

UTILIZAÇÃO DE MEMBRANAS TENSIONADAS LEVES NA EXECUÇÃO DE ESTRUTURAS ESPECIAIS

RODRIGO ESMERIZ FALCÃO MOREIRA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Orientador: Professor Doutor Rui Manuel Carvalho Marques de Faria

Co-Orientador: Professor Doutor Hipólito José Campos de Sousa

JULHO DE 2008

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2007/2008

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2007/2008 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

À minha Mulher, Marta, e minha filha, Inês.

*To Engineers who, rather than blindly following the codes of practice, seek to apply the laws
of Nature.*

T.Y. Lin

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas que tornaram possível a realização deste trabalho, nomeadamente:

- ao meu orientador, Professor Rui Faria, pela sua permanente disponibilidade e amizade demonstradas ao longo do meu percurso académico;
- ao Professor Hipólito de Sousa, Administrador da SOPSEC, SA e co-orientador deste trabalho, pelo seu apoio e incentivo;
- à Professora Rosemarie Wagner, da *Munich University of Applied Sciences*, pelo incentivo e orientação no arranque deste trabalho e por todo o apoio prestado ao longo da sua realização;
- à Marta, minha Mulher, pela sua compreensão e pelo tempo que não lhe pude dedicar.

RESUMO

As membranas tensionadas leves proporcionam coberturas de grande vão com elevado interesse espacial e grande variedade de formas, requerem um número mínimo de elementos de apoio “rígidos” e asseguram níveis muito bons de iluminação natural. Do ponto de vista da engenharia são membranas esbeltas de espessura constante que, em virtude da sua forma e das elevadas deformações inerentes ao seu comportamento, são capazes de suportar as acções regulamentares. Níveis de pré-esforço ligeiros permitem ainda aumentar a sua rigidez, maximizando assim o seu desempenho.

O actual panorama civilizacional exige, de facto, construções mais ligeiras, energeticamente mais eficientes, mais móveis e adaptáveis, em suma mais naturais, sem que haja prejuízo das exigências de segurança. Logicamente, este caminho leva a um maior desenvolvimento das construções leves, à construção de tendas, cascas e membranas insufladas. Conduz também a novos conceitos de mobilidade e flexibilidade/adaptabilidade.

Nos últimos 15 anos o domínio de aplicação das membranas tensionadas leves tem vindo assim a crescer consideravelmente, sendo previsível a continuação desta tendência. Apesar deste crescimento estas estruturas são consideradas especiais, o que está ligado ao facto de requererem técnicas sofisticadas de projecto e tecnologias de construção não tradicionais. O conhecimento sobre como projectar e construí-las está limitado a um número relativamente pequeno de especialistas e fabricantes.

Assim sendo, surge a necessidade de as comunidades técnica e científica estarem melhor informadas sobre o comportamento, vantagens e desvantagens da aplicação destas estruturas em oposição às realizações mais convencionais. O presente trabalho pretende, então, sintetizar o actual estado do conhecimento nesta matéria e identificar as necessidades de investigação científica no sentido de perspectivar desenvolvimentos futuros.

Numa primeira parte são cobertas questões relacionadas com a forma que tais estruturas podem assumir, suas características e comportamento, classificação e domínios preferenciais de aplicação. Em seguida são discutidos aspectos relativos a bases de dimensionamento, critérios de segurança e acções de projecto. Por fim, é revista e comentada a sequência do processo de análise estrutural e descritos os diferentes métodos numéricos disponíveis para resolver os problemas de geração de formas e análise estática não-linear das estruturas, sendo particularmente desenvolvida a formulação do método da densidade de forças. O trabalho termina com um exemplo numérico de análise de uma estrutura muito simples.

PALAVRAS-CHAVE: Membranas tensionadas leves, geração de formas, análise não-linear.

ABSTRACT

Fabric structures provide widespan enclosures of great spatial interest and variety, require minimal supporting elements of “hard” structure and provide very good overall levels of natural daylight. From an engineering point of view fabric structures are thin membranes of constant thickness which, by virtue of their surface shape and inherent large deflection behaviour, are able to support the imposed loads required by design codes. They are modestly prestressed to enhance their stiffness.

Our time demands lighter, more energy-saving, more mobile and more adaptable, in short more natural constructions, without disregarding the demand for safety. This logically leads to the further development of light constructions, to the building of tents, shells, awnings and air-supported membranes. It also leads to a new mobility and changeability.

The tensile surface structure’s business has thus grown considerably in the last 15 years and is predicted to grow further. Despite this tendency, they are still considered to be special due to the sophisticated structural analysis techniques required and non-traditional construction methods involved. Knowledge of how to design and construct them is limited to a relatively few specialist designers and fabricators.

Therefore, there is a need for the technical and scientific communities to be better informed about the general behaviour and the advantages and disadvantages of using tensile surface structures, in relation to more conventional structures. This work is then an attempt to summarize current knowledge on this topic and identify fields that require further scientific research, in order to plan future developments.

The first part of the work is dedicated to the variety of forms offered by tensile surface structures, their characteristics and behaviour, classification and applications. In the next part, issues related with structural design basis, safety criteria and design loading conditions are discussed. The last part of the work explains the design sequence and presents the general concepts common to all equilibrium modelling systems before a more detailed exposition of the Force Density method. The extension of the Force Density method to geometrically non-linear elastic analysis is described. The work closes with a simple structure design example.

KEYWORDS: Tensile surface structures, form finding, non-linear analysis.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
 1. INTRODUÇÃO	 1
1.1. ENQUADRAMENTO GERAL.....	1
1.2. ENQUADRAMENTO NORMATIVO.....	2
1.3. OBJECTIVOS E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	3
 2. ENGENHARIA DAS MEMBRANAS TENSIONADAS LEVES	 5
2.1. FORMA E COMPORTAMENTO	5
2.1.1. CONFIGURAÇÃO DAS SUPERFÍCIES	5
2.1.2. PRÉ-ESFORÇO.....	8
2.1.3. DEFORMABILIDADE.....	8
2.2. SEQUÊNCIA DE PROJECTO	10
2.2.1. CONCEPÇÃO GERAL	10
2.2.2. PORMENORIZAÇÃO	11
2.2.3. DADOS PARA FABRICO	12
 3. FORMAS E CARACTERÍSTICAS	 13
3.1. A ARTE MINIMALISTA DAS ESTRUTURAS EM MEMBRANA TENSIONADA.....	13
3.2. LEQUE DE FORMAS.....	14
3.2.1. MEMBRANAS DE SUPERFÍCIE ANTICLÁSTICA	14
3.2.2. MEMBRANAS DE SUPERFÍCIE SINCLÁSTICA	16
3.2.2.1. Estruturas suportadas por ar	16
3.2.2.2. Estruturas hidrostáticamente modeladas	17
3.3. APLICAÇÕES E CLASSIFICAÇÃO.....	18
3.3.1. MEMBRANAS ABERTAS	19
3.3.1.1. Abertas e Envolventes.....	19
3.3.1.2. Abertas e Interiores	20

3.3.1.3. Abertas e Acopladas	21
3.3.2. MEMBRANAS FECHADAS	22
3.3.2.1. Fechadas e Envoltentes	22
3.3.2.2. Fechadas e Interiores	23
3.3.2.3. Fechadas e Acopladas	24
3.3.3. MEMBRANAS CONVERSÍVEIS	25
3.3.3.1. Conversíveis e Envoltentes	25
3.3.3.2. Conversíveis e Interiores	26
3.3.3.3. Conversíveis e Acopladas	26
3.4. QUALIDADES ARQUITECTÓNICAS E CONSTRUTIVAS	27
3.4.1. LEVEZA	27
3.4.2. TRANSLUCÊNCIA	28
3.4.3. FLEXIBILIDADE	28
3.4.4. ESCULTURALIDADE	29
3.4.5. SEGURANÇA	30
3.4.6. FORMA ARQUITECTÓNICA EXPRESSIVA	30
3.4.7. PROTECÇÃO CLIMÁTICA	31
3.4.8. MOBILIDADE E EFEMERIDADE	31
3.4.9. CONVERTIBILIDADE E ADAPTABILIDADE	32

4. BASES DE DIMENSIONAMENTO E CRITÉRIOS DE SEGURANÇA	35
4.1. BASES DE DIMENSIONAMENTO – GENERALIDADES	35
4.2. COEFICIENTES DE SEGURANÇA – PERSPECTIVA DOS CRITÉRIOS REGULAMENTARES	36
4.2.1. RECOMENDAÇÕES DO GRUPO DE TRABALHO 7 DA IASS	36
4.2.2. MANUAL FRANCÊS DE COBERTURAS TÊXTEIS DE CARÁCTER PERMANENTE	37
4.2.3. NORMA ALEMÃ DIN 4134	38
4.2.4. REGULAMENTO ITALIANO	41
4.2.5. MANUAL DA ASSOCIAÇÃO DE ESTRUTURAS EM MEMBRANA DO JAPÃO	41
4.2.6. NORMA DA ASCE	41
4.2.7. SÍNTESE E COMENTÁRIOS	42
4.3. PROPAGAÇÃO DE RASGOS	42
4.4. RESISTÊNCIA DE EMENDAS E EFEITOS DA TEMPERATURA	44

4.5. CABOS, CORDAS E CINTAS: COEFICIENTES DE SEGURANÇA	45
4.6. ESTRUTURAS DE SUPORTE EM AÇO: COEFICIENTES DE SEGURANÇA	45
4.7. INSTABILIDADE DE ELEMENTOS DE SUPORTE	45
4.8. ANÁLISE GLOBAL DE ESTABILIDADE	45
4.9. DEFORMAÇÕES: ESTADOS LIMITES E <i>PONDING</i>	46
4.10. ESTADOS LIMITES RELATIVOS A CEDÊNCIA DE COMPONENTES / ROTURA DA TELA	46

5. ACÇÕES DE PROJECTO 47

5.1. ESTRUTURAS LEVES SUJEITAS A ACÇÕES EXTERNAS	47
5.2. PRÉ-ESFORÇO	47
5.2.1. COMPENSAÇÃO	48
5.2.2. SUBSTITUIÇÃO DA TELA	49
5.3. PESO PRÓPRIO	49
5.4. ACÇÃO DO VENTO	49
5.4.1. VELOCIDADE DO VENTO	49
5.4.2. VALORES DOS COEFICIENTES DE PRESSÃO C_p	49
5.4.3. VALORES DE C_p PARA ESTRUTURAS SIMPLES E DE PEQUENA DIMENSÃO	50
5.4.4. VALORES DE C_p PARA FORMAS IRREGULARES E COMPLEXAS E ESTRUTURAS DE GRANDE VÃO	50
5.4.5. EFEITOS DINÂMICOS	51
5.5. ACÇÃO DA NEVE	53
5.5.1. DISTRIBUIÇÃO DA ACÇÃO DA NEVE	53
5.5.2. ESCORREGAMENTO	53
5.5.3. <i>PONDING</i>	53
5.5.4. REMOÇÃO	54
5.6. ACÇÃO DA TEMPERATURA	54
5.7. ACÇÃO DO SISMO	55
5.8. TOLERÂNCIAS DE CONSTRUÇÃO ADMISSÍVEIS	55
5.9. COMBINAÇÃO DE ACÇÕES	56
5.10. COLAPSO DESPROPORCIONAL	56

6. ANÁLISE ESTRUTURAL 57

6.1. EVOLUÇÃO TEMPORAL DOS MÉTODOS E A NECESSIDADE DO CÁLCULO AUTOMÁTICO	57
6.2. SEQUÊNCIA E CONDICIONAMENTOS DO PROCESSO DE ANÁLISE ESTRUTURAL	59

6.3. MÉTODOS NUMÉRICOS PARA GERAÇÃO DE FORMAS E ANÁLISE ESTÁTICA.....	62
6.3.1. MÉTODO DA DENSIDADE DE FORÇAS APLICADO À GERAÇÃO DE FORMAS	63
6.3.2. MÉTODO DA DENSIDADE DE FORÇAS APLICADO À ANÁLISE ESTÁTICA	65
6.4. MODELOS NUMÉRICOS PARA RELAÇÕES TENSÃO-EXTENSÃO DE TECIDOS	66
6.4.1. EFEITO DA INTERACÇÃO ENTRE FIBRAS (<i>CRIMP INTERCHANGE EFFECTS</i>)	67
6.4.2. MODELOS DE GRELHA.....	68
6.5. EXEMPLO PRÁTICO.....	68
 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	 79
7.1. CONCLUSÕES	79
7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.2.1. – Superfície anticlástica.....	5
Fig.2.2. – Cone	6
Fig.2.3. – Sela.....	6
Fig.2.4. – Parabolóide Hiperbólico.....	6
Fig.2.5. – Cume e Vale.....	6
Fig.2.6. – Modelo em película de sabão de uma cobertura	6
Fig.2.7. – Modelo com anéis concêntricos.....	7
Fig.2.8. – Limitações das películas de sabão.....	7
Fig.2.9. – <i>Akita Sky Dome</i>	9
Fig.2.10. – <i>Cargolifter Airship Hangar</i>	9
Fig.2.11. – <i>Munich Airport Centre</i>	10
Fig.2.12. – <i>Sony Center Forum</i>	10
 Fig.3.1. – Escritórios da <i>PW Coopers</i>	 13
Fig.3.2. – <i>Thowal Spectator's Tent</i>	13
Fig.3.3. – Princípio da sela de 4 pontas.....	15
Fig.3.4. – Exemplo de disposição radial	15
Fig.3.5. – <i>Thowal Majlis Tent</i>	15
Fig.3.6. – <i>Pontiac Silver Dome</i>	16
Fig.3.7. – Pavilhão de exposições	16
Fig.3.8. – Classificação das Estruturas em Membrana Tensionada	18
Fig.3.9. – Membrana aberta sobre um espaço exterior.....	19
Fig.3.10. – <i>Palenque Building – Expo 1992</i>	19
Fig.3.11. – <i>San Nicola Stadium</i>	20
Fig.3.12. – Estádio Faro-Loulé	20
Fig.3.13. – <i>Ashford Designer Outlet Centre</i>	20
Fig.3.14. – Membrana aberta no interior de um edifício	20
Fig.3.15. – Telas interiores no <i>IBM Travelling Pavilion</i>	21
Fig.3.16. – Membrana aberta associada a um edifício	21
Fig.3.17. – <i>Sony Center Forum</i>	22
Fig.3.18. – <i>Fort IV</i>	22

Fig.3.19. – Membrana fechada sobre um espaço exterior	22
Fig.3.20. – <i>Valenton Water Treatment Plant</i>	22
Fig.3.21. – <i>Venafro Chemical Research Centre</i>	22
Fig.3.22. – <i>Millennium Dome</i>	23
Fig.3.23. – Membrana fechada no interior de um edifício	23
Fig.3.24. – Membrana fechada interior num edifício de escritórios – Munique, Alemanha	24
Fig.3.25. – Membrana fechada associada a um edifício	24
Fig.3.26. – <i>Amagi Sports Centre (interior)</i>	24
Fig.3.27. – <i>Amagi Sports Centre (exterior)</i>	24
Fig.3.28. – Membrana conversível sobre um espaço exterior	25
Fig.3.29. – <i>Tecklenburg open-air theatre</i>	25
Fig.3.30. – <i>Venezuelan Pavilion</i>	25
Fig.3.31. – Membrana conversível no interior de um edifício	26
Fig.3.32. – Dispositivos sombreadores no <i>Wildscreen</i> – Bristol, Reino Unido	26
Fig.3.33. – Membrana conversível associada a um edifício	26
Fig.3.34. – <i>Bad Hersfeld Collegiate Church Theatre</i>	27
Fig.3.35. – <i>Obhur Palace Reception Tent</i> – Arábia Saudita	27
Fig.3.36. – <i>Menlyn Park Shopping Centre</i> – Pretória, África do Sul	28
Fig.3.37. – <i>Piazza of Al-Hussein Mosque</i> – Cairo, Egipto	29
Fig.3.38. – <i>Piazzale Italia</i> – Milão, Itália	29
Fig.3.39. – Cobertura de um espaço privado – Dubai, Emirados Árabes Unidos	30
Fig.3.40. – Tenda para exposições – Malásia	31
Fig.3.41. – Cobertura de uma piscina – Sevilha, Espanha	32
Fig.3.42. – <i>Prophet's Holy Mosque</i> – Medina, Arábia Saudita	33
Fig.5.1. – Modelo em túnel de vento da cobertura de um estádio	50
Fig.5.2. – <i>Ponding</i> numa cobertura em tela – <i>Pennsylvania</i> , EUA	54
Fig.6.1. – Pavilhão Alemão – Expo 1967	57
Fig.6.2. – Modelo físico da estrutura [15]	57
Fig.6.3. – Modelo físico da rede de cabos da cobertura do Estádio Olímpico de Munique [15]	58
Fig.6.4. – Modelo físico de uma cobertura de forma complexa	59
Fig.6.5. – Sequência do processo de análise estrutural	59

Fig.6.6. – Exemplo de uma superfície cônica de campo não uniforme de tensões	60
Fig.6.7. – Exemplo de geração e refinamento automático de uma malha de elementos finitos.....	61
Fig.6.8. – Processo de divisão de uma superfície anticlástica em painéis individuais.....	62
Fig.6.9. – Fragmento de uma grelha de cabos.....	64
Fig.6.10. – Efeito da interacção entre fibras em estado biaxial de tensão	67
Fig.6.11. – Fronteiras e malha inicial (<i>ForTen 2000</i>).....	70
Fig.6.12. – Configuração da superfície obtida (<i>ForTen 2000</i>).....	70
Fig.6.13. – Pré-esforço na membrana para $C_{membrane} = 1.00\text{kN/m}$ (<i>ForTen 2000</i>)	71
Fig.6.14. – Pré-esforço na membrana para $C_{membrane} = 0.80\text{kN/m}$ (<i>ForTen 2000</i>)	71
Fig.6.15. – Pré-esforço na membrana – tensões em elementos lineares (<i>ForTen 2000</i>)	72
Fig.6.16. – Reacções nos apoios relativas ao estado pré-esforçado (<i>ForTen 2000</i>).....	72
Fig.6.17. – Quadro de definição de parâmetros de análise não-linear geométrica (<i>ForTen 2000</i>).....	73
Fig.6.18. – Tensões σ_{11} na membrana para o caso de carga LC1 (<i>ForTen 2000</i>)	74
Fig.6.19. – Tensões σ_{22} na membrana para o caso de carga LC1 (<i>ForTen 2000</i>)	75
Fig.6.20. – Tensões σ_{11} na membrana para o caso de carga LC2 (<i>ForTen 2000</i>)	75
Fig.6.21. – Tensões σ_{22} na membrana para o caso de carga LC2 (<i>ForTen 2000</i>)	76
Fig.6.22. – Tensões σ_{11} na membrana para o caso de carga LC3 (<i>ForTen 2000</i>)	76
Fig.6.23. – Tensões σ_{22} na membrana para o caso de carga LC3 (<i>ForTen 2000</i>)	77
Fig.6.24. – Deslocamentos na membrana para o caso de carga LC3 (<i>ForTen 2000</i>)	77

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

T	– esforço de tracção na membrana anticlástica [kN/m]
p	– pressão aplicada normal à superfície da membrana anticlástica [kN/m ²]
R	– raio de curvatura da superfície anticlástica [m]
EA	– rigidez do material [kN/m]
M	– esforço de tracção na membrana sinclástica [kN/m]
r	– raio da superfície sinclástica [m]
L_1	– factor de não uniformidade do material (IASS)
L_2	– factor de rigor de análise estrutural (IASS)
L_3	– factor de incerteza sobre acções (IASS)
L_4	– factor de incerteza sobre a aplicação (IASS)
L_5	– factor de confiança do material (IASS)
L_6	– factor de incerteza sobre a execução (IASS)
L_7	– factor para aspectos não previsto (IASS)
T_p	– tensão admissível do material (direcção principal ou secundária / Manual Francês)
T_{sm}	– tensão de rotura declarada do material (direcção principal ou secundária / Manual Francês)
K_q	– factor de qualidade da membrana (emendas e tela / Manual Francês)
K_e	– factor de escala (Manual Francês)
S_f	– factor de segurança (Manual Francês)
S_t	– coeficiente global de segurança do material (Manual Francês)
f_d	– tensão admissível no material (DIN 4134)
f_{tk}	– resistência à tracção do material (DIN 4134)
γ_f	– factor de carregamento (DIN 4134)
γ_M	– coeficiente de segurança do material (DIN 4134)
A_i	– combinação dos factores de redução (DIN 4134)
β	– factor de redução (ASCE)
L_t	– factor de ciclo de vida (ASCE)
K_n	– coeficiente de propagação de tensões
n	– número de fibras seccionadas
C_p	– coeficiente de pressão (acção do vento)
N_f	– frequências naturais da estrutura [Hz]
D	– rigidez da superfície da membrana [kN/m ²]

N_{warp} – pré-esforço na direcção principal [kN/m]
 N_{weft} – pré-esforço na direcção secundária [kN/m]
 R_{warp} – raio positivo na direcção principal [m]
 R_{weft} – raio positivo na direcção secundária [m]
 S_a, S_b, S_c, S_d – forças nas barras (método da Densidade de Forças) [kN]
 p_x, p_y, p_z – projecções da força exterior p (método da Densidade de Forças) [kN]
 a, b, c, d – comprimentos das barras (método da Densidade de Forças) [m]
 q_a, q_b, q_c, q_d – densidades de força nas barras (método da Densidade de Forças) [kN/m]
 A – área da secção da barra a (método da Densidade de Forças) [m²]
 a_0 – comprimento não tensionado da barra a (método da Densidade de Forças) [m]
 E – módulo de elasticidade do material [GPa]
 σ_x – tensão resultante na direcção principal [kN/m]
 σ_y – tensão resultante na direcção secundária [kN/m]
 σ_x^i – pré-esforço na direcção principal [kN/m]
 σ_y^i – pré-esforço na direcção secundária [kN/m]
 EA_x – factor de rigidez na direcção principal [kN/m]
 EA_y – factor de rigidez na direcção secundária [kN/m]
 EA_c – factor de rigidez cruzado [kN/m]
 ε_x – extensão na direcção principal
 ε_y – extensão na direcção secundária
 τ – tensão de corte resultante [MPa]
 G – módulo de elasticidade transversal do material [GPa]
 γ – extensão de corte

IL – *Institut für Leichte Flächentragwerke*

DIBT – *Deutsches Institut für Bautechnik*

IASS – *International Association for Shell and Spatial Structures*

ASCE – *American Society of Civil Engineers*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

EC – Eurocódigo

EN – Norma Europeia

PVC – Policloreto de vinilo

PTFE – Politetrafluoretileno

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO GERAL

As membranas tensionadas leves proporcionam coberturas de grande vão com elevado interesse espacial e grande variedade de formas, requerem um número mínimo de elementos de apoio “rígidos” e asseguram níveis muito bons de iluminação natural.

Do ponto de vista da engenharia são membranas esbeltas de espessura constante que, em virtude da sua forma e das elevadas deformações inerentes ao seu comportamento, são capazes de suportar as acções regulamentares. Níveis de pré-esforço ligeiros permitem ainda aumentar a sua rigidez, maximizando assim o seu desempenho.

Os materiais aplicados nas telas são geralmente tecidos revestidos por uma resina polímera, sendo a sua resistência essencialmente definida pelas fibras que os constituem. O revestimento protege as fibras de tecido contra a acção dos agentes atmosféricos (radiação ultra-violeta, humidade e precipitação) e funciona como impermeabilizador.

A sua forma depende de um equilíbrio de esforços de tracção, seguindo princípios estruturais que podem ser encontrados na Natureza. Surge assim a seguinte questão: como projectar estas estruturas minimalistas e que funcionam neste peculiar estado de tensão – tracção pura?

No projecto de construções tradicionais, a tarefa essencial da arquitectura é definir o *layout* geral, a geometria e os materiais no sentido de atingir um conceito funcional e agradável que vá de encontro ao que é pretendido. Aos primeiros esboços, que capturam e expressam a ideia e o espírito da construção, seguem-se os desenhos de projecto que organizam os conceitos essenciais de acordo com um conjunto de regras e são frequentemente baseados em grelhas ortogonais de eixos. Seguindo este caminho são seleccionados os materiais e as formas estruturais mais convenientes, concluindo com a selecção de um sistema de revestimento rígido que funcione como barreira atmosférica.

Este processo é algo diferente no caso de estruturas cujo fluxo interno de forças obedece a leis naturais. Enquanto a arquitectura tradicional está mais preocupada em realizar conjuntos racionais e sequências de espaço ortogonais, as membranas tensionadas definem construções onde estrutura e forma estão intimamente ligadas. Superfícies de forma minimalista criam espaços e ambientes interessantes através de um jogo de luzes e sombras. Membranas bem concebidas proporcionam protecção contra sol, chuva, neve e vento. Podem ser translúcidas ou até transparentes, o que permite controlar a quantidade de iluminação natural sobre os espaços que cobrem, ao mesmo tempo que são o principal elemento estrutural, sendo compatíveis com uma gama alargada de vãos.

O actual panorama civilizacional exige, de facto, construções mais ligeiras, energeticamente mais eficientes, mais móveis e adaptáveis, em suma mais naturais, sem que haja prejuízo das exigências de segurança. Logicamente, este caminho leva a um maior desenvolvimento das construções leves, à construção de tendas, cascas e membranas insufladas. Conduz também a novos conceitos de mobilidade e flexibilidade/adaptabilidade.

A expressão deste conjunto de qualidades ganha corpo na forma única das membranas tensionadas leves – “menos é mais” e não existe melhor forma de se atingir mais com menos do que construindo estruturas leves desta natureza.

No entanto, estas estruturas não são capazes de absorver erros de projecto. Qualquer descontinuidade ou falta de tensão será totalmente exposta, conduzindo a enrugamentos, deformações e reduzindo o tempo de vida útil da construção. São estruturas muito particulares que requerem um equilíbrio total entre os seus elementos e, como tal, não permitem alterações arbitrárias a componentes individuais. Tais alterações afectam a geometria e o equilíbrio de pré-esforço do sistema. Assim sendo, a concepção arquitectónica só terá sucesso se houver conhecimento dos princípios de funcionamento estrutural envolvidos.

A arte de “desenhar” membranas tensionadas é a arte de controlar as suas condições de fronteira e geometria dos apoios no sentido de gerar a forma mais adequada para o propósito em questão. Este é um processo mais disciplinado e interactivo do que aquele aplicado na concepção arquitectónica tradicional. É também uma abordagem científica que requer o envolvimento da arquitectura e de todas as engenharias necessárias em estreita colaboração e com o objectivo comum de encontrar a forma de maior simplicidade e pureza para desempenhar a função pretendida.

Ter como objectivo superfícies minimalistas como resultado de um processo de auto-génese é a base da engenharia das membranas tensionadas. Isto resulta em estruturas leves que não são apenas eficientes mas também de uma simplicidade apelativa, apesar das muitas formas possíveis que podem assumir – razão pela qual são frequentemente consideradas como sendo de grande beleza.

1.2. ENQUADRAMENTO NORMATIVO

O domínio de aplicação das membranas tensionadas leves tem vindo a crescer consideravelmente nos últimos 15 anos, sendo previsível a continuação desta tendência. Tais estruturas estão a tornar-se maiores e mais sofisticadas. Há cada vez mais interesse em aplicá-las, mas estas são ainda consideradas especiais – uma nova tecnologia. O conhecimento sobre como projectar e construí-las está limitado a um número relativamente pequeno de especialistas e fabricantes. Consequentemente, o seu potencial como parte integrante da realidade da construção encontra-se ainda por explorar, podendo este factor ter importância na altura de optar por este tipo de estrutura. Caso não figurem no vocabulário dos intervenientes Europeus na construção, a sua aplicação continuará a estar limitada.

Na Europa não existe regulamentação que inclua recomendações técnicas sobre aspectos tais como dimensionamento, especificação, ensaio e construção destas estruturas. Durante cerca de 30 anos têm sido apresentadas comunicações isoladas em conferências, publicados artigos muito específicos em revistas científicas e até realizados congressos inteiramente dedicados a este tema. Apesar disto, a informação disponível é ainda, de certa forma, *ad hoc*. No entanto, entre outros, importantes contributos têm sido dados pela série de volumes ilustrados publicada pelo *Institut für Leichte Flächentragwerke (IL)*, em Estugarda, e por comunicações apresentadas em diversas conferências por membros do *Working Group 6 – Tension and Membrane Structures* da *International Association for Shell and Spatial Structures (IASS)*.

A ausência de um documento normativo pode ser vista como um entrave para os investidores Europeus, assim como para as entidades licenciadoras ligadas à construção. Existem algumas normas nacionais mas que são incompletas, válidas apenas em domínios muito específicos e que diferem de país para país. As Partes 2.3 e 2.4 do Eurocódigo 1 [1] (acções da neve e do vento) não consideram as formas complexas de dupla curvatura das membranas tensionadas. A Norma Alemã DIN 4134 [2] dá apenas orientação mínima sobre estruturas insufláveis. A DIN 4112 [3] considera, de facto, membranas tensionadas de carácter temporário, mas sem detalhe. Já o *Bureau Veritas* (França) elaborou um conjunto de recomendações aplicáveis a membranas tensionadas de carácter permanente que foram publicadas em “*Annales du bâtiment et des travaux publics*” [4].

No resto do mundo, a *Membrane Structures Association of Japan* publicou um *Design Guide* [5] em 1990. Algum tempo depois, a *American Society of Civil Engineers (ASCE)* também publicou um manual [6] que posteriormente foi convertido em regulamento.

É opinião geral que a Europa carece de regulamentação neste domínio. Em 2004, a associação *TensiNet* editou o “*European Design Guide for Tensile Surface Structures*” [7] que, não pretendendo ser uma Norma Europeia, é um passo nessa direcção e constitui um *state of the art report* sobre este assunto. Uma vez que uma EN esteja disponível, as membranas tensionadas deverão começar a ter maior aceitação no seio da comunidade técnica, o que por sua vez deverá criar novas oportunidades de negócio para projectistas e construtores.

1.3. OBJECTIVOS E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Conforme é possível compreender do que foi dito nos pontos anteriores, existe a necessidade de as comunidades técnica e científica estarem melhor informadas sobre o comportamento, vantagens e desvantagens da aplicação de membranas tensionadas leves em oposição às realizações mais convencionais. O presente trabalho pretende, então, sintetizar o actual estado do conhecimento nesta matéria, aplicar as técnicas de análise estrutural disponíveis a um caso concreto e identificar as necessidades de investigação científica no sentido de perspectivar desenvolvimentos futuros.

A sua organização desenvolve-se em sete capítulos que, antes de se referirem às questões formais de análise e dimensionamento, dão uma perspectiva geral das estruturas em membrana tensionada, com o objectivo de enquadrar convenientemente um assunto menos explorado.

Após breve introdução realizada no presente capítulo, o segundo refere-se aos principais conceitos de engenharia associados a estas estruturas. São cobertos aspectos relativos às configurações que podem assumir, suas características e comportamento estrutural. É dada particular ênfase às questões do pré-esforço e da deformabilidade. É ainda desenvolvida a sequência de projecto usualmente seguida.

O terceiro capítulo é inteiramente dedicado às formas que as estruturas em membrana tensionada podem assumir, sendo extremamente ilustrado. São descritos todos os tipos de formas, ilustradas e comentadas aplicações em situações reais e proposta uma classificação. Por fim, são elencadas as suas qualidades arquitectónicas e construtivas.

O quarto capítulo é dedicado às bases de dimensionamento. São revistos vários regulamentos e normas, Europeus e não só, assim como manuais e recomendações de grupos de investigação pertencentes a associações internacionais. São comentadas as limitações de cada um e realizada uma síntese da informação recolhida. Alguns fenómenos particulares são, no final, comentados em separado.

O quinto capítulo refere-se às acções a considerar na análise e dimensionamento das membranas tensionadas. São comentados os valores normalmente utilizados e distribuições consideradas, sendo dado particular desenvolvimento aos métodos de determinação das acções do vento e fenómenos associados à sua actuação. São ainda comentados alguns outros fenómenos particulares característicos destas estruturas.

O sexto capítulo diz respeito às questões de análise estrutural. É dada uma breve perspectiva histórica sobre a evolução dos métodos de cálculo e evidenciada a necessidade de implementação de forma automática dos algoritmos desenvolvidos. A sequência do processo de análise estrutural é revista e comentada. Em seguida são descritos os diferentes métodos numéricos disponíveis para resolver os problemas de geração de formas e análise estática não-linear das estruturas, sendo particularmente desenvolvida a formulação do método da densidade de forças (por ser o algoritmo mais utilizado na Europa). É ainda feita referência aos modelos numéricos normalmente utilizados para as relações tensão-extensão dos materiais constituintes das membranas. O capítulo termina com um exemplo numérico de análise, ilustrativo do procedimento atrás revisto.

Por fim, o sétimo capítulo é dedicado a considerações finais sendo tiradas conclusões do trabalho apresentado e realizadas algumas recomendações para desenvolvimentos futuros.

2

**ENGENHARIA DAS MEMBRANAS
TENSIONADAS LEVES****2.1. FORMA E COMPORTAMENTO**

As estruturas em membrana tensionada apresentam formas e comportamentos que diferem substancialmente dos característicos das estruturas porticadas, usualmente aplicadas em construções convencionais. Os seus projectistas preocupam-se com três factores estruturais primários: escolha da forma da superfície, níveis de pré-esforço a instalar e deformabilidade. É ainda necessário levar em consideração aspectos relacionados com o ambiente interior dos espaços criados assim como com a escolha do tipo e classe do material a ser aplicado na membrana.

2.1.1. CONFIGURAÇÃO DAS SUPERFÍCIES

A forma da grande maioria das estruturas contemporâneas tem por base a geometria de uma superfície “anticlástica”. Trata-se de uma superfície na qual um conjunto de elementos “arqueados” traccionados actua em oposição a um conjunto semelhante de elementos “suspensos”. Em termos físicos, os dois conjuntos representam as direcções das fibras do tecido constituinte da membrana.

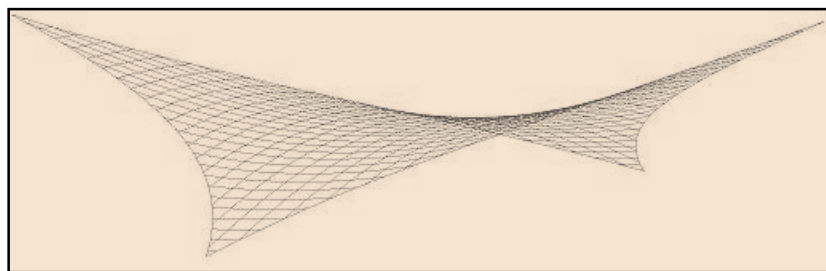


Fig.2.1. – Superfície anticlástica

Esta configuração tem uma propriedade valiosa no sentido em que a superfície, como um todo, é passível de ser pré-esforçada sem que ocorram mudanças significativas na sua forma global. Também possui “caminhos de esforços” claros e distintos para pressões descendentes e ascendentes. A pressão descendente devida à acção da neve é suportada pelas fibras que constituem os elementos “suspensos” enquanto a pressão ascendente devida à acção do vento é suportada pelas fibras que constituem os elementos “arqueados”.

Existem quatro tipos genéricos de superfícies anticlásticas de aplicação comum – “cone”, “sela”, “parabolóide hiperbólico” e “cume e vale”, ilustrados nas figuras 2.2 a 2.5. Na sua essência cada um é constituído por elementos curvos, sendo esta curvatura função das condições de fronteira impostas.

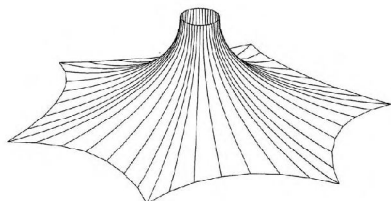


Fig.2.2. – Cone

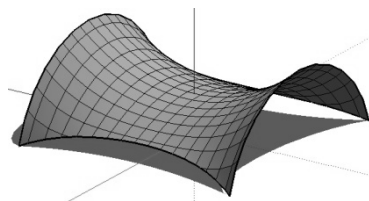


Fig.2.3. – Sela

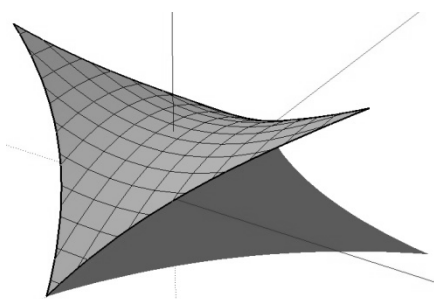


Fig.2.4. – Parabolóide Hiperbólico

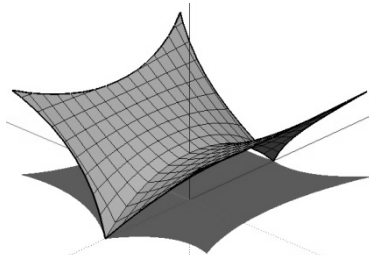


Fig.2.5. – Cume e Vale

Mais, a geometria da membrana não é definida pela imposição de uma superfície de revolução matematicamente definida. A sua forma é gerada através do seu “equilíbrio interno de pré-esforço” associado a condições de apoio pré-determinadas. A analogia física da película de sabão é aqui útil na medida em que esta apenas se pode formar dentro de um sistema de elementos fronteira cuja geometria permita a existência de tracções equilibradas entre as suas moléculas. A figura 2.6 ilustra um modelo físico de uma cobertura, realizado com recurso a esta técnica.

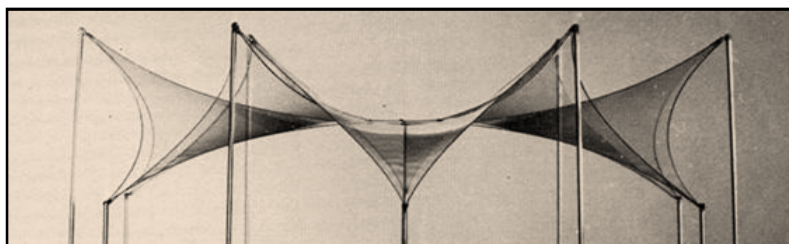


Fig.2.6. – Modelo em película de sabão de uma cobertura

Assim sendo, quando se trata de projectar estruturas em membrana tensionada, a definição da sua forma resume-se essencialmente à escolha de um conjunto de condições de fronteira. Estas últimas consistem na disposição de todos os elementos que contactam e garantem suporte à membrana, tais como cabos, mastros, arcos, vigas, etc. Este processo de definição da forma da estrutura é usualmente

denominado por “geração de formas” e consiste num processo iterativo durante o qual são realizados ajustes e alterações à disposição dos elementos de suporte.

Cada sistema de condições de fronteira dá origem a uma configuração única da película de sabão, o que implica que qualquer alteração, total ou parcial, destas condições modifica a forma da sua superfície. O modelo representado na figura 2.6 terá sido o resultado de várias iterações na escolha das alturas e espaçamentos dos apoios.

Importa também referir que existem limitações físicas às fronteiras entre as quais se conseguem formar películas de sabão e os seus modelos numéricos análogos. Por exemplo, existe um limite relativo ao espaçamento de qualquer par de anéis circulares concêntricos (figura 2.7) para além do qual a película “estrangula” e colapsa. Foram estabelecidos rácios, física e numericamente, para as películas de sabão que relacionam o diâmetro dos referidos anéis com o seu espaçamento. A figura 2.8 ilustra um gráfico onde Z^* representa a formulação numérica do referido rácio.

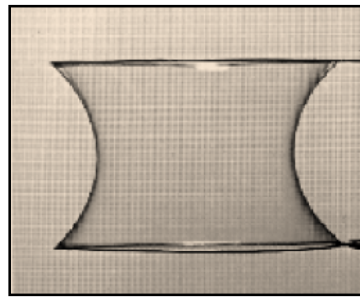


Fig.2.7. – Modelo com anéis concêntricos

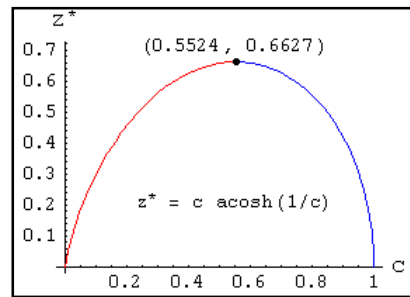


Fig.2.8. – Limitações das películas de sabão

No entanto, introduzindo um subconjunto de condições de fronteira no seio da película tal como um conjunto de “fios” esticados entre os anéis superior e inferior, uma película de sabão pode então formar-se fora dos limites impostos pelos rácios acima referidos.

Numa estrutura real estes fios podem constituir um conjunto de cabos de pré-esforço radiais dispostos em contacto com a superfície da membrana. Em alternativa poderão representar a presença de um campo não uniforme de tensões no seio de uma geometria ligeiramente alterada, onde o pré-esforço aplicado na direcção radial do tecido que constitui a membrana é mais elevado do que aquele aplicado na direcção circunferencial.

Este tipo de abordagem na definição da forma permite ultrapassar as limitações impostas pela película de sabão uniformemente tensionada e, por conseguinte, criar superfícies com rácios altura/diâmetro dos anéis menos restritivos à custa de campos de pré-esforço ligeiramente variáveis. Então, a configuração das superfícies pode ser não apenas o resultado da escolha das condições de fronteira mas também dos rácios de pré-esforço a aplicar. Mantenha-se, no entanto, presente que a escolha das condições de fronteira é a principal variável na definição da forma das superfícies, enquanto o rácio de pré-esforço a aplicar não é, por si só, um gerador da forma, apenas um modificador desta última.

As configurações que as estruturas em tela podem assumir não estão limitadas às quatro formas básicas ilustradas nas figuras 2.2 a 2.5. De facto, versões híbridas e suas combinações alargam consideravelmente o leque de formas disponível [8], conforme poderá ser visto nos exemplos que serão apresentados no Capítulo 3.

2.1.2. PRÉ-ESFORÇO

A aplicação de pré-esforço contribui significativamente para a rigidez das membranas, devido à actuação das suas componentes de curvatura oposta no sentido de limitar o que, de outra forma, seriam deformações muito elevadas, típicas de superfícies planas ou de curvatura simples. Na prática, os níveis de pré-esforço aplicados geralmente são consideravelmente inferiores à resistência última da membrana.

O nível de pré-esforço escolhido será normalmente um compromisso entre dois factores – suficientemente baixo para reduzir o trabalho envolvido durante a construção, e suficientemente elevado para que se mantenha efectivo após as perdas por fluência do material da membrana. O Capítulo 5 refere alguns valores usualmente aplicados.

A escolha das condições de fronteira iniciais para uma superfície anticlástica pode frequentemente basear-se na relação (2.1.) [7]:

$$T = p \times R \quad (2.1.)$$

onde T representa a tensão instalada na membrana, p a pressão aplicada normal à superfície e R o raio de curvatura da superfície. Esta relação é particularmente adequada quando se trata de formas em “sela” ou “parabolóide hiperbólico”. Estão, conhecendo a gama de pressões a que a estrutura irá estar sujeita, assim como o limite de forças actuantes aplicável, o(s) raio(s) de curvatura pode(m) ser facilmente calculado(s). Em seguida, esta informação pode ser analisada face às hipóteses iniciais colocadas sobre a geometria das condições de fronteira.

Este procedimento é simplificado, na medida em que assume que as pressões aplicadas são normais à superfície deformada e uniformemente distribuídas. Não obstante, pode ser tomado como ponto de partida da concepção estrutural assim como uma forma expedita de verificar resultados de modelos de análise mais elaborados.

Na situação de existirem condicionantes de natureza geométrica no problema – tal como pretender raios de curvatura alargados – então serão necessários níveis de pré-esforço mais elevados do que o habitual de forma a controlar as deformações da membrana. Na prática existem limites relativos ao que pode ser aplicado com segurança e permanece a longo prazo. No caso em que o raio de curvatura de superfície tende para infinito (superfície plana), os únicos parâmetros disponíveis para controlar as deformações da estrutura são o pré-esforço e a rigidez do material (EA).

Em grande parte das estruturas a quantidade de pré-esforço aplicada é igual nas duas direcções das fibras do material. No entanto, em casos onde a magnitude das pressões positivas e negativas aplicadas são marcadamente diferentes, pode ser economicamente vantajoso conceber a membrana de forma a que as fibras com menor raio de curvatura estejam sujeitas às pressões externas mais elevadas enquanto as fibras com maior raio de curvatura (mais planas) suportam as pressões menores. Desta forma as tensões máximas actuantes sobre a membrana serão da mesma ordem de grandeza.

2.1.3. DEFORMABILIDADE

Ao contrário do que acontece nas estruturas convencionais, nas membranas tensionadas a sua deformabilidade é vista como uma útil e importante característica. De facto, devido à sua relativamente baixa rigidez (tanto no plano como fora deste), alterações na sua configuração são a

primeira resposta destas estruturas a acções exteriores, a par de mudanças na distribuição de tensões ao longo da sua superfície. Mais, as extensões que se desenvolvem no seio do material da membrana são várias ordens de grandeza maiores do que aquelas que se desenvolveriam caso se tratasse de uma estrutura em aço, por exemplo. Consequentemente, quando solicitadas as estruturas em tela exibem deformações e alterações de geometria muito maiores do que as estruturas porticadas tradicionais. A flexibilidade dos apoios também pode contribuir para a sua deformabilidade desde que, como é evidente, a sua estabilidade global esteja assegurada.

Este comportamento tem o efeito benéfico de as tensões não evoluírem de forma linear com as acções aplicadas, devido às alterações de geometria que ocorrem na superfície da estrutura como um todo. Por exemplo, o fluxo de vento em volta de uma membrana cónica faz com que um mastro rotulado na base se incline contra o vento, permitindo assim que ocorra uma alteração na curvatura da superfície na face de barlavento. Isto atenua o aumento de tensão nessa zona, enquanto a alteração de curvatura que ocorre na face de sotavento ajuda a estabilizar o mastro. Cargas elevadas localizadas tais como a pressão do vento são, então, suportadas por uma área consideravelmente maior de que a superfície de actuação da carga devido a alterações geométricas que ocorrem no seio da membrana.

No entanto, permitir que uma membrana se deforme é benéfico desde que, quando carregada, a sua deformada mantenha a inclinação. O risco de projectar estruturas com baixa inclinação é criar a possibilidade de a acumulação de neve ou gelo causar deformações tais que se possa acumular água devida a degelo ou chuvas – fenómeno geralmente designado por “*ponding*”. A água acumulada conduz a um aumento de deformação que, por sua vez, permite a acumulação de mais água e assim sucessivamente podendo levar ao colapso da estrutura. Assim sendo, o objectivo é conseguir uma forma que, à medida que se deforma, mantém o sinal das inclinações quando solicitada pelo cenário de carregamento credível mais severo. Isto obriga a estudar cuidadosamente o comportamento da estrutura sob a acção da neve em fase de projecto. A escolha das condições de fronteira tem enorme influência assim como as características de rigidez consideradas para todos os elementos de suporte do sistema estrutural.

Em locais do Mundo com elevada queda de neve tais como Canadá, EUA e Japão, a aplicação de sistemas baseados em formas do tipo “Cume e Vale” e “Arco e Vale” tem tido sucesso quando empregues na cobertura de edifícios de grande dimensão. As figuras 2.9 e 2.10 mostram dois exemplos ilustrativos de edifícios situados no Japão e na Alemanha, respectivamente.



Fig.2.9. – Akita Sky Dome



Fig.2.10. – Cargolifter Airship Hangar

2.2. SEQUÊNCIA DE PROJECTO

2.2.1. CONCEPÇÃO GERAL

O programa base da obra e a natureza e configuração do local onde esta será construída têm de ser completamente considerados e compreendidos. Poderá haver exigências de espaço e ambiente interior passíveis de serem cumpridas com uma cobertura em tela e a forma desta mesma enquadrar-se harmoniosamente com a topografia do terreno envolvente. Será possível cumprir estas exigências com uma cobertura aberta ou será necessária uma construção fechada? As coberturas abertas permitem muito mais liberdade na escolha da sua forma e configuração e não requerem tolerâncias tão apertadas no que diz respeito à sua implantação final. Rematar o bordo de uma membrana com o topo de uma parede obriga a acomodar deformações relativamente elevadas da cobertura as quais, dependendo das circunstâncias, poderão atingir cerca de 500mm durante a actuação do vento ou neve. Torna-se então necessário aplicar uma série de mecanismos, executados com o material da própria membrana, que permitam realizar tal fecho. Estes são ligeiramente pré-esforçados por razões de estabilidade e aparência [9].

Por outro lado, nos casos em que se pretenda que a membrana faça parte da envolvente exterior de um edifício, poderá haver hipótese de integrar geometricamente os dois de forma a que as forças de tracção da membrana sejam em grande parte absorvidas pela estrutura do edifício em si, sem necessidade de existirem ancoragens pesadas ao solo e tornando o remate entre a cobertura e as paredes relativamente simples. As figuras 2.11 e 2.12 mostram dois exemplos de edifícios, situados em Munique e Berlim respectivamente, onde ocorre esta situação.

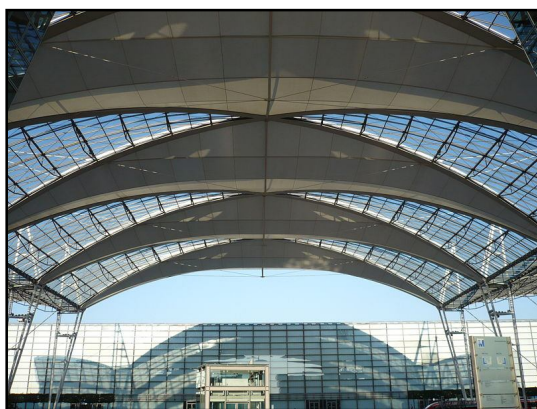


Fig.2.11. – Munich Airport Centre

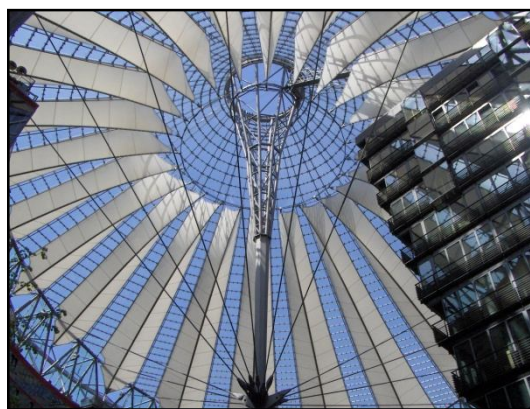


Fig.2.12. – Sony Center Forum

A localização geográfica tem influência directa no tipo e magnitude das acções que uma cobertura não retráctil de natureza permanente deve suportar. Valores característicos das acções do vento e da neve devem ser retirados dos Documentos Nacionais de Aplicação da legislação em vigor, dos registos meteorológicos do local em questão e, quando necessário, de ensaios em túnel de vento. Para estruturas de dimensão considerável, é essencial recorrer a este tipo de ensaios.

Os materiais constituintes das membranas são facilmente danificados por objectos afiados, o que as torna vulneráveis a danos por vandalismo ou impacto de objectos voadores. É assim necessário estudar os efeitos da cedência de um ou mais elementos no sentido de perceber a sensibilidade do sistema a estas eventualidades. Embora este tipo de dano seja relativamente raro, o Dono de Obra deve implementar um sistema de inspecção periódica da estrutura no sentido de prevenir acidentes graves

por deterioração de componentes. Para que tal seja possível é necessário que estes estejam acessíveis, devendo esta situação ser prevista em sede de projecto.

Os elementos constituintes de uma estrutura desta natureza são integralmente pré-fabricados e, uma vez montados, formam um sistema com geometria e distribuição de pré-esforço particulares. Assim sendo, tanto a tela como os cabos devem ser fabricados com dimensões inferiores às previstas na estrutura final de forma a poderem desenvolver as tensões pretendidas durante o processo de montagem.

Geralmente os elementos são montados num plano de nível e sem qualquer tensão instalada. Em seguida é necessário dar ao conjunto os deslocamentos necessários para o levar à sua posição final e induzir o pré-esforço desejado. O projectista terá, então, de prever este procedimento e assegurar que o seu processo de projecto inclui meios práticos e efectivos através dos quais é possível atingir a configuração pré-esforçada desejada.

Em alguns casos poderá ser necessário incluir elementos discretos no projecto, cujos comprimentos podem ser significativamente alterados durante o tensionamento, mas que permanecem no sistema como permanentes. São exemplos destes elementos mastros que são içados e tirantes que são tensionados. O projectista terá também que prever a ordem de grandeza e direcção dos deslocamentos e rotações expectáveis durante a montagem da estrutura, assim como em serviço, para que haja a necessária articulação entre elementos e nos pontos de apoio. O processo de projecto pode, então, envolver um número de iterações que obriguem a rever comprimentos de elementos, topologia e coordenadas [7].

Dependendo das circunstâncias, o projectista poderá explorar estes aspectos em primeira instância recorrendo a modelos físicos da estrutura à escala reduzida. A modelação numérica servirá, numa fase posterior, para confirmar as forças que se desenvolvem nos elementos estruturais em vários instantes durante as fases de montagem e tensionamento.

2.2.2. PORMENORIZAÇÃO

A pormenorização do projecto envolve várias fases e é invariavelmente apoiada por software de análise não-linear. Este processo pode ser resumido nas fases abaixo descritas e comentadas.

- a) Desenvolvimento do conceito inicial, incluindo definição da configuração de todos os elementos, materiais a aplicar e suas propriedades, dimensões e ligações.

É necessário estabelecer uma “forma equilibrada” simulando a membrana e os cabos com elementos finitos de rigidez nula, cada um dos quais com tensões instaladas específicas. Modificando a relação entre tensões e a geometria relativa dos apoios obtêm-se superfícies de geometria diferente. Este procedimento permite adaptar a forma a uma acção de cálculo dominante e melhorar a configuração de zonas que poderão ser mais propícias a inverter a sua inclinação e/ou curvatura.

Na análise estrutural que se segue à fase de geração da forma, os elementos de cabo e de membrana são já modelados com a sua rigidez real. Estas características são determinadas através de ensaios biaxiais do material a aplicar.

Durante o processo de cálculo, os elementos cuja tracção se anula são automaticamente desactivados. Isto permite simular o efeito de um cabo “frouxo” ou de uma parte enrugada da membrana. As malhas de elementos finitos usadas são alinhadas com as direcções das fibras do tecido, permitindo assim prever a localização e direcção das emendas entre os painéis individuais de tecido que irão formar a totalidade da superfície.

É importante ter consciência que a localização e direcção das emendas nunca são arbitrárias ou meramente uma questão de gosto, a não ser em estruturas pequenas e pouco solicitadas. As emendas são um indicador da direcção principal das fibras do tecido. Uma vez que na grande maioria dos tecidos as fibras principais são mais fortes que as secundárias, a direcção principal deverá ser orientada de forma a suportar as tensões mais elevadas, por uma razão de economia.

Em regiões com elevada queda de neve, a direcção principal será geralmente orientada segundo a curvatura em sela para que a sua maior rigidez possa limitar a deformação da membrana a médio e longo prazo. Nos casos em que a acção do vento é francamente superior à da neve, então fará sentido orientar as fibras principais segundo a curvatura em arco.

O modelo numérico da membrana é carregado com forças que representam a acção do vento e da neve nas direcções apropriadas. A superfície deformada sob a acção do seu peso próprio e da neve tem obrigatoriamente de ser analisada quanto à possibilidade de *ponding*. Neste sentido, deverá ser conduzido um exame rigoroso dos casos de carga possíveis e respectiva intensidade.

b) Definição do processo construtivo a aplicar. Esta fase inclui o desenvolvimento da sequência de montagem e plano de tensionamento.

O propósito desta fase é confirmar a viabilidade de determinada sequência e, quando necessário, determinar forças e deslocamentos importantes que surgem durante o processo construtivo. Tal informação é necessária, por exemplo, para o cálculo das ligações e ajuda a definir qual a melhor “posição inicial” dos elementos principais.

Este processo pode ser simulado numericamente modelando passo por passo a desactivação do pré-esforço instalado na estrutura [7]. Isto pressupõe uma série de passos discretos que deverão, como é evidente, ser praticáveis. Refira-se que a estratégia e técnicas escolhidas para a instalação do pré-esforço em obra deverão ser tão independentes quanto possível do fabrico e das tolerâncias da construção.

2.2.3. DADOS PARA FABRICO

Para que a construção de uma estrutura em tela seja bem sucedida é essencial que todos os elementos sejam fabricados com grande rigor dimensional. Isto requer que as dimensões dos painéis de tecido que vão constituir a totalidade da membrana sejam obtidas a partir da configuração final da estrutura, ou seja, após o tensionamento. As emendas entre painéis são definidas por linhas geodésicas, por uma questão de economia de material.

Os painéis desta forma definidos têm posteriormente de ser “compensados”, ou seja, reduzidos em percentagem, tanto na direcção principal como na secundária, de forma a permitir o desenvolvimento das extensões necessárias à instalação do pré-esforço. Os valores das reduções a aplicar são obtidos através de ensaios do material. Frequentemente é ainda necessário proceder a ajustes do comprimento de alguns bordos dos painéis (“descompensação”), de forma a facilitar a montagem [7].

Para além dos painéis de tecido, é também importante que os restantes elementos de suporte, tais como os cabos, sejam fabricados levando em consideração todos os aspectos de montagem e tensionamento.

É importante haver rigor, tanto no dimensionamento como no corte dos painéis individuais de tecido, uma vez que erros grosseiros irão impedir o desenvolvimento das extensões pretendidas e, como consequência, do pré-esforço necessário. Mais, o aspecto final da membrana ficará comprometido pelo aparecimento de vincos e rugas, não sendo em geral possível corrigir estes erros em obra.

3

FORMAS E CARACTERÍSTICAS

3.1. A ARTE MINIMALISTA DAS ESTRUTURAS EM MEMBRANA TENSIONADA

A arquitectura das membranas leves deu os seus primeiros passos com as experiências em película de sabão, levadas a cabo na década de 50, pelo Arquitecto/Engenheiro Alemão *Frei Otto* [10]. Encontrar as formas através de um processo de auto-génese é a filosofia da nova escola de Arquitectura que fundou.

Frei Otto estudou e desenvolveu a construção de modernas estruturas em membrana tensionada baseadas no conceito das “superfícies mínimas”. Estas são definidas como possuindo a superfície de menor área que requer o mínimo de energia potencial devido à sua forma, entre um conjunto determinado de condições fronteira. A sua principal característica estrutural é o facto de o campo de tensões que se desenvolve na sua superfície ser uniforme. As figuras 3.1 e 3.2 mostram dois exemplos destas estruturas, situadas na Bélgica e na Arábia Saudita respectivamente.



Fig.3.1. – Escritórios da PW Coopers



Fig.3.2. – Thowal Spectator's Tent

Para condições de fronteira definidas num dado plano, a superfície mínima resultante é também plana. No entanto, assim que um único ponto da superfície da membrana ou da sua fronteira sai desse plano, a superfície mínima resultante possui dupla curvatura em todos os pontos.

Tais superfícies com dupla curvatura podem ser sinclásticas ou anticlásticas. No caso das superfícies anticlásticas o somatório de todos os raios de curvatura (positivos e negativos) é igual a zero. Estes conceitos serão mais desenvolvidos no ponto 3.2.

As membranas de superfície anticlástica envolvem uma quantidade mínima de material para a função que desempenham. Devido à eficiência do seu comportamento estrutural são também capazes de redistribuir acções locais elevadas através de alterações significativas da sua configuração sem que resulte um aumento de tensão proporcional. Constituem assim estruturas leves que não são apenas eficientes mas também de uma simplicidade apelativa, apesar das muitas formas possíveis que podem assumir – razão pela qual são frequentemente consideradas como sendo de grande beleza.

3.2. LEQUE DE FORMAS

As estruturas em membrana tensionada oferecem uma variedade ilimitada de formas e assim grande liberdade para influenciar as suas qualidades espaciais. No entanto, a definição da forma arquitectónica é um processo disciplinado, obrigatoriamente baseado num conhecimento profundo deste tipo de estruturas.

Em geral podem considerar-se dois tipos diferentes de formas [7]:

- Formas **Anticlásticas**, ou em forma de sela com dupla curvatura, que são tensionadas e estabilizadas por acção de pré-esforço aplicado mecanicamente no plano da membrana;
- Formas **Sinclásticas**, ou esféricas com dupla curvatura, que são tensionadas e estabilizadas por pressão pneumática ou hidráulica actuando perpendicularmente à superfície da membrana.

3.2.1. MEMBRANAS DE SUPERFÍCIE ANTICLÁSTICA

É possível estabilizar um elemento no espaço usando apenas forças de tracção, desde que aquele seja actuado por um mínimo de 4 forças auto-equilibradas cujos vectores não sejam coplanares. Este princípio estrutural é a base da configuração estável das estruturas em membrana tensionada.

As membranas com dupla curvatura resistem pela sua forma às acções exteriores aplicadas, não pela massa. Basear a escolha da forma arquitectónica neste princípio permite cobrir áreas extensas com uma quantidade mínima de material.

A superfície tensionada é, por si só, o principal elemento estrutural. A tela é mantida em equilíbrio por reforços posicionados nas fronteiras (tais como cintas ou cabos) que se encontram distribuídos no espaço por elementos de suporte.

Alterando a disposição dos elementos de suporte internos e externos, os projectistas conseguem encontrar um elevado número de formas anticlásticas com dupla curvatura. Quando realizado de uma forma sistemática é possível considerar e desenvolver aspectos de índole arquitectónica e de engenharia em simultâneo. Refira-se que a distribuição e escala dos elementos de suporte e a forma da membrana têm de ser vistos em relação aos vãos a cobrir e às acções aplicadas. Desta maneira, a forma do espaço poderá ser definida num processo iterativo que permitirá encontrar a melhor solução arquitectónica.

Apesar de algumas formas anticlásticas clássicas serem frequentemente aplicadas, existe uma grande variedade de configurações disponível.

Existem dois métodos básicos de definição da forma de uma cobertura em membrana. O primeiro é baseado na distribuição livre de apoios internos e externos e condições de fronteira dando origem a uma estrutura equilibrada completamente tensionada. Isto permite criar ambientes arquitectonicamente

singulares. O segundo método aplica painéis modulares de dupla curvatura que são justapostos para criar estruturas de maior dimensão.

A forma anticlástica mais básica é a chamada “sela de 4 pontas”, definida por pontos altos e baixos alternados ligados por bordos rectos ou curvos (figura 3.3). Juntar vários módulos deste tipo numa disposição radial dá origem a uma estrutura “em forma de estrela”, podendo ter um ponto central alto ou baixo (figura 3.4). Quando dispostos de forma linear assumem uma forma baseada na alternância de pontos altos e baixos. Estes exemplos ilustram dois dos numerosos arranjos modulares possíveis que originam formas complexas de carácter repetitivo ou segmentado.

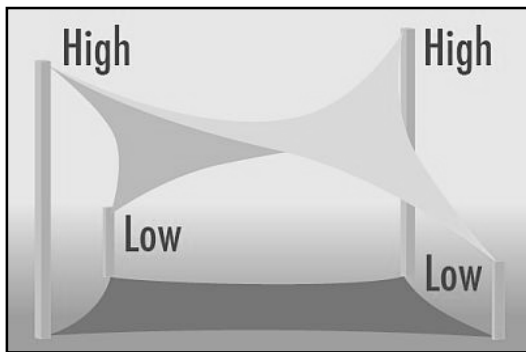


Fig.3.3. – Princípio da sela de 4 pontas

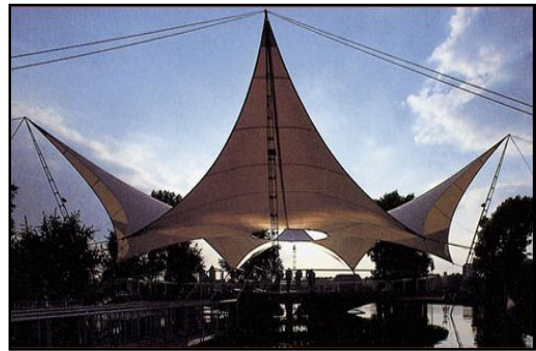


Fig.3.4. – Exemplo de disposição radial

Como alternativa às disposições modulares existem as estruturas de forma livre, sendo fascinantes do ponto de vista arquitectónico devido à sua dinâmica e aspecto contínuo. Podem assumir configurações relativamente simples, quando definidas por um número reduzido de pontos de apoio, ou mais complexas. Podem ser concebidas de forma simétrica ou de acordo com condições de fronteira dispostas livremente. Como é evidente, apresentam comportamento estrutural mais complexo e requerem maior detalhe uma vez que não há repetições de elementos. Do ponto de vista arquitectónico, não são tão rígidas formalmente e integram-se melhor em espaços de arquitectura complexa. A figura 3.5 mostra um exemplo de uma estrutura desta natureza, situada na Arábia Saudita.



Fig.3.5. – Thowal Majlis Tent

É importante referir que a forma não é independente da dimensão da estrutura que se pretende construir. A membrana tensionada precisa de espaço suficiente para poder desenvolver a sua dupla curvatura. A diferença de altura mínima entre os pontos de apoio altos e baixos está relacionada com o vão da estrutura, nível de pré-esforço e forças de reacção.

Vãos reduzidos requerem formas diferentes das adequadas a vãos mais elevados. Por exemplo, a simples sela de 4 pontas é uma das soluções mais leves e eficientes para vãos de 15-20m. Para vãos maiores esta forma requereria altura demasiado elevada, desenvolveria forças de reacção incomportáveis nos apoios e perderia a sua função arquitectónica como abrigo.

Para vãos elevados as estruturas necessitam de fronteiras lineares internas, tais como cumes ou vales, suportadas por vigas ou mastros interiores ou suspensas por apoios exteriores. Podem também existir apoios pontuais circulares desde que o seu diâmetro seja adequado ao vão envolvente, de forma a garantir a continuidade da forma e o fluxo de forças no seio da superfície da membrana.

A solução arquitectónica deve estar sempre em sintonia com a função da construção no que diz respeito a aspectos estruturais, formais e económicos. Seguindo o princípio das superfícies mínimas verifica-se que, frequentemente, a solução mais simples é a mais eficiente.

3.2.2. MEMBRANAS DE SUPERFÍCIE SINCLÁSTICA

As membranas de forma sinclástica possuem curvatura primária em todos os pontos da sua superfície, sendo modeladas, pré-esforçadas e estabilizadas por uma diferença de pressão de um gás ou fluido que actua na perpendicular à sua superfície. As forças que se desenvolvem são directamente proporcionais à curvatura da membrana, sendo que maiores raios de curvatura originam forças maiores.

As estruturas modeladas hidrostáticamente são o sistema natural que melhor distribui as cargas. Esta característica pode ser observada tanto nas gotas de água como nas células vivas. A pressão hidrostática aumenta com a altura de água criando, assim, formas com raio de curvatura continuamente variável. Por outro lado, as estruturas insufladas na atmosfera natural podem ser consideradas como sendo uniformemente carregadas.

3.2.2.1. Estruturas suportadas por ar

As estruturas suportadas por ar são membranas de forma sinclástica estabilizadas por uma diferença de pressão que actua na perpendicular à sua superfície. As figuras 3.6 e 3.7 mostram dois exemplos ilustrativos, situados nos EUA.



Fig.3.6. – Pontiac Silver Dome



Fig.3.7. – Pavilhão de exposições

A diferença de pressão é gerada por ventoinhas que insuflam ar para o interior de câmaras estanques existentes na superfície da membrana. Não há necessidade de elementos rígidos de suporte, tais como pilares, paredes, arcos, etc., tornando as estruturas insufladas as mais leves e minimalistas construções realizadas pelo Homem [9].

Os níveis de tensão instalados na superfície estão, conforme foi já referido, relacionados com o seu raio de curvatura. Por exemplo, numa esfera de raio r insuflada a uma pressão p , a tensão M na membrana é dada pela relação (3.1.) (válida para estruturas de qualquer dimensão):

$$M = \frac{1}{2} \cdot p \cdot r \quad (3.1.)$$

Calotes esféricas de raio alargado são formas muito eficientes para a realização de estruturas insufladas que estão essencialmente expostas à acção do vento, uma vez que é evitada a actuação de pressões dinâmicas positivas em áreas de grande dimensão. No entanto, estas estruturas apresentam deslocamentos elevados, em particular quando sob a acção não uniforme e anti-simétrica do vento e da neve.

As estruturas suportadas por ar com pressão interna positiva são essencialmente de superfície sinclástica. No entanto, em situações de concepção mais complexas, é possível aplicar painéis em forma de sela como ligação entre áreas de forma sinclástica.

O princípio pneumático possibilita uma grande variedade de formas, uma vez que permite executar estruturas estáveis com níveis de tensão variáveis, devido à variação dos raios de curvatura das superfícies. Esta variedade de formas pode ser estudada com recurso a modelos tridimensionais físicos e/ou numéricos.

Refira-se que é também possível executar membranas suportadas por ar que são tensionadas por acção de uma pressão negativa. Nesta situação o ar é mecanicamente evacuado para que a pressão no interior da estrutura seja inferior à pressão exterior, estabilizando desta forma a membrana. Naturalmente que é necessário existir uma estrutura de reacção, que poderá ser constituída por pórticos de secção tubular em aço, ou por costelas realizadas no mesmo material da membrana e insufladas a alta pressão, para que tenham a rigidez à flexão apropriada.

3.2.2.2. Estruturas hidrostáticamente modeladas

As formas das estruturas em membrana podem ser obtidas à custa de pressão hidrostática. A variação da pressão com a altura de água gera um conjunto de formas características. No seio de uma superfície uniformemente tensionada com a forma de uma gota de água assente sobre um contorno formando um plano de nível, o seu raio de curvatura varia continuamente desde um valor elevado no topo – correspondendo a baixa pressão interna – até um valor muito reduzido na base – correspondendo a maior pressão hidrostática.

A forma de gota representa a relação óptima entre volume e área superficial. Estas estruturas podem ser utilizadas para armazenar líquidos (foram já desenvolvidos alguns protótipos na Alemanha) assim como outras substâncias mais viscosas em diversas tarefas ambientais. Podem ainda ser utilizadas como barreiras contra inundações.

3.3. APLICAÇÕES E CLASSIFICAÇÃO

As membranas tensionadas estão já em aplicação num vasto conjunto de edifícios, servindo uma variedade de propósitos. Neste subcapítulo será apresentada uma classificação esquemática que pretende ilustrar os domínios de aplicação para os quais estas estruturas estão a ser utilizadas [7].

As membranas tensionadas podem ser classificadas de acordo com diferentes aspectos, tais como a função da construção, a função específica da tela (transmissão de luz natural, protecção contra o sol ou chuva, elemento definidor de espaço, etc.), o vão a vencer, ser ou não conversível ou a vida útil pretendida.

Os exemplos dados no presente capítulo ilustram as diferentes qualidades dos materiais têxteis revestidos – por exemplo leveza, translucência – e a variedade de formas arquitectónicas que é possível criar – por exemplo formas naturais, regulares, abertas ou fechadas. A aparência contrastante de alguns projectos sugere um quase infinito leque de possibilidades. A manipulação da estrutura, da sua forma e a aplicação de múltiplas camadas de material podem ser utilizados para evidenciar objectivos arquitectónicos específicos. Tecidos de alto desempenho podem ser aplicados em construções novas assim como na reabilitação e expansão de edifícios existentes.

Na figura 3.8 as colunas mostram construções abertas, fechadas e conversíveis. As três filas mostram estruturas que servem três propósitos diferentes – função de envolvente, aplicações interiores ou associação a outros edifícios.

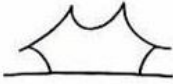
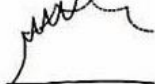
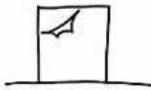
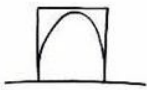
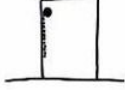
	Abertas	Fechadas	Conversíveis
Envolventes			
Interiores			
Acopladas			

Figura 3.8. – Classificação das Estruturas em Membrana Tensionada

Esta classificação particular não pretende ser restritiva, antes permitir a comparação e exploração das soluções existentes numa fase de concepção da estrutura. Refira-se ainda que esta classificação considera a função principal de cada construção. É normal que a membrana cumpra mais do que um propósito.

Evidenciando as características específicas e vantagens das construções existentes é possível fundamentar os projectos futuros e melhorar a construção e operação das novas membranas e seus componentes. Todavia, o contexto e o programa base têm sempre de ser cuidadosamente considerados para garantir que a estrutura em membrana oferece uma solução apropriada. Em caso afirmativo, então será necessário escolher o material adequado para cumprir o propósito em questão.

3.3.1. MEMBRANAS ABERTAS

A grande maioria das estruturas tensionadas pertence à categoria das membranas abertas. Tais estruturas oferecem protecção contra as condições atmosféricas e em simultâneo preservam a sensação de permanência num espaço ao ar livre.

3.3.1.1. Abertas e Envolventes



Fig.3.9. – Membrana aberta sobre um espaço exterior

Uma membrana aberta cobre uma área, um espaço aberto ou um edifício. Podem ser realizadas nas mais diversas configurações, sob a forma de tendas convencionais ou tendas conjugadas com pórticos de suporte, e também realizar marcos impressionantes.

Para algumas funções a existência de apoios internos não é necessariamente um inconveniente. Por exemplo, a cobertura do edifício ilustrado na figura 3.10 (Expo 1992 em Sevilha) toma apoio sobre uma grelha de pilares. Os pontos de apoio baixos estão dispostos na superfície de um cilindro imaginário de raio elevado. A curvatura global resultante reforça a impressão interna de espaço.



Fig.3.10. – Palenque Building – Expo 1992

As estruturas em membrana tensionada conseguem criar vãos livres de grande dimensão, daí a sua aplicação na execução de coberturas de grandes estádios de futebol, como por exemplo o *San Nicola Stadium*, em Itália (figura 3.11), e o Estádio Intermunicipal Faro-Loulé, em Portugal (figura 3.12).



Fig.3.11. – San Nicola Stadium

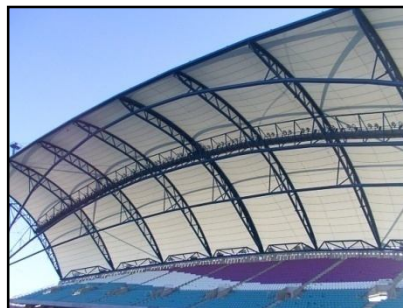


Fig.3.12. – Estádio Faro-Loulé

É também possível cobrir edifícios convencionais com uma membrana tensionada para reduzir o risco de infiltração de água devido a pendentes reduzidas, criar espaços ventilados à sombra ou permitir que a estrutura coberta seja mais ligeira (quando construída de raiz). Este princípio foi aplicado durante cerca de 35 anos e ainda é utilizado em climas temperados e tropicais.



Fig.3.13. – Ashford Designer Outlet Centre

Este mesmo princípio foi já aplicado a empreendimentos de maior dimensão tais como o *Ashford Designer Outlet Centre*, no Reino Unido (figura 3.13). A membrana cobre tanto os passeios pedonais como as lojas e é visível a grande distância, o que produz o efeito de atrair clientes.

3.3.1.2. Abertas e Interiores

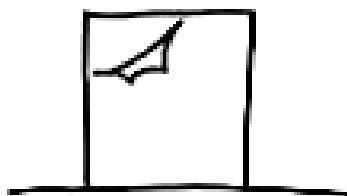


Fig.3.14. – Membrana aberta no interior de um edifício

No caso de fachadas envidraçadas de edifícios podem ser aplicadas telas, internamente ou externamente, com função de sombreamento. Quando colocadas no interior estas irão retardar o aquecimento do edifício e evitar encadeamento devido ao impacto directo da luz solar.

Revestimentos em vidro e policarbonato conferem excelente transparência, permitindo assim elevada transmissão de luz natural. No *IBM Travelling Pavilion* foram aplicadas membranas interiores de sombreamento ao longo do interior do edifício. Antes de a instalação ser finalizada foram realizados testes de desempenho no local.



Fig.3.15. – Telas interiores no *IBM Travelling Pavilion*

Refira-se ainda que o desempenho acústico de um determinado espaço pode ser melhorado pela aplicação de painéis têxteis suspensos, de forma sinclástica, ou membranas de forma anticlástica com duas camadas, contendo isolamento acústico no seu interior.

3.3.1.3. Abertas e Acopladas



Fig.3.16. – Membrana aberta associada a um edifício

Coberturas exteriores associadas a outros edifícios poderão criar espaços protegidos privados ou semi-públicos. São, essencialmente, construções definidoras de espaço.

A cobertura do *Sony Center Forum*, em Berlim, foi projectada com o objectivo de estender a utilização do fórum em situações de más condições atmosféricas. A cobertura cobre a praça como se de um guarda-chuva gigante se tratasse (figura 3.17).

Um outro exemplo de uma estrutura desta natureza é a cobertura executada sobre a praça interior do Forte IV em Antuérpia, Bélgica. A sua construção permitiu tornar a utilizar o espaço para a realização de eventos no Verão. A tela translúcida e fina parece extremamente leve em contraste com as paredes espessas do Forte. As partes transparentes da cobertura acentuam a sensação de permanência num espaço ao ar livre (figura 3.18).



Fig.3.17. – Sony Center Forum

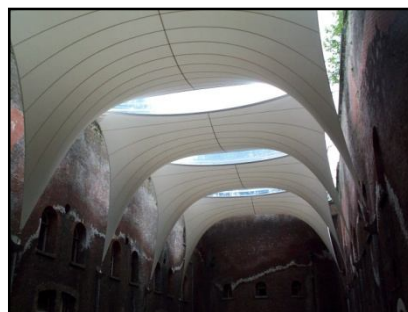


Fig.3.18. – Fort IV

3.3.2. MEMBRANAS FECHADAS

A envolvente exterior oferece protecção contra condições atmosféricas adversas (vento, chuva ou sol intenso) ao mesmo tempo que ajuda a criar um ambiente interior menos severo. Membranas com múltiplas camadas permitem melhorar o comportamento acústico e térmico assim como diminuir a transmissão de luz natural.

3.3.2.1. Fechadas e Envolventes



Fig.3.19. – Membrana fechada sobre um espaço exterior

A natureza do tecido a aplicar na realização da membrana depende da função pretendida para a construção. Por exemplo, caso se pretenda construir uma estufa então um tecido de elevada transparência deve ser aplicado. Por outro lado, uma envolvente opaca, com múltiplas camadas e acústica e termicamente isolada será adequada para a construção de um cinema. No caso de construções de natureza não permanente, que tenham de ser montadas e desmontadas regularmente, torna-se necessário limitar tanto o peso como as dimensões dos seus componentes.



Fig.3.20. – Valenton Water Treatment Plant



Fig.3.21. – Venafro Chemical Research Centre

As figuras 3.20 e 3.21 mostram dois exemplos de membranas completamente fechadas, situadas em França e Itália respectivamente, com objectivos distintos.

A cobertura de uma estação de tratamento de águas tem requisitos bem específicos: durabilidade do material, resistência ao envelhecimento por acção de produtos químicos, estanquidade ao ar, capacidade de ventilação, possibilidade de acesso para manutenção, etc. Estes aspectos têm influência significativa na escolha do material e da forma da superfície da estrutura assim como no detalhe das ligações.

No caso do centro de investigação representado na figura 3.21, os blocos interiores de edifícios que requerem a manutenção de ambientes muito controlados beneficiam de condições climáticas menos severas devido à actuação da membrana.

Um outro exemplo de uma estrutura pertencente a este grupo é a bem conhecida *Millennium Dome* no Reino Unido, representada na figura 3.22.



Fig.3.22. – *Millennium Dome*

3.3.2.2. Fechadas e Interiores

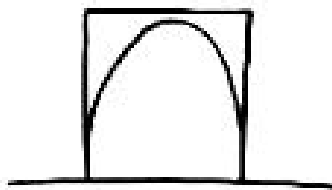


Fig.3.23. – Membrana fechada no interior de um edifício

Quando as características de uma construção não são suficientes para cumprir os requisitos específicos de conforto térmico, acústico ou até estético, recorrer à colocação de uma membrana interior poderá ser a solução. Esta actua como uma espécie de revestimento, permitindo assim dotar o edifício de características adequadas a outro tipo de função que não a original.



Fig.3.24. – Membrana fechada interior num edifício de escritórios – Munique, Alemanha

Este princípio foi aplicado na reconversão de um edifício industrial, representado na figura 3.24, em espaço para escritórios. A membrana interior, constituída por duas camadas de material transparente, permitiu melhorar o conforto interno e a acústica do espaço sem reduzir o nível de iluminação natural.

3.3.2.3. Fechadas e Acopladas



Fig.3.25. – Membrana fechada associada a um edifício

As coberturas em membrana colocadas entre edifícios, no seu topo ou ligadas à sua fachada têm frequentemente como objectivo a protecção de áreas nas quais os níveis de conforto relativos a temperaturas interiores são menos exigentes e a existência de iluminação natural é uma vantagem.



Fig.3.26. – Amagi Sports Centre (interior)

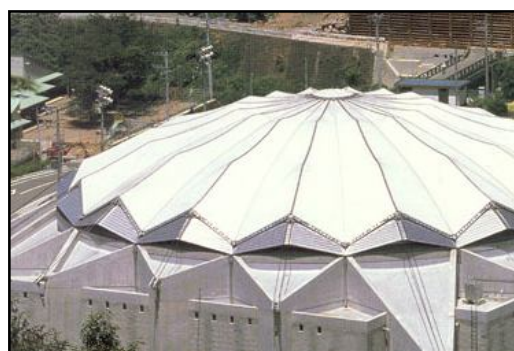


Fig.3.27. – Amagi Sports Centre (exterior)

A combinação de vidro com tecidos revestidos é frequentemente utilizada neste tipo de estruturas uma vez que permite a penetração de luz natural e previne o encadeamento e o sobreaquecimento. As figuras 3.26 e 3.27 mostram a cobertura de um pavilhão multi-desportos, situado no Japão, como exemplo deste tipo de aplicação. O nível de iluminação natural é elevado e a estrutura transmite uma grande sensação de leveza.

3.3.3. MEMBRANAS CONVERSÍVEIS

As estruturas conversíveis são construídas de maneira a que a sua forma possa ser alterada, com a frequência que se deseje, em relativamente pouco tempo. As membranas tensionadas são particularmente adequadas para este fim devido às suas propriedades específicas, referidas no ponto 3.4, proporcionando soluções que de outra forma não seriam possíveis.

3.3.3.1. Conversíveis e Envolventes

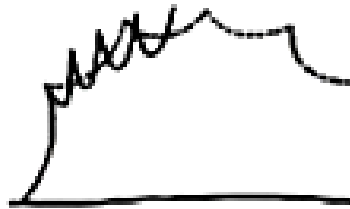


Fig.3.28. – Membrana conversível sobre um espaço exterior

Uma envolvente exterior adaptável pode interagir com as condições climáticas locais, variando de acordo com as estações do ano assim como com flutuações entre o dia e a noite.

Este conceito foi aplicado na cobertura de um teatro exterior situado na Alemanha. A cobertura é constituída por seis painéis insufláveis que se deslocam ao longo de um par de carris. Quando em funcionamento, os painéis são automaticamente insuflados com ar. Isto permite estabilizar a tela contra a acção do vento. Não sendo necessários, os painéis são esvaziados e recolhidos, quase desaparecendo (figura 3.29).



Fig.3.29. – Tecklenburg open-air theatre



Fig.3.30. – Venezuelan Pavilion

A cobertura do Pavilhão da Venezuela (Expo 2000 – Hannover, Alemanha) é outro exemplo. Esta abria ou fechava de acordo com as condições climáticas (figura 3.30).

3.3.3.2. Conversíveis e Interiores

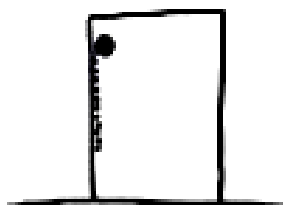


Fig.3.31. – Membrana conversível no interior de um edifício

As membranas adaptativas interiores podem ter diversas funções. Podem ser utilizadas para regular o nível de luz exterior e proteger contra demasiada luz solar directa. Podem servir também como elementos sombreadores para efeitos de privacidade.

A figura 3.32 mostra um exemplo deste tipo, situado no Reino Unido. Trata-se de um jardim botânico interior no qual a envolvente exterior é constituída por painéis insufláveis transparentes. O dispositivo sombreador retráctil está montado no interior.



Fig.3.32. – Dispositivos sombreadores no *Wildscreen* – *Bristol*, Reino Unido

3.3.3.3. Conversíveis e Acopladas

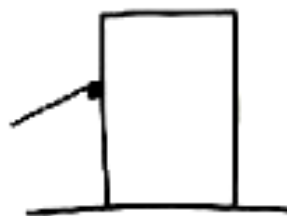


Fig.3.33. – Membrana conversível associada a um edifício

As membranas adaptativas associadas a edifícios têm as mesmas funções que as membranas não adaptativas acima discutidas. No entanto permitem que o espaço por elas definido seja aberto ou fechado.

Um dos exemplos mais conhecidos de coberturas retrácteis é a existente sobre o teatro a céu aberto nas ruínas da igreja de *Bad Hersfeld*, Alemanha, desenhada em 1968 por *Frei Otto*. Quando as condições climáticas são boas a membrana está recolhida em volta de um mastro podendo, em caso de chuva, ser desdobrada em poucos minutos. Esta estrutura foi reabilitada em 1992 (figura 3.34).



Fig.3.34. – *Bad Hersfeld Collegiate Church Theatre*

3.4. QUALIDADES ARQUITECTÓNICAS E CONSTRUTIVAS

Enquanto sistema construtivo as membranas tensionadas possuem qualidades muito especiais, essencialmente como resultado das suas formas singulares e da natureza dos seus materiais constituintes. Assim sendo proporcionam soluções arquitectónicas que não são passíveis de executar com os sistemas tradicionais [7], [9].

3.4.1. LEVEZA

O peso próprio das estruturas em membrana tensionada é reduzido, uma vez que a sua estabilidade estrutural resulta da sua configuração pré-esforçada e não da massa de material utilizada. Consequentemente são muito mais leves do que as estruturas tradicionais oferecendo, no entanto, grande estabilidade. A combinação entre peso reduzido e grandes vãos oferece à Arquitectura a oportunidade de expressar leveza e estabilidade de uma forma coerente e unificada através da concepção de cada detalhe.



Fig.3.35. – *Obhur Palace Reception Tent – Arábia Saudita*

3.4.2. TRANSLUCÊNCIA

A translucência é uma das qualidades mais apreciadas das coberturas têxteis. De facto, tal característica permite a manutenção do nível de iluminação natural necessário à utilização normal da construção, tendo assim um importante papel na sua eficiência energética. Isto é particularmente relevante em construções onde a luz é necessária de uma forma plena, por exemplo em complexos comerciais.

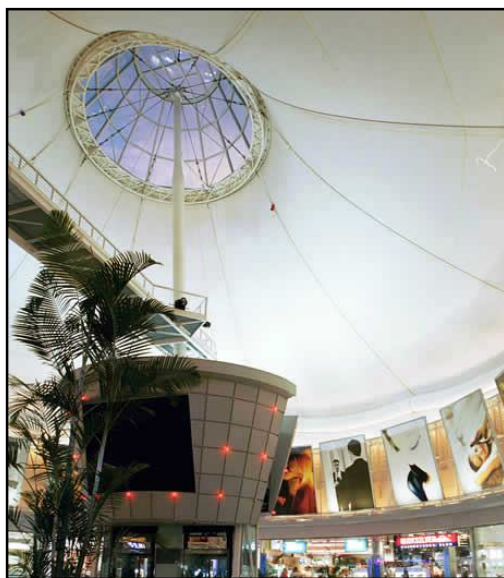


Fig.3.36. – Menlyn Park Shopping Centre – Pretória, África do Sul

Esta propriedade também oferece à Arquitectura grandes possibilidades estéticas, através da conjugação de luz natural e artificial. À noite, este efeito pode transformar a estrutura numa escultura de luz.

A translucência dos tecidos utilizados nas estruturas em membrana depende do tipo de fibra que forma a sua base estrutural assim como do material e cor do seu revestimento. Em geral este parâmetro varia entre 10% e 20% mas existem materiais com 40%, assim como outros completamente opacos. A aplicação de revestimentos pigmentados ou com padrões pode também servir para ajustar o nível de transmissão de luz.

3.4.3. FLEXIBILIDADE

As estruturas em membrana tensionada não são rígidas, podendo alterar a sua forma quando sob a acção do vento ou da neve. A sua geometria responde à solicitação deformando-se, desenvolvendo raios de curvatura mais apertados na direcção da acção, e encontrando assim uma forma estrutural mais eficiente para fazer face a essas condições particulares de carregamento.

A flexibilidade destas estruturas permite a ocorrência de grandes deslocamentos sem que haja lugar a deformação permanente. O grau de alteração e resposta dependem da elasticidade do material e do nível de pré-esforço instalado. Esta “inteligência estrutural” pode servir de inspiração à concepção arquitectónica.



Fig.3.37. – *Piazza of Al-Hussein Mosque* – Cairo, Egito

O grau de flexibilidade disponível varia consoante o material em questão. Existem materiais extremamente flexíveis que podem ser dobrados sem que ocorra fractura ou desgaste das fibras. Tais materiais são a base e pré-condição para estruturas conversíveis eficientes.

3.4.4. ESCULTURALIDADE

A forma única de uma membrana tensionada tem qualidades esculturais muito fortes. A sua superfície tensionada atinge o equilíbrio dentro de si própria. Os movimentos ascendentes e descendentes das superfícies anticlásticas equilibram-se sendo possível criar construções de grande dimensão que parecem flutuar sem esforço, desafiando a gravidade.



Fig.3.38. – *Piazzale Italia* – Milão, Itália

As membranas tensionadas dão à arquitectura a possibilidade de criar espaços complexos e equilibrados entre si. Estas construções modificam dramaticamente a sua aparência, num jogo de luz e sombras, enquanto as condições do dia evoluem. Arranjos de luz artificial, que usam a translucência e a reflectividade do material, contribuem para transformar estas estruturas em verdadeiras esculturas de luz.

3.4.5. SEGURANÇA

As membranas tensionadas leves são estruturas seguras concebidas e dimensionadas de acordo com os regulamentos e manuais existentes (ver Capítulo 4). São particularmente estáveis no que diz respeito a acções horizontais, como os sismos.

Em caso de colapso tais estruturas tendem a ser menos perigosas do que os sistemas construtivos tradicionais devido à sua reduzida massa. O risco é ainda menor nos casos em que a configuração da estrutura é tal que os elementos de suporte rígidos (mastros, vigas, etc.) se mantêm estáveis numa situação de rotura da tela.

Conforme já foi dito atrás, a flexibilidade destas estruturas permite-lhes encontrar a forma mais eficiente para fazer face a determinadas condições de carregamento. No entanto, a disposição e a forma da estrutura devem ser desenvolvidos e afinados para estas situações. O projectista deverá garantir que a membrana e todos os seus componentes trabalham em conjunto de forma a evitar o aparecimento de zonas de concentração de forças no seio da sua superfície ou nas ligações.

3.4.6. FORMA ARQUITECTÓNICA EXPRESSIVA

Uma característica arquitectónica comum a qualquer construção é a de representar uma ideia. As formas singulares das membranas tensionadas apresentam uma beleza natural que é, por si só, uma afirmação arquitectónica.



Fig.3.39. – Cobertura de um espaço privado – Dubai, Emirados Árabes Unidos

Tais formas criam marcos de grande interesse, tanto nas realizações isoladas como quando conjugadas com edifícios existentes. Quando bem concebidas são estrutural e formalmente equilibradas, o que faz com que se destaquem e se integrem tanto em ambientes naturais como em ambientes urbanos, sejam eles históricos ou modernos.

As estruturas tensionadas leves podem ser desenhadas e vistas como esculturas de grande dimensão, trazendo vida aos espaços existentes em sua volta, podendo ser complementares ou contrastantes.

3.4.7. PROTECÇÃO CLIMÁTICA

Uma das principais funções de uma cobertura é a de proporcionar abrigo e conforto em condições climáticas tais como sol, chuva, vento e neve, dependendo da zona climática onde se encontra. A escolha da forma e do material a aplicar deve levar em conta todas as condicionantes, de forma a proporcionar um ambiente interior adequado, sempre que possível por meios passivos, usando a própria arquitectura para reduzir o consumo energético da construção.



Fig.3.40. – Tenda para exposições – Malásia

Materiais de estrutura porosa podem ser utilizados para criar zonas de sombra. Isto permite controlar parcialmente a transmissão e reflexão da luz solar, de forma a garantir a iluminação do espaço, e estimular a ventilação natural. Isto, por sua vez, permite manter a superfície da membrana à temperatura ambiente e evitar radiação de calor descendente.

Quando o objectivo é proteger da chuva e da neve a forma da estrutura deve permitir o escoamento fácil e rápido das águas. A acumulação de água da chuva (*“ponding”*) e de grandes quantidades de neve tem de ser evitada. Este efeito pode ser muito importante na fase de construção, quando a configuração final pré-esforçada ainda não está instalada. Todas as juntas devem ser correctamente detalhadas de forma a serem estanques.

3.4.8. MOBILIDADE E EFEMERIDADE

A leveza das estruturas em membrana tensionada dá-lhes clara vantagem sobre as restantes construções quando consideradas como intervenção reversível sobre o ambiente. Outros dois aspectos importantes são a mobilidade e a flexibilidade.

Conceber uma estrutura que pode ser construída um grande número de vezes em locais diferentes é a expressão da mobilidade. A leveza e flexibilidade do material permitem que tais estruturas sejam transportadas e desdobradas fácil e rapidamente assim como que ocupem um espaço relativamente reduzido quando não estão montadas. Estas características são úteis para estruturas temporárias e móveis, e essenciais no caso de emergências e catástrofes em que é necessário criar abrigos para um grande número de pessoas em pouco tempo.



Fig.3.41. – Cobertura de uma piscina – Sevilha, Espanha

Por outro lado, o projecto de estruturas móveis que são capazes de proporcionar níveis de conforto equivalentes aos oferecidos por realizações de natureza permanente abre um novo aspecto no campo da construção. A construção deixa de ser imóvel, sendo este aspecto da maior importância no desenvolvimento acelerado das cidades actuais e nas consequentes “mudanças de uso” de zonas particulares, uma vez que tais construções podem ser movidas e reutilizadas.

3.4.9. CONVERTIBILIDADE E ADAPTABILIDADE

As estruturas conversíveis podem ser vistas como sistemas adaptativos criados pelo Homem que, à semelhança de muitos organismos naturais, se modificam consoante as necessidades. São flexíveis e adaptáveis no seu arranjo espacial e respondem às variações climáticas. Esta abordagem na fase de concepção/projecto leva automaticamente à possibilidade de poupança de energia, através do controlo da luz natural e da temperatura interna.

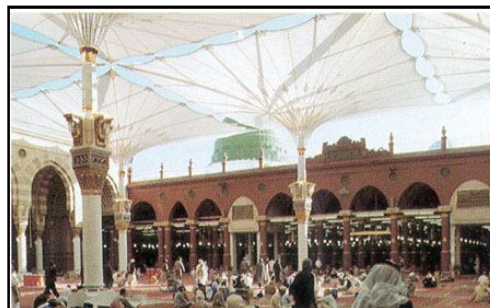
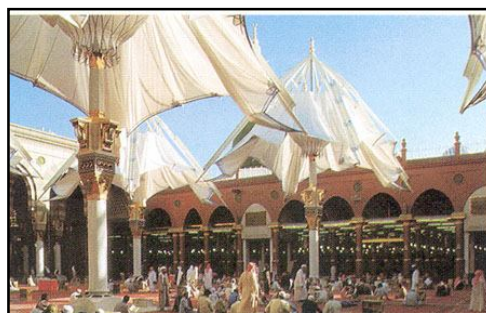
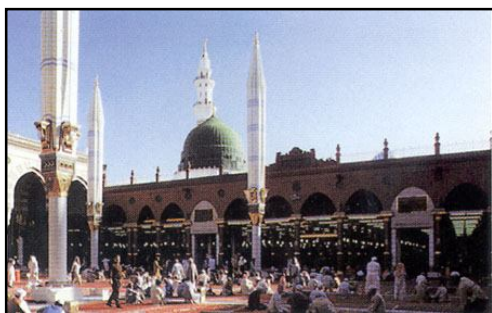


Fig.3.42. – Prophet's Holy Mosque – Medina, Arábia Saudita

A figura 3.42 mostra a sequência de abertura de um conjunto de guarda-sóis existente numa Mesquita. As condições climáticas são melhoradas por estas estruturas retrácteis que permitem controlar o equilíbrio de energia entre o edifício e o ambiente. No Verão, os guarda-sóis são abertos durante o dia, evitando assim a exposição à radiação solar directa, e fechados durante a noite, permitindo expor pessoas e edifício às frescas temperaturas nocturnas. No inverno, os guarda-sóis permanecem fechados durante o dia, de forma a permitir a recolha do calor da radiação solar. Durante a noite, o calor recolhido durante o dia é mantido durante mais tempo no interior da Mesquita abrindo os guarda-sóis.

A flexibilidade das estruturas conversíveis faz com que seja possível alterar o espaço arquitectónico, uma vez que este pode ser vivido de uma forma mais aberta ou mais abrigada. Os elegantes movimentos de uma cobertura conversível bem desenhada proporcionam uma sensação de harmonia entre Homem e Natureza, sintetizando o conceito da “casa sem construção” disponível apenas onde e quando necessária.

4

BASES DE DIMENSIONAMENTO E CRITÉRIOS DE SEGURANÇA

4.1. BASES DE DIMENSIONAMENTO – GENERALIDADES

A grande maioria dos regulamentos Nacionais e dos Eurocódigos são baseados na filosofia dos “estados limites”, ou seja, para várias combinações de acções majoradas a estrutura e os seus componentes devem respeitar determinados critérios de resistência e para várias combinações de acções de serviço não devem ser excedidos os limites de deformação e degradação impostos. Esta abordagem contrasta com a anterior filosofia das “tensões admissíveis”, na qual a tensão máxima que se desenvolvia na estrutura quando carregada com as acções de “serviço” não poderia exceder uma determinada percentagem da tensão de cedência do material constituinte.

Tratando-se de estruturas com comportamento elástico-linear (real ou assumido), não existe diferença significativa entre as duas abordagens no contexto da verificação de segurança. Para estruturas que exibam alterações de comportamento por não-linearidade material (por exemplo plasticidade no aço ou fendilhação no betão), uma abordagem com base em estados limites e acções majoradas pode ser mais precisa. Já no caso de estruturas que exibam forte não-linearidade geométrica, tais como as membranas tensionadas, uma abordagem semelhante à anterior pode não ser apropriada uma vez que a geometria da estrutura depende tanto da magnitude como da distribuição das acções (as variações são particularmente significativas para distribuições não uniformes de acções). Um outro aspecto que joga contra a utilização de acções majoradas no caso das membranas tensionadas é a grande variação das propriedades dos materiais e os elevados factores de segurança que têm de ser aplicados à tensão de rotura do tecido de forma a considerar este e outros aspectos (resistência ao rasgamento, degradação e danos locais durante o manuseamento). Os restantes componentes da estrutura, realizados com materiais mais convencionais como o aço (mastros, treliças, etc.), devem ser verificados de acordo com os critérios previstos na legislação em vigor.

Na determinação da resistência de estruturas em membrana tensionada, em particular dos seus componentes em tecido, cabos, cordas e cintas, as actuais recomendações sugerem, então, que as acções de cálculo sejam tomadas com os seus valores característicos e que os diferentes componentes sejam verificados com base numa filosofia de tensões admissíveis. Este procedimento permite considerar a variabilidade das propriedades dos materiais, assim como diferentes coeficientes parciais de segurança associados ao tipo de carregamento.

Tipicamente, os coeficientes de segurança a aplicar podem estar entre 5 e 7 para a resistência do tecido, 2.5 para cabos, 3 para cintas – cada um em relação a tensões de rotura e dependentes do material a aplicar e do tipo e duração da acção em questão. Para elementos em aço, coeficientes de

segurança específicos (e sua articulação/alteração para diferentes casos de carga) seriam, então, aplicados às forças e momentos obtidos com a análise não-linear geométrica. Note-se que os coeficientes atrás citados são ilustrativos – os valores reais para cada situação são dependentes das condições ambientais e da qualidade de fabrico dos materiais, e encontram-se discutidos nos pontos seguintes.

Para além da análise não-linear geométrica baseada em factores de segurança recomenda-se que, para sistemas de membranas que incluam elementos de suporte que possam estar sujeitos a encurvadura (tais como arcos esbeltos), se proceda a uma verificação de estabilidade da estrutura aplicando um coeficiente de segurança de 2 para acções de média ou longa duração, e 1.8 para rajadas de vento (e em cada caso utilizando as propriedades dos materiais da membrana devidamente corrigidos).

Outros estados limites importantes a considerar são: o colapso global da estrutura por falha de qualquer um dos seus componentes, a garantia de segurança de componentes estruturais pesados na eventualidade de uma rotura parcial da estrutura ou retirada de uma parte da membrana e a não ocorrência de *ponding*.

4.2. COEFICIENTES DE SEGURANÇA – PERSPECTIVA DOS CRITÉRIOS REGULAMENTARES

A resistência do material constituinte da membrana (e das suas emendas ou juntas) depende de variados factores, tais como a idade, degradação por manuseamento, existência de vincos, fadiga, fluência, acção da temperatura e outros factores ambientais e ainda alguma não uniformidade criada durante o seu processo de fabrico. Quase todos estes factores dependem do tipo de material em questão, do método de emenda, da escala da estrutura e da vida útil pretendida para a tela.

Um conjunto de manuais de dimensionamento foi, ou está a ser, desenvolvido em vários países da Europa, na América do Norte e no Japão, sendo que cada um conjuga os referidos factores de forma muito distinta no sentido de obter o coeficiente global de segurança a aplicar à resistência declarada do material da tela. Alguns destes manuais são baseados no método das tensões admissíveis, enquanto outros recomendam abordagens baseadas no método dos estados limites. Independentemente das diferenças nas abordagens e dos diversos factores contributivos, existe razoável consistência entre os coeficientes de segurança recomendados. Estes são resumidos nos pontos seguintes [7].

4.2.1. RECOMENDAÇÕES DO GRUPO DE TRABALHO 7 DA IASS

As recomendações do Grupo de Trabalho 7 da IASS [11], dirigidas principalmente a membranas insufláveis, defendem que o coeficiente global de segurança (baseado no método das tensões admissíveis) deve ser composto por um factor de aplicação, um factor de importância e factores de incerteza relacionados com a estimativa das acções aplicadas, o rigor e verificação do cálculo estrutural e a qualidade de execução da obra.

Em primeiro lugar o projectista deve fazer uma estimativa da resistência crítica do material constituinte da membrana e das suas juntas, estimativa essa baseada em ensaios laboratoriais e/ou resultados anteriores, e aplicar um coeficiente de segurança do material mínimo de 2. O coeficiente global de segurança é, então, obtido conjugando também os diversos factores acima referidos. Os valores recomendados para estes factores são os seguintes:

- **Factor de não uniformidade do material:** $L_1 = 1.25$ para a direcção principal das fibras & 1.43 para a direcção secundária;

- **Factor de rigor de análise estrutural:** $L_2 = 1.0$ quando confirmada por ensaios, $L_2 = 1.3$ em caso contrário;
- **Factor de incerteza sobre acções, aplicação e execução:** normalmente $L_3, L_4, L_6 = 1.0$;
- **Factor de confiança do material / confiança nos ensaios laboratoriais:** $1.1 < L_5 < 1.3$;
- **Outros factores / aspectos não previstos:** $L_7 = 1.2$ (mínimo).

O resultado da conjugação destes factores (assumindo que os cálculos não foram confirmados por ensaios) situa-se nos intervalos de 2.1 – 2.5 para a direcção principal das fibras e 2.5 – 2.9 para a direcção secundária.

Adicionalmente, um factor entre 2.0 e 2.4 é recomendado para levar em consideração a degradação da membrana por factores ambientais (incluindo radiação ultra-violeta, acções cíclicas, altas temperaturas, fluência e humidade).

Resumindo todos estes aspectos, o factor global de segurança a aplicar à resistência declarada do material deve estar situado nos intervalos de 4.2 – 6.0 para a direcção principal das fibras e 5.0 – 7.0 para a direcção secundária.

4.2.2. MANUAL FRANCÊS DE COBERTURAS TÊXTEIS DE CARÁCTER PERMANENTE

No “Manual Francês de Coberturas Têxteis de Carácter Permanente” [4] a tensão admissível T_p (direcção principal ou secundária) no material constituinte da membrana é dada pela relação (4.1.):

$$T_p = \frac{(K_q \cdot K_e \cdot T_{sm})}{S_f} \quad (4.1.)$$

onde:

- T_{sm} = Tensão de rotura declarada do material (direcção principal ou secundária);
- K_q = Factor de qualidade da membrana (emendas e tela);
 - = 1.0 para telas e emendas testadas ou certificadas;
 - = 0.8 em caso contrário;
- K_e = Factor de escala que leva em consideração o aumento do risco devido a um defeito crítico à medida que a área da superfície aumenta;
 - = 1.0 para superfícies com área $< 50\text{m}^2$;
 - = 0.8 para superfícies com área $> 1000\text{m}^2$ (tipicamente);
- S_f = Factor de segurança que depende do nível de poluição / degradação por factores ambientais a que a membrana estará sujeita;
 - = 4.0 para poluição ligeira;
 - = 4.5 para poluição forte.

Este último factor (S_f) deve ser tomado igual a 5 para zonas da membrana onde possa haver concentração de tensões. Isto pode depender do grau de sofisticação da análise estrutural. A não ser

que a malha de elementos finitos seja muito refinada nas zonas de potencial concentração de tensões, os resultados obtidos não serão realistas.

Resumindo, então, o que atrás foi dito: em estruturas de pequena escala nas quais emendas e tela não sejam certificadas, ou em estruturas de grande envergadura em que exista essa certificação (ou tenham sido realizados ensaios), o coeficiente global de segurança mínimo a aplicar à resistência declarada do material no sentido de obter o valor da tensão admissível é $S_t = 5.0$.

Em casos extremos de estruturas de grande envergadura sujeitas a forte poluição e com características não certificadas das emendas e da tela, este factor deve ser aumentado para $S_t = 7.0$.

Em relação ao factor de segurança S_f acima referido, este parece ser elevado caso se considere que apenas leva em consideração os efeitos da poluição. Na realidade, é provável que também cubra possíveis pequenos estragos e a resistência do tecido à propagação de rasgos. Poderá ainda levar em consideração o facto de as estruturas em membrana tensionada serem tipicamente “únicas”, com formas não convencionais e, por conseguinte, a confiança existente na distribuição de acções considerada poder ser menor de que em estruturas mais convencionais. Posto isto, poderá ser apropriado reduzir o factor relacionado com a poluição/degradação desde que sejam incluídos factores adicionais relacionados com a resistência do tecido à propagação de rasgos e confiança na distribuição de acções considerada. Alternativamente e talvez de forma mais consistente com a abordagem da maioria dos códigos, este último aspecto poderá ser levado em conta majorando as acções de cálculo ou por consideração de casos de carga adicionais.

4.2.3. NORMA ALEMÃ DIN 4134

A prática Alemã combina a Norma DIN 4134 – *Tragluftbauten* [2] e a dissertação “Comportamento Mecânico de Ligações em Telas Revestidas” por *Minte* [12], que refere uma série de coeficientes de segurança baseados em numerosos ensaios experimentais.

Na Alemanha, materiais não homologados tais como as telas revestidas têm de ser aprovados pelo Instituto da Tecnologia de Edifícios (*DIBT – Deutsches Institut für Bautechnik*) e pelo Engenheiro Coordenador. Os objectivos dos ensaios estão à disposição do Engenheiro Coordenador e do Engenheiro Projectista e dependem geralmente da dimensão e importância da estrutura e se existem exemplos anteriores concretos de aplicação do material e pormenores em questão. No entanto, enquanto o Engenheiro Projectista se baseia na experiência adquirida em projectos anteriores, os fabricantes precisam de validar a resistência do material constituinte da membrana.

Historicamente a abordagem da DIN 4134 (Estados Limites Últimos) baseia-se na consideração de acções majoradas, de acordo com os coeficientes a seguir apresentados, em 4 casos de carga distintos:

Acções Permanentes	$1.3 \times (\text{Pré-esforço} + \text{Peso próprio})$
Tempestade de Inverno	$1.1 \times \text{Pré-esforço} + 1.6 \times \text{Acção do Vento}$
Tempestade de Verão	$1.1 \times \text{Pré-esforço} + 0.7 \times \text{Acção do Vento}$
Acção da Neve	$1.1 \times \text{Pré-esforço} + 1.5 \times \text{Acção da Neve}$

Esta abordagem leva em consideração o facto de a resistência das emendas decair com o aumento da temperatura ambiente, e também de a velocidade do vento ser menor em tempo quente. O coeficiente de 0.7 aplicado ao vento de Verão é artificialmente reduzido uma vez que posteriormente é aplicado um factor de temperatura que o irá efectivamente aumentar. Este procedimento poderá não parecer

lógico uma vez que ventos fortes irão sempre arrefecer a superfície da membrana, mas não é plausível assumir que toda as emendas e ligações arrefecem rapidamente para uma temperatura padrão de 23°C.

Conforme referido no ponto 4.1 a abordagem acima descrita deixou de ser apropriada e a prática de projecto corrente na Alemanha passou, então, a ser baseada numa filosofia de tensões admissíveis aplicando acções de cálculo não majoradas (excepto quando se trata de verificações de equilíbrio estático). Esta abordagem renovada inclui, no entanto, um factor que depende do tipo de carregamento mas que actua reduzindo o valor da tensão admissível. Esta última é definida pela relação (4.2.):

$$f_d = \frac{f_{tk}}{\gamma_f \cdot \gamma_M \cdot A_i} = \frac{f_{tk}}{A_{res}} \quad (4.2.)$$

onde:

- f_d = Tensão admissível;
- f_{tk} = Resistência à tracção definida como o percentil 5% de pelo menos 5 faixas de material com largura de 10cm, ensaiadas a 23°C;
- γ_f = Factor de carregamento;
- γ_M = Coeficiente de segurança do material para todos os materiais homologados;
 $\gamma_M = 1.4$ para a tela ou 1.5 para ligações;
- A_i = Combinação dos factores de redução, dependendo do caso de carga.

Os factores de redução individuais diferem consoante se está a tratar uma zona corrente da tela ou uma emenda / ligação.

Uma vez que não é possível nem realista combinar de forma linear os vários tipos de acções (permanentes, vento ou neve), as seguintes combinações foram propostas no sentido de cumprir com as recomendações regulamentares aquando da consideração do efeito do tipo de carregamento por intermédio dos factores redutores aplicados aos resultados de uma análise não-linear baseada em acções não majoradas.

- | | |
|--------------------|--|
| Acções Permanentes | $\gamma_f = 1.5 \times (\text{Pré-esforço} + \text{Peso próprio})$ |
| Acção do Vento | $\gamma_f = 1.6 \times (\text{Pré-esforço} + \text{Peso próprio} + \text{Acção do Vento})$ |
| Acção da Neve | $\gamma_f = 1.5 \times (\text{Pré-esforço} + \text{Peso próprio} + \text{Acção da Neve})$ |

Nas combinações acima o factor relativo ao caso de carga “Tempestade de Verão” foi excluído. Isto deve-se em parte ao facto de, para estruturas permanentes ou semi-permanentes, raramente ser este o caso condicionante. Adicionalmente, para o cálculo de estruturas que apenas são temporariamente montadas no Verão é recomendada a utilização de acções sazonais apropriadas/aprovadas.

Os factores de redução A_i abaixo referidos são o resultado de muitos testes que têm sido realizados nos últimos 20 – 30 anos e são correntemente aplicados para a superfície da membrana. Os valores entre parêntesis são relativos a ligações, com os intervalos dependendo do tipo de ligação (ex. soldadas, aparafusadas, etc.).

- | | |
|-------------------------|---|
| $A_0 = 1.0 - 1.2$ (1.2) | Factor de redução para levar em conta o facto de o ensaio à tracção de uma faixa de tecido de largura reduzida conduzir |
|-------------------------|---|

a um resultado cujo valor é superior à resistência biaxial do material;

$A_1 = 1.6 - 1.7 (1.5 - 3.4)$	Factor de redução relativo a acções de longa duração, sendo os factores relativos às ligações muito dependentes da largura das emendas (excluem-se emendas cosidas);
$A_2 = 1.1 - 1.2 (1.2)$	Factor de redução relativo a poluição e degradação (novamente excluem-se emendas cosidas);
$A_3 = 1.1 - 1.25 (1.4 - 1.95)$	Factor de redução relativo a casos de carga envolvendo temperaturas elevadas (isto é pré-esforço + peso próprio durante o Verão, sem considerar arrefecimento devido à acção do vento.

Nos factores acima referidos assume-se que as emendas têm a largura recomendada, particularmente para os factores A_1 e A_3 , de acordo com o tipo de material em causa.

Sintetizando o que foi dito acima, resultam os seguintes intervalos para os coeficientes globais de segurança a aplicar:

Para o material:

Acções Permanentes	$A_{res} = \gamma_f \times \gamma_m \times A_0 \times A_1 \times A_2 \times A_3$	= 4.9 – 6.4
Acção do Vento	$A_{res} = \gamma_f \times \gamma_m \times A_0 \times A_2$	= 2.9 – 3.2
Acção da Neve	$A_{res} = \gamma_f \times \gamma_m \times A_0 \times A_1 \times A_2$	= 4.4 – 5.1

Para Ligações (apenas ligações soldadas com largura apropriada ao tipo de material):

Acções Permanentes	$A_{res} = \gamma_f \times \gamma_m \times A_0 \times A_1 \times A_2 \times A_3$	= 6.7 – 9.5
Acção do Vento	$A_{res} = \gamma_f \times \gamma_m \times A_0 \times A_2$	= 3.5
Acção da Neve	$A_{res} = \gamma_f \times \gamma_m \times A_0 \times A_1 \times A_2$	= 4.9

Os coeficientes de segurança relativos a acções de longa duração e acções da neve são comparáveis aos preconizados noutras recomendações internacionais. Já para acções de curta duração como o vento, a abordagem Alemã fornece coeficientes de segurança reduzidos, geralmente cerca de 3.0, o que pode parecer surpreendente. No entanto, uma vez que se trata da única regulamentação que considera as propriedades fortes dos compósitos plásticos em situações de curta duração, isto pode ser razoável.

Refira-se ainda que esta abordagem não considera a potencial propagação de rasgos devida a defeitos pré-existentes, sendo normalmente considerada como um caso de carga de estado limite último. Este aspecto será discutido mais à frente no presente capítulo.

4.2.4. REGULAMENTO ITALIANO

O Regulamento Italiano [13] é semelhante à normalização Alemã e aplica factores de redução semelhantes, definindo no entanto três classes de ligações relativas à qualidade e tipo de execução (em oficina ou em obra):

- Classe 1 – ligações executadas por pessoal certificado aplicando metodologias (que caracterizam todos os parâmetros e condições de execução) definidas pelo fabricante do tecido ou pelo construtor da membrana e **testadas** pelo construtor da membrana;
- Classe 2 – ligações executadas por pessoal certificado aplicando metodologias (que caracterizam todos os parâmetros e condições de execução) definidas pelo fabricante do tecido ou pelo construtor da membrana, mas **não testadas** pelo construtor da membrana;
- Classe 3 – ligações, executadas de qualquer forma, admitidas exclusivamente na realização de elementos secundários.

A escolha da classe das ligações não é independente do tipo de estrutura da qual fazem parte. Por exemplo, para tendas que tenham um conjunto de apoios primários as ligações da tela poderão ser de Classe 1 ou 2. Já em membranas tensionadas todas as ligações têm de ser de Classe 1.

4.2.5. MANUAL DA ASSOCIAÇÃO DE ESTRUTURAS EM MEMBRANA DO JAPÃO

O Manual da Associação de Estruturas em Membrana do Japão [5] recomenda os seguintes valores para a tensão admissível a considerar em cada caso (para zonas flexíveis correntes da membrana):

$$\text{Acções de longa duração} \quad T_p = \frac{T_{sm}}{8} \quad (4.3.)$$

$$\text{Acções de curta duração} \quad T_p = \frac{T_{sm}}{4} \quad (4.4.)$$

Para membranas utilizadas efectivamente como revestimento em estruturas porticadas, os coeficientes de segurança são reduzidos para 6 e 3, respectivamente.

4.2.6. NORMA DA ASCE

A Norma da ASCE [6] aplicável a estruturas de membrana tensionada estipula que os valores da tensão admissível para estados de tensão uniaxiais são obtidos da seguinte forma (aplicável às direcções principal e secundária das fibras de tecido):

$$T_p = \beta \cdot L_t \cdot T_{sm} \quad (4.5.)$$

onde:

β = Factor de redução dependente das combinações de acções;

= 0.27 para a maioria das combinações;

L_t = Factor de Ciclo de Vida;

= 0.75 para tecidos que garantam pelo menos 75% da sua resistência inicial durante a sua vida útil;

= 0.6 para estruturas frequentemente manuseadas.

Para estruturas sujeitas a estados de tensão biaxiais, para além da verificação acima referida, deve ser garantido que o somatório de tensões nas duas direcções principais seja menor do que:

$$T_{pw} + T_{ps} < 0.8 \cdot \beta \cdot L_t \cdot (T_{sw} + T_{sf}) \quad (4.6.)$$

onde:

$T_{sw} + T_{sf}$ = Soma das tensões de rotura mínimas declaradas nas duas direcções principais.

4.2.7. SÍNTESE E COMENTÁRIOS

A perspectiva dada sobre os vários regulamentos e manuais levou em consideração diversas combinações de factores desde condições de carregamento e dimensão das estruturas até níveis de poluição e efeitos cíclicos. De uma forma geral, para estruturas permanentes ou semi-permanentes (e acções de longa duração) tem sido frequentemente utilizado um coeficiente de segurança mínimo do material de 5 (apesar de em alguns casos – para acções de curta duração – coeficientes entre 3 – 4 serem aplicados) sendo que em ligações e zonas de concentração de tensões este valor pode aumentar até 7.

Dois aspectos que não são explicitamente considerados nos códigos/manuais Europeus são a propagação de rasgos no seio da membrana e a rotura de emendas por fluência sob a acção de temperaturas elevadas. Estes e outros são desenvolvidos nos pontos seguintes [7].

4.3. PROPAGAÇÃO DE RASGOS

A par da redução de resistência do material da membrana por degradação devida a factores ambientais e por defeitos de fabrico, a sua resistência ao rasgamento é extremamente importante. É provável que os vários exemplos de danos extensos em membranas potenciados por baixa resistência ao rasgamento da tela estejam por detrás dos coeficientes de segurança elevados aplicados em projecto à resistência declarada dos tecidos. Desejavelmente, a resistência ao rasgamento do material será sempre suficientemente grande para que pequenos defeitos e rasgos pré-existent não se propaguem sob o efeito das acções de cálculo.

Uma vez que diferentes tipos e tamanhos de defeitos localizados produzem diferentes forças de rasgamento, é necessário estabelecer através de ensaios um valor aceitável para a resistência ao

rasgamento de um material que possa posteriormente ser aplicado em projecto. Infelizmente, os procedimentos dos ensaios de rasgamento padrão – “*Tongue Tear Method*” e “*Trapezoidal Tear Method*” – foram originalmente desenvolvidos pela ASTM (*American Society for Testing and Materials*) para a indústria de vestuário não sendo assim apropriados para ensaiar tecidos estruturais (o “*Tongue Tear Test*” é particularmente inadequado).

Do ponto de vista da análise estrutural, a questão importante é relacionar a resistência de uma tela isenta de defeitos com a sua resistência na presença de um pequeno rasgo que intersecta o caminho de forças. Isto pode ser avaliado em ensaios de rasgamento em painel largo usando amostras de 40cm de largura e 100cm de comprimento (dimensões mínimas) com um rasgo central transversal de 4cm de desenvolvimento. Tais ensaios têm sido realizados para vários tipos de tecido (polyester revestido a PVC e fibra de vidro revestida a PTFE) e a conclusão prática atingida é que a resistência de um tecido danificado por um pequeno rasgo é reduzida de um factor entre 3 – 4. Uma vez que apenas algumas amostras de cada tipo de tecido foram ensaiadas, é recomendável aplicar um coeficiente de segurança de 4 para levar em conta a resistência à propagação de rasgos.

De um ponto de vista meramente teórico, quando existe um rasgo no seio de um tecido (não revestido) e n fibras foram seccionadas, o coeficiente de concentração de tensões K_n nos limites do rasgo é dado pela relação (4.7.):

$$K_n = \frac{4 \cdot 6 \cdot 8 \cdot \dots \cdot (2n+2)}{3 \cdot 5 \cdot 7 \cdot \dots \cdot (2n+1)} \quad (4.7.)$$

Caso o produto de K_n pela tensão instalada no tecido resulte superior à resistência declarada do tecido, o rasgo propagar-se-á. Um rasgo que seccione 20 fibras origina $K_n = 4.1$ (e 30 fibras origina 5.0).

No entanto, a resistência ao rasgamento de um tecido revestido não pode ser determinada de forma tão simples – esta vem aumentada por efeito do revestimento, particularmente pela sua resistência ao corte, e também pela tenacidade das fibras e estados de tensão biaxiais. Contrariamente, fibras de alta resistência com elevada aderência ao revestimento (típico das fibras de vidro revestidas a PTFE) irão tendencialmente reduzir a resistência ao rasgamento face ao valor teórico K_n . Assim sendo, na ausência de resultados experimentais, parece ser necessário adoptar um coeficiente de segurança mínimo de 4.

Tipicamente, este factor será apropriado para rasgos com comprimento menor que 40mm sendo que acima deste valor deverão ser reparados. Note-se ainda que na presente discussão foram apenas tecidas considerações sobre membranas sujeitas a estados de tensão uniaxiais com rasgos perpendiculares ao caminho das forças. Telas sujeitas a estados de tensão biaxiais poderão ver a sua resistência ao rasgamento ainda mais reduzida. Adicionalmente, este parâmetro decai com a idade da estrutura, conforme demonstrado em ensaios realizados em telas com 20 anos de idade.

Da leitura do ponto 4.2. do presente capítulo conclui-se que vários regulamentos/manuais, que consideram aspectos como a qualidade do material constituinte da membrana, a dimensão da estrutura e a degradação por factores ambientais, recomendam um coeficiente de segurança mínimo de 5.0 relativo a tensões admissíveis. No entanto, este valor é obtido sem que haja uma formal consideração da resistência da tela à propagação de rasgos. Uma vez que a ocorrência de pequenos rasgos é algo que deverá sempre ser considerado, então o real coeficiente de segurança relativo às tensões actantes poderá atingir valores tão baixos como 1.2 para a tela na sua nova condição.

Um coeficiente de segurança de 4 que permita levar em consideração os efeitos da degradação da tela por factores ambientais (níveis ligeiros de poluição) poderá afigurar-se adequado uma vez que é igual ao coeficiente relativo à propagação de rasgos (um rasgo poderá ser considerado como um efeito da degradação por factores ambientais, ainda que severo). Deveria, no entanto, existir ainda uma margem de segurança adicional que levasse em conta os efeitos da degradação ambiental na presença de rasgos pré-existent (ou vice-versa). Fortuitamente, materiais como as fibras de vidro revestidas a PTFE possuem baixa resistência ao rasgamento mas boa durabilidade, enquanto as fibras de poliéster revestidas a PVC se degradam mais rapidamente embora possuindo superior resistência ao rasgamento.

No entanto as fibras revestidas a PTFE são mais propensas a serem danificadas durante a sua embalagem e transporte para o local da obra (por exemplo por dobragem inapropriada). Tem sido prática comum aplicar coeficientes de segurança mínimos de 6 (relativamente à resistência declarada destas fibras), para tensões induzidas pela acção do vento, e de 8 para tensões induzidas pela acção da neve. Note-se que estes coeficientes dependem da dimensão das fibras do tecido – por exemplo, tecidos constituídos por fibras de 4µm estão mais sujeitos a vincos dos que aqueles constituídos por fibras de 6µm.

4.4. RESISTÊNCIA DE EMENDAS E EFEITOS DA TEMPERATURA

A rotura por fluência de emendas depende da duração do carregamento e das condições de temperatura embora, em geral, a temperatura da membrana não aumente durante a actuação de acções de projecto significativas (vento forte ou neve). Assim sendo, para o dimensionamento será apropriado considerar dois casos de carga relativos à rotura por fluência: acções de projecto máximas em condições de temperatura padrão; peso próprio + pré-esforço sob temperatura elevada (sendo as tensões afectadas do respectivo coeficiente de segurança).

A Norma Canadiana [14] estipula que as juntas devem ser capazes de suportar o dobro da máxima tensão de projecto durante 4 horas, a uma temperatura de 20°C, e a máxima tensão de projecto durante as mesmas 4 horas mas a uma temperatura de 70°C. A Norma da ASCE [6] sugere estas mesmas condições mas com uma cláusula adicional na primeira que estipula que as emendas deverão apresentar um escorregamento inferior a 3mm no final do ensaio. Adicionalmente, a resistência da emenda deverá ser igual ou superior a 70% da resistência declarada do tecido.

Em algumas estruturas são utilizadas emendas largas ou camadas adicionais de tecido como forma de aumentar a resistência na direcção das emendas (por exemplo na direcção do topo de membranas cónicas) ou em zonas de concentração de tensões, mais frequentemente. Nestas situações a resistência combinada destas camadas deverá ser reduzida. O manual Japonês [5] refere um limite a considerar para a resistência conjunta a considerar dado pela relação (4.8.):

$$T < 0.9^{(n-1)} \cdot n \cdot T_{sm} \quad (4.8.)$$

onde n é o número de camadas de tecido. A Norma Americana sugere valores idênticos.

4.5. CABOS, CORDAS E CINTAS: COEFICIENTES DE SEGURANÇA

Os coeficientes de segurança relativos à força mínima de rotura de conjuntos completos de cabos são cobertos pelos vários diplomas existentes (NF, DIN, ASCE) para diversas aplicações e condições de carregamento. No entanto, em situações não suficientemente desenvolvidas, é recomendado um coeficiente de segurança de 2.5.

Para conjunto de cintas é normalmente aplicado um coeficiente de segurança mínimo de 3. Nos casos em que as acções tenham uma componente dinâmica deverão ser aplicados coeficientes mais elevados, sendo recomendável a leitura das Normas Nacionais aplicáveis. No entanto a rigidez das cintas será frequentemente o factor condicionante para o seu dimensionamento, resultando coeficientes de segurança relativos à resistência próximos de 4.

4.6. ESTRUTURAS DE SUPORTE EM AÇO: COEFICIENTES DE SEGURANÇA

É possível proceder de acordo com a filosofia dos estados limites prevista nos Eurocódigos estruturais considerando acções não majoradas como dados de entrada num processo completo de análise não-linear. Os resultados desta análise são posteriormente multiplicados por coeficientes de segurança adequados.

4.7. INSTABILIDADE DE ELEMENTOS DE SUPORTE

Em sistemas tensionados que empreguem estruturas de suporte passíveis de instabilidade por bambeamento (ex. arcos esbeltos) deve ser realizada uma verificação da sua carga última de rotura, aplicando um coeficiente de segurança de 2 para acções de média e longa duração e de 1.8 para acções do vento (em cada caso deverão ser consideradas as propriedades adequadas para o material da membrana, a não ser que seja realizada uma análise não-linear global do sistema – ver ponto seguinte).

4.8. ANÁLISE GLOBAL DE ESTABILIDADE

No caso em que os sistemas tensionados têm de ser analisados em conjunto com estruturas de suporte flexíveis sujeitas a esforços de compressão (ex. arcos esbeltos) é recomendável realizar uma análise não-linear global no sentido de verificar a possibilidade de instabilidade por bambeamento de tais elementos. Deve também ser considerada a inclusão de efeitos devidos a imperfeições iniciais, tais como desalinhamentos axiais de peças. A deformação global da estrutura aliada aos esforços gerados por tais efeitos assim como a redução de rigidez de elementos individuais devem ser integralmente levados em conta.

Esta técnica de análise deve também modelar todos os efeitos não-lineares tais como alterações da rigidez do travamento proporcionado aos arcos pelo sistema tensionado, sob acções de diferentes intensidades e distribuição. Tais alterações de rigidez ocorrem na transição de estados limites de serviço para estados limites últimos devido ao afrouxamento de elementos resistentes apenas à tracção. No entanto, para estar de acordo com o EC3, ainda deve ser aplicado um coeficiente de segurança de 1.65 com esta análise.

4.9. DEFORMAÇÕES: ESTADOS LIMITES E *PONDING*

Um aspecto importante no processo de definição da forma inicial de uma estrutura tensionada é evitar o *ponding* – a forma da estrutura é tal que a drenagem de água é sempre garantida em todas as zonas. É igualmente importante garantir que estas condições de drenagem se mantêm sob a acção da neve, devendo este estado limite ser verificado considerando valores reduzidos do pré-esforço instalado assim como distribuições não uniformes de acções.

4.10. ESTADOS LIMITES RELATIVOS A CEDÊNCIA DE COMPONENTES / ROTURA DA TELA

Outros estados limites importantes a considerar são: colapso global da estrutura por rotura de componentes individuais e colapso de elementos estruturais de grande dimensão na eventualidade de rotura parcial de uma área da membrana. Para este tipo de situações poderá ser apropriado reduzir os coeficientes de segurança propostos para a resistência da tela.

5

ACÇÕES DE PROJECTO

5.1. ESTRUTURAS LEVES SUJEITAS A ACÇÕES EXTERNAS

Pela própria natureza das estruturas leves, a relação entre as acções aplicadas e o seu peso próprio é normalmente muito superior ao característico das estruturas mais convencionais. Assim sendo, alterações na intensidade das acções do vento ou da neve terão um impacto proporcionalmente maior na dimensão dos elementos estruturais necessários e na escala das deformações observadas.

Consequentemente, a distribuição de acções a considerar na análise e dimensionamento de membranas tensionadas tem de ser cuidadosamente escolhida. Mais, a legislação actual foi desenvolvida para formas e comportamentos estruturais *standard*, tornando difícil a aplicação de um único código. É assim necessário investir mais tempo e esforço na definição dos casos de carga a considerar.

5.2. PRÉ-ESFORÇO

O nível de pré-esforço existente na superfície de uma membrana afecta todos os elementos da sua estrutura de suporte (mastros, pórticos, cabos, etc.), sendo inerente ao seu comportamento estrutural. Este surge como resultado do processo de “geração da forma” e tem de ser atingido e mantido durante a construção e tempo de vida da estrutura. Estas forças têm de ser incluídas em todos os casos de carga a considerar.

O pré-esforço é uma parte fundamental da forma e comportamento das membranas tensionadas. Este aspecto encontra-se mais desenvolvido no Capítulo 2.

Efeitos diferidos tais como a fluência do material constituinte da membrana podem alterar os níveis de pré-esforço instalados. A ocorrência de assentamentos de apoio também poderá ter influência, embora raramente. Estes efeitos têm de ser considerados e as devidas precauções tomadas no sentido de assegurar a manutenção de um nível de pré-esforço suficiente.

Geralmente o nível mínimo de pré-esforço requerido pelas membranas depende da rigidez e resistência do material envolvido e da eficiência da sua superfície (i.e. curvatura). Mais, níveis de pré-esforço inferiores aos necessários poderão conduzir a uma aparência pouco uniforme ou enrugada, uma vez que nem todas as fibras da tela se encontram suficientemente traccionadas.

Para membranas constituídas por fibras de poliéster revestidas a PVC, uma “regra de bolso” a ter presente é que o pré-esforço instalado não deverá ser menor do que 1.3% da resistência média à tracção do material, nas duas direcções principais. Esta relação conduz a valores de 0.70kN/m – 2.00kN/m para os diferentes tipos de fibras de poliéster revestidas a PVC disponíveis no mercado.

Podem ser aplicados níveis de pré-esforço superiores aos citados no sentido de minimizar deformações de membranas com curvatura pouco eficiente, sendo que mais pré-esforço implica uma redução da gama de tensões disponível para a estrutura receber as demais acções de serviço. No caso de estruturas temporárias ou em casos especiais poderão ser aplicados valores inferiores aos citados.

Os níveis de pré-esforço característicos de membranas constituídas por telas em fibra de vidro revestida a PTFE tendem a ser superiores aos atrás indicados uma vez que este material é mais rígido. A força instalada não deverá ser inferior a 2.00kN/m e a classe mais resistente destas fibras é frequentemente pré-esforçada a 5.00kN/m (para superfícies muito planas poderá atingir 10.00kN/m). Uma “regra de bolso” a ter presente é que o pré-esforço instalado não deverá ser menor que 2.5% nem maior do que 6.0% da resistência média à tracção do material, nas duas direcções principais.

Os valores acima indicados poderão ser tomados como referência para satisfazer os requisitos mínimos relativos a pré-esforço de estruturas de membrana tensionada permanentes.

Os rácios de pré-esforço entre as duas direcções principais da membrana são seleccionados durante o processo de geração da forma e os seus níveis validados durante a análise estrutural. Níveis diferentes de pré-esforço em cada direcção podem ajudar a alterar a forma, dentro de certos limites, e podem melhorar o comportamento estrutural. Esta estratégia é na realidade uma forma de “afinação fina” para estruturas sujeitas a acções claramente condicionantes numa direcção enquanto as actuantes na outra direcção são de intensidade moderada. No entanto, a escolha de condições de fronteira mais adequadas e o aumento da curvatura será sempre uma estratégia melhor sucedida na melhoria do comportamento estrutural. Não obstante, formas existem em que a aplicação de níveis variáveis de pré-esforço é uma necessidade, sendo a forma cónica um exemplo evidente.

Em geral os rácios de pré-esforço utilizados não deverão exceder 1:4 ou 4:1 [7].

5.2.1. COMPENSAÇÃO

As membranas tensionadas são usualmente “compensadas” para garantir que a tela é capaz de atingir os níveis de pré-esforço pré-definidos para a sua geometria após fluência do material. O processo de compensação leva, então, em conta a deformação elástica da tela e dos cabos e a fluência do material.

Existem dois processos de controlar o pré-esforço instalado [7]. Um regime de pré-esforço “controlado por força” é aquele em que todos os elementos, incluindo a tela, atingem os valores pré-definidos mas são sujeitos a novo tensionamento após ocorrência da fluência primária. Em alternativa, um regime de pré-esforço “controlado geometricamente” implica um sobre-tensionamento da tela até que tenha ocorrido suficiente fluência.

Membranas altamente pré-esforçadas podem atingir a sua capacidade de carga durante um curto intervalo de tempo, enquanto estão a ser colocadas na sua posição final, sem que ainda tenha havido tempo para ocorrer fluência, devendo, por conseguinte, ser instaladas num regime “controlado por força” ou aplicando um regime “controlado geometricamente” de forma faseada. A estrutura não terá de ser re-tensionada após instalação desde que tenham sido aplicados parâmetros adequados de compensação e tenha sido considerada a ocorrência de deformações a longo prazo expectáveis, tais como assentamentos de fundação.

A aplicação de um regime de pré-esforço “controlado geometricamente” requer uma análise estrutural cuidada no sentido de evitar o surgimento de tensões de tracção demasiado elevadas caso a membrana venha a estar sujeita a acções externas de grande intensidade pouco tempo após a sua instalação.

5.2.2. SUBSTITUIÇÃO DA TELA

As operações de manutenção e renovação da membrana devem ser levadas em conta em fase de projecto. No caso de, por exemplo, ser necessário substituir um painel da tela as consequências sobre a remanescente estrutura, em termos de alteração do seu estado de tensão, esforços em elementos individuais e deslocamentos devem ser consideradas.

Em tais circunstâncias, será admissível considerar valores reduzidos das acções de projecto face ao curto período de tempo de ocorrência das condições em análise.

5.3. PESO PRÓPRIO

O peso próprio de uma membrana varia normalmente entre 0.7 e 2.0kg/m².

Não é usual considerar-se o peso próprio no processo de geração de formas uma vez que poderá introduzir entropia na resposta da membrana a sucções por acção do vento. Apesar de este efeito ser normalmente trivial, casos há em que poderá ser significativo – por exemplo em membranas ligeiramente pré-esforçadas realizadas com tecidos de gramagem elevada.

Independentemente de ser ou não incluído no processo de geração de formas, o peso próprio da membrana terá de ser considerado em todos os casos de carga.

5.4. ACÇÃO DO VENTO

A acção do vento, especialmente na forma de sucções, é frequentemente condicionante na verificação de tensões de telas e cabos incluídos em membranas tensionadas leves. É normalmente considerada como sendo uma acção estática, definida pelo produto de uma pressão dinâmica por um coeficiente de pressão (C_p). É também assumido como hipótese que as alterações de geometria experimentadas pela superfície da membrana são suficientemente ligeiras para que as alterações do coeficiente de pressão sejam suficientemente pequenas para serem em segurança ignoradas.

Esta abordagem poderá não ser apropriada nos casos em que a própria forma da membrana é muito sensível a deformações e/ou ocorram grandes deformações. Esta situação é discutida mais à frente no presente capítulo.

5.4.1. VELOCIDADE DO VENTO

A velocidade do vento e respectiva pressão dinâmica podem ser obtidas conforme descrito na Parte 2.4 do Eurocódigo 1.

5.4.2. VALORES DOS COEFICIENTES DE PRESSÃO C_p

As membranas tensionadas são estruturas de camada única nas quais o vento frequentemente actua em ambas as faces simultaneamente. Os valores dos coeficientes de pressão para as superfícies interior e exterior podem ser obtidos aplicando o disposto na legislação e artigos científicos adequados. O efeito conjunto destes dois coeficientes deve ser incluído no modelo analítico da estrutura, sendo as pressões aplicadas normalmente à superfície deformada.

Nas situações em que a membrana cumpre a função de cobertura de um edifício o seu comportamento é diferente do típico de coberturas isoladas, uma vez que apenas a face exterior da tela está

directamente exposta à pressão dinâmica do vento. No entanto, a pressão interior também tem de ser levada em conta. Esta será significativa na presença de aberturas de grande dimensão em paredes ou na própria cobertura. Consequentemente, devem ser esperados coeficientes de pressão interna elevados.

No caso de estruturas insufladas a pressão dinâmica do vento actua apenas na face exterior da membrana, já que o equipamento de insuflação controla a pressão interior.

5.4.3. VALORES DE C_p PARA ESTRUTURAS SIMPLES E DE PEQUENA DIMENSÃO

As formas estruturais descritas na legislação aplicável não coincidirão, na maioria das situações, com a forma da membrana em estudo. Consequentemente, é necessário tecer algumas considerações conservativas durante a definição de valores de C_p baseados nestas fontes. São exemplos de literatura a consultar neste domínio os seguintes:

- EC1 – Parte 2.4;
- BS 6399 – Parte 2;
- DIN 1055 – Parte 4;
- Cook, N.J. – “The Designers Guide to Wind Loading of Building Structures – Part 2”, BRE/Butterworths.

5.4.4. VALORES DE C_p PARA FORMAS IRREGULARES E COMPLEXAS E ESTRUTURAS DE GRANDE VÃO

É necessário recorrer a ensaios em túnel de vento para obter valores de C_p nas seguintes situações:

- i. A forma da membrana é suficientemente diferente das descritas na legislação e literatura aplicáveis, para que uma estimativa fiável dos valores de C_p possa ser feita;
- ou
- ii. Uma abordagem conservativa na definição de tais valores conduz a uma estrutura demasiado dispendiosa para que possa ser construída.

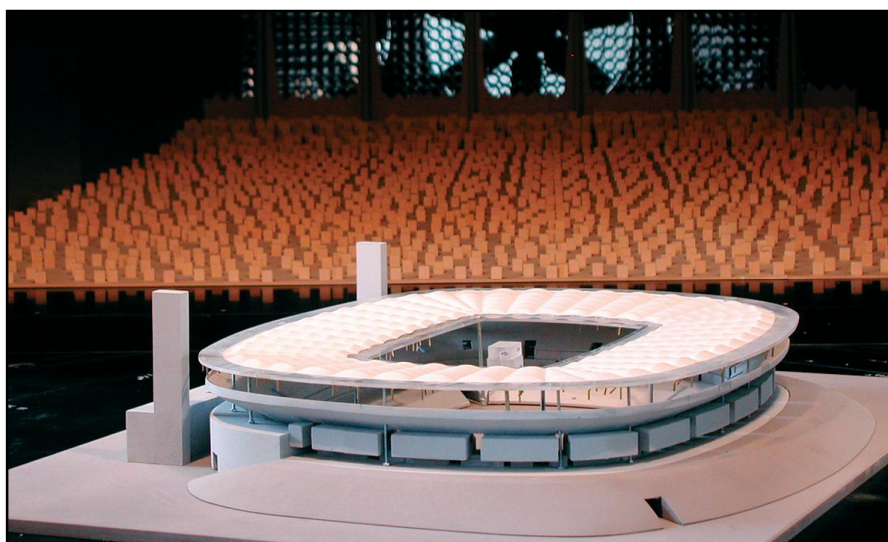


Fig.5.1. – Modelo em túnel de vento da cobertura de um estádio

Um ensaio em túnel de vento tem como objectivo determinar os coeficientes de pressão locais e aumentar a fiabilidade das acções de projecto consideradas. A maioria é conduzida com recurso a modelos reduzidos rígidos que não levam em consideração as mudanças na distribuição das pressões aplicadas devidas à deformação da superfície da membrana. Por conseguinte, os ensaios em modelo rígido não são os mais indicados para membranas de superfície muito sensível a deformações, embora geralmente sejam a única opção.

Um ensaio aero-elástico mais complexo que permitisse investigar efeitos dinâmicos, tais como “galloping” e “flutter”, poderia ser mais adequado para tais estruturas. Isto obriga a incorporar no modelo uma superfície deformando-se da mesma maneira que a estrutura à escala real. No entanto estes modelos são extremamente complexos de construir e nem sempre fornecem resultados consistentes. Investigações actualmente em curso estão a tentar avaliar a estabilidade aerodinâmica conjugando análise numérica de condições de escoamento do vento (Dinâmica de Fluidos Computacional) e interacção estrutural (Modelação em Elementos Finitos). No entanto, a aplicação no sentido de provar a fiabilidade da resposta de membranas muito flexíveis à acção do vento será um aspecto a considerar em investigações futuras.

Um túnel de vento deve representar uma barreira atmosférica adequada para acomodar os efeitos de rajada do vento, incluindo aqueles influenciados por edifícios e outras obstruções existentes na área envolvente.

Geralmente o ensaio fornece pressões locais incluindo valores de C_p , factores de amplificação dinâmica e efeitos de escala. Estes resultados são baseados na seguinte informação fornecida pelo projectista da estrutura:

- a) os modos de vibração estruturalmente importantes e as suas frequências naturais;
- b) deformações máximas previstas, baseadas nas acções consideradas;
- c) áreas de aplicação de cargas (global, elementos secundários, revestimentos, etc.);
- d) áreas de interesse específico.

Os resultados do ensaio devem ser apropriadamente filtrados no sentido de encontrar os casos de carga mais críticos para a estrutura em questão. Refira-se que no caso das membranas tensionadas estes não estarão necessariamente relacionados com os modos de vibração, como frequentemente acontece quando se trata de estruturas mais convencionais.

5.4.5. EFEITOS DINÂMICOS

Tipicamente a análise estrutural será conduzida considerando acções aplicadas de natureza estática. No entanto existem situações, embora raras, nas quais os efeitos dinâmicos do vento devem ser considerados.

No que diz respeito a “ressonância global”, as estruturas de membrana tensionada apresentam frequências naturais muito reduzidas, sendo comuns valores entre 0.5 e 1.5Hz. No entanto, devido ao seu baixo peso próprio e à eficiência do amortecimento, efeitos perniciosos tais como amplificação dinâmica são pouco significativos podendo ser desprezados na maioria dos casos. São também frequentemente consideradas como estruturas de amortecimento reduzido em termos do seu coeficiente de amortecimento estrutural. No entanto, ensaios de modelos aero-elásticos em túnel de vento demonstram um comportamento altamente amortecido, especialmente para estruturas fechadas, não causando instabilidade aerodinâmica. De forma semelhante, em estruturas isoladas um elevado grau de amortecimento parece dever-se aos volumes de ar em movimento.

Para estimar os factores de amplificação dinâmica, os especialistas em ensaios em túnel de vento consideram coeficientes de amortecimento entre 1.5% e 3.0% – desprezando o amortecimento aerodinâmico. No entanto, na indústria das membranas julga-se ser adequado considerar valores mais elevados uma vez que a natureza compósita do material e à interacção entre fibras deverão proporcionar amortecimento mais elevado devido ao atrito.

Os bordos livres das membranas são susceptíveis a efeitos dinâmicos locais. Bordos frontais e paralelos à direcção de sotavento devem ser objecto de análise cuidada uma vez que os coeficientes de pressão C_p nestas zonas se alteram dramaticamente com apenas pequenas variações do ângulo de actuação do vento. Este efeito é designado por “flutter” e ocorre particularmente em áreas planas de fronteira ou em bordos pouco tensionados da tela.

O aumento de movimento da superfície da membrana reduz o tempo de vida da estrutura e pode inquietar os observadores do fenómeno. No sentido de minimizar este efeito é recomendável limitar o vão dos cabos que materializam bordos a cerca de 20m.

De forma semelhante ao que acontece para as restantes acções de projecto, actuar sobre a curvatura da membrana é a chave para minimizar efeitos de “flutter”, embora valores elevados de pré-esforço aplicados na estabilização de superfícies planas possam, por vezes, constituir uma alternativa. A relação (5.1.) fornece um bom indicador da rigidez disponível D para fazer face a pressões aplicadas a uma determinada forma equilibrada:

$$D \approx \frac{N_{warp}}{R_{warp}} + \frac{N_{weft}}{R_{weft}} \quad (5.1.)$$

onde:

- N_{warp} = Pré-esforço na direcção principal (kN/m);
- N_{weft} = Pré-esforço na direcção secundária (kN/m);
- R_{warp} = Raio positivo na direcção principal (m);
- R_{weft} = Raio positivo na direcção secundária (m);
- D = Rigidez da superfície (kN/m²).

Membranas com bom funcionamento estrutural apresentam valores de D tipicamente superiores a 0.3kN/m². Em alguns exemplos de estruturas com valores D de cerca de 0.15kN/m², e menores, têm sido observadas pequenas ondas na sua superfície criadas pelo fluxo de vento. Estruturas que apresentem $D < 0.20\text{kN/m}^2$ em áreas alargadas poderão exibir comportamento muito sensível a deformações, devendo ser cuidadosamente analisadas quando sob a influência de acções ambientais.

No caso de estruturas insufláveis com curvatura positiva reduzida e superfícies relativamente planas, podem surgir ondas mesmo em condições de velocidade do vento constantes, uma vez que a pressão interna é frequentemente baixa para reduzir custos de manutenção. A rigidez D da superfície para estas estruturas é equivalente à pressão interna.

5.5. ACÇÃO DA NEVE

A acção da neve deve ser determinada de acordo com o disposto no Eurocódigo 1. No entanto, para estruturas de grande vão é recomendável consultar a informação disponível nos serviços meteorológicos locais.

Em regiões não sujeitas a queda de neve deve ser considerada uma acção uniformemente distribuída de valor não inferior a 0.30kN/m^2 . Este valor poderá ser reduzido em estruturas com vãos superiores a 50m desde que seja realizada uma análise estatística dos valores correspondentes às acções da chuva, queda de folhas, areia/pó, etc.

5.5.1. DISTRIBUIÇÃO DA ACÇÃO DA NEVE

Pode haver deposição de neve em coberturas sob condições de vento fraco ou forte. Sob vento fraco a neve tenderá a depositar-se de forma uniforme sobre toda a cobertura. O EC1 fornece indicações sobre os coeficientes a serem aplicados nesta situação.

Sob condições de vento forte a neve tenderá a acumular-se em determinadas zonas, originando assim um carregamento não uniforme da superfície da cobertura. A distribuição desta acção depende da configuração da cobertura e da direcção de actuação do vento.

No caso de coberturas constituídas por uma série de “cumes e vales” sujeitas a vento forte, a neve afastar-se-á dos cumes e tenderá a depositar-se nos vales. O EC1 fornece coeficientes relativos à quantidade máxima de neve a considerar nos vales e à quantidade mínima a considerar nos cumes. No entanto, este efeito é de difícil previsão devendo ser tomadas as devidas precauções.

Deverão ser consideradas várias distribuições de carga, desde que plausíveis, e a estrutura dimensionada para o caso mais condicionante. A eventualidade de existir um caso de carga composto por sucessivos nevões também deve ser considerada. O EC1 adopta os conceitos de “evento isolado” e “evento múltiplo”.

Estruturas de grande envergadura sujeitas à acção da neve batida pelo vento podem ser modeladas em túnel de vento de forma a prever a distribuição da neve na cobertura. É geralmente assumido que a quantidade total de neve que se deposita na cobertura se mantém inalterada, mas sob condições de vento forte poderão ocorrer concentrações de carga em determinadas zonas.

5.5.2. ESCORREGAMENTO

O efeito do escorregamento de massas de neve sobre superfícies lisas em direcção aos vales deve ser considerado. Também deve ser avaliado o risco para pessoas, equipamentos e bens associado ao escorregamento da neve para fora da área da cobertura, caindo em direcção ao solo. Este risco é maior no caso das estruturas em tela, uma vez que a sua superfície macia é efectivamente lubrificada quando a neve começa a derreter.

5.5.3. PONDING

Conforme explicado atrás, a neve depositar-se-á nos vales das coberturas e deslizará na direcção dos seus limites. Na presença de uma grande quantidade de neve, por conseguinte de uma carga elevada, e estrutura poderá desenvolver deformações tais que ocorra inversão das pendentes originais. A figura 5.2 ilustra a ocorrência desta situação.



Fig.5.2. – *Ponding* numa cobertura em tela – Pennsylvania, EUA

Este fenómeno, vulgarmente designado por *ponding*, impede que haja drenagem de água da chuva e neve derretida. Devido à flexibilidade da membrana a retenção de água pluvial e de neve conduz a elevadas deformações. Este efeito, por sua vez, leva a que se acumulem mais água pluvial e neve dando assim origem a carregamentos de grande intensidade.

Por esta razão, o *ponding* tem de ser evitado nas estruturas em membrana tensionada. Deverá ser demonstrado que, na presença da acção da neve, este fenómeno não ocorre. Não é suficiente considerar pendentes puramente na forma pré-esforçada da estrutura uma vez que a sua geometria se pode alterar significativamente sob o efeito de acções externas.

5.5.4. REMOÇÃO

A realização de operações de remoção da neve depositada sobre a cobertura tem de ser considerada. A utilização de acções de projecto reduzidas só será admissível nos casos em que possa ser assegurada uma altura máxima de neve por um sistema efectivo de remoção. Refira-se que as acções associadas ao acesso à cobertura para remoção da neve podem resultar maiores do que a acção da neve propriamente dita. No entanto, estruturas de pequena/média dimensão permitem a aplicação de meios alternativos de remoção sem que para isso seja necessário aceder à cobertura.

Um destes métodos consiste em usar uma mangueira para ajudar a neve a libertar-se da superfície da membrana após um nevão. Outro método, usualmente aplicado em estruturas insufladas, consiste em aquecer a face interior da membrana permitindo assim que a neve deslize facilmente em toda as direcções.

5.6. ACÇÃO DA TEMPERATURA

No que diz respeito ao comportamento global das estruturas em tela, verifica-se que os efeitos das variações de temperatura são menos significativos do que em construções rígidas. Tais variações manifestam-se por variações relativamente pequenas dos níveis de pré-esforço instalados. No entanto, estes efeitos podem ser mais importantes quando se trata de redes de cabos de aço.

5.7. ACÇÃO DO SISMO

Em geral a acção do sismo não é problemática uma vez que as estruturas em membrana são muito leves, não assumindo assim acelerações significativas na ocorrência de um sismo. No entanto caso a estrutura contenha elementos de massa significativa, tais como treliças ou ligações, essas acelerações deverão ser consideradas para esses elementos.

5.8. TOLERÂNCIAS DE CONSTRUÇÃO ADMISSÍVEIS

O disposto nos códigos Europeus relativamente a tolerâncias de construção varia, mas em geral pode afirmar-se que as oferecidas pelos trabalhos em betão armado não são, sob qualquer circunstância, suficientes. Assim sendo, terão de ser seleccionados critérios mais restritivos ou, em alternativa, tomadas medidas que garantam que os pontos de ligação (isto é, chapas de base, sapatas de mastros ou ligações com paredes) são posicionados com precisão.

Estruturas rígidas ou elementos com elevado pré-esforço podem requerer elevadas tolerâncias de fabrico, especialmente na direcção onde será aplicada a força axial, de forma a garantir que o pré-esforço de projecto e a geometria prevista se podem efectivar. As tolerâncias relativas ao posicionamento dos elementos de apoio podem ser definidas com base numa análise dos encurtamentos e alongamentos aplicáveis a elementos estruturais críticos (por exemplo cabos). Não obstante, deve ser realizado um levantamento do posicionamento real dos apoios antes da instalação de qualquer estrutura em membrana.

Têm ainda de ser consideradas tolerâncias relativas à tela em si e aos cabos. A superfície da tela, por ser menos rígida, é normalmente mais capaz de absorver pequenas imprecisões dimensionais do que os cabos.

Em geral os elementos tensionados de uma estrutura de cabos não admitem ajustes ao seu comprimento no sentido de compensar as tolerâncias de fabrico. Por conseguinte, esta tolerância relativamente ao comprimento do conjunto completo com as respectivas ligações é crítica. Qualquer erro no comprimento dos cabos resultará em diferenças entre as forças de pré-esforço de projecto e as efectivamente instaladas.

Na situação de os cabos serem genericamente mais curtos do que o previsto então as forças de pré-esforço serão maiores, resultando o seguinte:

- a) possível excesso de carga nos cabos, uma vez carregada a estrutura;
- b) aumento das forças de esticamento necessárias para ligar os cabos uma vez que estes têm de ser “esticados” até atingirem a sua posição final. Quanto maior for o diâmetro do cabo maior será o acréscimo de força necessário para o esticar de uma determinada percentagem do seu comprimento – por conseguinte a tolerância no comprimento de cabos curtos de diâmetro elevado é mais crítica do que aquela relativa a cabos longos de diâmetro reduzido.

Em alternativa, se os cabos forem genericamente mais longos do que o previsto as forças de esticamento necessárias serão menores, resultando no seguinte:

- c) os cabos podem ficar “frouxos” uma vez que a estrutura seja carregada (ou até no estado pré-esforçado) originando uma perda de rigidez estrutural.

Um valor tipicamente utilizado como tolerância para cabos cortados sob tensão e já com ligações nas extremidades é dado pela relação (5.2.):

$$\text{Tolerância} = \pm \left(\sqrt{\frac{L}{1000}} + 5\text{mm} \right) \quad \text{onde } L = \text{comprimento do cabo (mm)} \quad (5.2.)$$

No sentido de garantir estas tolerâncias, os cabos são geralmente cortados à medida sob a acção da sua força de pré-esforço prevista em projecto. É assim importante que as forças de pré-esforço utilizadas no cálculo representem com rigor as forças que efectivamente estarão instaladas nos cabos aquando da construção da estrutura.

5.9. COMBINAÇÃO DE ACÇÕES

Para que as grandes deformações das estruturas em membrana sejam convenientemente estudadas, a análise estrutural deve ser conduzida utilizando acções não majoradas. É da maior importância que os resultados de uma combinação de acções sejam obtidos por soma de acções e posteriormente analisados em vez de constituírem um somatório de efeitos produzidos por acções individuais.

O peso próprio da estrutura e o pré-esforço devem fazer parte de todas as combinações de acções consideradas. Nas combinações que considerem acções de levantamento pelo vento não é necessário minorar a acção do peso próprio uma vez que esta é desprezável.

São exemplos de combinações a considerar as seguintes:

- a) *peso próprio + pré-esforço*
- b) *peso próprio + pré-esforço + neve*
- c) *peso próprio + pré-esforço + vento*
- d) *peso próprio + pré-esforço + vento (pressões descendentes) + neve*
- e) *etc.*

As combinações devem, em geral, ser elaboradas de acordo com o Documento Nacional de Aplicação do EC1, desprezando os coeficientes parciais de segurança aplicados às acções, conforme descrito no capítulo anterior. No entanto, para combinações incluindo mais do que uma acção variável (i.e. vento (pressões descendentes) + neve) uma delas poderá ser razoavelmente reduzida.

5.10. COLAPSO DESPROPORCIONAL

As membranas tensionadas deverão ser concebidas no sentido de evitar o colapso desproporcional, ou seja, colapso global da estrutura motivado pela rotura parcial de um dos seus elementos.

Uma vez identificados os modos de rotura prováveis, será necessário modelar a estrutura no seu estado de colapso parcial com o objectivo de provar que não ocorrerá rotura de mais elementos estruturais nem colapso global. Esta situação poderá ser considerada como sendo um caso de carga adicional apesar de, obviamente, ter de ser desenvolvido um modelo analítico separado para cada modo de rotura.

Para estas verificações os coeficientes de segurança relativos às propriedades dos materiais podem ser inferiores aos utilizados nos casos de carga genéricos.

6

ANÁLISE ESTRUTURAL

6.1. EVOLUÇÃO TEMPORAL DOS MÉTODOS E A NECESSIDADE DO CÁLCULO AUTOMÁTICO

Apesar de estruturas pré-esforçadas como as tendas estarem entre as primeiras construções realizadas pela humanidade, até 1970 o conhecimento sobre a modelação analítica do seu comportamento era relativamente reduzido. Membranas tensionadas e redes de cabos pré-esforçados caracterizam-se por uma inerente interacção entre geometria e distribuição de tensões. Esta relação entre forma e esforços instalados torna impossível a resolução directa do sistema de equações de equilíbrio, como é o caso nas estruturas convencionais.

Quando foi construído Pavilhão Alemão para a Expo 1967 (figura 6.1), em *Montreal*, não era conhecida qualquer solução analítica para determinar a forma da rede de cabos da cobertura nem analisar o seu comportamento quando solicitada por acções exteriores. Na altura, a única forma de estudar a estrutura foi através de modelos físicos (figura 6.2), desenvolvidos por *Frei Otto*, *Leonhardt* e *Linkwitz*, entre outros [15].



Fig.6.1. – Pavilhão Alemão – Expo 1967



Fig.6.2. – Modelo físico da estrutura [15]

Encontrar uma forma geométrica adequada requer a determinação de uma figura de equilíbrio entre forças internas e externas aplicadas à estrutura. Tipicamente, este processo resulta em superfícies com dupla curvatura que, matematicamente falando, apenas podem ser grosseiramente descritas por equações diferenciais. Uma vez que tais superfícies não podem ser planificadas sem que ocorra distorção, torna-se necessário gerar moldes exactos para fabrico dos painéis individuais a justapor para formar a estrutura completa. Finalmente, quando solicitada a estrutura sofre grandes deformações, o que implica que qualquer método analítico teria de ser capaz de lidar com este facto.

Durante o projecto da cobertura do Estádio Olímpico de Munique (1972), *Frei Otto* construiu modelos físicos precisos com o objectivo destes serem a fonte de toda a informação necessária para a análise e pormenorização da estrutura (figura 6.3). Tais modelos foram cuidadosamente medidos por *Linkwitz* com a ajuda de métodos fotogramétricos, o que permitiu gerar a sua geometria tridimensional, sem que para isso fosse necessário manipulá-los directamente [15].



Fig.6.3. – Modelo físico da rede de cabos da cobertura do Estádio Olímpico de Munique [15]

No entanto, viria a tornar-se evidente que os modelos físicos, ainda que realizados a grande escala, não eram suficientemente precisos para o efeito pretendido. Para que a geração de formas fosse bem sucedida foi necessário recorrer a métodos numéricos que ajudaram a corrigir os dados obtidos a partir do modelo, de forma a serem satisfeitas as condições de equilíbrio de forças em cada nó da malha. Tal objectivo foi conseguido aplicando o método dos mínimos quadrados às coordenadas dos nós que haviam sido determinadas por fotogrametria. Este procedimento foi bem sucedido, embora de uma forma extremamente demorada, o que obrigou a mobilizar toda a capacidade computacional disponível nessa época.

Em 1971 viria a ser descoberta (*Linkwitz & Schek*) uma nova formulação numérica da figura de equilíbrio de forças atrás referida – o método da densidade de forças (*“force density method”*). Este revelou-se mais eficiente no estabelecimento e resolução do sistema de equações de equilíbrio, sem que para isso fosse necessário conhecer as coordenadas iniciais da estrutura. A sua formulação será discutida mais à frente. Desde então os métodos numéricos têm tido um papel essencial tanto na análise, dimensionamento e pormenorização destas estruturas, como na verificação da viabilidade do conceito arquitectónico e seu posterior desenvolvimento [15].

Tais métodos são extremamente complexos, trabalhosos e repetitivos, pelo que a sua implementação de forma automática foi obrigatória para que estes processos pudessem sofrer o aumento de rendimento desejado. Começam então a surgir os primeiros programas de cálculo automático que, apesar de terem um interface pouco intuitivo e requererem aos seus utilizadores um conhecimento profundo da teoria subjacente, permitiram realizar estruturas que não teriam sido possíveis se baseadas apenas nos métodos de análise tradicionais.

Actualmente, a aplicação de membranas tensionadas leves como meio de cobrir espaços de grande dimensão é integralmente dependente da utilização de métodos potentes de computação. De facto, grande parte do desenvolvimento desta indústria ocorreu nos últimos 20 anos precisamente devido à generalização de computadores pessoais relativamente potentes.

Os processos de cálculo automático substituíram assim as técnicas de modelação física, permitindo visualizar e controlar interactivamente geometria e níveis de tensão, assim como definir moldes de fabrico rigorosos e detalhes de construção. Tais ferramentas aliadas a técnicas computacionais de dinâmica dos fluidos permitirão, no futuro, uma melhor definição da distribuição das acções do vento em formas complexas.

Apesar disto, os modelos físicos simples continuam a ser uma ferramenta útil no estudo inicial da geometria de sistemas complexos de forma livre, fornecendo uma estimativa da curvatura das superfícies e, por conseguinte, da distribuição de tensões. Para além do valor “táctil” evidente de tais modelos, são também um meio de comunicação entre os vários elementos da equipa de projecto e constituem o melhor processo de aprendizagem para os novos membros dessa mesma equipa.

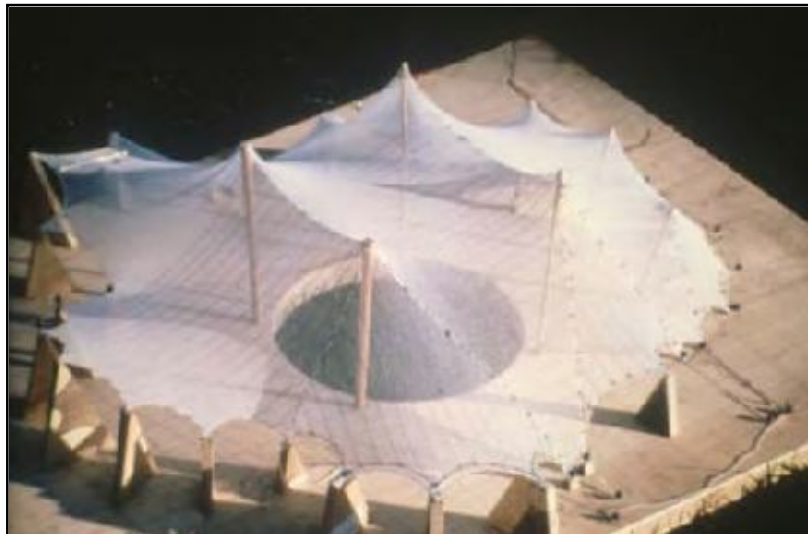


Fig.6.4. – Modelo físico de uma cobertura de forma complexa

6.2. SEQUÊNCIA E CONDICIONAMENTOS DO PROCESSO DE ANÁLISE ESTRUTURAL

O processo de análise estrutural das membranas tensionadas pode ser dividido nas fases representadas na Figura 6.5. Naturalmente, terminado este processo, é necessário proceder à pormenorização de todos os elementos constituintes da estrutura para que a solução fique convenientemente documentada.



Fig.6.5. – Sequência do processo de análise estrutural

O problema da definição da forma inicial das membranas tensionadas pode ser abordado de várias maneiras [7], [16]. Comum a todas as abordagens é a necessidade de garantir que a superfície resultante é capaz de suportar as acções aplicadas, ao mesmo tempo que satisfaz as restrições impostas pelo conceito arquitectónico. Devido à relação directa que existe entre forma e distribuição de tensões é frequentemente necessário chegar a um compromisso entre o que se pretende e o que é estruturalmente possível.

De um ponto de vista puramente filosófico, pareceria razoável ter como objectivo a definição de uma superfície uniformemente tensionada, limitada pelas condições de fronteira escolhidas pela arquitectura – a superfície resultante seria assim uma superfície mínima, semelhante aos modelos de película de sabão. Na realidade, apesar de poder haver razões do ponto de vista da engenharia para trabalhar com campos de tensões uniformes ou aproximadamente uniformes, esta estratégia ignora as condições de carregamento e o facto dos materiais constituintes das membranas serem tipicamente anisotrópicos. Independentemente disto, o principal requisito para qualquer sistema de geração de formas é a capacidade de definir superfícies equilibradas suaves que possuam dupla curvatura alargada e sejam limitadas por fronteiras arbitrárias.

Um exemplo clássico em que a definição de um campo de tensões não uniforme é propositada é o de uma forma cónica na qual, para a diferença de altura pretendida entre o anel superior e o limite inferior da superfície, o diâmetro do anel é insuficiente para que se possa instalar um estado de tensão isotrópico (figura 6.6) – isto obrigaria a que as curvaturas opostas fossem iguais, o que tipicamente não é possível com esta configuração.

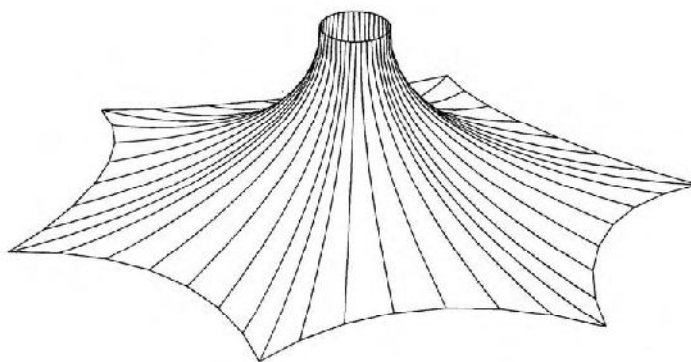


Fig.6.6. – Exemplo de uma superfície cónica de campo não uniforme de tensões

Os principais determinantes da forma global das membranas tensionadas são as suas condições de fronteira, conforme foi já referido nos capítulos anteriores. Fixadas estas, a configuração obtida apenas é alterada por variações da relação entre as forças de pré-esforço instaladas nas direcções principal e secundária das fibras. De facto, nesta fase é conveniente desprezar o peso próprio da membrana e incluí-lo apenas na análise estática subsequente. Este procedimento tem a vantagem de, uma vez que a configuração da superfície depende apenas dos rácios de pré-esforço (não de magnitudes), os níveis de pré-esforço poderem ser ajustados durante a análise estática sem que seja necessário repetir o processo de geração de formas.

Terminada a fase de concepção, é necessário levar a cabo a análise estática da estrutura. Nesta fase são atribuídas propriedades materiais à membrana e obtidos os estados de tensão devidos à actuação das diferentes acções consideradas.

A definição que se pode tornar mais complexa é a da acção do vento, conforme referido no Capítulo 5. Esta pode ser levada a cabo de 3 formas distintas:

- de acordo com os coeficientes de pressão C_p definidos na regulamentação disponível, embora seja uma simplificação grosseira;
- obtendo os valores máximos a considerar através de ensaios em túnel de vento, sendo que este é um método muito dispendioso e não completamente rigoroso (mas geralmente a única alternativa);
- usando programas de dinâmica dos fluidos computacional em conjunto com programas de elementos finitos, sendo possível obter distribuições cronológicas e espaciais exactas dos valores máximos a considerar (este tipo de processos ainda está a ser desenvolvido).

No que diz respeito aos modelos numéricos utilizados, estes devem considerar as não-linearidades materiais, tais como anulação da tracção em cabos ou enfunamentos locais da membrana, e as não-linearidades geométricas associadas às grandes deformações da estrutura.

As relações tensão-extensão consideradas para os materiais têxteis revestidos devem também levar em conta os efeitos da interacção entre fibras ortogonais (*crimp interchange effects*), sendo que estes podem conduzir a dificuldades de convergência numérica. Em alguns casos poderá ser aconselhável considerar propriedades materiais dependentes do tipo de carregamento – consoante a tensão predominante actua na direcção principal ou secundária das fibras.

Para que os resultados obtidos sejam rigorosos é também importante controlar os processos automáticos de geração e refinamento das malhas utilizadas na discretização da estrutura. A figura 6.7 ilustra este procedimento.

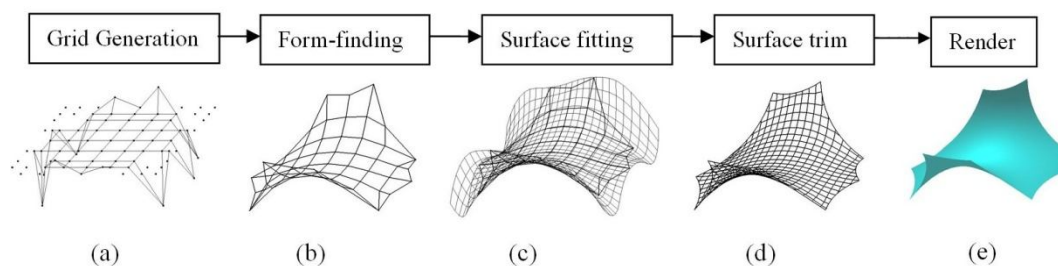


Fig.6.7. – Exemplo de geração e refinamento automático de uma malha de elementos finitos

A última fase do processo de análise diz respeito à definição dos moldes de fabrico dos painéis individuais a justapor para formar a estrutura completa. Este procedimento é da maior importância por várias razões, conforme abaixo descrito.

Os tecidos revestidos utilizados nas membranas tensionadas não são capazes de resistir a forças de corte de carácter permanente. Consequentemente, a orientação dos painéis deve ser tal que as direcções das tensões principais da estrutura coincidam com aquelas das fibras de tecido.

Adicionalmente, o principal requisito para a definição destes painéis é que as suas linhas centrais e limites coincidam com linhas geodésicas da superfície de dupla curvatura. Isto implica que, quando

planificados, a sua linha central é uma recta coincidente com a direcção principal das fibras de tecido mas os seus bordos são curvilíneos – nas emendas as fibras irão, portanto, sobrepor-se com um determinado ângulo. Isto pode conduzir a ligeiros enrugamentos da tela mas que poderão ser evitados se o pré-esforço for suficiente (ou a dimensão dos painéis seja reduzida em áreas de curvatura acentuada). A figura 6.8 ilustra este processo para uma superfície muito simples.

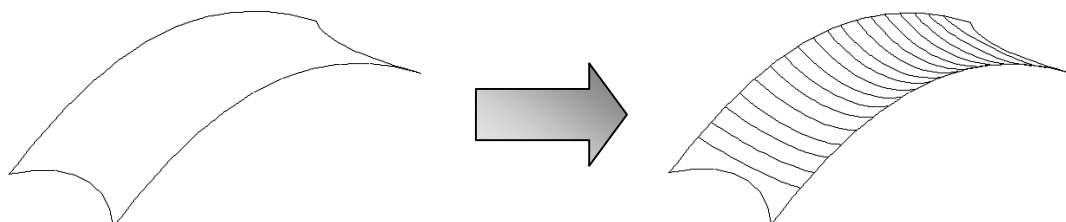


Fig.6.8. – Processo de divisão de uma superfície anticlástica em painéis individuais

6.3. MÉTODOS NUMÉRICOS PARA GERAÇÃO DE FORMAS E ANÁLISE ESTATICA

A base fundamental da maioria dos métodos computacionais utilizados na análise de estruturas em membrana tensionada é alguma forma de modelação de equilíbrio. A estrutura é discretizada numa malha de elementos finitos com topologia fixada mas na qual, à excepção dos apoios, os nós têm coordenadas apenas aproximadas. Dependendo do tipo particular de elemento finito utilizado, as forças internas podem ser determinadas e depois aplicadas nos nós. Uma vez que tenham sido aplicadas quaisquer forças externas, é possível determinar as forças nodais residuais não equilibradas. Podem então ser aproximadas as coordenadas nodais equilibrantes através de uma perturbação directa da malha, baseada nessas mesmas forças residuais. Uma das principais vantagens de utilizar tal abordagem computacional no processo de geração de formas é que a subsequente determinação dos esforços instalados na membrana, devido à actuação do pré-esforço e das acções exteriores, vem facilitada.

Os métodos mais largamente estudados, que podem ser utilizados tanto no processo de geração de formas como numa análise não linear completa de estruturas em membrana tensionada, são os sucintamente descritos a seguir [17]:

Método da Densidade de Forças (*Force Density Method*) – utiliza uma técnica analítica para linearizar as equações de geração de formas aplicáveis a uma rede tensionada de cabos. Esta linearização torna o método independente das propriedades do material constituinte da membrana. Os rácios de densidade de forças (força no cabo dividida pelo comprimento do cabo) precisam de ser especificados para cada elemento, sendo que rácios diferentes dão origem a formas de equilíbrio diferentes. Este método é numericamente robusto e independente da localização inicial dos nós da malha, sendo a forma de equilíbrio determinada com facilidade.

Método da Densidade de Tensões (*Surface Stress Density Method*) – pode ser considerado uma generalização do método linear da densidade de forças ao caso bidimensional, sendo que entra em linha de conta com as tensões de corte. Neste método, os rácios de densidade de tensões são dados pela relação entre a tensão e a área do elemento.

Método da Relaxação Dinâmica (*Dynamic Relaxation Method*) – resolve o problema não-linear geométrico assimilando-o a um problema dinâmico. Torna-se necessário definir propriedades dinâmicas apropriadas, tais como a massa e o amortecimento característico da membrana. É feito um balanço de forças em cada nó, do qual resulta uma força residual que produz o movimento do nó na direcção dessa força, de acordo com o comportamento dinâmico da malha. São calculadas novas posições para todos os nós até que seja atingida a forma final de equilíbrio, ou seja, até que as forças residuais obtidas sejam suficientemente pequenas. A convergência numérica do método é controlada através de uma escolha apropriada do coeficiente de amortecimento ou, em alternativa, através de uma técnica denominada “amortecimento cinético”.

Todos estes métodos idealizam a superfície da membrana como uma grelha de elementos lineares e/ou uma malha contínua de elementos finitos ortotrópicos, na qual é considerada a rigidez ao corte do tecido e do seu revestimento. Têm como característica comum o facto de não ser necessário conhecer as propriedades do material constituinte da membrana para obter a configuração tridimensional de equilíbrio associada a uma dada distribuição de tensões, condições de fronteira e pontos de apoio.

A existência de diferentes métodos é explicada pelo problema matemático que surge ao tentar resolver um problema mecânico inverso. Este é definido pelo facto de a distribuição de tensões imposta ser o grau de liberdade dominante no processo de análise. Isto é contrário ao que se passa na mecânica tradicional em que as tensões são a resposta da estrutura à deformação do material. Como consequência, os métodos numéricos associados deparam-se com singularidades matemáticas que são ultrapassadas com a ajuda de diferentes técnicas (por exemplo o método de *Newton-Raphson* modificado).

6.3.1. MÉTODO DA DENSIDADE DE FORÇAS APLICADO À GERAÇÃO DE FORMAS

O método da densidade de forças é o algoritmo dominante utilizado na Europa para o processo de geração de formas de estruturas em membrana tensionada. A sua aplicação fora da Europa tem, nos últimos tempos, vindo a aumentar. A principal razão para esta situação é porque se trata de um método particularmente bom. Entre as suas excelentes características destacam-se as seguintes:

- **Qualidade:** as formas geradas são geralmente extremamente adequadas;
- **Velocidade:** a geração de formas é praticamente instantânea;
- **Fiabilidade:** a existência de solução é garantida para quaisquer especificações;
- **Flexibilidade:** a modificação da distribuição de tensões na superfície é facilmente controlada através de parâmetros simples.

Este método não é mais do que uma estratégia matemática para resolver o sistema de equações de equilíbrio, associado a qualquer tipo de grelha de cabos, sem que para isso seja necessário conhecer as coordenadas iniciais da estrutura. Tal efeito é conseguido através da exploração de um artifício matemático. As ideias essenciais do método são a seguir descritas [16].

Estruturas em grelha rotuladas nos nós assumem o estado de equilíbrio quando as forças internas s e externas p estão em equilíbrio (figura 6.9).

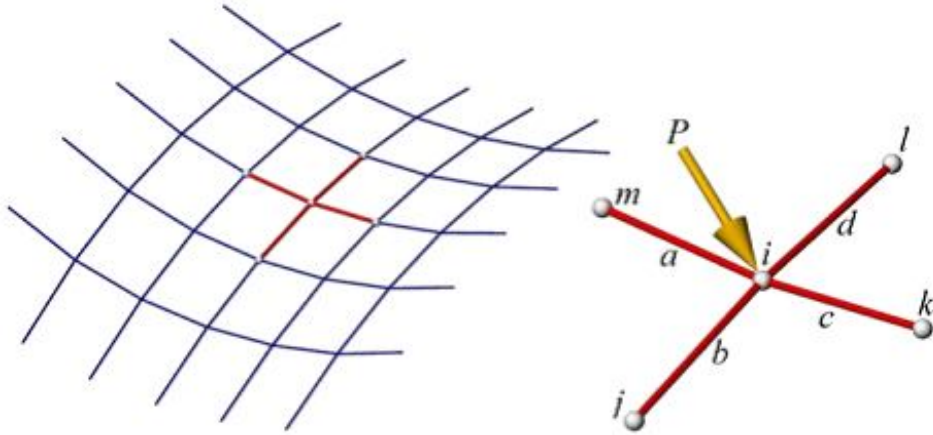


Fig.6.9. – Fragmento de uma grelha de cabos

No caso do nó i representado na figura 6.9 as equações são as seguintes:

$$s_a \cdot \cos(a, x) + s_b \cdot \cos(b, x) + s_c \cdot \cos(c, x) + s_d \cdot \cos(d, x) = p_x \quad (6.1.)$$

$$s_a \cdot \cos(a, y) + s_b \cdot \cos(b, y) + s_c \cdot \cos(c, y) + s_d \cdot \cos(d, y) = p_y \quad (6.2.)$$

$$s_a \cdot \cos(a, z) + s_b \cdot \cos(b, z) + s_c \cdot \cos(c, z) + s_d \cdot \cos(d, z) = p_z \quad (6.3.)$$

onde s_a , s_b , s_c e s_d são as forças nas barras indicadas, com comprimentos a , b , c e d , e os cossenos indicados são as projecções nos eixos coordenados xyz dos comprimentos normalizados dos cabos. Expressando estes comprimentos projectados de uma outra forma, as equações convertem-se nas seguintes:

$$\frac{s_a}{a} \cdot (x_m - x_i) + \frac{s_b}{b} \cdot (x_j - x_i) + \frac{s_c}{c} \cdot (x_k - x_i) + \frac{s_d}{d} \cdot (x_l - x_i) = p_x \quad (6.4.)$$

$$\frac{s_a}{a} \cdot (y_m - y_i) + \frac{s_b}{b} \cdot (y_j - y_i) + \frac{s_c}{c} \cdot (y_k - y_i) + \frac{s_d}{d} \cdot (y_l - y_i) = p_y \quad (6.5.)$$

$$\frac{s_a}{a} \cdot (z_m - z_i) + \frac{s_b}{b} \cdot (z_j - z_i) + \frac{s_c}{c} \cdot (z_k - z_i) + \frac{s_d}{d} \cdot (z_l - z_i) = p_z \quad (6.6.)$$

Nestas equações os comprimentos a , b , c e d são função das coordenadas, tratando-se, portanto, de um problema não-linear. Adicionalmente, as forças são dependentes da largura da grelha não deformada e da lei de *Hooke*. Incorporar estas funções conduziria a uma formulação por elementos finitos.

O processo de geração de formas tem como objectivo obter uma forma com uma determinada distribuição de pré-esforço e discretizada com uma malha de largura pré-definida. Esta informação

inicial pode ser sintetizada nos parâmetros de densidade de forças q , para todos os elementos. As equações linearizadas resultantes são, então, as seguintes:

$$q_a \cdot (x_m - x_i) + q_b \cdot (x_j - x_i) + q_c \cdot (x_k - x_i) + q_d \cdot (x_l - x_i) = p_x \quad (6.7.)$$

$$q_a \cdot (y_m - y_i) + q_b \cdot (y_j - y_i) + q_c \cdot (y_k - y_i) + q_d \cdot (y_l - y_i) = p_y \quad (6.8.)$$

$$q_a \cdot (z_m - z_i) + q_b \cdot (z_j - z_i) + q_c \cdot (z_k - z_i) + q_d \cdot (z_l - z_i) = p_z \quad (6.9.)$$

O sistema de equações obtido é extremamente escasso e pode ser eficientemente resolvido em ordem às coordenadas da estrutura.

6.3.2. MÉTODO DA DENSIDADE DE FORÇAS APLICADO À ANÁLISE ESTÁTICA

O método da densidade de forças pode ser eficientemente estendido à análise elástica de estruturas geometricamente não-lineares [16]. É possível demonstrar que a formulação do método dos elementos finitos pode ser derivada directamente da formulação do método da densidade de forças. No entanto, este último tem-se revelado numericamente mais estável no cálculo de estruturas leves, em que ocorrem grandes deformações e partes da estrutura frequentemente ficam lassas.

Antes de ser realizada qualquer análise estática, a forma da estrutura definida pelas equações atrás elencadas tem de ser materializada. Isto pode ser feito sem perturbar o estado de equilíbrio de forças. Para qualquer conjunto de valores positivos de q , posições fixas e forças externas p existe um único conjunto de coordenadas de nós que garante o equilíbrio da estrutura. Aplicando a lei de *Hooke* à força na barra s_a resulta:

$$s_a = E \cdot A \cdot \frac{a - a_0}{a_0} \quad (6.10.)$$

onde A representa a área da secção, E o módulo de elasticidade e a_0 o comprimento da barra indeformada. Substituindo s_a por q_a resulta:

$$a_0 = \frac{E \cdot A \cdot a}{q_a \cdot a + E \cdot A} \quad (6.11.)$$

Uma vez que a é função das coordenadas dos nós extremos da barra, o comprimento indeformado materializado é função de q_a e das coordenadas. Para cada q_a existe um comprimento indeformado correspondente a_0 .

Para que seja possível realizar a análise estática da estrutura sujeita a acções externas, os comprimentos indeformados têm de ser fixados. Isto pode ser matematicamente atingido conjugando as equações de materialização com as equações de equilíbrio. O sistema de equações resultante deixa

assim de ser linear, no que diz respeito a coordenadas e densidades de força, tendo de ser novamente linearizado. Uma vez que a informação obtida após o processo linear de geração de formas está naturalmente disponível, este procedimento revela-se extremamente favorável na obtenção de convergência do método. De facto, a utilização de densidades de força como pré-informação para os problemas não-lineares de análise estática resulta em características de convergência poderosas.

6.4. MODELOS NUMÉRICOS PARA RELAÇÕES TENSÃO-EXTENSÃO DE TECIDOS

Todos os métodos de análise relativos a estruturas tensionadas têm obrigatoriamente que levar em conta os efeitos não-lineares geométricos associados a grandes deformações, incluindo as flechas em cabos devidas ao seu peso próprio. Devem também ser incorporados os efeitos não-lineares materiais, tais como o enrugamento de zonas da membrana ou a desactivação de cabos, e utilizadas relações tensão-extensão biaxiais adequadas, sendo estas baseadas em resultados de ensaios dos materiais. As relações mais frequentemente adoptadas assumem a seguinte forma [7]:

$$\sigma_x' = \sigma_x^i + EA_x \cdot \varepsilon_x \quad (6.12.)$$

$$\sigma_y' = \sigma_y^i + EA_y \cdot \varepsilon_y \quad (6.13.)$$

$$\sigma_x = \sigma_x' + EA_C \cdot \varepsilon_y \quad (6.14.)$$

$$\sigma_y = \sigma_y' + EA_C \cdot \varepsilon_x \quad (6.15.)$$

desde que a membrana permaneça tensionada nas direcções principal (x) e secundária (y). Nas expressões acima é o seguinte o significado dos símbolos envolvidos:

- σ_x = Tensão resultante na direcção principal (kN/m);
- σ_y = Tensão resultante na direcção secundária (kN/m);
- σ_x^i = Pré-esforço na direcção principal (kN/m);
- σ_y^i = Pré-esforço na direcção secundária (kN/m);
- EA_x = Factor de rigidez na direcção principal;
- EA_y = Factor de rigidez na direcção secundária;
- EA_C = Factor de rigidez cruzado (interacção entre fibras ortogonais);
- ε_x = Extensão na direcção principal, medida a partir do estado pré-esforçado;
- ε_y = Extensão na direcção secundária, medida a partir do estado pré-esforçado;

Nos casos em que possa haver enrugamento de áreas da membrana para determinadas condições de carregamento – o que será verdade na maioria dos casos – tal efeito pode ser considerado associando às relações tensão-extensão verificações condicionais. Um exemplo das verificações passíveis de serem aplicadas é o descrito a seguir nas equações (6.16.) a (6.18.).

$$\text{se } (\sigma_x + \sigma_y) < 0 \text{ então } \sigma_x = \sigma_x' \text{ e } \sigma_y = \sigma_y' \quad (6.16.)$$

$$\text{se } \sigma_x < 0 \text{ então } \sigma_x = 0 \quad (6.17.)$$

$$\text{se } \sigma_y < 0 \text{ então } \sigma_y = 0 \quad (6.18.)$$

Estas relações consideram as tensões axiais resultantes nas duas direcções, mas deverão também ser consideradas as tensões de corte na membrana. Apesar de a rigidez ao corte depender principalmente do revestimento do tecido e ser relativamente baixa, esta pode influenciar significativamente os valores das concentrações de tensão previstos durante a análise. Esta rigidez pode ser convenientemente considerada usando uma relação elástica e isotrópica:

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (6.19.)$$

onde:

- τ = Tensão de corte;
- G = Módulo de elasticidade transversal;
- γ = Extensão de corte.

6.4.1. EFEITO DA INTERACÇÃO ENTRE FIBRAS (*CRIMP INTERCHANGE EFFECTS*)

O efeito da interacção entre fibras é levado em conta de forma simplificada nas expressões 6.14 e 6.15 através da consideração do factor de rigidez cruzado EA_C . Conforme foi já referido, este procedimento tem restrições que podem afectar a convergência da análise, e o comportamento real dos tecidos revestidos é muito mais complexo. A figura 6.10 mostra uma comparação entre relações tensão-extensão para diferentes rácios das forças instaladas nas duas direcções principais das fibras.

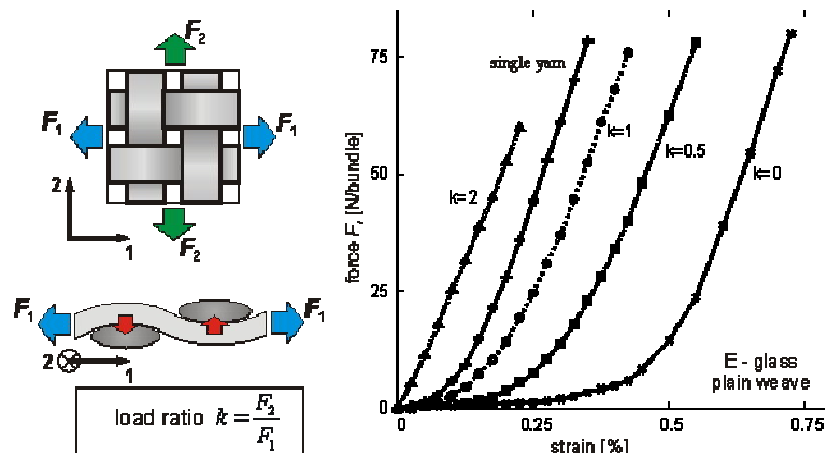


Fig.6.10. – Efeito da interacção entre fibras em estado biaxial de tensão

Este fenómeno pode ser levado em conta de uma forma mais rigorosa utilizando modelos que consideram o espaçamento e diâmetro das fibras, assim como a tensão inicial instalada. No entanto, a análise por elementos finitos associada requer que sejam realizadas iterações para cada elemento durante cada um dos ciclos de iteração global (devidos à não linearidade geral do problema), levando a que este tipo de procedimento não seja usualmente adoptado. Em vez disso, a análise é normalmente realizada de acordo com o que foi dito no ponto 6.4, considerando as propriedades “elásticas” (valores EA) adequadas a cada caso de carga, de forma a tentar aproximar o comportamento real do material. Outras abordagens, mais sofisticadas, têm sido propostas por vários autores mas, por enquanto, ainda será mais apropriado proceder desta forma.

6.4.2. MODELOS DE GRELHA

Outra abordagem válida na simulação numérica de tecidos revestidos é utilizar grelhas de elementos lineares. Nesta situação a rigidez ao corte não é modelada mas, uma vez que esta é muito baixa, este efeito não será significativo. Adicionalmente, as expressões 6.12 a 6.15 pressupõem que as direcções das tensões principais estão sempre alinhadas com as fibras do tecido.

Seria possível considerar o efeito de interacção entre fibras nestes modelos (analogamente à utilização de EA_C nas expressões 6.14 e 6.15), mas tal não é usualmente feito. Usualmente são considerados os factores de rigidez directos (equivalentes a EA_x e EA_y) ajustados ao tipo de carregamento – dependendo se a tensão actuante é predominante na direcção principal, por exemplo devido à acção da neve, ou na direcção secundária, devido a acção do vento. No entanto, os resultados obtidos devem ser verificados no sentido de avaliar se tal efeito é ou não desprezável. Este mesmo comentário é aplicável na situação em que a modelação é feita com elementos finitos planos ortotrópicos.

6.5. EXEMPLO PRÁTICO

Nesta secção será resolvido o problema de cobrir uma área de $20 \times 20 \text{ m}^2$ com uma estrutura do tipo parabolóide hiperbólico. Serão levadas a cabo as fases de geração de formas e análise estática não-linear. A resolução será apoiada pelo programa de cálculo automático *ForTen 2000*, desenvolvido pela empresa Italiana TSI (www.forten32.com). Este programa é baseado no método da densidade de forças, sendo de utilização muito simples.

A estrutura em análise será constituída pelos seguintes elementos:

- cabo de aço de 16mm de diâmetro, para realizar o limite da estrutura;
- tela de poliéster, tipo *Ferrari Preconstraint Fluotop 702*, revestida a PVC Tipo 2.

As características do material constituinte da membrana são dadas pelo seu fabricante sendo, neste caso concreto, as seguintes:

peso próprio: 0.75 kg/m^2

resistência característica à tracção (direcção principal): 60 kN/m

resistência característica à tracção (direcção secundária): 56 kN/m

extensão característica de rotura: $\leq 1\%$

As condições de fronteira do problema ficam definidas pelas coordenadas dos pontos de apoio da estrutura. Estas manter-se-ão inalteradas durante o processo de geração de formas e apenas serão modificadas caso a configuração de equilíbrio que delas resulte se revele inadequada ao vão a vencer e

às acções a suportar. No entanto, este aspecto apenas poderá ser apreciado uma vez obtidos os resultados da análise estática não linear. As coordenadas dos vértices da estrutura consideradas como ponto de partida para o processo de geração de formas são, então, as seguintes (as coordenadas z_i representam as cotas altimétricas):

$x_1 = 0.0\text{m}$	$y_1 = -10.0\text{m}$	$z_1 = 0.0\text{m}$
$x_2 = 10.0\text{m}$	$y_2 = 0.0\text{m}$	$z_2 = 5.0\text{m}$
$x_3 = 0.0\text{m}$	$y_3 = 10.0\text{m}$	$z_3 = 0.0\text{m}$
$x_4 = -10.0\text{m}$	$y_4 = 0.0\text{m}$	$z_4 = 5.0\text{m}$

Para que a configuração de equilíbrio da superfície fique completamente definida é ainda necessário fixar as densidades de força para cada um dos elementos da estrutura. Um bom indicador dos valores a considerar como ponto de partida é dado pelo valor do pré-esforço que desejavelmente estará instalado na membrana. Este pode ser determinado a partir das características do material acima citadas, da seguinte forma:

$$T_r = 58 \text{ kN/m}$$

$$T_e = \frac{T_r}{S} = \frac{58}{5} = 11.6 \text{ kN/m}$$

$$T_p \approx 10\% \cdot T_e = 1.16 \text{ kN/m}$$

onde:

T_r = Resistência característica à tracção do material da membrana;

T_e = Tensão admissível;

T_p = Valor médio do pré-esforço a instalar na membrana;

S = Coeficiente de segurança do material.

Note-se que, por uma questão de simplicidade, a diferença entre as resistências à tracção nas duas direcções não foi considerada, tomando-se o valor médio de 58kN/m como referência. Uma vez obtidos os resultados do processo de geração de formas será possível verificar se os valores das densidades de forças adoptados foram adequados ou se são necessários ajustes.

O programa utilizado requer ainda que o material constituinte da membrana seja caracterizado pelo seu módulo de elasticidade E . Este parâmetro é, mais uma vez, determinado a partir das propriedades do material fornecidas pelo fabricante.

$$E = \frac{T_r}{\varepsilon} = \frac{58}{0.01} = 5800 \text{ kN/m}, \text{ sendo } \varepsilon \text{ a extensão característica de rotura do material.}$$

Estão neste momento completamente definidos os dados necessários para que o programa leve a cabo o processo de geração de formas. Uma vez definidas as posições dos vértices da superfície, é necessário gerar a malha rectangular (planificada) de elementos lineares a ser utilizada. Esta operação é realizada automaticamente pelo programa, sendo apenas necessário definir o espaçamento entre elementos e as fronteiras a considerar. Neste exemplo foi utilizada uma malha com elementos espaçados de 1.0m.

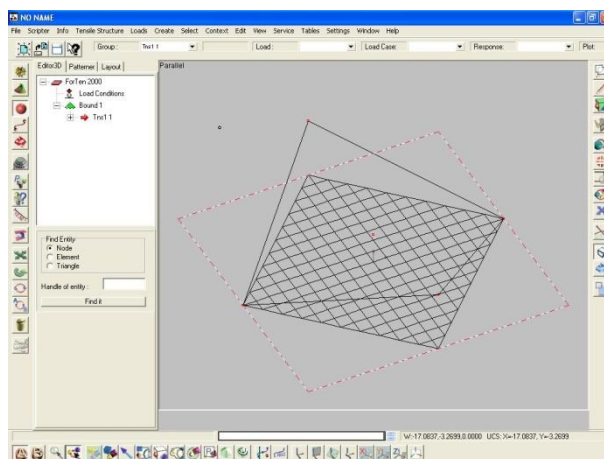


Fig.6.11. – Fronteiras e malha inicial (ForTen 2000)

Em seguida é necessário definir as densidades de força a considerar para cada um dos elementos constituintes da estrutura. Como ponto de partida serão consideradas as seguintes:

$$C_{membrane} = 1.00 \text{ kN/m} \quad C_{cable} = 10.00 \text{ kN/m}$$

Realizadas estas operações, é possível visualizar o resultado do processo de geração de formas. A figura 6.12 mostra a configuração da superfície obtida.

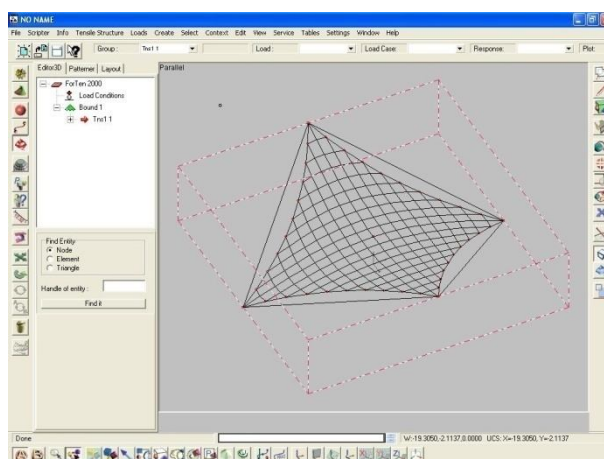


Fig.6.12. – Configuração da superfície obtida (ForTen 2000)

Nesta altura é possível verificar qual o valor médio do pré-esforço instalado na membrana, de forma a validar as densidades de força consideradas como ponto de partida. A figura 6.13 mostra o correspondente mapa de tensões.

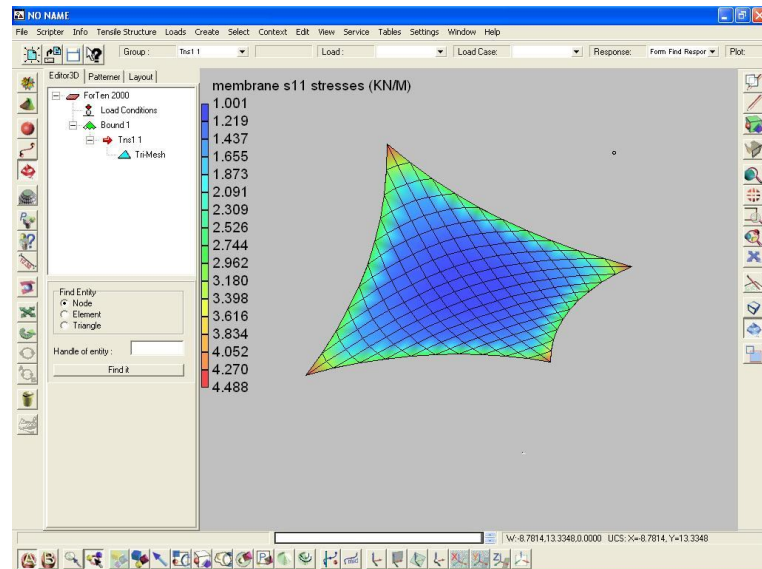


Fig.6.13. – Pré-esforço na membrana para $C_{membrane} = 1.00\text{kN/m}$ (ForTen 2000)

Conforme é possível observar, o pré-esforço médio instalado na membrana é de cerca de 1.65kN/m , sendo demasiado elevado se comparado com o valor previamente fixado de 1.16kN/m para a tela escolhida. Sendo assim, é necessário repetir o processo de geração de formas para uma nova densidade de forças nos elementos da membrana – seja $C_{membrane} = 0.80\text{kN/m}$. A figura 6.14 mostra o novo resultado em termos de pré-esforço instalado, com a escala limitada a 1.16kN/m .

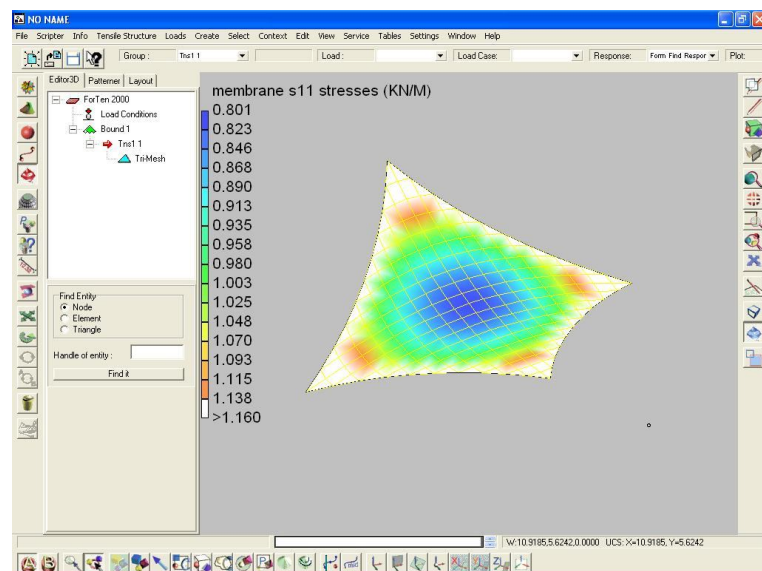


Fig.6.14. – Pré-esforço na membrana para $C_{membrane} = 0.80\text{kN/m}$ (ForTen 2000)

A distribuição de tensões obtida é, desta feita, adequada. Este resultado pode ser confirmado visualizando o gráfico de tensões em elementos lineares ilustrado na figura 6.15.

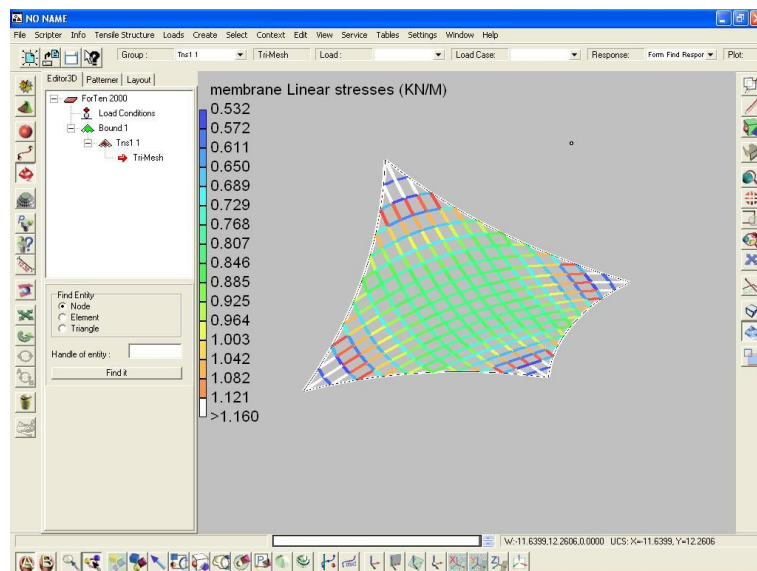


Fig.6.15. – Pré-esforço na membrana – tensões em elementos lineares (ForTen 2000)

É ainda possível verificar quais as reacções nos apoios associadas ao estado de equilíbrio inicial da membrana. Esta informação encontra-se sintetizada na listagem ilustrada na figura 6.16, onde é possível analisar as diferentes componentes da reacção em cada nó com apoio exterior.

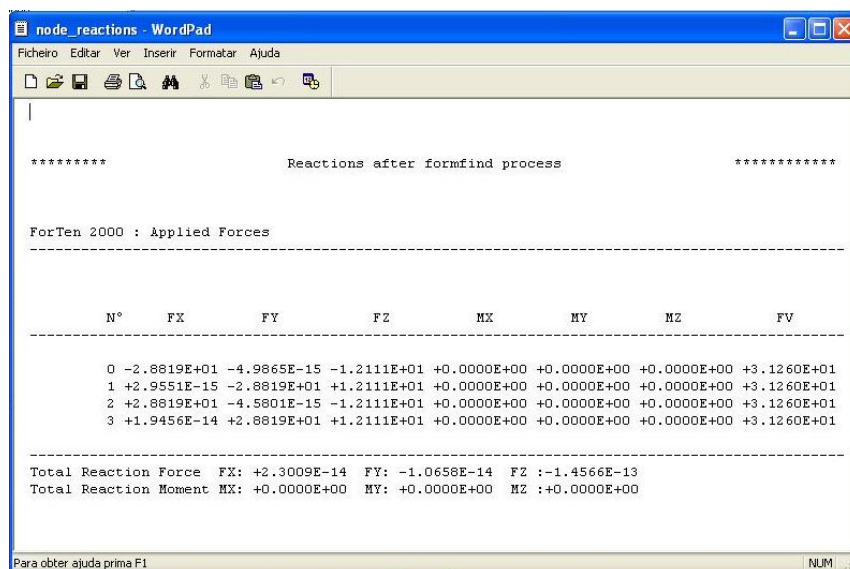


Fig.6.16. – Reacções nos apoios relativas ao estado pré-esforçado (ForTen 2000)

Conforme é possível observar na listagem acima representada, as reacções globais são iguais nos quatro apoios, assumindo um valor de 31.26kN.

Terminado o processo de geração de formas, fica assim definida a geometria inicial da estrutura G_0 em equilíbrio com o pré-esforço S_0 , sendo que estes dois parâmetros definem a rigidez e a capacidade de a membrana suportar as acções exteriores. É, então, possível avançar com a análise estática não-linear da estrutura.

O programa *ForTen 2000* resolve o problema da análise não-linear geométrica com a ajuda do método de *Newton-Raphson*, considerando uma carga P aplicada numa superfície de geometria inicial G_0 e pré-esforço inicial S_0 . É fixado um número de incrementos n e de iterações t , assim como a precisão de cálculo ξ . O primeiro incremento de carga aplicado tem o valor $P_1 = P/n$, dando origem a uma nova geometria G_1 e a um novo estado de tensão S_1 . Se o incremento de carga for pequeno quando comparado com o estado inicial de tensão S_0 , então as variações de tensão $\Delta S = S_1 - S_0$ e de geometria $\Delta G = G_1 - G_0$ serão também pequenas, podendo o problema ser linearizado e resolvido em t ciclos de iteração. Note-se que os ciclos de iteração apenas são realizados até que se atinja a precisão de cálculo desejada. É assim obtida uma nova geometria G_1 que está em equilíbrio com a tensão S_1 e a carga P_1 , sendo em seguida calculado um novo incremento de carga $P_2 = P_1 + P/n$ e determinados novos geometria e estado de tensão, G_2 e S_2 . Após n iterações, a acção P foi completamente aplicada e a geometria e estado de tensão finais, G_n e S_n , foram determinados.

Pode acontecer que a análise acima descrita não convirja ou então convirja para uma má solução. As possíveis razões para que tal fenómeno aconteça são as seguintes:

- baixo número de incrementos/iterações quando comparados com a carga P . As variações ΔG e ΔS são demasiado elevadas e, em cada incremento, são acumulados erros fazendo o problema divergir.

Solução: usar um maior número de incrementos/iterações ou usar o método de *Newton-Raphson* em vez do método de *Newton-Raphson* modificado;

- níveis de pré-esforço reduzidos ou má concepção estrutural, fazendo com que a rigidez global seja baixa.

Solução: alterar condições de fronteira, verificar zonas planas locais ou verificar níveis de pré-esforço.

Tanto o método de *Newton-Raphson* como o método de *Newton-Raphson* modificado são processos de actualização da matriz de rigidez. O método original actualiza a matriz em cada ciclo de iteração, sendo assim mais lento, embora mais preciso, do que o método modificado que apenas actualiza a matriz após um determinado número de iterações. A figura 6.17 mostra o quadro de definição de parâmetros de análise não-linear geométrica do programa.

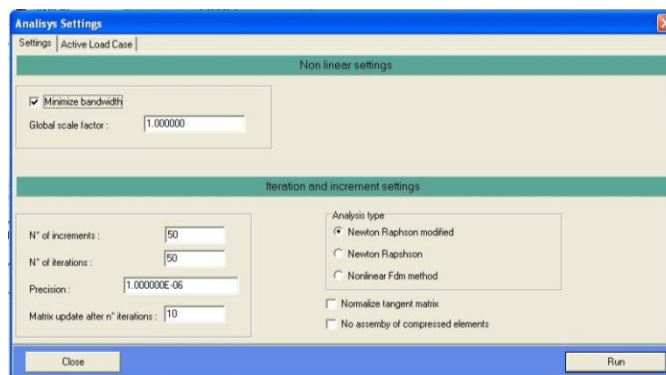


Fig.6.17. – Quadro de definição de parâmetros de análise não-linear geométrica (*ForTen 2000*)

No que diz respeito às acções aplicadas à estrutura, serão considerados 3 casos de carga distintos. Refira-se que, numa situação real, é em geral necessário considerar mais variações. Note-se ainda que, por uma questão de simplicidade, a acção do vento será aplicada com direcção uniforme e sem levar em consideração forças de arrastamento ou efeitos de sucção. As acções aplicadas e respectivos casos de carga serão, então, os seguintes:

- Acção da Neve: $L1 = 0.40\text{kN/m}^2$;
- Acção do Vento: $L2 = 0.60\text{kN/m}^2$.
- Caso de carga $LC1 = L1$;
- Caso de carga $LC2 = L2$;
- Caso de carga $LC3 = L1 + L2$.

Estão assim definidos todos os dados necessários para que o programa realize a análise estática não-linear da estrutura. Os parâmetros de análise considerados são os seguintes:

- número de incrementos = 50;
- número de iterações = 50;
- método de análise = *Newton-Raphson* modificado;
- actualização da matriz depois de (n.º iterações) = 10.

Após alguns incrementos verifica-se que o problema diverge, surgindo uma informação dada pelo programa de que foi encontrado um elemento nulo na diagonal da matriz de rigidez da estrutura. É, então, necessário modificar os parâmetros de análise na tentativa de conseguir a convergência. Alterando o método de análise para *Newton-Raphson*, observa-se que o problema converge mas ocorrem tensões de compressão na membrana, para o caso de carga $LC1$. Uma vez que este tipo de funcionamento estrutural não é admissível, é novamente necessário modificar os parâmetros de análise no sentido de não considerar a contribuição de elementos comprimidos da estrutura para a sua resposta mecânica (activar a opção “*No assembly of compressed elements*” no quadro da figura 6.17). Desta feita, a análise estática é concluída sem que ocorram mais incidente.

As figuras 6.18 e 6.19 mostram os mapas de tensões principais na membrana associadas ao caso de carga $LC1$.

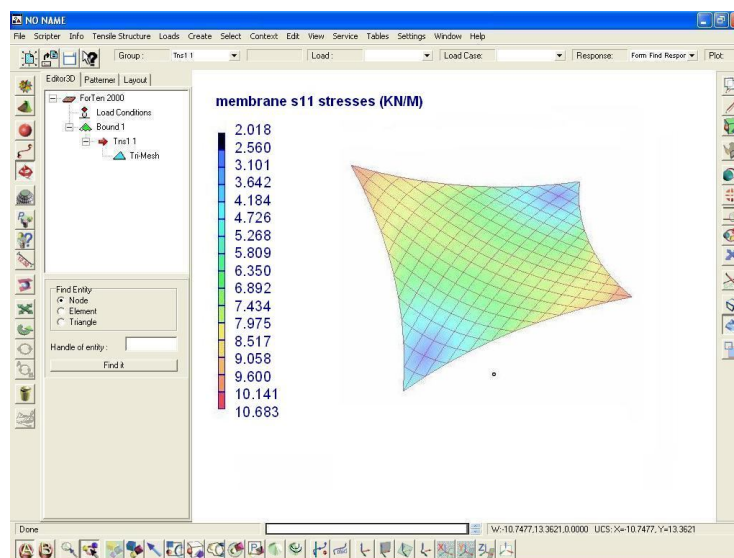


Fig.6.18. – Tensões σ_{11} na membrana para o caso de carga $LC1$ (ForTen 2000)

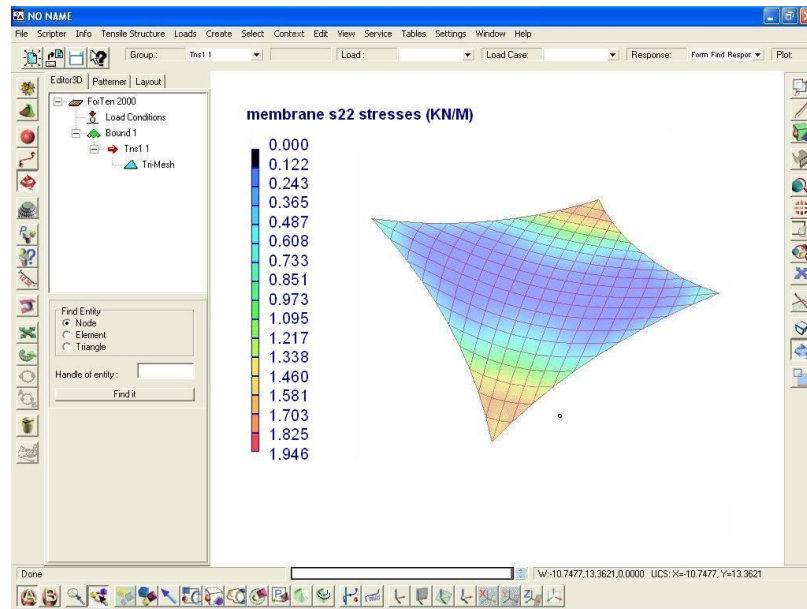


Fig.6.19. – Tensões σ_{22} na membrana para o caso de carga LC1 (ForTen 2000)

Conforme é possível observar, a tensão admissível definida para o material não é atingida para o presente caso de carga. Relativamente ao caso de carga LC2, os resultados obtidos em termos de tensões são os ilustrados nas figuras 6.20 e 6.21.

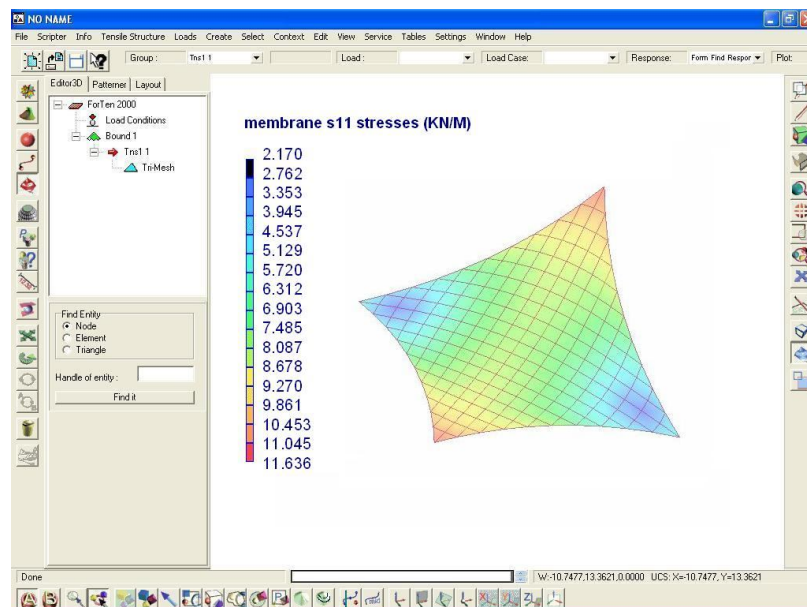


Fig.6.20. – Tensões σ_{11} na membrana para o caso de carga LC2 (ForTen 2000)

Conforme é possível observar na figura 6.20, a tensão admissível de 11.6kN/m é excedida embora apenas ligeiramente e em zonas muito pontuais da membrana. Assim sendo, este facto não inspira qualquer tipo de cuidado ou redefinição das condições iniciais do problema.

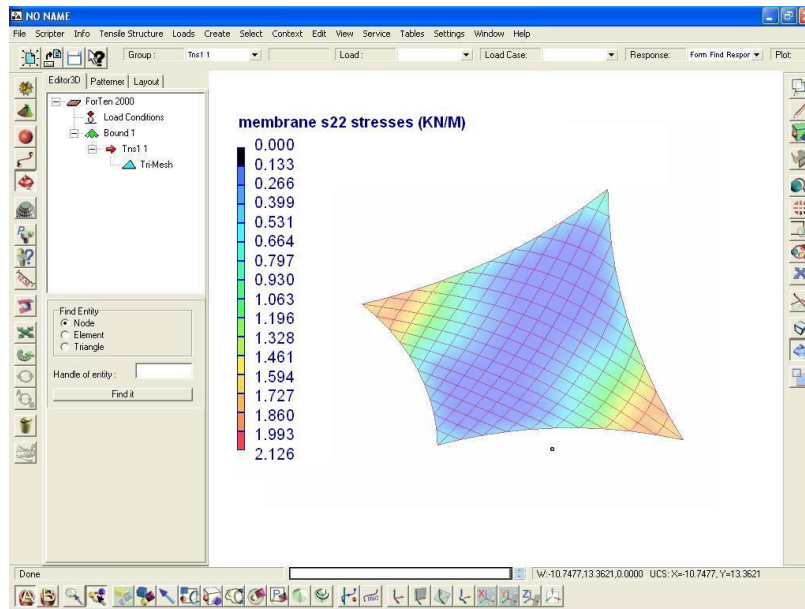


Fig.6.21. – Tensões σ_{22} na membrana para o caso de carga LC2 (ForTen 2000)

No que diz respeito ao caso de carga LC3, os resultados obtidos em termos de tensões são os representados nas figuras 6.22 e 6.23.

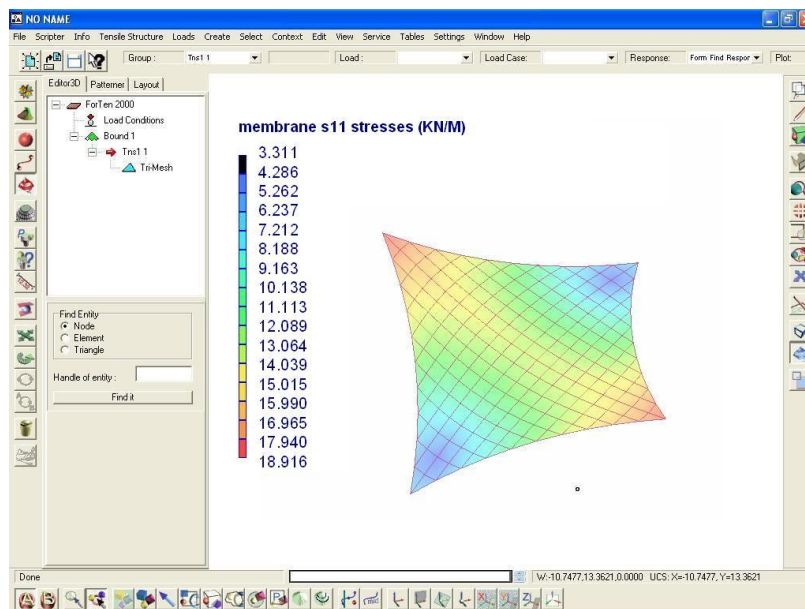
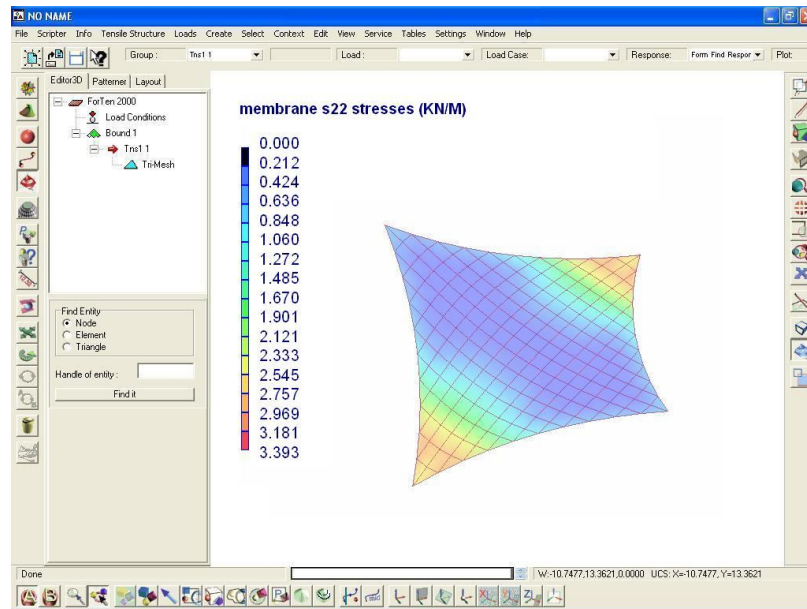


Fig.6.22. – Tensões σ_{11} na membrana para o caso de carga LC3 (ForTen 2000)

Para este caso de carga é possível observar que a tensão máxima instalada atinge o valor de 18.916kN/m. No entanto, este valor ocorre junto dos pontos altos da membrana podendo o problema ser resolvido executando um reforço local com uma dupla camada de material.

Fig.6.23. – Tensões σ_{22} na membrana para o caso de carga LC3 (ForTen 2000)

Para além de verificar as tensões máximas instaladas, devem também ser observados os deslocamentos máximos que ocorrem em cada caso de carga. A análise realizada revelou que o deslocamento máximo se dá para o caso LC3. A figura 6.24 mostra o mapa de deslocamentos associado a este carregamento.

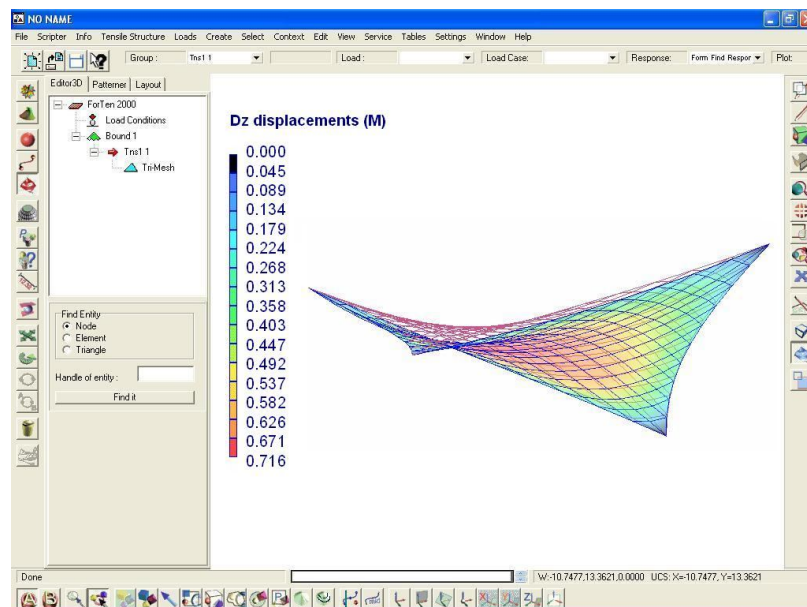


Fig.6.24. – Deslocamentos na membrana para o caso de carga LC3 (ForTen 2000)

Conforme é possível constatar desta última figura, o deslocamento máximo que ocorre é de 71.6cm, sendo este valor aceitável no caso das membranas tensionadas, embora francamente superior aos tipicamente observados nas estruturas tradicionais.

Conforme ilustrado, conseguiu-se obter uma solução estruturalmente aceitável para a cobertura de um espaço de grandes dimensões em planta e com um reduzido número de apoios, envolvendo uma membrana tensionada com configuração muito simples. Foi também demonstrado que a sua análise estrutural, apesar de complexa, pode ser realizada com um conjunto de operações simples apoiadas por um programa de cálculo automático.

7

CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1. CONCLUSÕES

Existe uma enorme variedade de estruturas em membrana tensionada, havendo ainda muito que explorar neste domínio.

Entre os exemplos que foram apresentados ao longo do presente trabalho, muito contraste pode ser observado. Algumas estruturas são realmente *leves*, enquanto outras, se forem levados em conta todos os elementos (incluindo as fundações), não podem ser consideradas como realmente optimizadas no que diz respeito ao seu peso próprio. Algumas são *económicas*, enquanto outras são conhecidas por serem construções extremamente dispendiosas. Algumas são *portáteis*, enquanto em outros casos é difícil desmontar e mover a estrutura completa. Algumas são projectadas como *temporárias*, enquanto outras podem ser consideradas como definitivas, com uma vida útil expectável de cerca de 20 ou 30 anos. A utilização de membranas tensionadas pode ser específica ou *adaptável* a diferentes propósitos, pode ser sazonal ou então compreender aberturas e fechos diários consoante as condições atmosféricas.

As membranas tensionadas são *flexíveis*, o que também significa que as deformações sob a influência de acções externas são maiores do que as correspondentes em construções tradicionais. Pré-esforço e curvatura são necessários para assegurar estabilidade. Os exemplos clássicos, como a cobertura do Estádio Olímpico de Munique, apresentam curvaturas expressivas, mas exemplos recentes mostram que é possível definir espaços funcionais aplicando sistemas estruturais baseados em membranas de curvatura ligeira.

A tridimensionalidade contínua das membranas com dupla curvatura torna impossível projectá-las simplesmente com “papel e lápis”. É necessário utilizar modelos tridimensionais de geração de formas para determinar a geometria exacta a considerar na análise estrutural e definir os moldes para fabrico. Tanto os modelos físicos como os numéricos são importantes, cada um oferecendo qualidades particulares para o desenvolvimento do conceito arquitectónico.

A construção de modelos físicos pode ser comparada ao processo de “esquissar” desenhos e qualquer técnico que pretenda dedicar-se ao projecto e construção de membranas tensionadas deverá passar por essa experiência. Esta técnica permite desenvolver uma melhor compreensão do funcionamento das membranas com dupla curvatura que estão num estado de equilíbrio, sendo possível alterar as condições de fronteira e observar os efeitos sobre a superfície.

Apesar disso, os métodos numéricos têm um papel essencial no projecto destas estruturas, tendo sido ao longo do tempo implementados em diversos programas de cálculo automático. A consideração das não-linearidades materiais e geométricas envolvidas é condição obrigatória para uma correcta

simulação do comportamento estrutural. De entre os métodos mais aplicados destaca-se o método da *Densidade de Forças* como algoritmo dominante na Europa. O método da *Relaxação Dinâmica* é, no entanto, também digno de referência.

No que diz respeito às relações tensão-extensão consideradas para os materiais, estas devem ser baseadas em resultados de ensaios e caracterizar adequadamente o seu comportamento ortotrópico, incluindo as características não-lineares. No entanto, é importante reconhecer que qualquer que seja o desenvolvimento dos ensaios e grau de refinamento associado aos modelos considerados haverá sempre aproximações ao verdadeiro comportamento, devidas a diferenças entre lotes de tecido, aos efeitos de envelhecimento do material e imperfeições de fabrico.

A acção do vento é frequentemente condicionante na verificação de segurança das membranas tensionadas leves. Infelizmente, a definição dos valores a considerar e a sua distribuição reveste-se de várias dificuldades. Os ensaios em túnel de vento permitem ultrapassar algumas questões, e embora não sejam absolutamente perfeitos, são geralmente a melhor opção de apoio ao projecto de estruturas com formas complexas. No futuro, os métodos numéricos de análise, aliados a formulações envolvendo dinâmica dos fluidos, permitirão uma melhor definição desta acção em membranas tensionadas leves.

A pormenorização cuidada e completa é um aspecto fundamental para que uma solução desta natureza fique convenientemente documentada. Deve ser dada atenção ao detalhe de emendas e bordos da tela, reforço local em zonas de concentração de tensões, ligação aos apoios e definição de todos os elementos de suporte (mastros, cabos, vigas, fundações, etc.). Este assunto é muito vasto, existindo elementos bibliográficos dedicados e recheados de casos de estudo, pelo que se optou pela sua não inclusão na estrutura do presente trabalho.

A pesquisa bibliográfica levada a cabo para a realização do presente trabalho revelou que a informação disponível sobre este assunto é ainda, de certa forma, *ad hoc*. A Europa carece de regulamentação neste domínio, para que a comunidade técnica e o público em geral ganhem mais confiança nesta tecnologia não convencional. Entretanto, eventos tais como congressos, *wokshops* e exposições continuarão a estimular o intercâmbio de conhecimentos sobre esta temática.

7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O trabalho apresentado pretendeu sintetizar o actual estado do conhecimento nesta matéria, aplicar as técnicas de análise estrutural disponíveis a um caso concreto e identificar as actuais necessidades de investigação científica no sentido de perspectivar desenvolvimentos futuros.

Um aspecto que se afigura da maior importância é o da determinação rigorosa das acções do vento sobre membranas muito flexíveis e com formas complexas. São já reconhecidas as limitações dos ensaios em túnel de vento quando se trata destas estruturas, pelo que o caminho a seguir é o da dinâmica dos fluidos computacional. Este tema constitui uma das hipóteses para prosseguir com a investigação nesta área no âmbito de um programa de Doutoramento.

Outra área ainda não completamente conhecida é a do comportamento material. Os tecidos revestidos utilizados nas membranas apresentam características não-lineares que é necessário traduzir nas relações tensão-extensão utilizadas. Isto é possível ser efectuado de forma simplificada, mas pode afectar a convergência da análise e, de facto, o comportamento real deverá ser significativamente mais complexo. O resultado é um modelo computacional muito elaborado, sem que disso se tirem benefícios, o que é obviamente prejudicial para a eficiência do sistema. Existe, então, a necessidade de

elaborar modelos numéricos mais estáveis e rigorosos que permitam aumentar o rigor da análise das estruturas em membrana tensionada.

Estes aspectos são apenas dois exemplos das numerosas frentes de trabalho que é necessário desenvolver nesta matéria. Outros temas que necessitam de desenvolvimentos, dentro e fora da engenharia de estruturas, são os seguintes:

- critérios de segurança estrutural;
- processos de aumento da resistência à tracção dos materiais;
- métodos e procedimentos de ensaio dos materiais, emendas e ligações;
- processos construtivos;
- comportamento a longo prazo dos materiais;
- processos de aumento da durabilidade dos materiais;
- determinação rigorosa das propriedades térmicas, ópticas e acústicas dos materiais;
- modelos de previsão do ambiente interior proporcionado por tais construções.

Fica assim lançado o desafio de realizar investigação científica na área das membranas tensionadas leves, em todas as suas valências, sendo convicção do autor do presente trabalho que tais estruturas irão assumir um protagonismo crescente na realidade da construção futura.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Eurocódigo 1: Acções em Estruturas*. CEN, 2002.
- [2] *DIN 4134: Tragluftbauten*. DIN Deutsches Institut Für Normung, 1983.
- [3] *DIN 4112: Fliegende Bauten*. DIN Deutsches Institut Für Normung, 1983.
- [4] *Recommandations pour la conception des ouvrages permanents de Couverture Textile*. Bureau Veritas, 1997.
- [5] *Guide for Specific Membrane Structures*. Membrane Structures Association of Japan, 1990.
- [6] *Tensile Membrane Structures*. ASCE Standard, 2002.
- [7] Mollaert, M., Forster, B. *European Design Guide for Tensile Surface Structures*. VUB Brussels, Brussels, 2004.
- [8] Engel, H. *Sistemas Estruturais*. Editorial Gustavo Gili, S.A., Barcelona, 2001.
- [9] Mollaert, M. *Proceedings: Designing Tensile Architecture*. VUB Brussels, Brussels, 2003.
- [10] <http://www.freiotto.com>. Último acesso em 06/2008.
- [11] *Recommendations for the Design of Air Supported Structures*. IASS, 1986.
- [12] Minte, J. *Das mechanische Verhalten von Verbindungen beschichteter Chemiefasergewebe*. Dissertation, RWTH Aachen, 1981.
- [13] *Instructions for the Design, Realisation, Verification, Use and Maintenance of Tents, Tensile Structures and Air-Supported Structures*. Italian Standard (draft), 1995.
- [14] *National Standard of Canada – Air Supported Structures*. CAN3-S367-M81, 1981.
- [15] Gründig, L., Moncrieff, E., Singer, P., Ströbel, D. *A History of the Principal Developments and Applications of the Force Density Method in Germany 1970-1999*. Fourth International Colloquium on Computation of Shell & Spatial Structures, June 5-7 2000, Crete, Greece.
- [16] Mollaert, M. *Proceedings: The Design of Membrane and Lightweight Structures*. VUB Brussels University Press, Brussels, 2002.
- [17] Sánchez, J., Serna, M.A., Morer, P. *Surface Fitting Approach for Tensile Membranes Design*. IASS International Symposium, September 20-24 2004, Montpellier, France.
- [18] <http://www.tensinet.com>. Último acesso em 04/2008.
- [19] <http://www.arcaro.org/tension/>. Último acesso em 06/2008.

