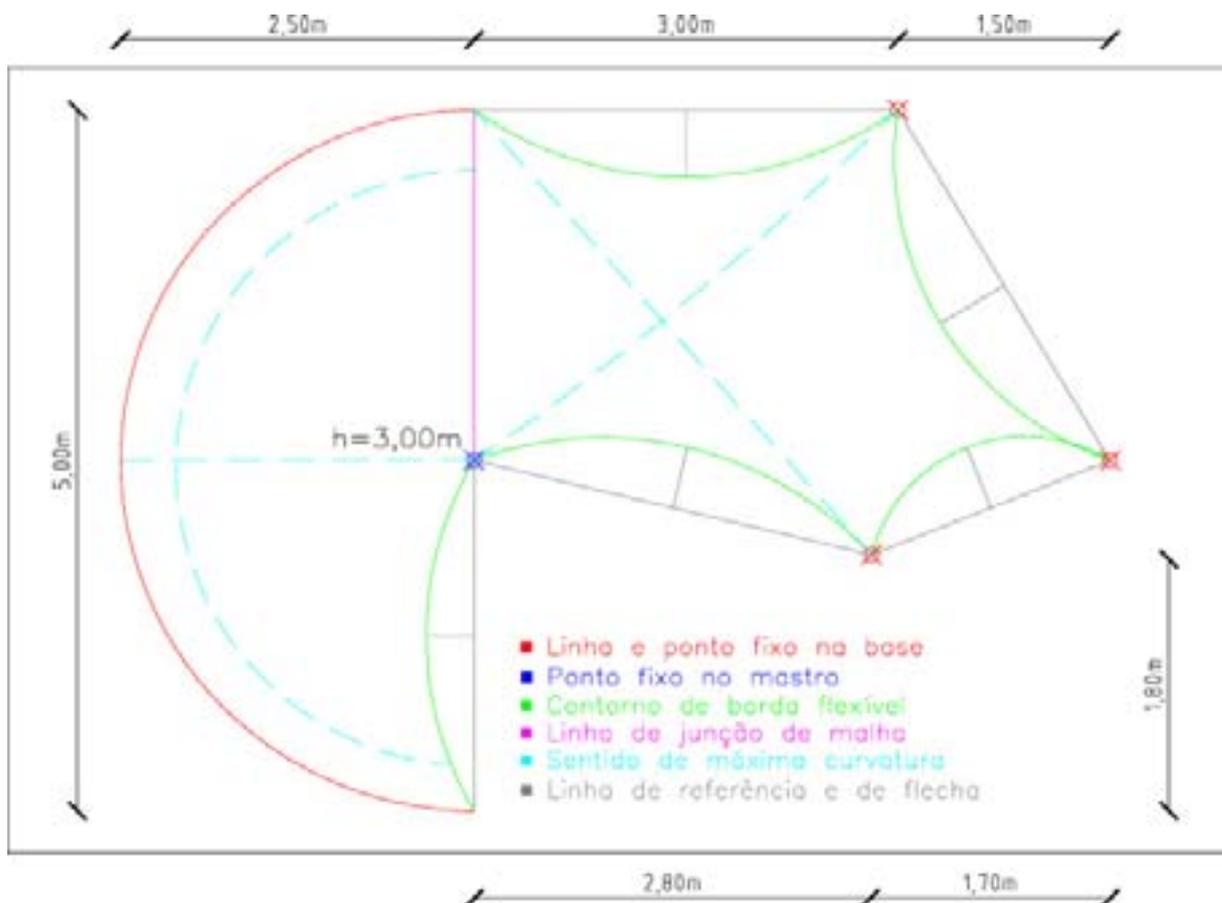


Ilustração 45 - Tipo 02. Aspectos gerais de projeto.

Busca da Forma - O modelo de lycra teve como ponto de partida uma base rígida com mastro central e locação de todos os elementos de ancoragem. O tecido de

lycra foi aberto sobre a base e os pontos de ancoragem foram fixados com percevejos metálicos. O ponto central da lycra foi fixado no mastro a exatos 30cm da base e os pontos de ancoragem do semicírculo foram unidos com linha.

Após ajustes da lycra, objetivando uma distribuição mais uniforme de tensões, foram realizados os procedimentos de marcação das bordas, colagem das linhas, retirada das sobras, tracionamento final das linhas de borda e ajustes finais do modelo.



Ilustração 46 - Tipo 02. Etapas de busca da forma.

Na seqüência da esquerda para a direita: desenho fixo na prancha e colocação de mastro; fixação da lycra e desenho dos contornos de borda; colagem das linhas de borda e corte das sobras de tecido; modelo final.

Padronização de Corte - Devido à completa assimetria do modelo, toda a superfície precisou ser padronizada. Dada sua complexidade, optou-se por dividir a rede em dois setores, dando origem a duas áreas de padronização unidas por uma linha de junção de malha.

Três linhas geodésicas foram marcadas: uma para o alinhamento da junção de malha, e outras duas para o alinhamento sobre as maiores curvaturas, uma em cada setor de malha.

Uma malha quadrada foi utilizada para conseguir o contorno de cada setor, separadamente; foram feitas as fotografias da malha planificada, a digitalização dos perímetros, hachuras em escala com malha de 50cm no sentido das maiores curvaturas e impressão das plantas de corte em escala 1:10.

Com poucos ajustes, o modelo de linha foi considerado satisfatório, e fotografado para apresentação nos resultados.

4.3 Tipo 03

A terceira forma realizada, tipo 03, apresenta uma base elíptica e simetria longitudinal sobre o eixo maior. A superfície parte dessa base elíptica e eleva-se a um ponto alto de fixação sobre o centro da estrutura. Ao longo de toda base elíptica, a superfície é ancorada linearmente com borda rígida.

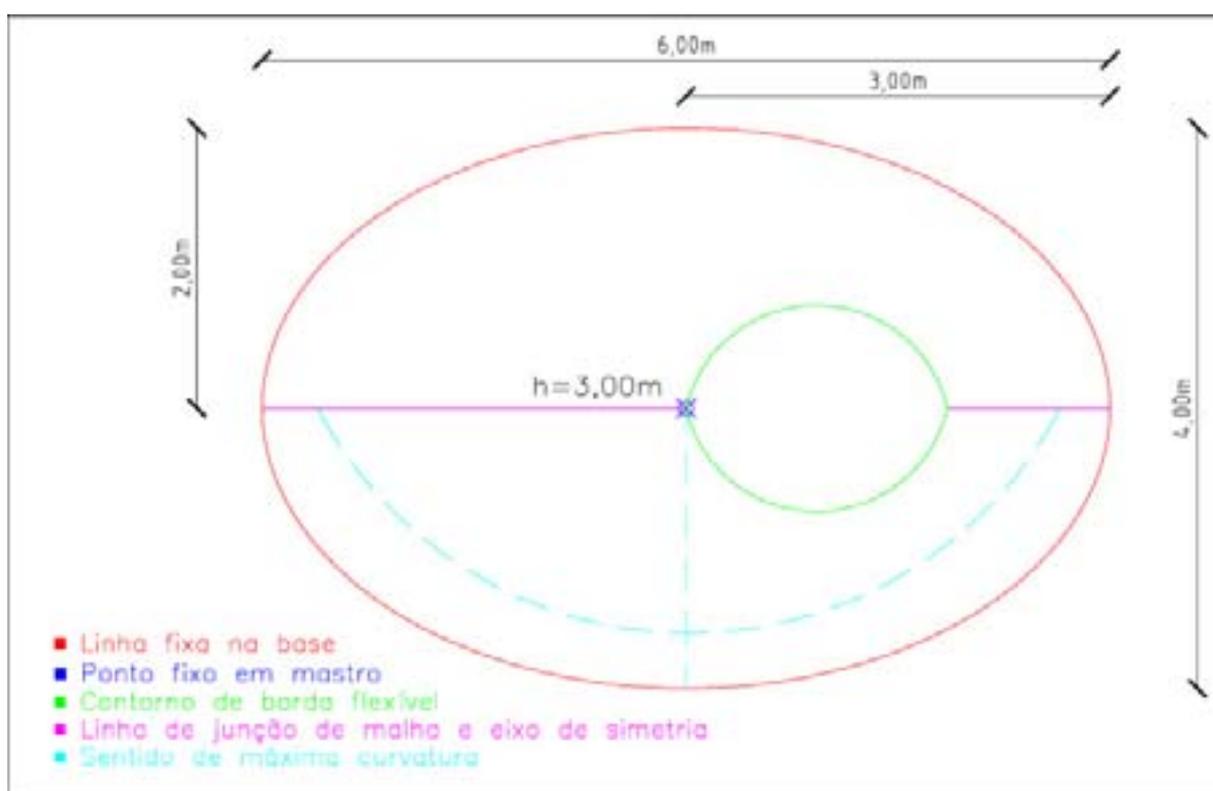


Ilustração 47 - Tipo 03. Aspectos gerais de projeto.

Intenção de Projeto - A concepção dessa forma não foi influenciada por qualquer finalidade como estrutura real. É mais uma demonstração das possibilidades de projeto utilizando coberturas retesadas. Porém, o conceito volumétrico básico deriva do projeto de Frei Otto para a sede do IL em Stuttgart, e apresenta o uso de borda superior em forma de laço, *eye loop*³², para distribuir tensões pontuais da rede.

³² Os *eye loop* foram descobertos em 1964 por Frei Otto, com colaboração de Larry Medlin, através de experimentos com modelos de filmes líquidos. A utilização desse recurso veio solucionar um dos problemas em projetos com redes de cabo em formas típicas de projetos com membranas: a alta concentração de tensões nas regiões de suporte em estruturas com mastros e formas pontiagudas.

Busca da Forma - O modelo de lycra foi realizado estendendo-se o tecido de lycra sobre a base rígida marcada, com a elipse de ancoragem representada por um arame sobreposta ao tecido e fixada com percevejos metálicos; o ponto central da lycra foi fixado em um mastro inclinado a exatos 30cm da base.

Após ajustes da lycra, foram realizados os procedimentos de marcação da borda interna em laço, colagem da linha, retirada das sobras e ajustes finais do modelo.

Padronização de Corte - Devido à simetria axial, foi padronizada apenas a metade da superfície. Dadas as características do modelo, optou-se por dividir a rede em duas áreas unidas por uma linha de junção de malha que segue o eixo de simetria, interrompida pelo *eye loop*.

Duas linhas geodésicas foram marcadas: uma para o alinhamento de junção de malha, seguindo o eixo maior da elipse; outra, para dispor as linhas de tração da malha no sentido das maiores curvaturas, com o alinhamento no sentido do eixo menor da elipse.

Uma malha quadrada foi utilizada para conseguir o contorno de metade do modelo, foram feitas as fotografias da malha planificada, a digitalização dos perímetros, hachuras em escala com malha de 50cm no sentido das maiores curvaturas e impressão da planta de corte em escala 1:10.

Foram necessários vários ajustes por deslizamento em borda no modelo de linha, principalmente na borda superior em laço. A configuração final foi registrada fotograficamente e utilizada para comparações e apresentação nos resultados.

4.4 Modelo em Escala Real

Com os dados obtidos pelo trabalho de padronização de corte (PC 01) da forma de tipo 01, foi realizada uma planta executiva para a construção de uma estrutura em tamanho real, em escala 1:1. Os cabos da malha foram divididos segundo sua

categoria, suporte ou tração, e mensurados, destacando-se a dimensão entre todos os pontos de cruzamento e fixação.

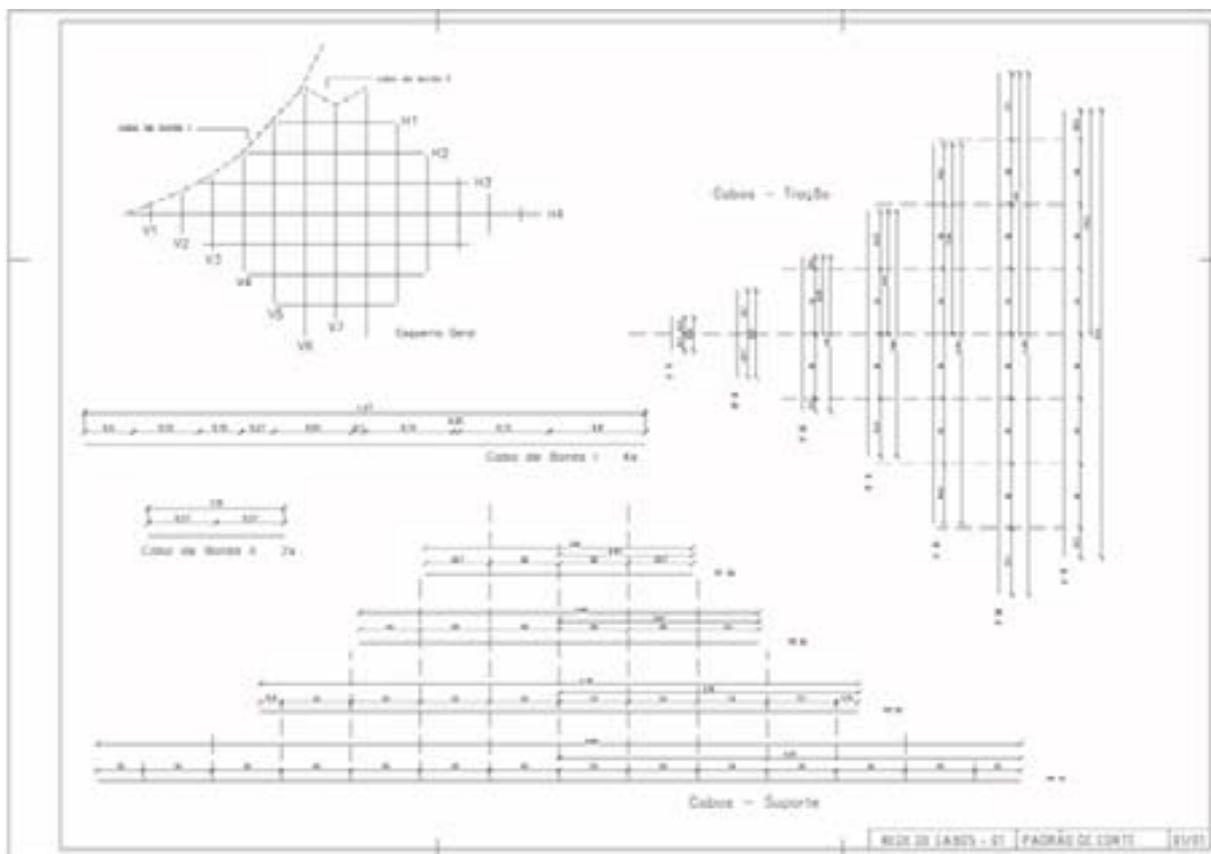


Ilustração 48 - Desenho executivo de padrão de corte do modelo em escala 1:1.

Com base no modelo de linhas, os cabos de borda foram dimensionados aproximadamente e os pontos de ancoragem da malha nas bordas foram registrados para reprodução na escala 1:1, objetivando com isso a pré-fabricação da rede em solo, tendo em vista que a realização de mais ajustes no ar acarretaria muito trabalho. Dois operários trabalharam 6 horas para realizar a montagem: locação, cravação de estacas, montagem da rede e instalação frouxa. O trabalho de retesamento levou mais duas horas: ajustes da ancoragem dos cabos da malha ao longo das bordas e retesamento final dos cabos de borda.

A estrutura foi fotografada de um ponto equivalente ao ponto de câmera dos modelos reduzidos para a comparação gráfica de sua forma.

Últimos ajustes foram realizados, inclusive com ajustes dimensionais do cabo central transversal em relação às bordas acessórias (B2), para aumentar o nível de retesamento das regiões próximas às ancoragens, áreas que apresentaram problemas em diversas configurações nos modelos de linha do tipo 01.



Ilustração 49 - Modelo em escala real.

À esquerda, vista geral da estrutura.

À direita, acima, vista da rede pré-fabricada no solo; abaixo, área problemática em todos os modelos do tipo 01: regiões próximas às ancoragens.



Ilustração 50 - Conectores no modelo real x conectores no modelo de linha.

Na seqüência, da esquerda para a direita: conectores entre cabos de malha e cabos de borda no modelo em escala real; idem no modelo de linha; conector entre cabos de malha no modelo em escala real; idem no modelo de linha com fixação das linhas com cola instantânea.

4.5 Experimentos

Tomando-se o tipo 01 como base, foram realizados alguns experimentos utilizando ajustes de borda no processo de formação tridimensional da malha.

Experimento 01 - Para demonstrar que a configuração plana da rede só pode deformar-se uniformemente em superfície 3D através de ajustes da malha por

deslizamento nas bordas, foi construído um modelo com base na planta de padronização de corte com as linhas da malha coladas nas bordas, sem possibilidade de deslizamento ao longo delas. O modelo resultante apresentou uma rede frouxa na região central, sem qualquer condição de ser retesada.

Isso demonstra que uma disposição plana deve sofrer ajustes de borda para ser deformada com uniformidade. Na realização desses ajustes, pontos vizinhos devem ser afastados em sentido contrário ao longo da borda; cada cabo da malha deve ter seu próprio ponto de fixação para permitir ajustes individuais e, com isso, conseguir variações no nível de tensão em cada um deles.

No entanto, para serem totalmente pré-fabricadas em uma construção real, as redes com malhas quadradas necessitam da exata posição de ancoragem de cada cabo ao longo das bordas, de modo a evitar trabalhosos ajustes no ar³³. Esses dados podem ser conseguidos por modelagem física realizando-se um modelo de arame de grande precisão, submetendo-o a grande retesamento e cuidadosa mensuração dos pontos de ligação ao longo das bordas. As medidas devem ser transpostas para a escala real e seguidas fielmente na execução da estrutura.

Experimento 02 - A utilização de uma malha mais fina, de 5mm, para obter o contorno da forma encontrada no modelo de lycra foi base para uma outra padronização de corte (PC 02) para a forma de tipo 01. O trabalho com uma malha mais fina torna-se menos preciso, uma vez que a deformação dos quadrados é prejudicada, assim como a planificação ortogonal da malha para o registro fotográfico. Dessa forma, verificado um perímetro ligeiramente diferente do conseguido com a malha de 11,5mm (PC 01), realizou-se o desenho de

³³ Mesmo com toda precisão possível, inclusive com a utilização de recurso computacional, na construção real de estruturas, ajustes no ar podem ser necessários após o içamento da rede. Esses ajustes podem ser realizados se dispositivos esticadores forem instalados no final de cada cabo da malha (LEONHARDT /SCHLAICH, 1972b, *apud* TIBERT, 1999, p.15). Os ajustes referidos não são ajustes de borda, e sim ajustes dimensionais dos segmentos de cabos.

padronização de corte 02 com malha de 50 x 50cm, em escala 1:10, e construiu-se um modelo de linha para observar a forma resultante. Foram realizadas diferentes configurações com essa rede construída com o padrão de corte 02, apenas com ajustes por deslizamento em borda, uma das quais, considerada a mais satisfatória em relação ao modelo em lycra, foi encontrada após quatro outras tentativas. As configurações 01, 02 e 03 sofreram ajuste dimensional de redução, na linha transversal central, por terem apresentado frouxidão nas regiões próximas à ancoragem.

Três das cinco configurações foram fotografadas para apresentação nos resultados.



Ilustração 51 - Padrão de corte 02 x padrão de corte 01.

À esquerda, na realização do padrão 02, uma rede de nylon de malha 5mm é a base para extração do contorno tridimensional de $\frac{1}{4}$ simétrico da forma do modelo em lycra.

À direita, sobreposição dos perímetros PC 01 e PC 02. Representação de $\frac{1}{4}$ do perímetro total da superfície.

Experimento 03 - Foi realizado um modelo com orientação de malha girada em 45° dentro do perímetro PC 01 para testar a capacidade dos ajustes de borda para uniformizar a rede. O modelo apresentou forma bem diversa da esperada, no entanto, utilizando apenas ajustes por deslizamento nas bordas, foi possível realizar o retesamento da rede em nível satisfatório de uniformidade.

Essa experiência demonstrou o grande potencial dos ajustes por deslizamento em borda, uma vez que os ajustes vieram cumprir seu objetivo de regularizar a distribuição de tensões na malha em situação completamente desfavorável.

O modelo final foi fotografado para apresentação nos resultados.

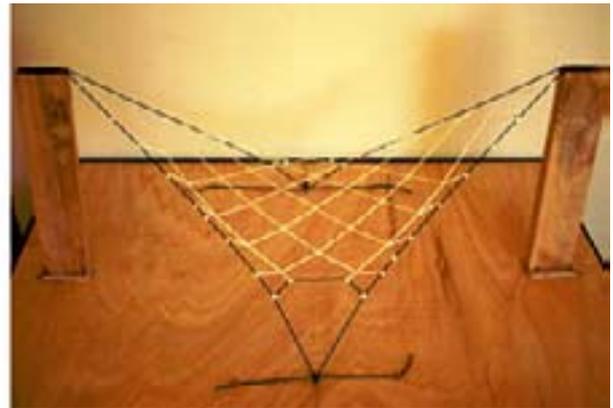
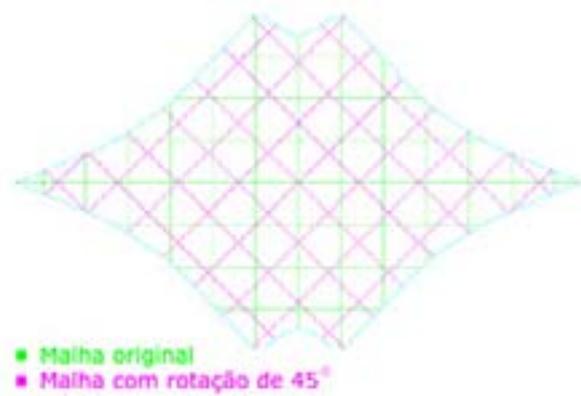


Ilustração 52 - Rede com malha rotacionada em 45°.

À esquerda, sobreposição de malhas no perímetro PC 01.

À direita, vista do modelo de linha com a rede rotacionada 45°.

5. RESULTADOS

O resultado das etapas de busca da forma, padronização de corte e ajustes de borda com os modelos do tipo 01 estão resumidos nos gráficos e tabelas a seguir:

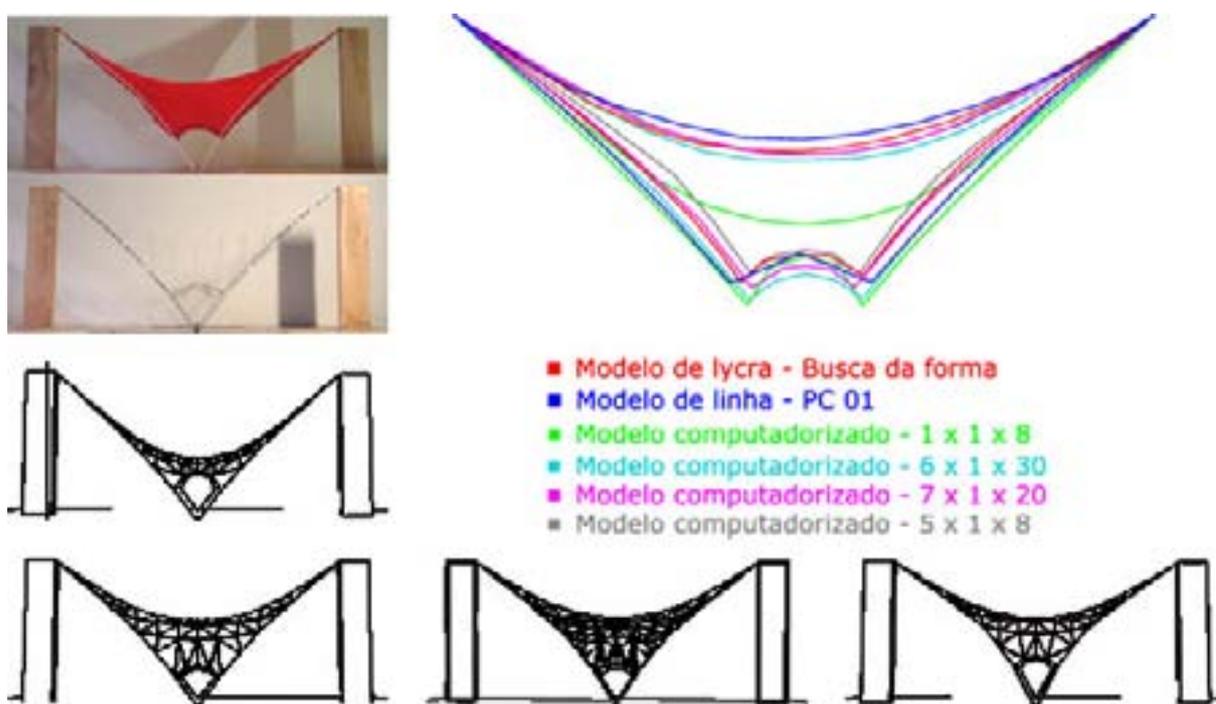


Gráfico 1 - Tipo 01. Comparação geral de modelos. Vista lateral.

Tabela 1 - RESULTADO DA COMPARAÇÃO GRÁFICA ENTRE FORMAS FINAIS				
Modelos computadorizados x Modelo de lycra (contorno referencial = 27,66)				
	Modelos computadorizados			
Proporção das tensões: Longitudinal x transversal x B1	1 x 1 x 8	5 x 1 x 8	6 x 1 x 30	7 x 1 x 20
Área discordante - Lateral	2,91	0,58	1,05	0,48
Área discordante - Topo	0,59	0,58	0,9	0,51
Área discordante por unidade de contorno	0,1265	0,0419	0,0705	0,0358

O contorno referencial adotado na tabela 1 foi extraído do modelo de lycra. Isso está indicado no sub cabeçalho da tabela (modelos computadorizados x modelo de lycra), sendo sempre o último a referência para a comparação.

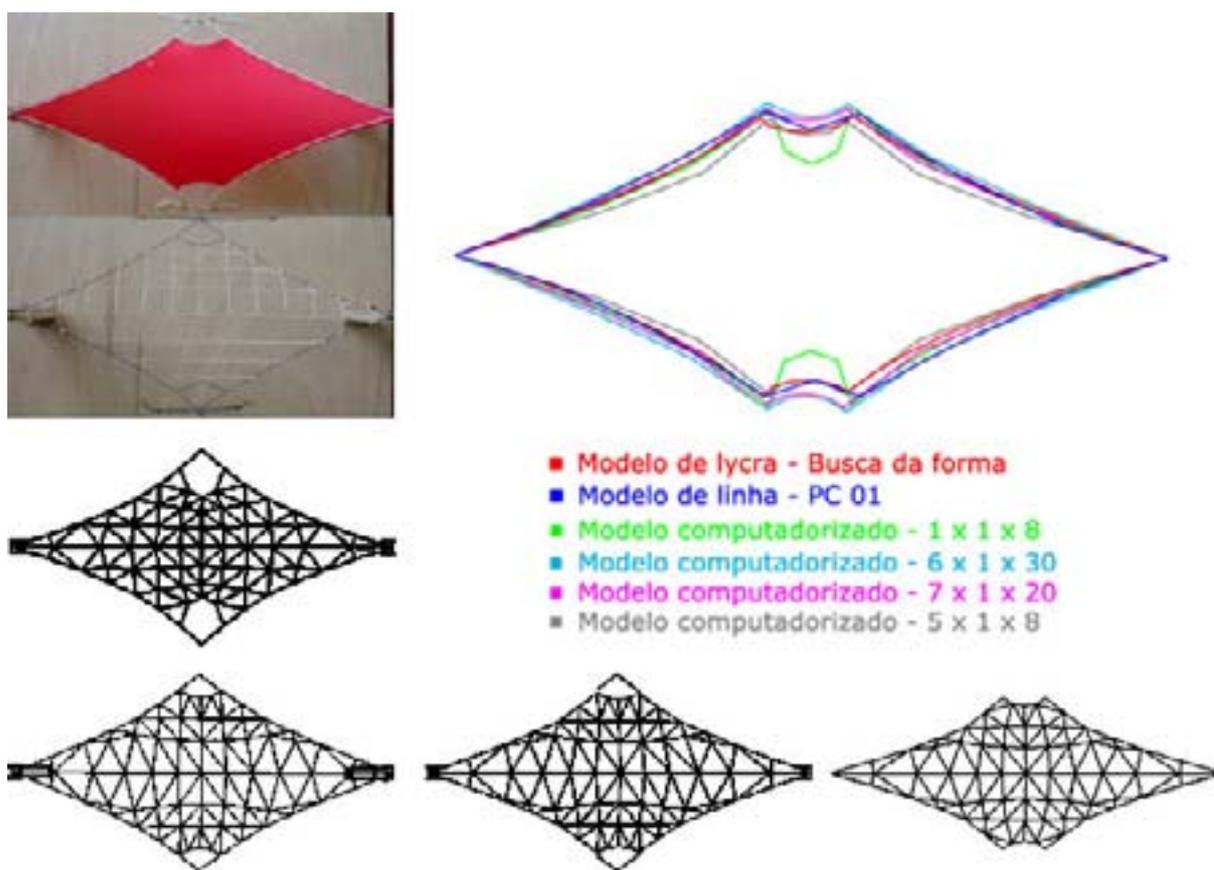


Gráfico 2 - Tipo 01. Comparação geral de modelos. Vista de topo.

Para todos os modelos computadorizados foi utilizada a tensão de 0 kN para as bordas acessórias (B2), já que não foi aplicada tensão nas bordas acessórias do modelo de lycra.

Tabela 2 - RESULTADO DA COMPARAÇÃO GRÁFICA ENTRE FORMAS FINAIS		
Modelos computadorizados x Modelo de linha - PC 01 (contorno referencial = 27,46)		
	Modelos computadorizados	
Proporção das tensões: Longitudinal x transversal x B1	6 x 1 x 30	7 x 1 x 20
Área discordante - Lateral	0,99	0,94
Área discordante - Topo	0,55	0,46
Área discordante por unidade de contorno	0,0561	0,0510

Na comparação da tabela 2, o contorno de referência foi extraído do modelo de linha de padrão de corte 01, como sempre, indicado no sub cabeçalho da tabela.

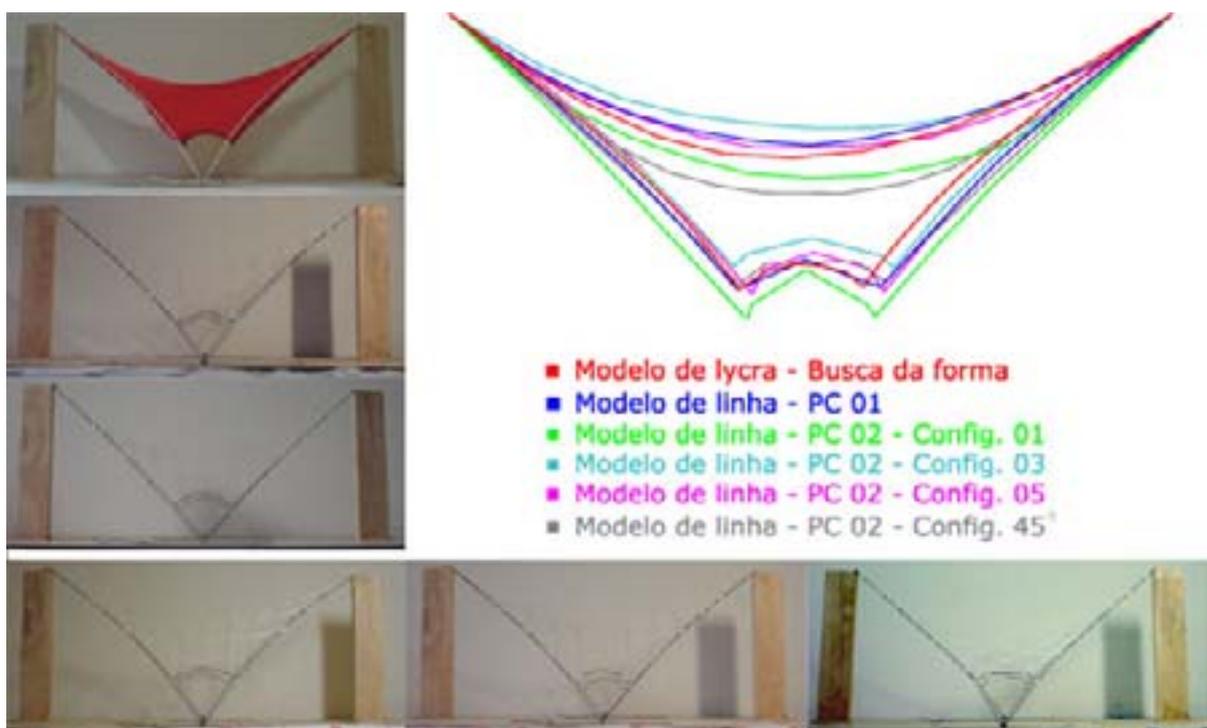


Gráfico 3 - Tipo 01. Comparação entre configurações do modelo de linha. Vista lateral.

Tabela 3 - RESULTADO DA COMPARAÇÃO GRÁFICA ENTRE FORMAS FINAIS					
Modelos de linha x Modelo de lycra (contorno referencial = 27,66)					
N° do padrão de corte e configuração da rede	Modelos de linha				
	PC 01	PC 02 - Config. 01	PC 02 - Config. 03	PC 02 - Config. 05	PC 01 - Config. 45°
Área disc. - Lateral	0,83	2,04	1,3	0,86	1,88
Área disc. - Topo	0,41	0,74	0,55	0,29	0,73
Área discordante por unidade de contorno	0,0448	0,1005	0,0669	0,0416	0,0944

A tabela 03 apresenta configurações de rede obtidas com o padrão de corte 02, utilizando uma malha de 5mm para extrair o contorno da forma de lycra. As configurações de número 02 e 04 foram suprimidas por apresentarem valores intermediários aos apresentados.

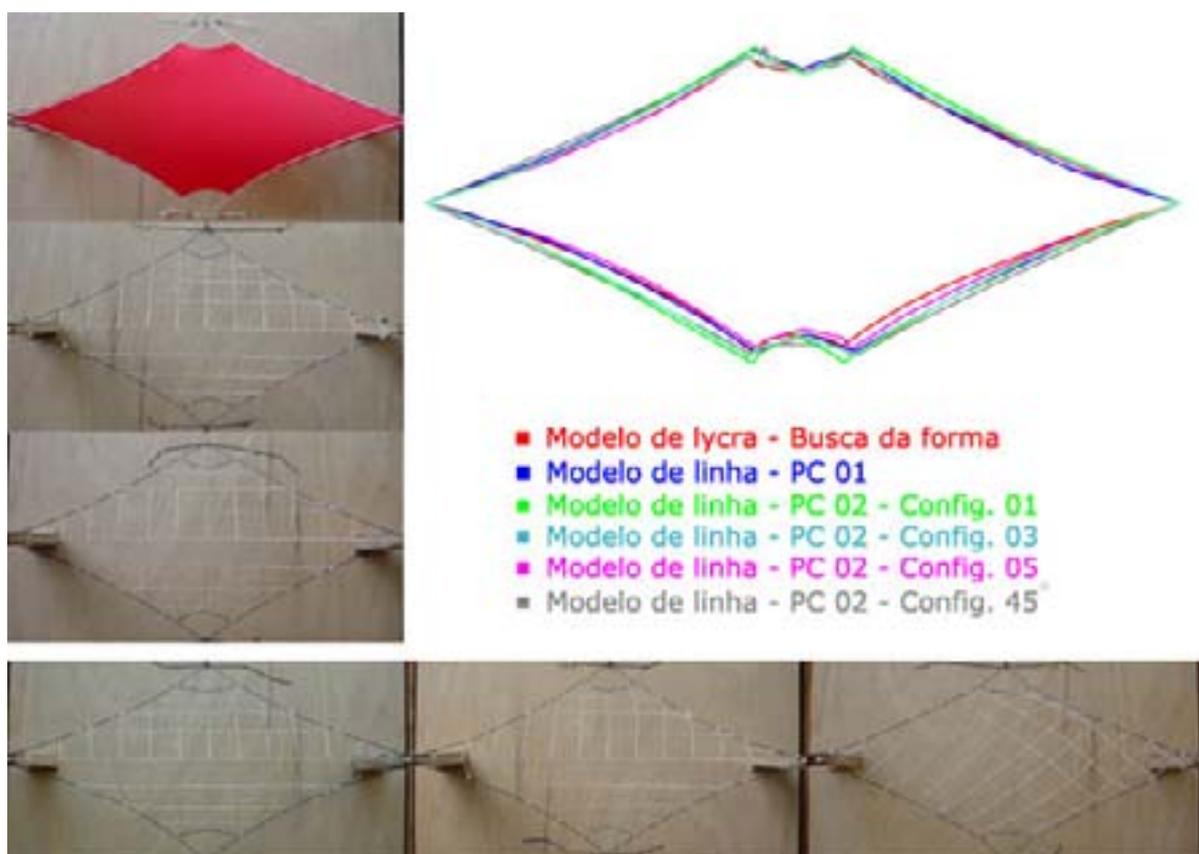


Gráfico 4 - Tipo 01. Comparação entre configurações do modelo de linha. Vista de topo.

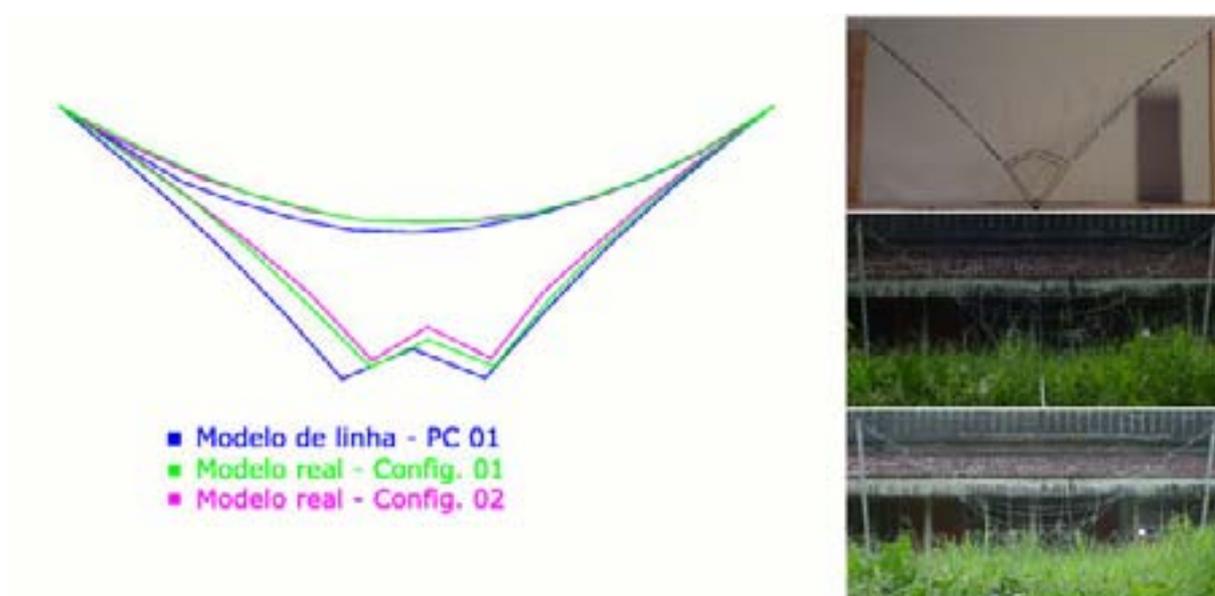


Gráfico 5 - Tipo 01. Comparação entre configurações da estrutura em escala real. Vista lateral.

A configuração 02 é resultado de um ajuste dimensional de redução na linha transversal central para aumentar o nível de retesamento das regiões mais baixas e planas da estrutura.

Tabela 4 - RESULTADO DA COMPARAÇÃO GRÁFICA ENTRE FORMAS FINAIS Estrutura real x Modelo de linha PC 01 (contorno referencial = 14,44)		
Estrutura em escala real		
Configuração da rede	Config. 01	Config. 02
Área discordante - Lateral	0,94	1,23
Área discordante por unidade de contorno flexível	0,0650	0,0851

O resultado das etapas de busca da forma, padronização de corte e ajustes de borda com os modelos do tipo 02 estão resumidos nos gráficos e tabelas a seguir:

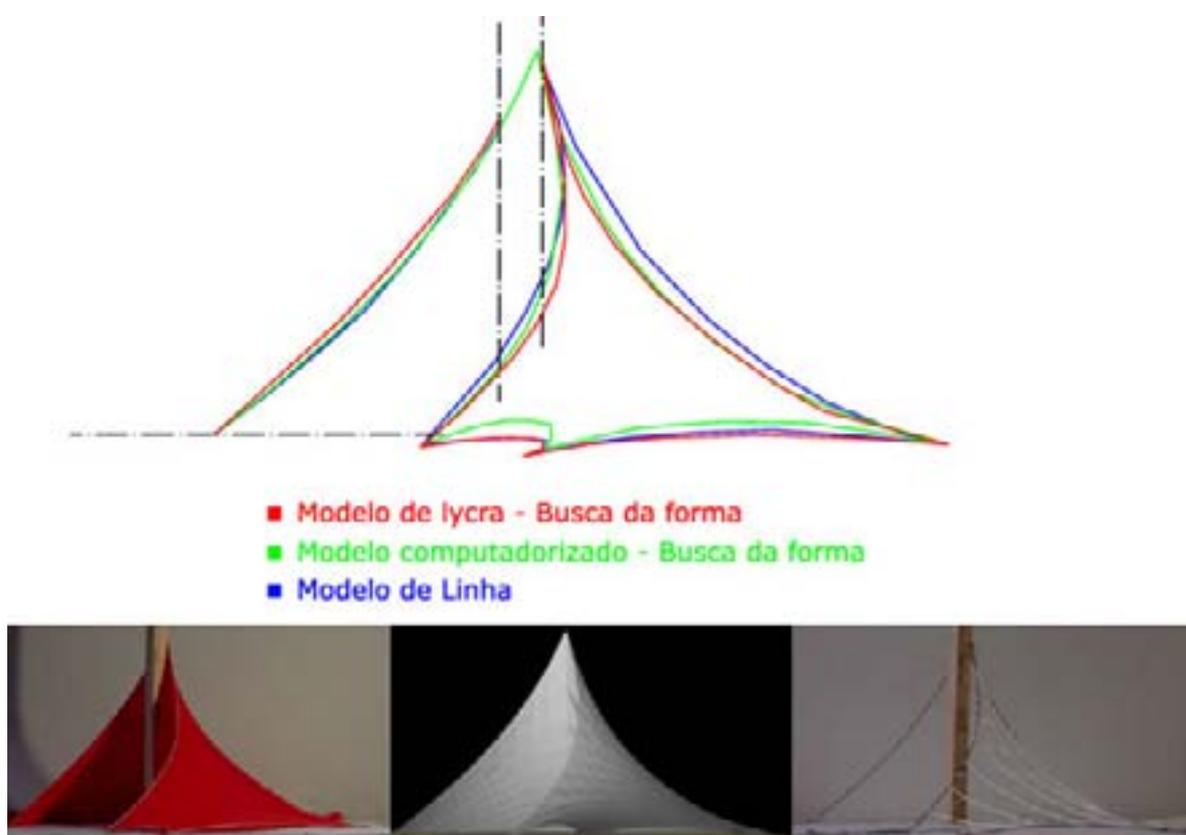


Gráfico 6 - Tipo 02. Comparação geral de modelos. Vista frontal.

As linhas tracejadas indicam delimitação especial para o cálculo das áreas e interrupção nas linhas de contorno e área total.

O modelo computadorizado foi realizado com variadas tensões de borda, procurando reproduzir a forma do modelo de referência, de lycra. O mesmo foi feito para a linha de junção de malha.

Tabela 5 - RESULTADO DA COMPARAÇÃO GRÁFICA ENTRE FORMAS FINAIS	
Modelo computadorizado x Modelo de lycra (contorno referencial = 44,17)	
Modelo computadorizado - Tensão 1 x 1	
Área discordante - Frontal	0,66
Área discordante - Lateral	1,02
Área discordante - Topo	0,45
Área discordante por unidade de contorno flexível	0,0482

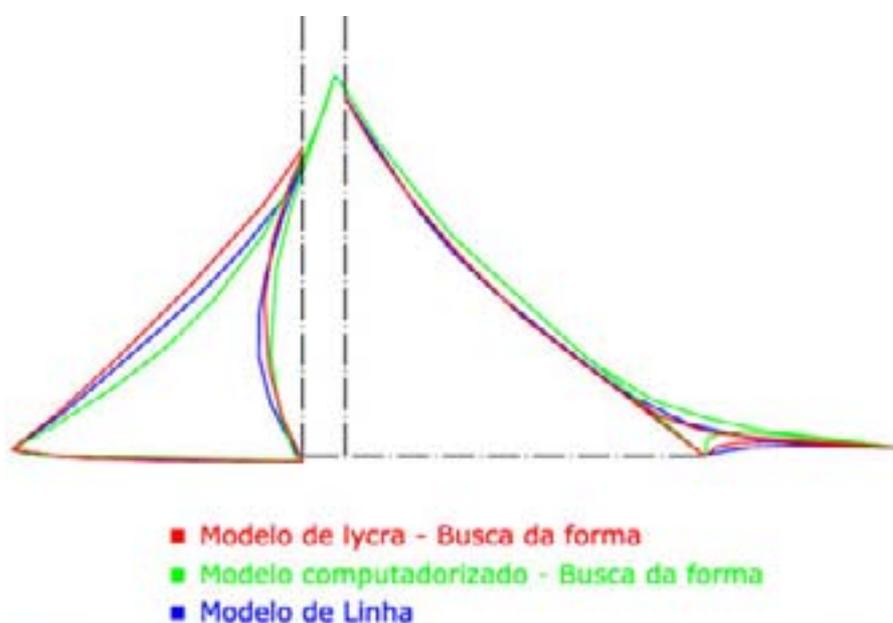


Gráfico 7 - Tipo 02. Comparação geral de modelos. Vista lateral.

Tabela 6 - RESULTADO DA COMPARAÇÃO GRÁFICA ENTRE FORMAS FINAIS	
Modelo de linha x Modelo de lycra (contorno referencial = 44,17)	
Modelo de linha - PC 01	
Área discordante - Frontal	0,82
Área discordante - Lateral	0,36
Área discordante - Topo	0,41
Área discordante por unidade de contorno flexível	0,0360



Gráfico 8 - Tipo 02. Comparação geral de modelos. Vista de topo.

Tabela 7 - RESULTADO DA COMPARAÇÃO GRÁFICA ENTRE FORMAS FINAIS	
Modelo computadorizado x Modelo de linha (contorno referencial = 43,41)	
	Modelo computadorizado - Tensão Isotrópica
Área discordante - Frontal	0,73
Área discordante - Lateral	0,8
Área discordante - Topo	0,4
Área discordante por unidade de contorno flexível	0,0445

Para os tipos 02 e 03, o contorno referencial é a soma das projeções das bordas flexíveis, em todas as vistas apresentadas, do modelo de referência. Esse é o valor utilizado no cálculo da área discordante por unidade de contorno flexível. As bordas rígidas não são consideradas já que não suscetíveis a variações.

O resultado das etapas de busca da forma, padronização de corte e ajustes de borda com os modelos do tipo 03 estão resumidos nos gráficos e tabelas a seguir:

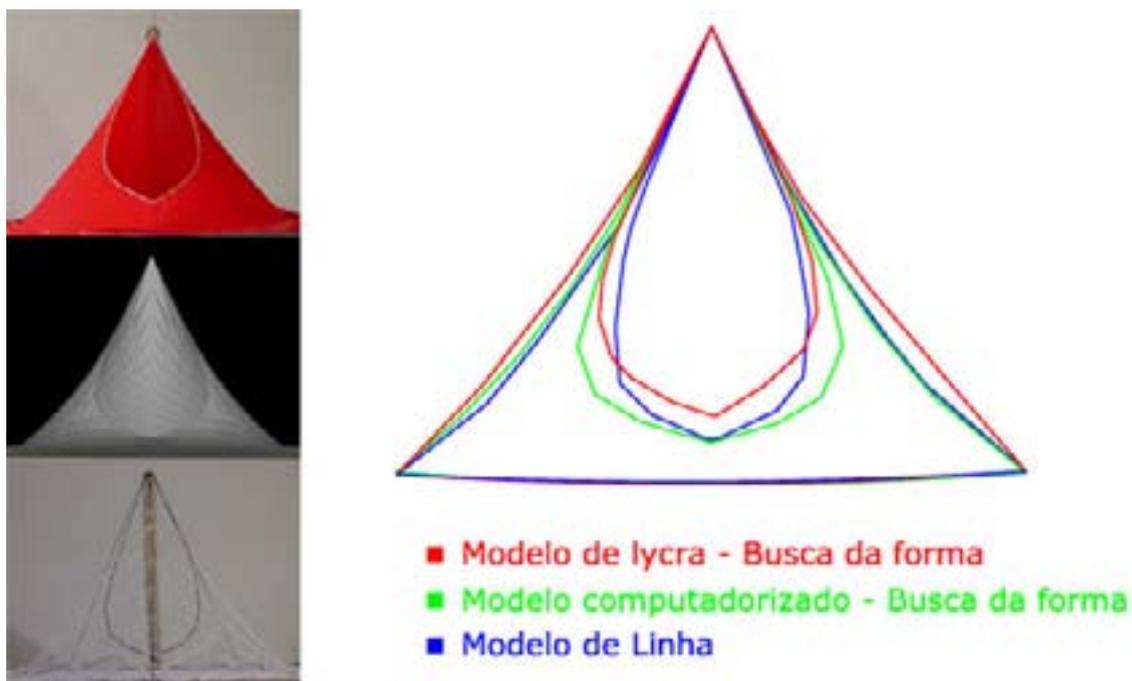


Gráfico 9 - Tipo 03. Comparação geral de modelos. Vista frontal.

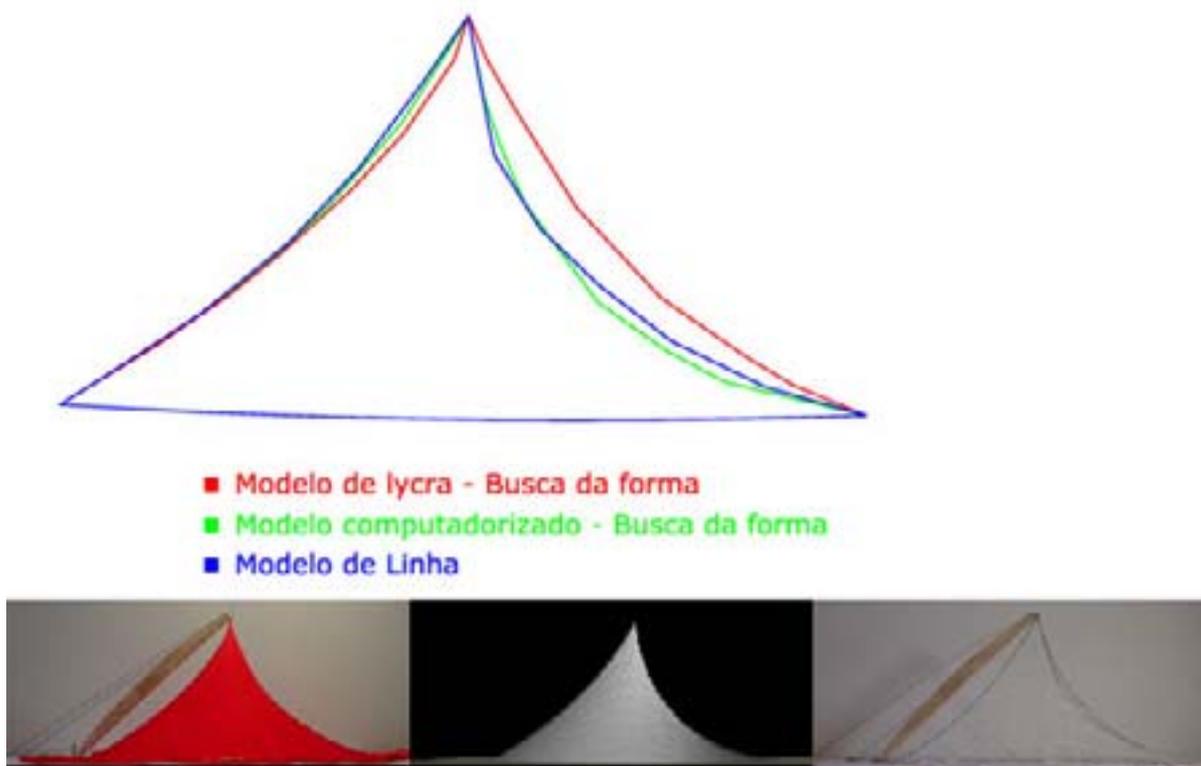


Gráfico 10 - Tipo 03. Comparação geral de modelos. Vista lateral.

Tabela 8 - RESULTADO DA COMPARAÇÃO GRÁFICA ENTRE FORMAS FINAIS Modelo computadorizado x Modelo de lycra (contorno flexível = 28,04)	
Modelo computadorizado - Tensão Isotrópica	
Área discordante - Frontal	0,98
Área discordante - Lateral	1,11
Área discordante - Topo	0,82
Área discordante por unidade de contorno flexível	0,1038

Tabela 9 - RESULTADO DA COMPARAÇÃO GRÁFICA ENTRE FORMAS FINAIS Modelo de linha x Modelo de lycra (contorno flexível = 28,04)	
Modelo de linha - PC 01	
Área discordante - Frontal	0,87
Área discordante - Lateral	1,05
Área discordante - Topo	0,56
Área discordante por unidade de contorno flexível	0,0884

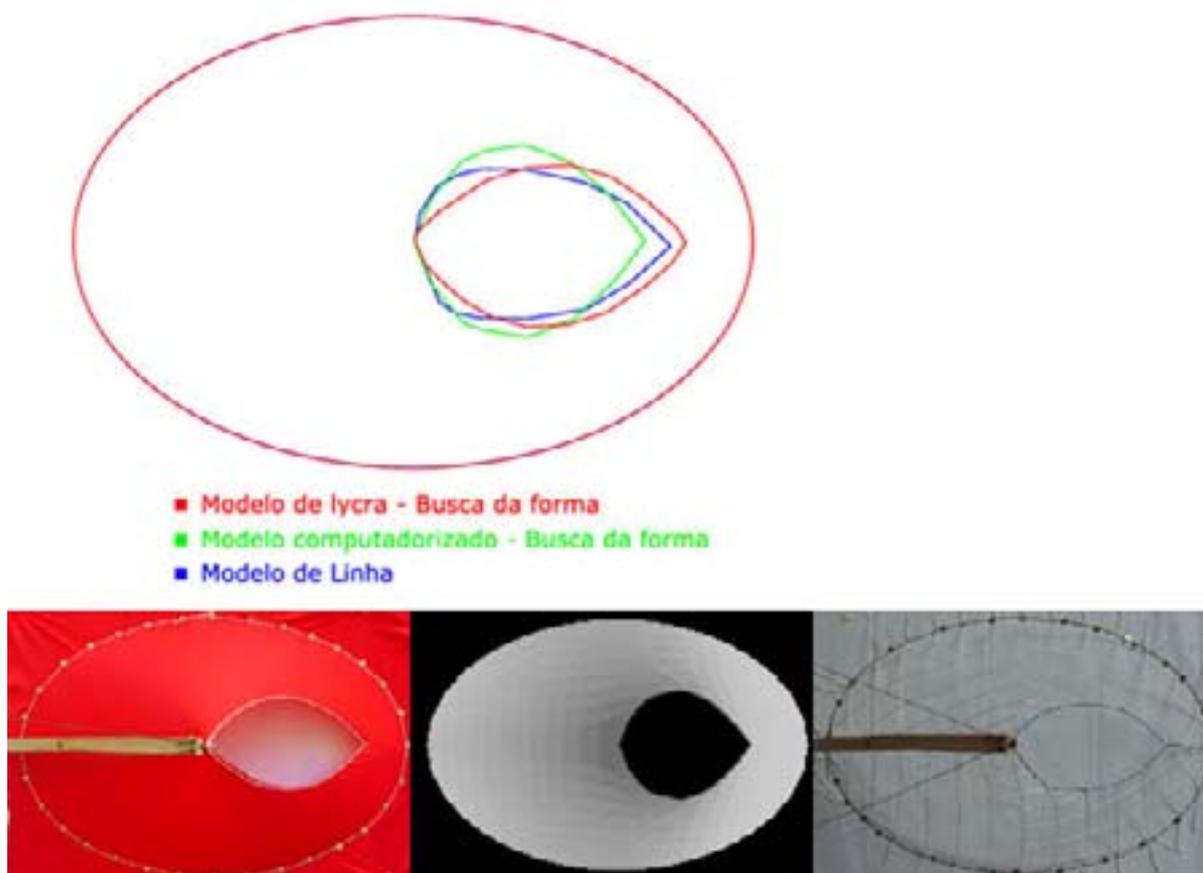


Gráfico 11 - Tipo 03. Comparação geral de modelos. Vista de topo.

Tabela 10 - RESULTADO DA COMPARAÇÃO GRÁFICA ENTRE FORMAS FINAIS Modelo computadorizado x Modelo de linha (contorno flexível = 28,73)	
Modelo computadorizado - Tensão Isotrópica	
Área discordante - Frontal	0,74
Área discordante - Lateral	0,26
Área discordante - Topo	0,49
Área discordante por unidade de contorno flexível	0,0519

O modelo computadorizado foi realizado com tensão de borda procurando reproduzir a forma do modelo de referência, de lycra. O mesmo foi feito para as linhas de junção de malha.

Tabela 11 - COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE ÁREA DISCORDANTE POR UNIDADE DE CONTOURNO REFERENCIAL				
Formas de Modelagem	Tipo 01 - MR	Tipo 02	Tipo 03	Média
Computorizada x Lycra	0,0358	0,0482	0,1038	0,0626
Linha x Lycra	0,0416	0,0360	0,0884	0,0553
Computorizada x Linha	0,0510	0,0445	0,0519	0,0491
Média	0,0428	0,0429	0,0814	

MR = Melhor resultado dentre as configurações apresentadas.

6. DISCUSSÃO

Nesta seção será realizada a análise dos dados apresentados nos gráficos e tabelas da seção anterior.

De um modo geral, deve ser observado o fato de que todos os modelos de linha foram fotografados e registrados após uma distribuição de tensões na rede considerada satisfatória, de modo a não apresentar áreas sub ou super retesadas.

Nos gráficos 1 e 2 são comparados os modelos em lycra, em linha (PC 01), e computadorizados do tipo 01. A superfície mínima para o contorno tridimensional da forma aproxima-se ao contorno verde, com proporção de tensões de malha de 1 x 1 e tensão de borda em B1, proporcionalmente, 8. Pela grande diferença apresentada em relação aos outros contornos, vê-se o que já havia sido constatado na modelagem física em lycra: a necessidade de aplicar um nível de retesamento não uniforme na malha para alcançar a intenção de projeto. O nível dessa diferença foi determinado no software Tensocad. A configuração computadorizada mais próxima à forma em lycra apresentou uma grande diferença de tensão, na proporção de 7 para 1, maior no sentido dos cabos longitudinais. O nível de tensão nas bordas precisou ser aumentado para evitar as deformações vistas no contorno cinza, 5 x 1 x 8, que apresenta tendência de angulação dos cabos principais. A melhor configuração alcançada apresentou uma discordância de área por unidade de contorno de 0,0358, a menor entre todas as constatadas, o que indica grande aproximação formal com o contorno de referência.

A configuração de rede realizada no modelo de linha (PC 01), com desenho de padrão de corte 01, apresentou uma baixa discordância de área por unidade de contorno de 0,0448, aproximando-se bastante de sua referência em uma única tentativa; já o modelo de linha (PC 02), com padronização de corte 02, como pode

ser visto na tabela 3, exigiu várias configurações para atingir o mesmo valor, apontando para a já esperada imprecisão do contorno extraído com rede para pesca de malha 5 mm. Ainda que tenham sido necessárias várias tentativas, a configuração final, 05, apresentou resultado bastante satisfatório, apontando para a eficiência dos ajustes de borda para refinamento da forma.

As configurações de rede 05 (PC 02) e 45° (PC 01), realizadas apenas com ajustes por deslizamento de borda e atingindo um retesamento satisfatoriamente uniforme, apontam para a eficiência dos ajustes de borda por deslizamento na correção de falhas de padronização de corte e redistribuição de tensões pela rede, apesar das diferentes formas finais resultantes.

No gráfico 5 são vistos os contornos de duas configurações da estrutura em escala 1:1. Torna-se flagrante um erro na locação dos pontos de ancoragem, responsável por uma deformação da parte inferior dos contornos em relação ao de referência, o modelo de linha PC 01. Na configuração 01 do modelo em escala real, as áreas próximas às ancoragens apresentaram um baixo nível de retesamento, semelhante a todos os modelos do tipo 01. Isso se deve tanto à forma tridimensional do tipo, na qual se verificam curvaturas pouco acentuadas nas áreas próximas ao solo, quanto ao nível de tração dos cabos transversais, que, proporcionalmente, é muito baixo em relação à tração dos cabos longitudinais, como comprovado na modelagem computadorizada.

Na construção de estruturas com membranas, pequenos erros na fase de padronização de corte ou locação do terreno comprometem a estrutura do ponto de vista estético e funcional, já que serão originadas rugas e concentrações de tensão na superfície pré-fabricada. Na construção com redes de cabos em malha quadrada, falhas podem ser corrigidas até a finalização da montagem com pequenos ajustes.

Os resultados referentes ao modelo do tipo 02 são apresentados nas tabelas 5, 6 e 7. São verificados valores de área discordante por unidade de contorno referencial baixos e homogêneos no âmbito da pesquisa, indicando uma aproximação geral entre as formas da modelagem em lycra, em linha e computadorizada.

No gráfico 6, a linha de junção da malha do modelo de linha é responsável por uma significativa deformação no contorno lateral direito em relação aos modelos em lycra e computadorizado. Essa saliência na curvatura da superfície é característica em estruturas com junção de malha devido ao nível superior de tensão na linha de junção em relação à malha em si. Isso poderia ter sido facilmente reproduzido no modelo computadorizado se sua referência fosse a modelagem em linha, ou no modelo de lycra, se previsto o uso da linha de junção de malha; para os dois casos seria bastante a existência de uma linha divisória da malha com tensão superior a essa.

A capacidade da rede em malha quadrada em deformar sua superfície ao longo de linhas de junção de maior rigidez, mantendo seu contorno bem próximo ao de referência e redistribuindo tensões de maneira uniforme é mais uma evidência da capacidade dos ajustes por deslizamento de borda na suplementação das etapas preliminares de projeto. Neste caso, a redistribuição uniforme de tensões na rede corrigiu a fase de busca da forma, por encontrar uma nova configuração de equilíbrio não existente na forma de referência em lycra; os ajustes de borda foram fundamentais para a uniformidade do retesamento da malha na nova configuração.

Os resultados referentes ao modelo do tipo 03 são apresentados nas tabelas 8, 9 e 10. Os valores de área discordante por unidade de contorno referencial são altos, no âmbito da pesquisa, uma média de 0,0814. Os altos valores da tabela 8 e 9 apontam para divergências formais entre o modelo de referência (lycra) e os outros. Por outro

lado, a significativa diminuição dos valores na tabela 10 aponta para uma aproximação entre a modelagem computadorizada e de linha.

No gráfico 9 fica perceptível a aproximação entre a modelagem com linha e a modelagem computadorizada nos contornos externos da vista frontal. A modelagem em lycra apresenta áreas de maior tensionamento na superfície sobre o eixo transversal da base elíptica, e, com isso, curvaturas muito pouco acentuadas no contorno externo da vista frontal; o modelo computadorizado corrigiu a forma, acentuando a curvatura dos cabos transversais; no modelo com linha, apesar de ter sido reproduzida a geometria do desenho de padronização de corte, verificaram-se curvaturas mais próximas às do modelo numérico que às do modelo de referência, em lycra. Esse fenômeno é repetido nas vistas laterais e de topo, evidenciando a correção da forma por ajustes de deslizamento nas bordas em projeto de estruturas retesadas com redes em malha quadrada.

No tipo 03, o principal problema relacionado à modelagem em lycra é a diferença dimensional entre os eixos maior e menor da base, o que veio a acarretar diferenças na distribuição de tensões no tecido, que, por sua vez, influenciaram o comportamento da borda em laço, o *eye loop*, deformando sensivelmente o contorno da forma como visto no gráfico 10.

A observação dos contornos do gráfico nove deixa claro pequenas flechas nas curvaturas no eixo transversal do modelo de lycra, um erro de *form-finding* decorrente do uso de materiais muito comuns e do sumário procedimento adotado. Uma distribuição mais equilibrada das tensões aproxima a forma do modelo de linha ao contorno da modelagem computadorizada, possível pela reorganização da malha através de ajustes por deslizamento em borda.

Uma vista da estrutura da sede do IL, com parâmetros semelhantes ao tipo 03, mas com planta aproximando-se a um círculo, demonstra as curvaturas adequadas à construção de estruturas retesadas de membranas. Uma maneira de evitar erros na fase de busca da forma é modelar a estrutura por meio de filmes líquidos, gerando superfícies mínimas, ou por um software de elementos finitos.



Ilustração 53 - Estrutura da sede do IL em testes. Reproduzida de (OTTO/RASCH, 1995, p. 102).

A construção de modelos de linha ou de arame permite uma visualização do retesamento de cada elemento em particular e correção de problemas por ajustes de deslizamento em borda ou por redimensionamento dos segmentos. O uso de rede de cabos em malha quadrada na construção real com ajustes *in situ* permite melhoramentos da forma e redistribuição de tensões, porém, com um custo em acréscimo no tempo de trabalho.

A tabela 11 apresenta uma comparação geral entre os valores de área discordante por unidade de contorno. Nessa tabela, dadas as complicações verificadas pelos requerimentos de projeto do tipo 01, foram utilizados seus melhores resultados dentre os alcançados no trabalho com modelos.

A média geral dos valores do tipo 01 ficou próxima à dos valores do tipo 02, por volta de 0,0429. O tipo 03 apresentou um valor consideravelmente maior, 0,0814, quase o dobro dos valores anteriores; esse número certamente poderia ter sido reduzido se mais configurações fossem realizadas.

A comparação entre a modelagem com linha e computadorizada apresentou uma média geral menor que a da comparação entre modelagem em lycra e computadorizada. Esse é um interessante dado uma vez que não sendo referências uma para a outra, acabaram por apresentar maior proximidade formal. É bem verdade que os resultados do tipo 03 foram determinantes nas médias, para cima, das comparações com o modelo de lycra, mas, por outro lado, os valores do tipo 01 utilizaram os melhores resultados dentre os alcançados em várias tentativas, e no campo 3 do tipo 02 a linha de junção de malha causou grande diferença na forma dos modelos de linha; descarta-se esse dado como verdadeiro, sendo necessárias muitas outras experiências para se comprovar o fenômeno.

Pela observação dos resultados fica claro que os ajustes por deslizamento de bordas são potencialmente úteis no projeto de estruturas retesadas de redes de cabos em malha quadrada, seja para corrigir determinados aspectos da forma, redistribuindo tensões pela rede, seja para corrigir pequenos erros de padronização de corte e de locação de elementos no sítio de construção. Esse tipo de refinamento pode ser aplicado na realização de modelos de precisão para testar configurações de malha

de melhor uniformidade de retesamento e em ajustes de borda *in situ* para garantir a uniformidade de tensão na malha antes da protensão final dos cabos de borda.

No entanto, a construção de grandes estruturas com redes de cabos de aço exige um maior controle sobre o nível de tensões atuantes na rede. Atualmente, isso pode ser alcançado de modo mais promissor através de modelagem numérico-computadorizada, que pode ser utilizada, ademais, em quase todas as fases do projeto. Porém, ao contrário do comportamento das redes de cabos com os elementos da malha seguindo percursos geodésicos, as redes de cabos em malha quadrada exigem mais dos pesquisadores da área. Uma vez que as referências da década de 1990 ainda mencionam a necessidade do uso de modelos físicos para gerar a configuração de partida para o trabalho com métodos numéricos, assim como foi feito no projeto da cobertura do complexo olímpico de Munique de 1972, é bem provável que a única maneira simples de se realizar atualmente modelos computadorizados com redes de cabos em malha quadrada, independentes, é recorrer aos poucos softwares especializados em estruturas retesadas capazes de trabalhar com a técnica matemática de relaxação dinâmica.

Dada a flexibilidade das técnicas envolvidas, a construção de coberturas com redes de cabos em malha quadrada parece mais adequada que a construção de estruturas com membranas sintéticas para a realidade da construção civil no Brasil. Permitindo o uso de técnicas semelhantes de montagem em solo e pré-fabricação, porém, sem a necessidade dos equipamentos necessários para a solda das membranas e sem o preciosismo dimensional do corte dos elementos, a construção de redes em malha quadrada pode ser compartilhada por fábricas e construtoras comuns, bastando, para tanto, um bem documentado projeto executivo e o acompanhamento técnico da execução da obra.

7. CONCLUSÃO

Os ajustes por deslizamento em bordas podem ser utilizados como etapa suplementar das fases preliminares do projeto de coberturas retesadas com redes em malha quadrada corrigindo a forma e redistribuindo tensões na rede, bem como corrigindo eventuais falhas de padronização de corte ou de locação da obra.

A aplicabilidade de redes em malha quadrada na construção de estruturas de pequena responsabilidade técnica convalida os refinamentos de borda como etapa importante no projeto e na construção dessas estruturas, favorecendo seu uso em conjunto com técnicas e materiais simples, como os utilizados na presente pesquisa. Entre as aplicações diretas de técnicas simples suplementadas pelo potencial dos ajustes por deslizamento em borda, podem-se citar:

- Estruturas arquitetônicas de pequeno porte que utilizem redes em malha quadrada como estrutura de cobertura.
- Redes de proteção para quadras esportivas, geralmente realizadas com tela de nylon em malha quadrada.
- Aviários ou outros ambientes enclausurados por redes sintéticas ou metálicas.

A construção de grandes coberturas arquitetônicas, no entanto, exige níveis de controle e segurança que demandam projetos supostamente isentos de erros e cuidadosa implantação da estrutura, sendo intoleráveis erros básicos como, por exemplo, a locação de elementos, ignorando-se, assim, a necessidade dos ajustes por deslizamento em borda nesses projetos de grande precisão e grande responsabilidade técnica.

A modelagem física utilizada nas experiências do presente trabalho, descritas na seção 3, foi realizada sem comprometimento com precisão técnica, entretanto, modelos construídos com arames podem ser utilizados como base de trabalho

consideravelmente mais precisa, inclusive para estimar o nível de cargas nos cabos, como ocorreu até a década de 1970, antes do advento da modelagem computadorizada.

O uso de redes em malha quadrada é um importante meio para a construção de estruturas retesadas, visto que:

- Podem ser facilmente pré-fabricadas por máquinas, transportadas em rolos, e montadas com mão de obra comum.
- Podem ser montadas sem necessidade de andaimes, utilizando a pequena dimensão de malha como base de trabalho para os operários, com a grande vantagem de não sofrerem o “efeito vela” a que são submetidas as membranas frouxas à mercê do vento.
- Podem ser construídas com perímetros flexíveis ou perímetros rígidos, com formas típicas das coberturas de membrana.
- Podem utilizar diversos materiais na construção da rede e em sua vedação, variando a resistência, durabilidade, dimensão de malha e custo, segundo sua finalidade de uso e regime climático a que são expostas.

Objetivando implementar o uso das redes de cabos em malha quadrada no Brasil, apontam-se dois problemas fundamentais e específicos para pesquisas futuras:

- Modelagem numérico-computadorizada cuja principal diferença em relação à modelagem de redes de cabos comuns é a problemática relação entre o controle da topologia da rede *versus* o controle das tensões.
- Vedação eficiente da malha levando em conta as acomodações da rede, o conforto ambiental, a praticidade de montagem, a viabilidade econômica e a proteção dos elementos estruturais.

8. BIBLIOGRAFIA

ALMEIDA, J. G. MEMBRANA & ESTRUTURA DE BAMBU EM ARQUITETURA: POTENCIALIDADES E DIFICULDADES. *in* 1º Simpósio Nacional Sobre Tensoestruturas, São Paulo. **2002.**

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS TASK COMMIT. TENSIONED FABRIC STRUCTURES: A PRACTICAL INTRODUCTION. R.E. Shaeffer. **1996.**

ARCHITECTURAL FABRIC SOURCEBOOK - LOADS AND ANCHORING. Fabrics and Architecture. **1998.**

ARCHITECTURE TEXTILE. Tempera Editions. Paris. **1990.**

ARUP. ANNUAL REPORT 2000. **2001.**

BEAUD, M. A ARTE DA TESE. Bertrand Brasil. Rio de Janeiro. **1997**

BERGER, H. Light Structures - Structures of Light: the art and engineering of tensile architecture. Suíça: Birkhäuser, Basel, **1996.**

BUCHHOLDT, H. A. AN INTRODUCTION TO CABLE ROOF STRUCTURES. Cambridge University Press, Cambridge. **1985.**

CARL STAHL. CATÁLOGO TÉCNICO NR.2. **2002.**

CIMAF CABOS S/A. CATÁLOGO. **2002,**

COSTELLO, G. A. THEORY OF WIRE ROPE. Springer-Verlag. New York. **1997.**

DEIFELD, T. E. C. / PAULETTI, R. M. O. UM BREVE ESTUDO SOBRE AS ESTRUTURAS TENSEGRITY. *in* 1º Simpósio Nacional Sobre Tensoestruturas, São Paulo. **2002.**

DREW, P. TENSILE ARCHITECTURE. Boulder, Colo.: Westview Press, **1979.**

ENGEL, H. SISTEMAS DE ESTRUTURAS. Stuttgart. Hemus. **1977.**

FREITAS, C. S. A TECNOLOGIA DE MEMBRANAS EM TECIDO: ESTUDO DE UMA ARQUITETURA SUSTENTÁVEL EM ZONAS DE CLIMA TROPICAL". *in* 1º Simpósio Nacional Sobre Tensoestruturas, São Paulo. **2002.**

HATTON, E.M. THE TENT BOOK. Houghton Mifflin Company Boston. **1979.**

HEBBELINCK, S. / MOLLAERT, M. / HAASE, J. FROM SMALL PARTS TO LARGE STRUCTURES. Bauen mit Textilien Heft 4/ **2001**

HERZOG, T. PNEUMATIC STRUCTURES: A HANDBOOK FOR THE ARCHITECT AND ENGINEER. London, Crosby Lockwood Staples. **1977.**

HINTON, C. CREATING THE DOME. Cambridge University Engineering Department. **2001.**

IASS. COLLOQUIUM ON HANGING ROOFS, CONTINUOUS METALLIC SHELL ROOFS AND SUPERFICIAL LATTICE ROOFS. PROCEEDINGS OF THE IASS COLLOQUIUM ON HANGING ROOFS, CONTINUOUS METALLIC SHELL ROOFS AND SUPERFICIAL LATTICE ROOFS. Amsterdam : North-Holland , **1963**.

IRVINE, M. CABLE STRUCTURES. Dover Pubns. **1992**.

ISHII, K. MEMBRANE DESIGNS AND STRUCTURES IN THE WORLD. Toquio. Shinkenchiku - Sha, . **1999**.

KRISHNA, P. CABLE-SUSPENDED ROOFS. McGraw-Hill, New York, **1978**.

LAGINHA, L. M. TENSOESTRUTURAS E CABOS. Curso EPUSP - PEF-5015, **1998**.

LEONHARDT, F. / SCHLAICH, J. CABLE-SUSPENDED ROOF FOR MUNICH OLYMPICS. *in* Civil Engineering, ASCE Vol. 42, No. 7. pp. 41-44. **1972a**.

LEONHARDT, F., / SCHLAICH, J.. STRUCTURAL DESIGN OF ROOFS OVER THE SPORTS ARENAS FOR THE 1972 OLYMPIC GAMES: SOME PROBLEMS OF PRESTRESSED CABLE NET STRUCTURES. The Structural Engineer Vol. 50, No. 3. pp 113-119. **1972b**.

LEWIS, W. J. / GOSLING, P. D. STABLE MINIMAL SURFACES IN FORM-FINDING OF LIGHTWEIGHT TENSION STRUCTURES. *in* International Journal of Space Structures Vol. 8, No. 3. pp. 149-166. **1993**.

MACAULAY, D. City. CONSTRUÇÃO DE UMA CIDADE ROMANA. Martins Fontes, São Paulo. **1989**.

MAJOWIECKI, M. WIDESPAN LIGHTWEIGHT TENSION STRUCTURES: FROM CONCEPT TO DETAIL DESIGN. *in* 1º Simpósio Nacional Sobre Tensoestruturas, São Paulo. **2002**.

MASCARÓ, J. L. O CUSTO DAS DECISÕES ARQUITETÔNICAS. Nobel, São Paulo. **1985**.

MEDLIN, L. A MASTER'S LEGACY. *in* Fabric and Architecture. pp. 50-53. **1999**.

MIDDENDORF, J. FORM FINDING FOR ANTICLASTIC MEMBRANE STRUCTURES. Master of Design Studies. GSD 6319. **2000**.

MOLLAERT, M. BUIDING 'LARGE' SCALE MODELS OF TENSILE STRUCTURES. *in* Tensinews No 4. pp. 2-3. **2003**.

MONCRIEFF, E. / TOPPING, B.H.V. COMPUTER METHODS FOR THE GENERATION OF MEMBRANE CUTTING PATTERNS. *in* Computers & Structures Vol. 37, No. 4. pp. 441-450. **1990**.

MOORE, F. CONCEPTS AND PRATICE OF ARCHITECTURAL DAYLIGHTING. New York: .Van Nostrand Reinhold Company, **1985**.

NOVÁK, B. DEVELOPMENT OF ELEMENTS OF TENSION STRUCTURES IN EUROPE. *in* 1º Simpósio Nacional Sobre Tensoestruturas, São Paulo. **2002**.

OLIVEIRA, M.B. / BARBATO. R.L.A. ESTRUTURAS DE MEMBRANA: ESTADO DA ARTE E TENDÊNCIAS DE DESENVOLVIMENTO. *in* 1º Simpósio Nacional Sobre Tensoestruturas, São Paulo. **2002**.

OTTO, F. / RASCH, B. FINDING FORM: TOWARDS AN ARCHITECTURE OF THE MINIMAL. Stuttgart. Editions Axel Menges. **1995**.

OTTO, F. PALESTRA DE ABERTURA. *in* 1º Simpósio Nacional Sobre Tensoestruturas, São Paulo. **2002**.

OTTO, F. IL 25 - EXPERIMENTS - PHYSICAL ANALOG MODELS IN ARCHITECTURAL DESIGN. Institut für Leichte Flächentragwerke (IL) - Universität Stuttgart, **1990**.

OTTO, F. ARCHITECTURE ET BIONIQUE: CONSTRUCTIONS NATURELLES. Suisse. Editions Delta et Spes, S.A. **1985**.

OTTO, F. TENSILE STRUCTURES, MIT Press, **1974**.

OTTO, F. TENSILE STRUCTURES; DESIGN, STRUCTURE AND CALCULATIONS OF BUILDINGS AND CABLES, NETS AND MEMBRANES. Cambridge. MIT Press, **1973**.

OTTO, F. CUBIERTAS COLGANTES. Barcelona. Editorial Labor, S.A. **1958**.

PAULETTI, R. M. O. HISTÓRIA, ANÁLISE E PROJETO DAS ESTRUTURAS RETESADAS, São Paulo. **2003**.

PAULETTI, R. M. O. SOBRE CABOS E CORDAS. *in* 1º Simpósio Nacional Sobre Tensoestruturas, São Paulo. **2002**.

PORTO, C. E. ANÁLISE DAS NOVAS TÉCNICAS DE CONSTRUÇÃO VINCULADAS AOS MATERIAIS. Curso de Mestrado UnB - FAU - TEC. Brasília. **2003**.

PORTO, C. E. O PAPEL DA RFR NA CONCEPÇÃO DAS NUUVENS DO GRANDE ARCO DE LA DÉFENSE. *in* 1º Simpósio Nacional Sobre Tensoestruturas, São Paulo. **2002**.

ROBBIN, T. ENGINEERING A NEW ARCHITECTURE. United States of America, Quebecor - Eusy Press, Leominster, Massachusetts. **1996**.

ROLAND, C. FREI OTTO: ESTRUCTURAS, Gustavo Gili, **1973**.

SALVADORI, M. WHY BUILDINGS STAND UP. THE STRENGTH OF ARCHITECTURE. WW Norton & Co. New York. **1990**.

SALVADORI, M. STRUCTURE IN ARCHITECTURE. New Jersey. Prentice Hall . **1963**.

SCHIERLE, G. ANTICLASTIC MEMBRANES AND CABLE NETS. **2001**.

SCHOCK, H.J. SOFT SHELLS - DESIGN AND TECHNOLOGY OF TENSILE ARCHITECTURE . Boston. Birkhäuser. **1997**.

SECRETS OF LOST EMPIRES: COLOSSEUM - Documentário em Vídeo. NOVA. **1997**.

SILVA, D. M. ESTRUTURAS: UMA ABORDAGEM ARQUITETÔNICA. Porto Alegre. Sagra Luzzato. **1997**.

SIMÕES, F. M. UTILIZAÇÃO DE TÊXTEIS NA ARQUITETURA E ACÚSTICA - ORIGENS. *in* 1º Simpósio Nacional Sobre Tensoestruturas, São Paulo. **2002**.

SPECIAL SINGLE STOREY STRUCTURES. STRUCTURAL SYSTEMS: BUILDINGS. Disponível em :
<<http://www.kuleuven.ac.be/bwk/materials/education/master/wg14/10602.htm>> Acesso em 04/2003.

TENSION STRUCTURES, 2 videos, 45 minutes + 35 minutes, The Building Centre Trust. **1990.**

TIBERT, G. NUMERICAL ANALYSES OF CABLE ROOF STRUCTURES. Licentiate Thesis, Department of Structural Engineering, Royal Institute of Technology, Sweden. **1999.**

VANDENBERG, M. CABLE NETS, DETAIL IN BUILDING. Great Britain. Academy Editions. **1998.**

WAGNER, R. TENSILE AND PNEUMATIC SYSTEMS - APPLICATIONS AND RESEARCH. *in* The Eighth International Workshop on the Design and Practical Realisation of Architectural Membrane Structures. Berlin. **2003.**

WAGNER, R. CABLE AND MEMBRANE STRUCTURES. Ernst & Sohn. **2002.**