



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Gridshells em madeira: morfologia, aplicabilidade, comportamento estrutural e projeto

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil
na Especialidade de Estruturas

Autor

Diogo Filipe Pombo Alves Carvalho

Orientadores

Alfredo Manuel Pereira Geraldes Dias

Edna Moura Pinto

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, Outubro, 2015

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço aos meus Pais e a toda a minha família pois foram eles, através do apoio incondicional que sempre me deram, que me possibilitaram chegar até aqui;

Agradeço aos meus orientadores, Professor Doutor Alfredo Dias e Professora Doutora Edna Pinto, pela ajuda prestada e pelas sugestões que enriqueceram o conteúdo da minha Dissertação;

Um especial agradecimento aos meus colegas, em particular ao meu grupo de amigos mais próximo, por terem atravessado comigo esta etapa da minha vida. Tanto os que estão comigo desde o início como os que se juntaram mais tarde foram importantes à sua maneira e por eles ficará uma eterna amizade;

Agradeço também a quem de alguma forma contribuiu para a realização desta Dissertação;

Finalmente, agradeço a todos os Professores e Funcionários do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra pela excelência na qualidade de ensino que me proporcionaram.

RESUMO

Gridshells são estruturas com formas curvas de definição livre, com elevada eficiência estrutural garantida com quantidades de material reduzidas. Como o próprio nome indica, resultam da associação de estruturas do tipo casca (“*shell*”) com grelhas (“*grid*”), ou seja, podem ser consideradas como cascas discretizadas em elementos lineares que formam uma grelha. Estas condições permitem uma grande variabilidade arquitetónica, aliada a um bom desempenho estrutural.

A presente Dissertação consiste num estudo detalhado sobre *gridshells* em madeira e no qual são abordados vários conteúdos que permitem caracterizar este tipo de solução estrutural. Em primeiro lugar apresentam-se o conceito e a aplicabilidade, a história e casos práticos, as vantagens da utilização da madeira na sua construção, os métodos construtivos, ligações entre os elementos, as condições de fronteira e o potencial de desenvolvimento que demonstram; Seguidamente, apresenta-se a explicação do comportamento estrutural das *gridshells*, fazendo um enquadramento com as estruturas do tipo casca (onde é válida a teoria da membrana) e expõem-se algumas características estruturais; Por fim, apresentam-se as várias etapas e correspondentes técnicas de execução da fase de projeto de estruturas deste tipo, bem como os aspetos normativos relativos ao seu dimensionamento.

Com este estudo verificou-se que as *gridshells* estão ainda numa fase embrionária da sua aplicabilidade, mas que têm todas as condições para poder crescer cada vez mais como potencial solução construtiva, dada a otimização do material que a eficiência do seu comportamento estrutural produz, devido ao crescente interesse demonstrado por parte de Arquitetos e Engenheiros, à maior divulgação que têm tido na última década e à grande evolução dos meios de projeto que se tem verificado recentemente.

ABSTRACT

Gridshells are curved structures with a freedom design characterized by a high structural efficiency achieved with very few material. As the name suggests, they can be defined as shell structures, but instead of considering a solid surface, they are displayed on a grid pattern. These assumptions allow a wide architectural range combined with a good structural behaviour.

This Dissertation is an in-depth study of timber gridshells in which several characteristic aspects were taken into account. First of all, the concept and applicability of this structural solution are presented, followed by its history and case studies, the advantages of using timber in its construction, the ordinary construction techniques, the connections between the laths, the boundary conditions and gridshells' development potential; Secondly, the structural behaviour of gridshells is explained by doing a comparison with real shells (where the membrane theory is valid), and some structural issues are presented; Finally, all the necessary steps towards the project and corresponding execution methods are shown, alongside with the required normative aspects related to the design.

The overall study has demonstrated that timber *gridshells* are still in an initial phase of its development, although they hold the perfect conditions to grow in a sustainable way, proved by the soaring interest on this structural solution among Architects and Engineers, by the wide dissemination they have had over the last decade and by the evolution of the technological project mechanisms registered lately.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
SIMBOLOGIA	ix
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento geral	1
1.2 Objetivos e metodologia	2
1.3 Organização	2
2 CARACTERÍSTICAS GERAIS	4
2.1 <i>Gridshells</i> : O conceito	4
2.2 Aplicabilidade: principais vantagens e desvantagens	5
2.3 Origem, desenvolvimento e casos práticos	6
2.4 Madeira como material utilizado na construção de <i>gridshells</i>	13
2.5 Métodos construtivos	15
2.6 Ligações	20
2.6.1 Introdução	20
2.6.2 Ligações de continuidade dos elementos de madeira	20
2.6.3 Ligações nas intersecções dos elementos de madeira	21
2.7 Condições de fronteira	24
2.8 Potencial de desenvolvimento	27
3 COMPORTAMENTO ESTRUTURAL	29
3.1 Enquadramento	29
3.2 Estruturas espaciais	29
3.3 Estruturas tipo casca e análise dos seus elementos	32

3.4	Teoria da membrana para cascas	37
3.5	<i>Gridshells</i> como cascas.....	39
3.6	Curvatura máxima dos elementos estruturais	42
4	TÉCNICAS DE PROJETO.....	44
4.1	Introdução	44
4.2	Definição da superfície	44
4.3	Discretização da superfície	46
4.3.1	Métodos geométricos: Método do compasso	47
4.3.2	Métodos computacionais	49
4.4	<i>Form-finding</i>	52
4.4.1	Introdução.....	52
4.4.2	Métodos físicos: Modelo de Cordas	52
4.4.3	Métodos computacionais: Método da Relaxação Dinâmica	55
4.4.4	Evolução do processo de <i>form-finding</i> e perspectivas de futuro.....	59
4.5	Análise estrutural e dimensionamento	60
4.5.1	Análise estrutural.....	60
4.5.2	Dimensionamento dos elementos de madeira	62
4.6	Esquematização do projeto de uma <i>gridshell</i>	63
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	65
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Exemplos de <i>gridshells</i> construídas com diferentes materiais	5
Figura 2.2 - <i>Chiddingstone Orangery Gridshell</i> (CarpenterOak&Woodland@).....	6
Figura 2.3 - Primeira <i>gridshell</i> em fase de construção no ano de 1897 (Bouhaya, 2010).....	7
Figura 2.4 – <i>Mannheim Multihalle Gridshell</i> ; Esquerda: Vista aérea (Bouhaya, 2010); Direita: Vista interior (E-kultura@, 2015).....	8
Figura 2.5 – Dimensões do pavilhão principal da <i>Mannheim Multihalle Gridshell</i> (PrincetonUniversity@, 2013).....	8
Figura 2.6 - <i>Downland Gridshell</i> ; Esquerda: Vista exterior; Direita: Vista interior (Weald&DownlandMuseum@).....	10
Figura 2.7 – <i>Savill Building</i> no <i>Windsor Great Park</i> , Inglaterra (FourthDoor@)	11
Figura 2.8 - <i>Savill Building Gridshell</i> ; Esquerda: Vista exterior (Foto de Gareth Ggardner); Direita: Vista interior (AtelierTen@, 2007)	12
Figura 2.9 – Exemplos de <i>gridshells</i> de pequena dimensão (Gridshell.it@)	13
Figura 2.10 - Protótipo construído durante o projeto da <i>Downland Gridshell</i> para testar o comportamento da madeira (Harris et al, 2003)	14
Figura 2.11 – a) Superfície plana; b) Superfície deformada na sua posição final (Toussaint, 2007).....	16
Figura 2.12 – Exemplo prático do início da montagem de uma <i>gridshell</i> em madeira (Buildingforafuture@).....	16
Figura 2.13 - Processo de construção ascendente (Linkwitz, 2002) e (Paoli, 2007).....	18
Figura 2.14 - Processo de construção descendente utilizado na <i>Downland Gridshell</i> (Toussaint, 2007).....	19
Figura 2.15 – Etapas base na construção de uma <i>gridshell</i> ; a) Grelha de elementos plana; b) Geometria final da estrutura; c) Estrutura com reforço diagonal; Adaptado de Bouhaya et al (2009)	19
Figura 2.16 – a) <i>Scarf joint</i> ; b) <i>Finger joints</i> (Paoli, 2007).....	21
Figura 2.17 - Exemplo de ligação com utilização de parafuso.....	22
Figura 2.18 - Exemplo de ligação com utilização de placas	22

Figura 2.19 - Exemplo de ligação com utilização de fita metálica reforçada (Paoli, 2007).....	23
Figura 2.20 – Exemplo de ligação de um reforço diagonal com travessas rígidas.....	23
Figura 2.21 – Exemplo de uma fronteira ligada a uma fundação de betão (PrincetonUniversity@, 2013).....	25
Figura 2.22 - Exemplos demonstrativos das condições de fronteira da <i>Downland Gridshell</i> : Placas de contraplacado na base (Weald&DownlandMuseum@)	25
Figura 2.23 – Exemplos demonstrativos das condições de fronteira da <i>Downland Gridshell</i> : Arcos de madeira nas extremidades (Weald&DownlandMuseum@).....	26
Figura 2.24 – Estrutura de tubos metálicos que suporta a <i>Savill Building Gridshell</i> (Harris et al, 2008).....	26
Figura 3.1 - Tipologias de estruturas espaciais; Adaptado de Bouhaya (2010)	30
Figura 3.2 – Exemplos de estruturas lamelares de madeira	31
Figura 3.3 – Estrutura de superfície reticulada: <i>Great Court Roof</i> no <i>British Museum</i> , Londres	32
Figura 3.4 – Exemplos de estruturas tipo casca; a) <i>L'Océanogràfic</i> em Valência, Espanha (Austriaangloalliance@); b) Estação de serviço de <i>Deitingen</i> , Suíça	33
Figura 3.5 – Elemento de uma casca com os raios de curvatura e tensões internas (Flügge, 1973).....	33
Figura 3.6 – Componentes dos esforços internos resultantes num elemento de casca (Farshad, 1992).....	34
Figura 3.7 – Exemplo ilustrativo da variação do comprimento dos segmentos ao longo da espessura da casca (Cardoso, 2008)	36
Figura 3.8 - Ilustração da violação das condições impostas para a validade da teoria da membrana; Adaptado de Farshad (1992).....	38
Figura 3.9 – a) Elemento casca; b) Elemento <i>gridshell</i> (Naicu et al, 2014).....	40
Figura 3.10 – Tipos de reforço diagonal para transmissão das tensões de corte; Adaptado de Naicu (2012).....	40
Figura 3.11 – a) Camada simples; b) Camada dupla (Naicu et al, 2014).....	41
Figura 3.12 – Vista em corte e em planta do sistema de camada dupla, demonstrando os blocos de transmissão de corte; Adaptado de Naicu et al (2014).....	42
Figura 4.1 - Modelo das bolhas de sabão do Arquiteto alemão Frei Otto, <i>Seifenlaugenversuch</i> (DesignIsFine@)	45
Figura 4.2 - Ajuste de uma grelha a uma superfície (D'Amico et al, 2014).....	46
Figura 4.3 – Ilustração das etapas iniciais do método do compasso numa superfície plana	48

Figura 4.4 - Ilustração das etapas finais do método do compasso numa superfície plana	48
Figura 4.5 – Aplicação do método do compasso numa superfície tridimensional (Toussaint, 2007).....	49
Figura 4.6 – Exemplo da discretização de uma superfície com uma malha de elementos finitos (Toussaint, 2007).....	50
Figura 4.7 – Discretização de uma superfície através da projeção de uma grelha inicialmente plana (YouTube@, 2013); a) Criação da grelha de elementos lineares; b) Sobreposição da grelha e da superfície; c) Projeção automática da grelha na superfície; d) Resultado final	51
Figura 4.8 - Exemplo de aplicação do Modelo de Cordas (Paoli, 2007).....	53
Figura 4.9 – Modelo de Cordas da <i>Mannheim Multihalle Gridshell</i> (Kuijvenhoven, 2009) ...	54
Figura 4.10 - Modelo à escala 1:100 da <i>Downland Gridshell</i> (Harris et al, 2003)	55
Figura 4.11 - Exemplo do processo de <i>form-finding</i> digital da <i>Toledo Gridshell</i> , em Nápoles (Itália), através do Método da Relaxação Dinâmica desde a sua fase inicial (a) até à posição final da estrutura (f) (D'Amico et al, 2015)	56
Figura 4.12 – Exemplo da análise de um modelo computacional de uma <i>gridshell</i> através do mapa de tensões; Em cima: Vista em perspectiva; Em baixo: Vista frontal; Adaptado de Naicu (2012)	61
Figura 4.13 – Esquemática do projeto de uma <i>gridshell</i>	64

SIMBOLOGIA

a – Aceleração de um corpo

ds_i – Comprimento do arco descrito por um elemento infinitesimal de casca, com direção i

dz – Altura de cada área infinitesimal a integrar ao longo de t (teoria das cascas)

E – Módulo de elasticidade

F – Força resultante

$f_{c,0,d}$; $f_{c0,d}$ – Tensão de cálculo resistente à compressão atuante na direção das fibras (verificações normativas)

f_m – Tensão resistente à flexão

$f_{m,i,d}$ – Tensão de cálculo resistente à flexão (verificações normativas)

$f_{t,0,d}$; f_{td} – Tensão de cálculo resistente à tração atuante na direção das fibras (verificações normativas)

f_u – Tensão última

$f_{v,d}$; $f_{v0,d}$ – Tensão de cálculo resistente ao corte (verificações normativas)

I – Momento de inércia

k_m ; k_M – Fator de minoração do efeito do momento fletor (verificações normativas)

k_{shape} – Fator de correção da geometria da secção (verificações normativas)

M – Momento fletor atuante numa peça

m – Massa de um corpo

M_i – Momento fletor com direção i (teoria das cascas)

M_{ij} – Momento torsor com direção j , em torno da direção i (teoria das cascas)

N_i – Esforço normal com direção i (teoria das cascas)

N_{ij} – Esforço de corte tangencial com direção j (teoria das cascas)

Q_i – Esforço de corte com direção ortogonal à direção i (teoria das cascas)

r_i – Raio de curvatura do arco ds_i (teoria das cascas)

t – Espessura de um elemento infinitesimal de casca

W – Módulo de flexão

z – Distância entre a superfície média do elemento infinitesimal de casca e outra superfície contida em t

Δt – Incremento de tempo

ν – Coeficiente de *Poisson*

ρ – Curvatura

ρ_{\max} – Curvatura máxima

σ_i – Tensão normal com direção i (teoria das cascas)

$\sigma_{c,0,d}$; $\sigma_{Nc,d}$ – Tensão de compressão atuante na direção das fibras (verificações normativas)

σ_M – Tensão normal devida ao momento fletor

$\sigma_{m,i,d}$; $\sigma_{Mj,d}$ – Tensão de flexão atuante (verificações normativas)

σ_N – Tensão normal devida ao esforço axial

$\sigma_{t,0,d}$; σ_{td} – Tensão de tração atuante na direção das fibras (verificações normativas)

τ_d – Tensão de corte atuante (verificações normativas)

τ_{ij} – Tensão de corte com direção j (teoria das cascas)

$\tau_{tor,d}$; $\tau_{T,d}$ – Tensão de corte devida à torção atuante (verificações normativas)

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento geral

Em resposta às necessidades de constante evolução nos ramos da Engenharia Civil e da Arquitetura, surgem a cada dia novas soluções que visam colmatar as falhas do que já existe, baseadas num conceito da inovação permanente, de forma a suplantar os constantes desafios que vão surgindo nestes dois meios que se complementam mutuamente. Desde sempre que as construções feitas pelo Homem, para além de servirem as suas necessidades de abrigo, têm uma expressão cultural significativa pela sua identidade arquitetónica e pelas suas características estruturais. Os vários períodos da história demonstram exemplos de edifícios característicos de um determinado povo, época ou região, como as construções romanas e gregas, as catedrais góticas e renascentistas ou mesmo as pirâmides do Egito. Estas obras, muitas delas grandiosas e inovadoras à época, foram possíveis graças à capacidade que o Homem desenvolveu em conseguir aliar o aspeto estético com o conhecimento científico, processo que ainda nos dias de hoje é de extrema importância e que necessita de estar em contínua evolução.

Neste contexto surgem as estruturas de forma livre, pouco convencionais e com grande potencial por explorar. As *gridshells* são estruturas com formas curvas de definição livre, com elevada eficiência estrutural atingida através do uso de quantidades reduzidas de material, que permitem vencer grandes vãos sem apoios intermédios. Estas estruturas, extremamente apelativas visualmente, são concebidas para situações em que o papel da Arquitetura no resultado final de uma determinada obra seja preponderante, possibilitando a criação de estruturas arquitetonicamente inéditas e que se tornem numa referência pelo seu aspeto.

Na última década tem-se verificado um aumento do interesse pelo estudo das *gridshells*, comprovado pela amplificação significativa de estudos publicados sobre o assunto, que procuram desenvolver uma grande variedade de aspetos, tais como ferramentas de projeto assistido por computador, a otimização do uso do material, ou mesmo apenas a sua divulgação. Este aumento pode ser justificado por vários fatores, desde a já mencionada variabilidade arquitetónica que estas estruturas permitem, à necessidade emergente da utilização de materiais mais sustentáveis como sejam a madeira e o aço.

Existe a possibilidade de utilizar diversos materiais na construção de uma *gridshell* como o aço, alumínio, madeira, compósitos de fibra de vidro ou mesmo tubos de cartão (Naicu et al, 2014).

Independentemente do material escolhido, os princípios de projeto e execução são semelhantes, com algumas variações. Nesta Dissertação abordam-se as *gridshells* em madeira, um material cujas vantagens relacionadas com a sua elevada capacidade de deformação elástica, sustentabilidade e durabilidade (quando devidamente protegida), fazem com que se apresente provavelmente como o mais indicado neste tipo de estruturas.

1.2 Objetivos e metodologia

Este trabalho tem o intuito de apresentar as estruturas de forma variável de madeira do tipo *gridshell* em todos os seus aspetos característicos, através de uma síntese da informação disponível na bibliografia existente sobre o tema, os quais incidem sobre a sua definição, aplicabilidade, comportamento estrutural, projeto e execução. Esta informação é complementada com aspetos mais genéricos, como os conceitos teóricos relativos ao comportamento e análise de estruturas do tipo casca (tipologia de estrutura espacial à qual se associam as *gridshells*) ou a explicação sobre procedimentos de projeto transversais a estruturas do tipo casca ou membrana e cuja aplicabilidade se estende às *gridshells*, de modo a proporcionar um melhor enquadramento das temáticas abordadas.

Até à data desta publicação, a informação disponível sobre este tipo de estrutura é relativamente escassa, apesar de nos últimos anos ter existido um aumento do interesse pelo tema, com o aparecimento de alguns estudos teóricos mais aprofundados e também sobre o desenvolvimento de ferramentas informáticas que têm em vista o projeto assistido por computador de *gridshells* em vários materiais, de entre os quais a madeira. Apesar deste tipo de construção já existir há vários anos – a primeira construída em madeira, de que foi encontrado registo, data de 1975 –, ainda são muito poucos os casos de *gridshells* em madeira de grandes dimensões construídos em todo o mundo.

1.3 Organização

A presente dissertação está organizada em seis capítulos, sendo o sexto e último capítulo correspondente às Referências Bibliográficas.

No primeiro capítulo faz-se um enquadramento geral do tema e apresentam-se os objetivos deste estudo.

No segundo capítulo são abordadas as características gerais deste tipo de construção, nomeadamente o seu conceito e morfologia, as vantagens e desvantagens da sua aplicabilidade, a sua origem e desenvolvimento com referência a casos práticos existentes, a utilização da madeira na construção de *gridshells*, os métodos construtivos utilizados até hoje, as ligações

entre os elementos e as condições de fronteira destas estruturas e, por fim, o seu potencial de desenvolvimento.

O terceiro capítulo diz respeito ao comportamento estrutural das *gridshells*. Para a sua explicação, é necessário enquadrar este tipo de estrutura no âmbito das estruturas espaciais e fazer a analogia do seu comportamento estrutural com o das estruturas do tipo casca, visto serem similares. Sendo assim, são apresentados alguns conceitos teóricos sobre cascas e sobre a teoria da membrana (teoria para análise de cascas finas), de modo a proporcionar ao leitor uma melhor compreensão e integração no tema. Apresentam-se também outros aspetos relacionados com o comportamento estrutural, designadamente os tipos de elementos utilizados no reforço diagonal da estrutura, a utilização de camada dupla de ripas de madeira, os blocos de madeira para transmissão das tensões de corte ao longo da superfície e a determinação da curvatura máxima para as ripas de madeira.

O quarto capítulo foca os aspetos relativos ao projeto e análise das *gridshells*, bem como o dimensionamento dos elementos de madeira, estes últimos com a apresentação das verificações regulamentares exigidas de acordo com a EN-1995-1-1 e com a NBR 7190 (para Estados Limites Últimos). As técnicas de projeto destas estruturas são consideravelmente diferentes das técnicas utilizadas em estruturas correntes e envolvem várias etapas algo complexas desde a conceção até ao resultado final, pelo que tem bastante relevância a apresentação de cada uma dessas etapas e correspondentes metodologias para a sua realização.

No quinto capítulo apresentam-se as principais conclusões deste estudo e algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 CARACTERÍSTICAS GERAIS

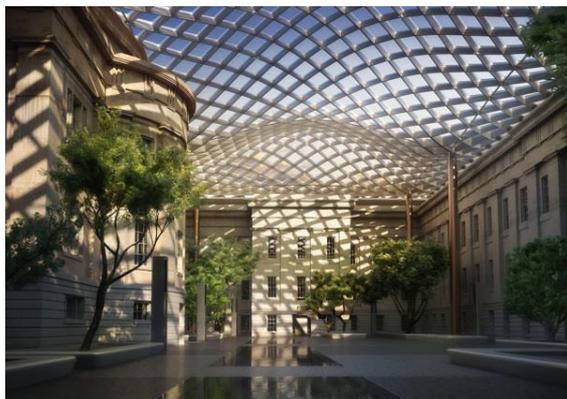
2.1 *Gridshells*: O conceito

As *gridshells* são estruturas bastante atrativas do ponto de vista estético, permitindo grande liberdade de *design*, aspeto ao qual conseguem aliar uma boa eficiência estrutural, vencendo grandes vãos com quantidades reduzidas de material.

Como o próprio nome indica, este tipo de solução estrutural consiste na combinação de cascas (“*shell*”) com grelhas (“*grid*”). A sua capacidade de carga resulta da sua própria configuração no espaço tridimensional (Paoli, 2007), funcionando como uma casca de espessura reduzida (quando comparada com as restantes dimensões), na qual a aplicação de um carregamento distribuído provoca apenas tensões normais e de corte no seu plano (sendo aplicável a teoria da membrana para cascas), uma vez que a rigidez de flexão é muito pequena e pode ser desprezada (Smith, 1969). Apesar do seu comportamento ser semelhante, não se podem considerar totalmente cascas, uma vez que é feita a discretização da superfície contínua numa grelha de elementos esbeltos de material, criando aberturas em forma de quadrilátero. Estes elementos são ligados nas suas interseções de modo a permitir a formação de uma grelha duplamente curva, aproximando o comportamento da estrutura ao comportamento de uma casca. Para assegurar o verdadeiro comportamento de casca, uma vez que os elementos da grelha transmitem apenas tensões normais na sua direção longitudinal, torna-se necessário garantir a transmissão das tensões de corte ao longo da superfície, procedimento usualmente feito numa fase mais adiantada da construção, através do denominado reforço diagonal da estrutura, que confere a rigidez necessária para que não existam deformações significativas.

Outro aspeto identificativo e característico deste tipo de estruturas é o seu procedimento de execução, abordado com detalhe no subcapítulo 2.5, que difere bastante dos procedimentos usuais. Resumidamente, a forma final da estrutura é obtida através da deformação elástica de uma grelha plana de elementos (ripas, no caso das *gridshells* em madeira) sobrepostos em duas direções, que são ligados entre si antes de qualquer modificação da forma. Para que isto aconteça, tal como menciona (Harris et al, 2003), é necessário garantir grande capacidade de deformação elástica nos elementos, pelo que nessa fase não pode ainda existir rigidez no plano.

Na Figura 2.1 são apresentados alguns exemplos de *gridshells* construídas com diferentes materiais para que seja possível ter uma perceção visual do conceito já descrito.



a) *Gridshell* em aço do *Kogod Courtyard* em *Washington, D. C.*, Estados Unidos da América (Behance@)



b) *Gridshell* em madeira do *Savill Building* em *Surrey*, Reino Unido (AtelierTen@, 2007)



c) *Gridshell* em tubos de cartão do *Japan Pavilion* na Expo 2000 em *Hannover*, Alemanha (imagem da *Shigeru Ban Architects*)

Figura 2.1 - Exemplos de *gridshells* construídas com diferentes materiais

2.2 Aplicabilidade: principais vantagens e desvantagens

A principal mais-valia deste tipo de solução estrutural consiste na grande liberdade de *design* que lhe está associada, possibilitando a criação de formas variadas e inéditas, o que é extremamente apelativo tanto para Arquitetos como para Engenheiros.

Permite ainda fazer um aproveitamento dos espaços de forma muito eficiente, uma vez que não são necessários elementos de apoio intermédios em vãos que podem ir até centenas de metros. Esta característica toma particular relevância na distribuição dos espaços interiores, pois não introduz restrições no aproveitamento do espaço, como é o caso de uma estrutura assente em pilares. Desta forma, é possível criar espaços amplos de área considerável e fazer a gestão do espaço interior de forma mais simples, livre e eficiente.

Outra característica favorável às *gridshells* é a sua considerável eficiência estrutural, uma vez que são estruturas com boa capacidade de carga, conseguida com quantidades reduzidas de material (Harris et al, 2003). São ainda estruturas que, quando bem projetadas têm um impacto mínimo nos recursos naturais, podendo ainda a madeira resultante da construção ser reutilizada no futuro.

Ainda no âmbito das vantagens da sua utilização, uma estrutura em grelha (com aberturas entre os elementos estruturais) permite grandes ganhos de luz natural se assim se pretender, o que pode ser um fator decisivo na escolha da solução para um determinado caso. Um exemplo de uma *gridshell* desenvolvida com esse propósito é a *Chiddingstone Orangery Gridshell*, em Inglaterra, tendo sido a primeira a suportar uma cobertura envidraçada (CarpenterOak&Woodland@).



Figura 2.2 - *Chiddingstone Orangery Gridshell* (CarpenterOak&Woodland@)

Olhando para a face oposta, existem também algumas limitações ou desvantagens na utilização de *gridshells*. A complexidade do projeto é grande, fazendo com que se tornem algo dispendiosas nesse aspeto. Além disso, não se adequam a todo o tipo de construção, pois as suas características são mais indicadas para pavilhões ou edifícios nos quais é necessário garantir grandes espaços amplos no seu interior.

2.3 Origem, desenvolvimento e casos práticos

Pode pensar-se que o aparecimento das *gridshells* é recente, uma vez que não é um tipo de solução estrutural amplamente conhecido e que, além disso, é muito pouco utilizado. Apesar disso, a sua origem data da última década do século XIX e deve-se ao Engenheiro russo Vladimir Shukhov, que introduziu o conceito na construção de pavilhões para a indústria e para

exposições em *Vyksa*, na Rússia. Nestas primeiras construções, o material usado foi o aço (Bouhaya, 2010).



Figura 2.3 - Primeira *gridshell* em fase de construção no ano de 1897 (Bouhaya, 2010)

Existem muito poucos casos de *gridshells* de grandes dimensões construídas em madeira em todo o mundo. As que se destacam são indicadas em seguida, relatando-se um pouco da sua história e de que forma o seu projeto e construção contribuíram para o desenvolvimento de metodologias de projeto.

***Mannheim Multihalle Gridshell* (1975, Alemanha)**

A primeira *gridshell* em madeira de grandes dimensões foi construída na Alemanha, na cidade de *Mannheim*, no ano de 1975. Esta estrutura foi construída com o propósito de servir uma feira de exposição hortícola - *Bundesgartenschau* -, realizada de dois em dois anos no país (Paoli, 2007), tendo a feira sido atribuída a essa cidade nesse mesmo ano, integrada no processo de reconstrução e desenvolvimento da cidade após os danos sofridos na Segunda Guerra Mundial (PrincetonUniversity@, 2013). O projeto para o local previa, para além da criação dos jardins que ainda hoje existem, a inclusão de um salão coberto temporário que servisse para exposições, restauração e outras funções diversas.

A empresa vencedora do concurso para a realização da obra (*Mutshler & Partners*) apresentou várias soluções para a estrutura, sendo que as propostas iniciais foram rejeitadas por não cumprirem a regulamentação imposta para o projeto pelas Autoridades Alemãs. Dessa forma, foi solicitado o envolvimento do Professor Frei Otto, Arquiteto e Engenheiro Estrutural com vasta experiência nas estruturas do tipo membrana. Este, em colaboração com Ove Arup, Engenheiro Estrutural, desenvolveu a solução final adotada que consiste em dois pavilhões, um destinado a exposições e outro mais pequeno destinado à restauração, ligados por um corredor interior, sendo que a cobertura de toda a estrutura é formada por uma *gridshell* (Naicu et al, 2014).



Figura 2.4 – *Mannheim Multihalle Gridshell*; Esquerda: Vista aérea (Bouhaya, 2010); Direita: Vista interior (E-kultura@, 2015)

A construção cobre uma área com 3600 m^2 (Paoli, 2007) e o pavilhão principal destinado às exposições (Figura 2.5) cobre um vão de 60 metros por 80 metros, aproximadamente; A altura máxima é de 20 metros (PrincetonUniversity@, 2013).

No caso do pavilhão destinado à restauração, este cobre um vão de 40 por 40 metros (Naicu, 2012).

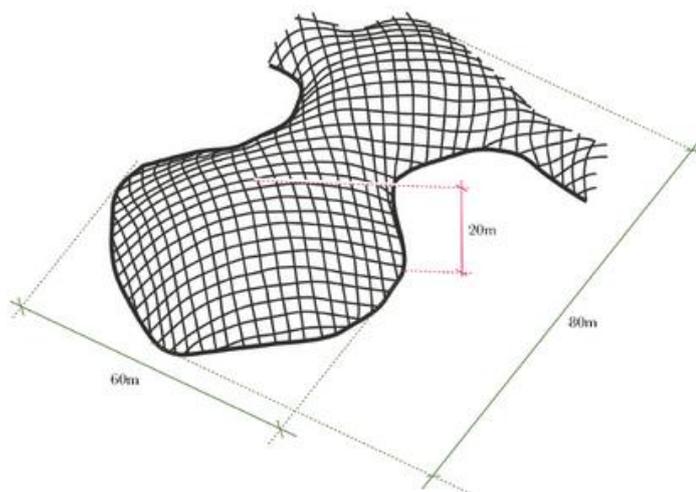


Figura 2.5 – Dimensões do pavilhão principal da *Mannheim Multihalle Gridshell* (PrincetonUniversity@, 2013)

As ripas de madeira desta estrutura têm secções transversais de $50 \times 50 \text{ mm}$ e um espaçamento entre elas de 500 mm . Na totalidade foram utilizados 72000 metros de ripas de madeira (Bouhaya, 2010). A espécie de madeira utilizada na construção foi *Tsuga heterophylla*,

vulgarmente conhecida em inglês por *Western Hemlock* (Naicu et al, 2014), uma espécie oriunda da costa oeste da América do Norte e que se adequa ao tipo de estrutura e ao tipo de método construtivo, tanto pelos grandes comprimentos das ripas que se conseguem obter, como em termos do módulo de elasticidade relativamente baixo que permite cumprir os requisitos de flexão dos elementos para que seja modelada a forma final da estrutura.

Os apoios da *gridshell* têm três tipos de componentes diferentes: fundações de betão, vigas de madeira lamelada colada e arcos de madeira. O reforço diagonal da estrutura foi feito através de cabos de aço (Toussaint, 2007).

Apesar de a construção ter sido efetuada apenas com cariz temporário (para o período de atividade da exposição), ainda hoje continua funcional. Este projeto, que se pode considerar inédito por ter sido a primeira *gridshell* em que foi utilizada madeira na construção, foi essencial para o melhor conhecimento deste tipo de estruturas, além de ter permitido otimizar metodologias de projeto e análise para as *gridshells*. Dessa forma, serviu de referência para as que se construíram posteriormente.

***Downland Gridshell* (2002, Reino Unido)**

A *Downland Gridshell*, a primeira em madeira construída no Reino Unido, localiza-se no Sul de Inglaterra, em *West Sussex*, e está integrada no museu em espaço aberto “*Weald and Downland Museum*”. Este museu, aberto ao público em 1970, tem como objetivo a promoção da conservação e preservação de edifícios históricos construídos em madeira. Apesar de o museu privilegiar a manutenção dos edifícios nos seus locais de origem, em casos pontuais em que isso não seja possível, o museu trata da sua desmontagem, transporte, restauro e reconstrução nos seus espaços, de forma a ilustrar a variedade de estilos e tipos de construção dos vários edifícios históricos. A construção da *Downland Gridshell* foi concluída no ano de 2002 com o propósito de servir de oficina para o armazenamento e restauro de peças dos edifícios a recuperar. (Weald&DownlandMuseum@).



Figura 2.6 - *Downland Gridshell*; Esquerda: Vista exterior; Direita: Vista interior (Weald&DownlandMuseum@)

As imposições arquitetônicas feitas para a concepção do edifício passavam por apresentar ao público um edifício artesanal e ao mesmo tempo moderno e inovador (Paoli, 2007), criando um edifício sustentável e com o mínimo impacto ambiental, utilizando para isso materiais biodegradáveis, reutilizáveis e recicláveis. Dada a elevada reputação do museu, os seus responsáveis queriam uma solução que se notabilizasse pela diferença (Harris et al, 2003). Posto isto, a escolha de uma *gridshell* em madeira foi uma escolha natural, uma vez que os componentes de madeira da estrutura podem ser vistos pelo interior do edifício (e, em parte, também pelo exterior), sendo ao mesmo tempo um edifício com formas inovadoras e orgânicas, transparecendo os vales e montes existentes nos espaços abertos do museu, fazendo com que a edificação se integre muito bem na sua envolvente paisagística.

A concepção e execução do edifício resultou de uma colaboração entre as empresas *Edward Cullinan Architects* e *Buro Happold Engineering*, responsáveis pela Arquitetura e Engenharia, Alex Sayer no controlo de qualidade e a empresa *Green Oak Carpentry Company* na carpintaria (Bouhaya, 2010).

A solução arquitetónica final consiste numa forma semelhante a um prisma quadrangular com três cúpulas, com um comprimento longitudinal de 50 metros, entre 11 e 16 metros de largura e entre 7 e 11 metros de altura (Bouhaya, 2010). A *gridshell* é composta por 600 ripas de madeira de secções transversais 50x35 mm, com comprimentos até 37 metros e com um comprimento total de ripas de 12000 metros (Weald&DownlandMuseum@). A espécie de madeira utilizada foi o Carvalho, uma vez que está disponível em fontes sustentáveis no Reino Unido (Naicu et al, 2014) e é uma espécie com elevada durabilidade natural (Santos et al, 2011).

Savill Building (2006, Reino Unido)

A construção da *Downland Gridshell*, em 2002, serviu de impulso para dar continuidade à utilização deste tipo de solução estrutural no Reino Unido.

O *Savill Building* é um edifício que funciona como centro de visitas integrado no *Savill Garden*, um jardim pertencente ao *Windsor Great Park*, a sul da cidade de *Windsor*, na Inglaterra. A sua cobertura é uma *gridshell* em madeira, projetada pela *Glen Howells Architects* em colaboração com os Engenheiros da *Buro Happold Engineering*, já envolvida no projeto da *Downland Gridshell*. Também a *Green Oak Carpentry Company* voltou a estar envolvida na construção (FourthDoor@). Ao ser concluída a sua execução, passou a ser a maior *gridshell* existente no Reino Unido (Bouhaya, 2010).



Figura 2.7 – *Savill Building* no *Windsor Great Park*, Inglaterra (FourthDoor@)

A cobertura, com cerca de 80 toneladas, tem um comprimento de 90 metros, uma largura de 25 metros e é uma estrutura simétrica, duplamente curva de forma sinusoidal, com uma expressão arquitetónica significativa no interior do edifício (Harris et al, 2008). A altura da cobertura varia entre 4,50 e 8,50 metros, a secção das ripas utilizadas é de 80x50 mm e estão espaçadas um metro entre elas (Bouhaya, 2010). A espécie de madeira utilizada na construção foi *Larix* (Naicu et al, 2014), conhecida em português como Lariço, e foi maioritariamente proveniente de *Crown Estate*, uma propriedade da Coroa Britânica.



Figura 2.8 - *Savill Building Gridshell*; Esquerda: Vista exterior (Foto de Gareth Ggardner); Direita: Vista interior (AtelierTen@, 2007)

Outras construções de menor dimensão

Os exemplos mencionados até agora representam o expoente máximo das *gridshells* em madeira construídas até hoje.

Devido ao interesse que suscitaram, foram construídos em menor escala vários outros exemplos no âmbito de estudos de investigação ou mesmo para adornos exteriores, como é o caso da *Chiddingstone Orangery Gridshell*, já mencionada no subcapítulo 2.3 devido à sua cobertura envidraçada. Apresentam-se também alguns exemplos (Figura 2.9) concebidos por uma equipa de investigação liderada pelo Professor Sergio Pone, da Faculdade de Arquitetura da Universidade de Nápoles Frederico II, cujo propósito é o de desenvolver o conhecimento sobre estruturas leves (Gridshell.it@), tendo inclusivamente feito algumas publicações sobre o tema.



a) *Trio Gridshell* em Lecce, Itália



b) *Toledo Gridshell* em Nápoles, Itália



c) *Woodome 1.0* em Lecce, Itália

Figura 2.9 – Exemplos de *gridshells* de pequena dimensão (Gridshell.it@)

2.4 Madeira como material utilizado na construção de *gridshells*

A madeira como material de construção possui várias valências que são transversais às várias tipologias de estruturas onde esta pode ser aplicada. Ambientalmente, as propriedades da madeira são um fator preponderante para a sua inclusão na construção, desde que a sua proveniência seja de fontes sustentáveis. Para além de ser um material que contribui positivamente para o balanço de CO₂ na atmosfera devido ao seu processo de crescimento, o seu impacto ambiental é reduzido, já que a construção em madeira não gera resíduos não degradáveis nem poluentes, podendo até ser reaproveitada no caso de se tratar de madeira maciça.

Apesar de a madeira ser um dos mais antigos materiais utilizados pelo ser humano nas construções, a sua utilização na construção de estruturas em casca é relativamente recente. Este material, em comparação com os outros materiais que se utilizam na construção de *gridshells*,

tem maior adequabilidade devido à sua elevada capacidade de deformação elástica e fácil trabalhabilidade (Paoli, 2007). No processo de execução destas estruturas, em primeiro lugar é feita a colocação dos elementos de madeira (ripas) numa superfície plana formando uma grelha, são efetuadas as ligações no cruzamento dos elementos e posteriormente é feita a modelação da superfície até atingir a forma final que se pretende. Dessa forma, torna-se necessário que os elementos contínuos que formam a grelha possam ser deformados (fletidos) sem que atinjam a rotura. A madeira, devido ao seu baixo módulo de elasticidade em comparação com outros materiais, perfila-se assim como o material mais adequado. Este é considerado um fator determinante na escolha do material a utilizar.



Figura 2.10 - Protótipo construído durante o projeto da *Downland Gridshell* para testar o comportamento da madeira (Harris et al, 2003)

Quanto às suas propriedades mecânicas, como referem inúmeros autores tais como (Negrão e Faria, 2009), (Dias, 2014) ou (Coutinho, 1999), a madeira possui uma boa resistência mecânica. De acordo com o último autor mencionado, a madeira pode apresentar uma resistência à compressão semelhante à de um betão de resistência razoável, podendo a sua resistência à flexão e ao corte ser dez vezes superior. Nas *gridshells*, os elementos estruturais estão sobretudo solicitados à compressão na direção axial, pelo que a madeira se apresenta como uma solução viável neste aspeto. A ordem de grandeza dos esforços de flexão e torsão que por norma se verificam nestas estruturas devido aos carregamentos aplicados é baixa, por se tratar de uma estrutura semelhante a uma casca e, conseqüentemente, são pouco relevantes. Apesar disso, uma vez que o processo construtivo implica a flexão dos elementos de madeira, é necessário garantir que a capacidade resistente à flexão desses elementos não é excedida.

Outro ponto que importa ter em consideração na utilização da madeira para a construção deste tipo de estruturas é o facto de a madeira possuir um bom rácio entre as propriedades mecânicas e o seu peso, quando comparada com outros materiais. Este aspeto torna-se relevante quando se pretende executar uma estrutura de elevada eficiência mas o mais leve possível, como as

gridshells. Comparando o peso da estrutura com as ações atuantes, o seu efeito é de uma ordem de grandeza consideravelmente menor. Como é referido em Paoli (2007), a decisão de optar por uma *gridshell* em detrimento de uma casca contínua noutra material como o betão, pode dever-se ao facto de o peso da estrutura ser significativamente inferior.

Contudo, nem tudo são vantagens. A madeira, para além de ter as suas características a variar de espécie para espécie, pode registar variações significativas nas suas propriedades ao longo da sua vida útil, inclusivamente a sua degradação (Bouhaya, 2010). Uma vez que é um material natural, quando exposta a humidade, a madeira pode degradar-se devido ao aparecimento de fungos e insetos xilófagos, pelo que deve ser devidamente protegida quando utilizada em ambientes exteriores (Negrão e Faria, 2009). É também um material altamente anisotrópico, o que significa que as suas propriedades variam de acordo com a direção (Dias, 2014). Sendo um material orgânico que absorve a humidade exterior, está também sujeita a fenómenos de expansão e retração que podem levar ao aparecimento de fissuras (Bouhaya, 2010). Numa *gridshell*, uma vez que as ripas de madeira que formam a superfície trabalham todas em conjunto para garantir o seu funcionamento estrutural, o facto de existirem elementos danificados introduz alterações no estado de tensão dos restantes membros, o que pode levar a alterações no comportamento da estrutura. A preservação da madeira que é utilizada neste tipo de construção é um aspeto crucial.

2.5 Métodos construtivos

Devido à elevada importância do processo construtivo das *gridshells*, que condiciona diversos aspetos desde o seu comportamento estrutural às técnicas de projeto, é importante fazer a sua descrição detalhada. É talvez a etapa que melhor caracteriza este tipo de estrutura, já que a execução difere significativamente dos métodos construtivos tradicionais.

De uma forma geral, este processo consiste em modelar a forma final da estrutura a partir de uma superfície plana formada por uma grelha de elementos lineares contínuos a toda a superfície (ripas), que são sobrepostos em duas direções. Após efetuar a ligação nos nós resultantes das interseções desses elementos, a grelha é deformada através da flexão das ripas de madeira, introduzindo também deformação nos polígonos formados pelos espaços sem material (Figura 2.11). Quando é atingida a forma desejada e prevista no projeto, são fixadas as ripas na sua extremidade, ou seja, nos apoios, o que irá fazer com que a estrutura se mantenha na posição final devido apenas à sua configuração espacial.

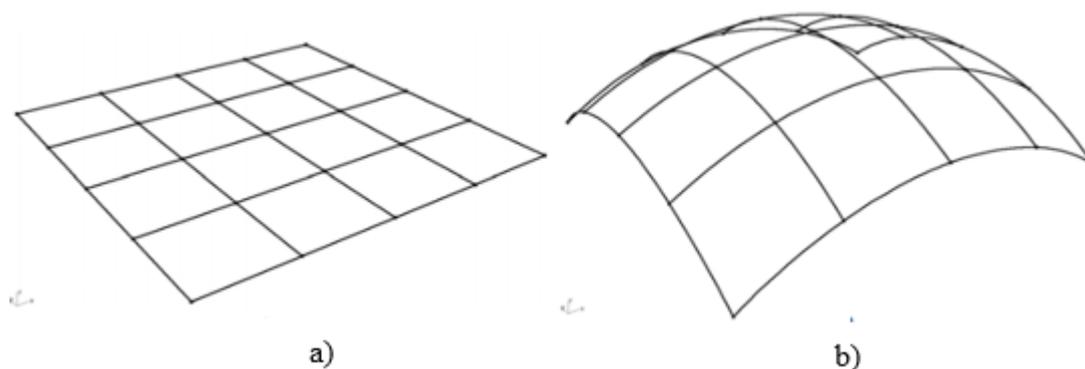


Figura 2.11 – a) Superfície plana; b) Superfície deformada na sua posição final (Toussaint, 2007)

É crucial ter em atenção que os elementos da grade são sobrepostos, conforme se pode verificar na Figura 2.12. Ao moldar a grade para a posição final, irão existir rotações e deslocamentos relativos entre as ripas colocadas por cima e as ripas colocadas por baixo, uma vez que têm raios de curvatura diferentes. É, desta forma, necessário que ao ligar os nós nas interseções ainda na configuração plana se deixe uma folga na ligação para prevenir essas rotações e deslocamentos relativos. Após a montagem, já com os nós nas suas posições finais, as ligações são apertadas para conferir a rigidez necessária à estrutura.



Figura 2.12 – Exemplo prático do início da montagem de uma *gridshell* em madeira (Buildingforafuture@)

Devido a este procedimento de execução, torna-se necessário que o material tenha capacidade de deformação elástica e que seja fácil de trabalhar. Nestes aspetos, a madeira devido ao seu módulo de elasticidade baixo e peso reduzido, é o material ideal, conforme já foi referido no subcapítulo 2.4.

Um problema recorrente na montagem deste tipo de estruturas é a dificuldade de prever os esforços a que irão estar sujeitos os elementos de madeira durante o processo de montagem, o que pode levar a uma grande quantidade de roturas nos elementos durante este processo. De facto, a fase de construção deste tipo de estruturas é a fase mais crítica na sua vida útil (Kuijvenhoven, 2009). Dessa forma, revela-se de extrema importância determinar a curvatura máxima que os elementos podem sofrer, respeitando-a depois na fase de execução.

Existem fundamentalmente duas metodologias de execução (semelhantes entre si) que se baseiam no que foi exposto. Ambas as metodologias são explicadas em seguida.

Construção ascendente

Neste método, a superfície plana é colocada ao nível do chão e, após serem efetuadas as ligações nos nós da grelha, é depois elevada em determinados pontos, de modo a modelar a sua forma final. Esta elevação é feita através de equipamentos hidráulicos, gruas elevatórias ou andaimes (Paoli, 2007). Ao elevar a grelha em certas zonas, a ação da gravidade faz com que esta se deforme e se aproxime da forma pretendida. Após a elevação, a grelha é fixa nos apoios e as ligações são apertadas de modo a garantir a rigidez necessária à estrutura.

Paoli (2007) refere um aspeto vantajoso neste método de construção, que reside no facto de as ligações entre os elementos serem feitas quando a grelha ainda está no chão, evitando a dificuldade acrescida que seria caso a estrutura estivesse noutra posição.

No processo de elevação (Figura 2.13), os elementos podem vir a estar sujeitos a tensões superiores àquelas para as quais foram dimensionados. Essas tensões adicionais podem dever-se a fases intermédias do processo onde o raio de curvatura das ripas de madeira seja menor do que o raio final, ou também devido a flexão adicional nos elementos entre dois pontos de elevação. Desta forma, o processo de construção tem que ser muito bem delineado e devem fazer-se estudos adicionais para determinar quais os pontos onde se deve intervir, de modo a evitar contratemplos como a rotura dos elementos ou a quebra de ligações. É também importante fazer essa monitorização para controlar os custos da execução.

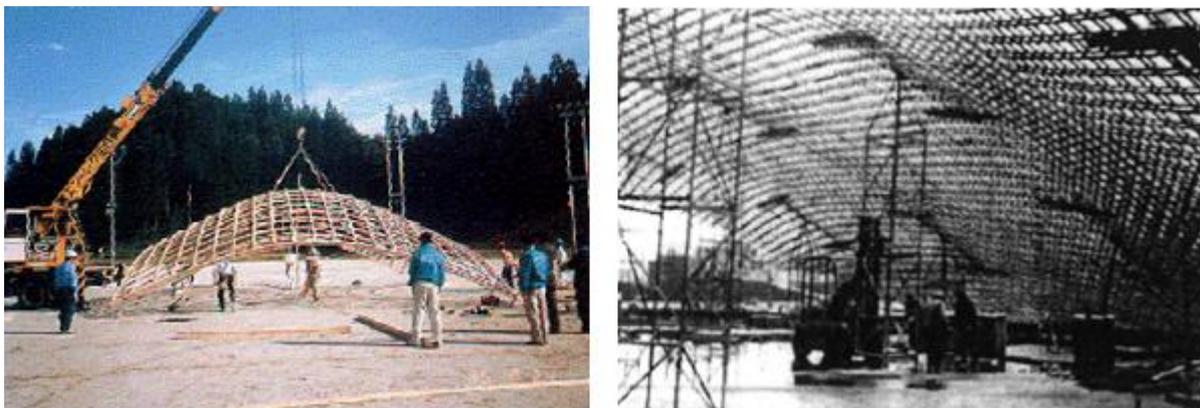


Figura 2.13 - Processo de construção ascendente (Linkwitz, 2002) e (Paoli, 2007)

Caso esteja prevista a utilização de dupla camada na constituição do esqueleto da estrutura, pode ser modelada a primeira camada, fazendo a sobreposição e respetivas ligações da segunda camada numa fase posterior, ainda com os apoios temporários dos equipamentos de montagem (Paoli, 2007).

Construção descendente

Este procedimento foi utilizado nas mais recentes *gridshells* construídas (Toussaint, 2007) e funciona de maneira inversa em relação ao método da construção ascendente. A superfície plana é colocada em altura sobre suportes estrategicamente colocados, de modo a tirar partido do peso próprio dos elementos da grelha que, por si, se ajustam a uma posição próxima da pretendida. Em vez de elevar a estrutura, atuando contra a força da gravidade como no caso da construção ascendente, tira-se partido dessa força (Paoli, 2007). Normalmente o peso próprio não é suficiente para que se atinja a forma desejada, pelo que é necessário completar esse processo através da aplicação de forças externas nos elementos até à fixação nos apoios. Na Figura 2.14 apresenta-se um exemplo ilustrativo deste método.



Figura 2.14 - Processo de construção descendente utilizado na *Downland Gridshell* (Toussaint, 2007)

Reforço diagonal

A última fase da construção, independentemente do método escolhido, é a fase de reforço diagonal. Este reforço é essencial para garantir a rigidez necessária à estrutura para que esteja em segurança e não fique suscetível a sofrer grandes deformações.

De forma esquemática, apresentam-se na Figura 2.15 as três etapas base na construção de uma *gridshell*.

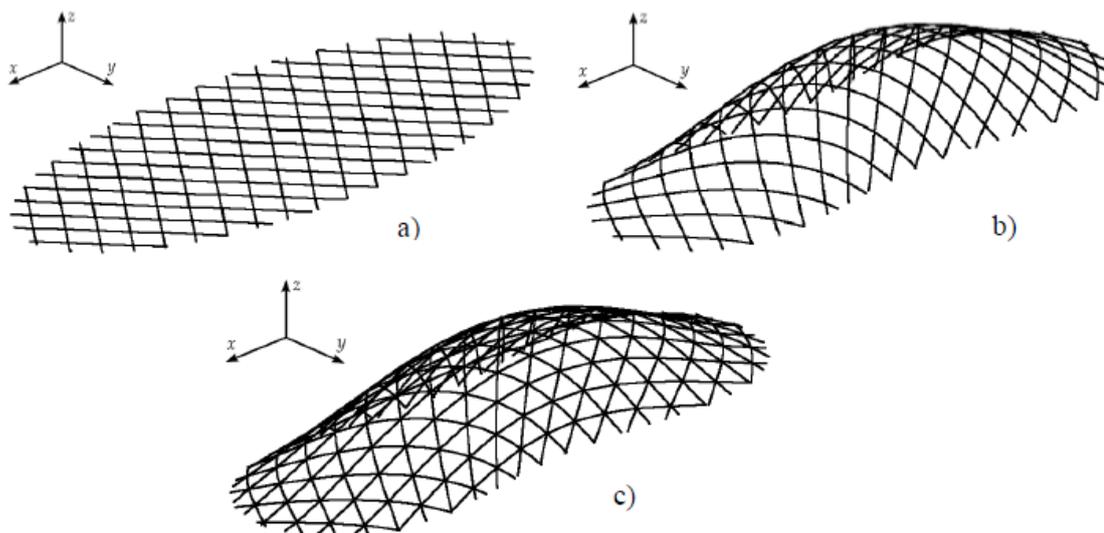


Figura 2.15 – Etapas base na construção de uma *gridshell*; a) Grelha de elementos plana; b) Geometria final da estrutura; c) Estrutura com reforço diagonal; Adaptado de Bouhaya et al (2009)

2.6 Ligações

2.6.1 Introdução

As ligações são, sem dúvida, um dos aspetos com maior importância nas *gridshells*. O papel que desempenham na estrutura vai para além da transmissão de esforços entre elementos ou da compatibilização das suas deformações quando a estrutura está em serviço. Só através da ligação entre os elementos estruturais se torna possível o processo de construção de uma estrutura deste tipo, uma vez que para a grelha de elementos inicialmente plana se poder deformar sem que as ripas se separem, estas necessitam de estar ligadas. Desde a ligação entre todos os elementos da grelha nas suas interseções até à garantia da continuidade das ripas de madeira de uma extremidade à outra da estrutura, as centenas (ou até milhares) de ligações necessárias desempenham um papel fundamental em todo o processo de construção e vida útil de uma *gridshell*.

Uma vez que existem poucas *gridshells* em madeira construídas até hoje, sendo que algumas delas partilham o mesmo tipo de ligações, não existe muita variedade. Deste modo, apresentam-se em seguida os tipos de ligação utilizados até ao momento.

2.6.2 Ligações de continuidade dos elementos de madeira

Uma vez que as ripas de madeira têm comprimentos finitos, torna-se necessário ligá-las entre si nas suas extremidades para criar ripas com o comprimento necessário. Essa ligação pode ser feita, essencialmente, através de dois tipos de ligação: *scarf joints* ou *finger joints* (Paoli, 2007).

As primeiras (*scarf joints*), apresentadas na Figura 2.16 – a), são feitas por corte e colagem das extremidades das ripas, embora não sejam ideais para transferir carga, já que o comportamento da peça final irá ser condicionado pela ligação e não pelas próprias ripas, devido à pequena superfície de contacto colada. De forma a melhorar este aspeto, pode reduzir-se o ângulo da ligação, aumentando a superfície de contacto entre as duas peças.

Nas *finger joints* (Figura 2.16 – b)) são também coladas ambas as extremidades das ripas, diferindo o tipo de corte que é feito nas peças relativamente às *scarf joints*. Em vez de um corte plano, neste tipo de ligação são feitos encaixes macho-fêmea, que são depois colados. Ao fazer isto, a superfície de contacto aumenta significativamente (aumentando, logicamente, com o número de encaixes considerado), conferindo à ligação melhor comportamento, ou seja, melhorando a interação entre as duas peças e melhorando a capacidade da ligação de transmitir carga.

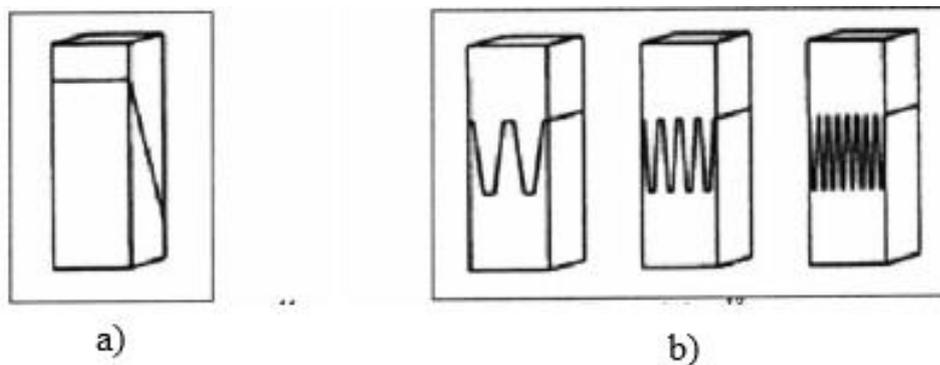


Figura 2.16 – a) Scarf joint; b) Finger joints (Paoli, 2007)

2.6.3 Ligações nas intersecções dos elementos de madeira

As ligações nas intersecções dos elementos de madeira necessitam de ser concebidas de modo a ter em conta as rotações e deslocamentos relativos entre as ripas no processo de construção, já que estas ligações são feitas ainda com a grelha de elementos exposta numa superfície plana.

As alternativas utilizadas até hoje para este tipo de ligação são as seguintes:

- **Utilização de parafuso ou varão roscado:** é colocado um ligador a atravessar transversalmente as ripas de madeira sobrepostas. Para ter em conta o processo de construção, é deixado livre, sendo apertado quando a grelha estiver na sua posição final. Para possibilitar o deslocamento relativo entre ripas durante esse processo, é criada uma folga na abertura onde é colocado o parafuso, o que reduz a capacidade resistente da secção (pois diminui a área e, conseqüentemente, a resistência à compressão), sendo este um aspeto negativo deste tipo de solução (Figura 2.17).

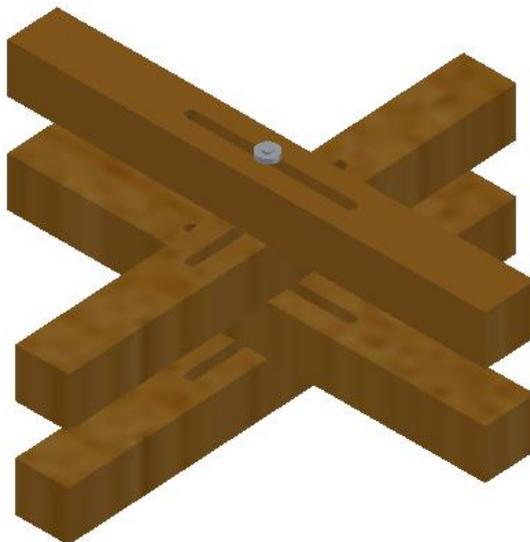


Figura 2.17 - Exemplo de ligação com utilização de parafuso

• **Utilização de placas aparafusadas:** esta solução permite evitar a criação de aberturas nas secções transversais das ripas. Consiste na colocação de placas quadrangulares no topo e na base da ligação (e também entre as duas camadas, no caso de camada dupla), aparafusando-as nos quatro cantos (Figura 2.18). No processo de construção é colocada a ligação com a folga necessária para as rotações e deslocamentos relativos entre as ripas e, posteriormente, são apertadas na sua posição final. Esta solução foi desenvolvida no projeto da *Downland Gridshell*, onde se considerava fundamental evitar a furação excessiva das ripas, o que levaria à redução das suas secções transversais e, por consequência, à diminuição da sua resistência (Harris et al, 2004).

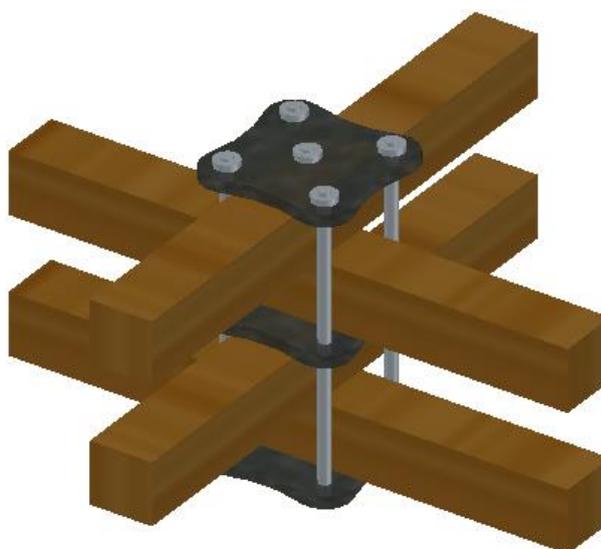


Figura 2.18 - Exemplo de ligação com utilização de placas

- **Utilização de fita metálica reforçada:** Este tipo de ligação foi utilizada na *gridshell* do Japan Pavilion e pretende imitar as construções tradicionais em bambu. Foi uma solução pensada para este caso específico (Paoli, 2007).

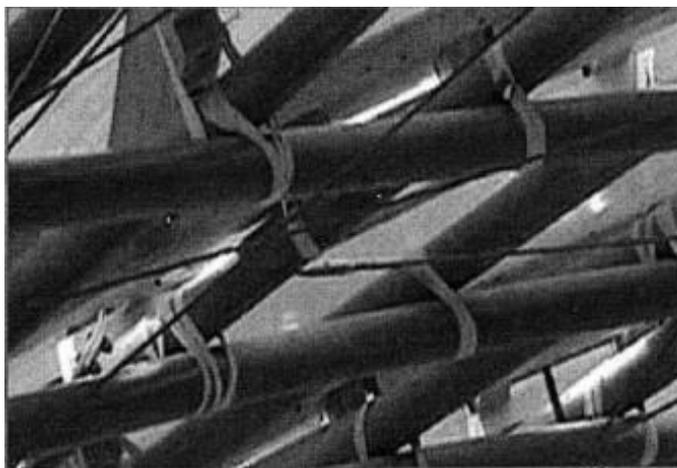


Figura 2.19 - Exemplo de ligação com utilização de fita metálica reforçada (Paoli, 2007)

- **Reforços diagonais de madeira:** O reforço diagonal da estrutura providenciado através da colocação de travessas diagonais rígidas representa a solução mais comum no meio das soluções disponíveis. As travessas são colocadas por cima da(s) camada(s) de ripas da estrutura, de modo a fazer a triangulação das aberturas. A sua fixação é feita através de parafusos e pode ser feita com os próprios parafusos da ligação no caso da utilização de placas aparafusadas, como se pode verificar na Figura 2.20.

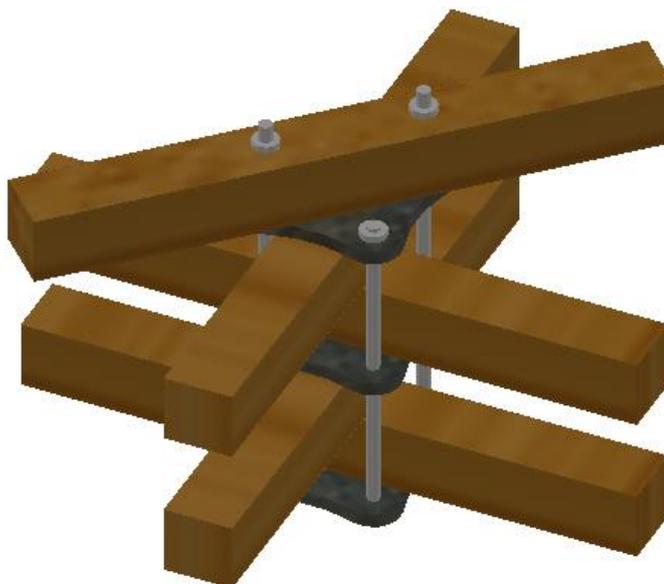


Figura 2.20 – Exemplo de ligação de um reforço diagonal com travessas rígidas

2.7 Condições de fronteira

Um dos aspetos cruciais no funcionamento estrutural das *gridshells* são as suas condições de fronteira, em particular as zonas de apoio da estrutura. Estas zonas de apoio garantem a fixação dos elementos de madeira ao resto da estrutura ou ao solo e são elas que fazem com que os elementos estruturais se mantenham em posição. A definição das zonas de apoio numa *gridshell* é variável de caso para caso, pois influenciam de forma direta a geometria da superfície, sendo definidas de acordo com a forma pretendida para a estrutura. Apesar disso, de acordo com Smith (1969), é possível estabelecer uma infinidade de formas para a superfície com apenas uma configuração das condições de apoio, por isso, cabe aos projetistas estabelecer a melhor geometria, de entre a infinidade de possibilidades, que respeite a Arquitetura pretendida e seja ao mesmo tempo estruturalmente eficaz.

Neste subcapítulo apresentam-se os vários tipos de componentes que podem ser utilizados nas fronteiras apoiadas da superfície que define uma *gridshell*, tendo em conta os que foram já utilizados no passado.

No caso da *Mannheim Multihalle Gridshell*, foram utilizadas fundações de betão, vigas de madeira lamelada colada e arcos de madeira. Os últimos dois tipos mencionados repetiram-se depois na construção da *Downland Gridshell*.

Nas fundações de betão da *Mannheim Multihalle Gridshell*, de acordo com a informação apresentada em PrincetonUniversity@ (2013), as extremidades das ripas que formam a grelha são em primeiro lugar aparafusadas a uma placa de madeira posicionada ao longo do apoio, com um determinado ângulo variável devido às diferentes inclinações da malha nessa zona. O suporte dessa placa de madeira é, por sua vez, feito através de suportes metálicos com diferentes inclinações, de modo a acompanhar a variação do ângulo da placa. Esses suportes metálicos são depois ligados à fundação de betão (Figura 2.21). Na imagem, a fundação é escondida por placas de madeira de modo a criar um efeito visual estético mais apelativo.



Figura 2.21 – Exemplo de uma fronteira ligada a uma fundação de betão (PrincetonUniversity@, 2013)

Os apoios de madeira lamelada colada e os arcos em madeira são soluções mais simples de executar e que permitem manter o aspeto tradicional da estrutura. As Figuras seguintes, correspondentes ao processo de construção da *Downland Gridshell*, contêm exemplos dessas soluções. No caso dos apoios inferiores em madeira lamelada colada (Figura 2.22), foram aplicadas duas placas de contraplacado aparafusadas entre si com blocos de ligação, de modo a criar um efeito *sandwich* nas extremidades das ripas da estrutura (Harris et al, 2004).



Figura 2.22 - Exemplos demonstrativos das condições de fronteira da *Downland Gridshell*: Placas de contraplacado na base (Weald&DownlandMuseum@)

No caso dos arcos de madeira utilizados nas extremidades, foi efetuado um procedimento semelhante, dividindo o arco em duas camadas aparafusadas entre si, como se pode ver na Figura 2.23.



Figura 2.23 – Exemplos demonstrativos das condições de fronteira da *Downland Gridshell*: Arcos de madeira nas extremidades (Weald&DownlandMuseum@)

Existe ainda a possibilidade de utilizar um sistema semelhante ao utilizado na *Savill Building Gridshell*. Nesse caso, uma vez que a *gridshell* consiste na cobertura do edifício, não apoia diretamente no solo. Sendo assim, foi criado um anel de tubos metálicos em todo o perímetro, apoiado em pilares metálicos, também eles de secção circular.



Figura 2.24 – Estrutura de tubos metálicos que suporta a *Savill Building Gridshell* (Harris et al, 2008)

As soluções apresentadas são apenas exemplos do que foi já utilizado. Com certeza que novas *gridshells* em madeira de grandes dimensões que possam vir a surgir no futuro terão as suas condições de fronteira diferenciadas destes exemplos, pois existe ainda muito espaço para a inovação.

2.8 Potencial de desenvolvimento

Apesar das vantagens que este tipo de solução estrutural confere, ainda há muito poucos exemplos práticos construídos. Uma vez que os processos de conceção e projeto são de alguma complexidade, torna-se moroso e dispendioso realizar uma obra deste tipo. Por essa razão, as *gridshells* facilmente são preteridas por outro tipo de soluções igualmente eficazes e mais baratas, apesar de não conseguirem um efeito arquitetónico tão apelativo. Outro aspeto que condiciona o aparecimento destas estruturas é a falta de conhecimento sobre as mesmas, bem como das técnicas de projeto. De acordo com Malek (2012), as *gridshells* existentes foram projetadas caso a caso e não como um tipo de solução estrutural, pelo que não existem procedimentos gerais que se possam utilizar no seu projeto. Como é referido em Paoli (2007), esta falta de conhecimento faz com que exista muito pouca gente com capacidade para desenvolver um projeto deste tipo, sendo necessário um aumento de projetistas com capacidades para tal (mesmo que em empresas de menor dimensão), de modo a que a confiança para a realização de trabalhos deste tipo aumente.

Com o progresso incessante dos meios tecnológicos e com o crescimento do interesse por este tipo de solução estrutural - que permite a criação de construções inéditas e únicas -, é de esperar que a tendência no que a este tipo de estruturas diz respeito seja o seu crescimento em número e desenvolvimento dos meios de projeto e execução, que permitam a realização de obras mais baratas e cada vez mais otimizadas. Começam hoje a existir meios de projeto cada vez mais completos e de simples utilização, que permitem fazer face aos obstáculos até agora encontrados nas diversas fases do projeto de uma *gridshell*, que vão desde a modelação tridimensional da estrutura até às metodologias de análise estrutural. No capítulo 4, correspondente às Técnicas de Projeto, abordam-se com maior detalhe estes aspetos e apresentam-se os desenvolvimentos mais recentes.

Também na vertente da construção é necessário que exista a formação de equipas especializadas neste tipo de estruturas, uma vez que a complexidade da execução é elevada e tem que ser levada a cabo com extremo cuidado. O envolvimento destas equipas na fase de projeto revela-se, deste modo, de extrema importância para que possam entender devidamente todas as necessidades especiais a ter em conta durante a construção, que foge significativamente aos processos construtivos tradicionais.

No panorama Nacional, a construção de uma ou mais estruturas deste género iria certamente criar uma identidade arquitetónica notória no local, apresentando-se como uma construção icónica que chamaria o interesse e curiosidade não só de Arquitetos e Engenheiros de todo o mundo, como do público em geral. Vejam-se os exemplos do MEO Arena ou da Pala do Pavilhão de Portugal, ambos no Parque das Nações em Lisboa, da Casa da Música no Porto ou

mais recentemente do novo Museu dos Coches, em Belém, construções modernas que se tornaram uma referência para a sociedade portuguesa devido à sua notoriedade.

Também em termos de recursos, Portugal consegue fazer face às necessidades. As espécies Pinho Bravo ou Carvalho, produzidas de forma sustentável no nosso país (Santos et al, 2011), reúnem características adequadas para este tipo de construção, dadas as suas semelhanças com as espécies utilizadas nos exemplos apresentados no subcapítulo 2.3. Além disso, os elementos construtivos são ripas de secções pequenas (na ordem dos 5 a 8 centímetros na maior dimensão da secção), o que se adequa com a utilização de troncos de baixo diâmetro, permitindo a utilização de árvores com idade reduzida.

3 COMPORTAMENTO ESTRUTURAL

3.1 Enquadramento

As *gridshells* são estruturas que diferem bastante das estruturas convencionais, pelo que o seu comportamento estrutural é peculiar e pode tornar-se algo complexo de compreender para quem não está devidamente enquadrado no tema. Sendo assim, torna-se necessário fazer uma exposição de informação que permita entender todos os conceitos de uma forma simples mas ao mesmo tempo completa. Por essa razão, os tópicos abordados em seguida estão estruturados de uma forma sequencial, visando numa fase inicial apresentar um enquadramento das *gridshells* no âmbito das estruturas espaciais, seguindo-se uma explicação do comportamento estrutural e metodologias de análise da tipologia de estrutura espacial em que estas se enquadram, após a qual são indicadas as peculiaridades das *gridshells* relativamente à tipologia de estrutura espacial em questão. Finalmente, apresenta-se uma metodologia para determinar a máxima curvatura dos elementos estruturais sem que atinjam a rotura, aspeto que deve ser tido em conta na execução da estrutura.

3.2 Estruturas espaciais

Para vencer grandes vãos e quando são necessárias estruturas com considerável elevação em relação ao nível do solo, por norma recorre-se a estruturas espaciais, pela sua eficiência estrutural, obtendo-se uma elevada capacidade de carga com utilização de pouco material. Existem fundamentalmente três tipos de sistemas estruturais dentro das estruturas espaciais. Essa distinção é feita em função do tipo de esforço a que está predominantemente sujeito cada tipo de estrutura. Desta forma, distinguem-se as treliças, concebidas para resistir a esforços de flexão; os cabos, para resistir a esforços de tração; os arcos, solicitados à compressão. Passando do plano para o espaço tridimensional, é possível associar a cada um desses elementos, um sistema estrutural espacial diferente (Bouhaya, 2010), como demonstra a Figura 3.1.

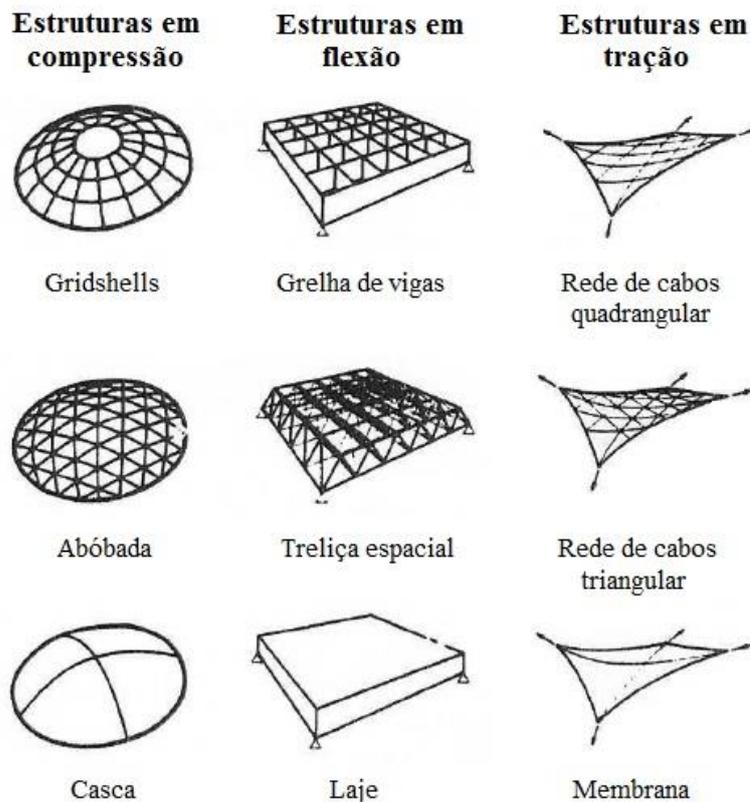


Figura 3.1 - Tipologias de estruturas espaciais; Adaptado de Bouhaya (2010)

Tanto as cascas como as membranas são tipologias de estruturas espaciais com rigidez de flexão pouco significativa devido à sua pequena espessura. As *gridshells* podem associar-se às cascas, uma vez que os seus elementos são predominantemente sujeitos a compressão.

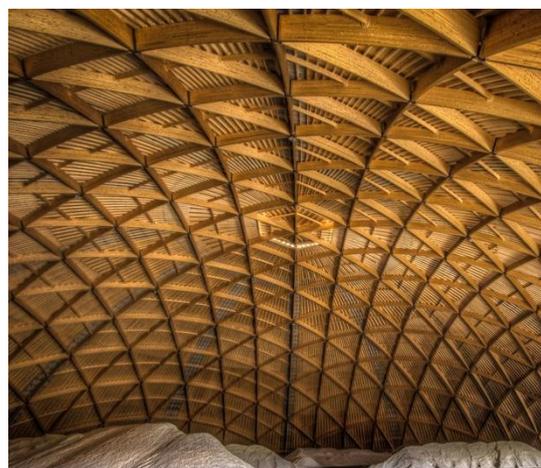
Dentro das estruturas espaciais em madeira com aspeto visual e comportamento estrutural semelhantes a uma casca, existe outro grupo que difere das *gridshells* tanto na constituição do seu esqueleto como na metodologia de construção, não podendo, por isso, ser designadas como tal. Na constituição do seu esqueleto, são utilizadas vigas de madeira que se interseam entre si em nós rígidos (sem possibilidade de movimento relativo) e com maior espaçamento do que as ripas que constituem uma *gridshell*. Colocadas as vigas em posição, o comportamento de casca é conferido à estrutura com o revestimento das vigas por uma dupla camada de tábuas de menor espessura (Linkwitz, 2002) ou através da colocação de outro revestimento que possa colaborar no funcionamento estrutural com as vigas de madeira. De acordo com o mesmo autor, estas estruturas são integradas nas estruturas lamelares de madeira, das quais se apresentam exemplos na Figura 3.2.



a) Cobertura na Expo 2000 em *Hannover*, Alemanha (Hannover.de@)



b) *Bad Dürrenheim Spa*, Alemanha (Geniesseroasen.ch@)



b) *Saldome 2*, armazém de sal na Suíça (Sai-tage.ch@)

Figura 3.2 – Exemplos de estruturas lamelares de madeira

As *gridshells* em madeira têm a particularidade de ter as suas aberturas entre elementos na forma de um quadrilátero, pois são formadas por elementos contínuos que se intersectam entre si em planos diferentes e não por elementos mais pequenos que vão sendo ligados entre si de modo a formar um esqueleto no mesmo plano. Dessa forma, tal como as estruturas lamelares de madeira referidas atrás, existem estruturas espaciais construídas em diferentes materiais que possuem o aspeto visual parecido ao de uma *gridshell* (porque, de facto, são visualmente cascas em grelha) mas que não são consideradas como tal. Em Paoli (2007) consideram-se essas estruturas como superfícies reticuladas. Veja-se o exemplo do *Great Court Roof* no *British Museum*, em Londres (Figura 3.3).



Figura 3.3 – Estrutura de superfície reticulada: *Great Court Roof* no *British Museum*, Londres

3.3 Estruturas tipo casca e análise dos seus elementos

De acordo com Farshad (1992), pode definir-se uma estrutura tipo casca como sendo uma estrutura formada por uma superfície espacial curva que suporta os carregamentos externos através da sua própria configuração no espaço. A geometria dessa superfície espacial é definida pela sua superfície média e pela sua espessura em cada ponto. Numa estrutura tipo casca, a sua espessura é significativamente menor quando comparada com o vão a cobrir e com o seu raio de curvatura. Por norma, conseguem vencer grandes vãos de forma bastante eficiente e económica e, por isso, são utilizadas em vários ramos da Arquitetura e da Engenharia. Podem também ser encontradas em várias estruturas naturais, tais como as cascas de ovo, plantas, folhas, ossos e formações geológicas.

Pode ser feita a divisão entre cascas finas e grossas, sendo indicado pelo mesmo autor, Farshad (1992), que uma casca é considerada fina se o seu rácio entre espessura e raio de curvatura for da ordem de $1/200$ ou menor. As cascas que interessam estudar no âmbito da temática em estudo são as cascas finas, na qual é aplicável a teoria da membrana, apresentada mais à frente.

O comportamento deste tipo de estruturas difere bastante do comportamento das estruturas convencionais. Nas cascas, os carregamentos aplicados são maioritariamente suportados por esforços de membrana que se distribuem uniformemente ao longo de toda a superfície, devido à rigidez no plano ser elevada e consideravelmente superior à rigidez de flexão, que é diminuta em consequência da pequena espessura da casca. Desta forma, é possível aproveitar ao máximo o material, gerando estruturas com bastante eficiência conseguida com quantidades mínimas de material.



Figura 3.4 – Exemplos de estruturas tipo casca; a) *L'Oceanogràfic* em Valência, Espanha (Austriaangloalliance@); b) Estação de serviço de *Deitingen*, Suíça

Em seguida, para melhor compreender o funcionamento estrutural deste tipo de estruturas, é apresentado na Figura 3.5 um elemento genérico infinitesimal de uma casca, com o seu campo de tensões internas, colocado num sistema de eixos x , y , z . Este elemento infinitesimal, obtido através da intersecção de quatro planos perpendiculares à superfície da casca e com a direção dos eixos x e y considerados, tem geometria curva nas suas facetas, tendo os seus arcos respetivos os comprimentos ds_y e ds_x . Os raios de curvatura desses arcos (considerados até metade da espessura da casca, ou seja, até à sua superfície média que a representa) são r_y e r_x , respetivamente.

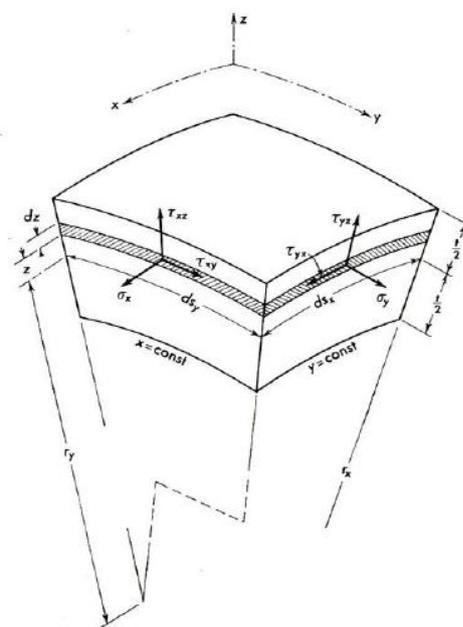


Figura 3.5 – Elemento de uma casca com os raios de curvatura e tensões internas (Flügge, 1973)

Quando a casca é solicitada por ações externas, desenvolvem-se tensões internas em cada elemento devido a essas ações. Daí resultam tensões normais às facetas do elemento, σ_x e σ_y , tensões de corte no próprio plano da superfície, τ_{xy} e τ_{yx} , e tensões de corte transversais à superfície, τ_{xz} e τ_{yz} . Em cascas finas, estas últimas tensões são por norma desprezadas na teoria clássica das cascas, uma vez que a sua ordem de grandeza é manifestamente inferior à das tensões atuantes na superfície (Farshad, 1992).

As tensões internas resultantes podem ser convertidas em esforços internos através da sua integração ao longo da espessura da casca (t), sendo possível dessa forma obter esforços por unidade de largura que lhes são estaticamente equivalentes. A Figura 3.6 demonstra quais as componentes existentes nesse sistema de esforços internos do elemento infinitesimal. São também apresentadas as formulações matemáticas dessa integração das tensões internas, que geram o valor dos esforços internos. Relembra-se que r_x e r_y representam os raios de curvatura da casca, medidos até à sua superfície média.

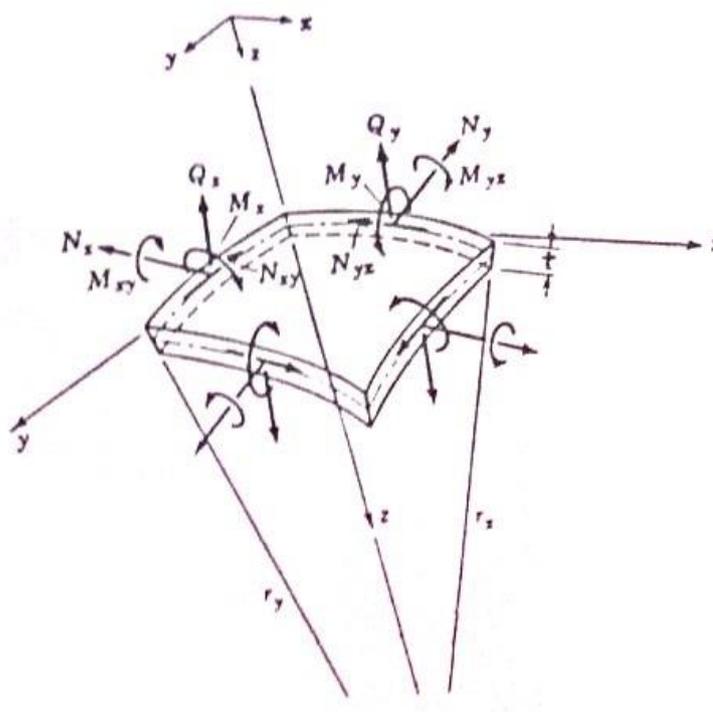


Figura 3.6 – Componentes dos esforços internos resultantes num elemento de casca (Farshad, 1992)

As equações (1), (3), (5), (7) e (9) referem-se às facetas do elemento com valor constante de x , ou seja, paralelas ao eixo y ; as equações (2), (4), (6), (8) e (10) referem-se às facetas do elemento com valor constante de y , paralelas ao eixo x .

$$N_x = \int_{-\frac{t}{2}}^{+\frac{t}{2}} \sigma_x \frac{r_y + z}{r_y} dz = \int_{-\frac{t}{2}}^{+\frac{t}{2}} \sigma_x \left(1 + \frac{z}{r_y} \right) dz \quad (1) \quad N_y = \int_{-\frac{t}{2}}^{+\frac{t}{2}} \sigma_y \frac{r_x + z}{r_x} dz = \int_{-\frac{t}{2}}^{+\frac{t}{2}} \sigma_y \left(1 + \frac{z}{r_x} \right) dz \quad (2)$$

$$N_{xy} = \int_{-\frac{t}{2}}^{+\frac{t}{2}} \tau_{xy} \left(1 + \frac{z}{r_y} \right) dz \quad (3) \quad N_{yx} = \int_{-\frac{t}{2}}^{+\frac{t}{2}} \tau_{yx} \left(1 + \frac{z}{r_x} \right) dz \quad (4)$$

$$Q_x = - \int_{-\frac{t}{2}}^{+\frac{t}{2}} \tau_{xz} \left(1 + \frac{z}{r_y} \right) dz \quad (5) \quad Q_y = - \int_{-\frac{t}{2}}^{+\frac{t}{2}} \tau_{yz} \left(1 + \frac{z}{r_x} \right) dz \quad (6)$$

$$M_x = - \int_{-\frac{t}{2}}^{+\frac{t}{2}} z \sigma_x \left(1 + \frac{z}{r_y} \right) dz \quad (7) \quad M_y = - \int_{-\frac{t}{2}}^{+\frac{t}{2}} z \sigma_y \left(1 + \frac{z}{r_x} \right) dz \quad (8)$$

$$M_{xy} = - \int_{-\frac{t}{2}}^{+\frac{t}{2}} z \tau_{xy} \left(1 + \frac{z}{r_y} \right) dz \quad (9) \quad M_{yx} = - \int_{-\frac{t}{2}}^{+\frac{t}{2}} z \tau_{yx} \left(1 + \frac{z}{r_x} \right) dz \quad (10)$$

O sinal de menos utilizado nas expressões (5) a (10) serve para compatibilizar as diferentes convenções de sinais utilizadas na Figura 3.5, referente às tensões, e na Figura 3.6, referente aos esforços internos.

É ainda importante explicar os termos $\frac{r_x+z}{r_x}$ e $\frac{r_y+z}{r_y}$, ou simplificados, $1 + \frac{z}{r_x}$ e $1 + \frac{z}{r_y}$.

Tome-se como exemplo a faceta que contém o segmento \overline{AB} da Figura 3.7. O integral ao longo da espessura da casca, t , representa a soma de todas as áreas com altura dz e comprimento \overline{AB} . Uma vez que a casca é curva, as facetas do elemento (que são geradas pela intersecção de planos perpendiculares à superfície da casca) são trapezoidais e não têm os lados paralelos dois a dois. Num elemento de largura unitária, medida na sua superfície média ($dx = 1$), \overline{AB} vai ser menor do que 1 abaixo dessa superfície e superior a 1 acima da mesma. Suponha-se agora que se quer determinar N_i , com $i = x$ ou y . N_i será igual ao integral ao longo da espessura da multiplicação da tensão pela área, ou seja, $N_i = \int_{-\frac{t}{2}}^{+\frac{t}{2}} \sigma_i \cdot 1 \cdot dz$ (na superfície média). Como \overline{AB} varia de comprimento ao longo da espessura, é necessário encontrar uma expressão que permita determinar o comprimento do segmento consoante a posição da porção dz . De acordo com Farshad (1992), essa expressão traduz-se pelos termos referidos no início deste parágrafo e representa uma variação de comprimento do segmento em proporção com a distância entre as áreas de altura dz e a superfície média representativa da casca.

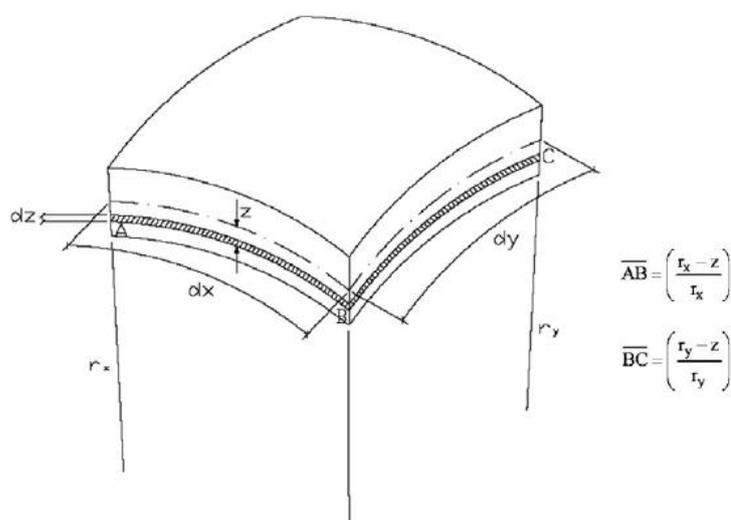


Figura 3.7 – Exemplo ilustrativo da variação do comprimento dos segmentos ao longo da espessura da casca (Cardoso, 2008)

Obtidos os esforços resultantes da integração das tensões, de acordo com Farshad (1992), estes podem ser divididos em dois grupos: Esforços de membrana e esforços de flexão.

No primeiro grupo estão os esforços que atuam na superfície média da casca, provocando a extensão ou contração da mesma como sendo uma membrana (onde não existe flexão ou alterações da curvatura da superfície). Neste grupo estão incluídos os esforços normais N_x e N_y , bem como os esforços de corte tangenciais N_{xy} e N_{yx} ; No segundo grupo são considerados os esforços de flexão, torsão e corte que provocam a alteração da curvatura da superfície. Neste grupo incluem-se os momentos fletores M_x e M_y , os momentos torsores M_{xy} e M_{yx} e os esforços de corte Q_x e Q_y .

Para estabelecer o equilíbrio estático de um corpo no espaço existem seis equações (três para equilíbrio de forças e três para o equilíbrio de momentos). Como num elemento de uma casca existem dez incógnitas (N_x , N_y , N_{xy} , N_{yx} , M_x , M_y , M_{xy} , M_{yx} , Q_x e Q_y) tornar-se-ia complexo o processo de determinação dos esforços internos resultantes das ações atuantes, sendo necessário recorrer às relações constitutivas da teoria da elasticidade com base nas deformações da casca, processo que implicaria a resolução de um sistema de equações diferenciais de ordem elevada e que, na maioria dos casos, não é exequível analiticamente (Cardoso, 2008). Sendo assim, existem algumas hipóteses simplificativas na teoria das cascas que permitem a determinação dos esforços internos apenas pelas equações de equilíbrio estático. É neste contexto que surge a teoria da membrana para análise de cascas, que se explica no próximo subcapítulo.

3.4 Teoria da membrana para cascas

O princípio base da teoria da membrana (aplicado às cascas finas) diz que um carregamento uniformemente distribuído atuante numa casca produz apenas campos de tensão puros na sua superfície. Desta forma, são apenas consideradas as tensões normais e de corte que atuam na superfície média da casca e que geram os esforços de membrana. Para isso, são feitas algumas considerações simplificativas, apresentadas em seguida.

Como já foi referido anteriormente, as tensões de corte transversais à superfície são, regra geral, desprezadas na análise de cascas finas, devido à sua ordem de grandeza não ser significativa quando comparada com as tensões atuantes na superfície. De igual forma, se a espessura de uma casca for suficientemente pequena (ou seja, se a casca for fina), o momento de inércia da sua secção transversal será próximo de zero e por consequência a sua rigidez de flexão pode ser desprezada na análise do seu comportamento estrutural. Sendo assim, as componentes relativas ao momento desaparecem das formulações utilizadas na análise das cascas. Smith (1969) apresenta uma explicação a partir das expressões matemáticas da teoria geral das cascas para os momentos, as quais são diretamente dependentes de uma quantidade D , que por sua vez depende da inércia da secção transversal da casca, do módulo de elasticidade do material e do coeficiente de *Poisson*, sendo dada pela expressão:

$$D = \frac{E}{(1 - \nu^2)} * \frac{t^3}{12} \quad (11)$$

Onde E representa o módulo de elasticidade do material; ν representa o coeficiente de *Poisson*; t representa a espessura da casca.

Se t for suficientemente pequeno, D será próximo de zero, fazendo com que as expressões relativas aos momentos sejam também quase nulas, podendo ser desprezadas sem que haja erros significativos na análise de cascas finas pela teoria da membrana.

Desta forma, restam os esforços internos integrados no grupo dos esforços de membrana, N_x , N_y , N_{xy} e N_{yx} . Fazendo o equilíbrio de momentos em relação ao eixo z , perpendicular à superfície da casca (ver a Figura 3.5), conclui-se facilmente que $N_{xy} = N_{yx}$. Finalmente, é possível obter um sistema estaticamente determinado, com três incógnitas para três equações da estática.

A teoria da membrana é uma metodologia usual de pré-dimensionamento de estruturas do tipo casca, consistindo um processo simplificado mas que apresenta bons resultados (LEM@).

De acordo com diversos autores, tais como Smith (1969) ou Farshad (1992), existem certas condições relacionadas com a satisfação do equilíbrio ou com os requisitos de deformação para

que seja válida a utilização da teoria da membrana para a análise de estruturas do tipo casca. Estas condições são de diversos ordens, desde as condições de apoio, ao tipo de cargas aplicadas na superfície ou mesmo relativas à geometria da superfície. Basta que uma das condições não seja cumprida para que exista um distúrbio do estado de tensão de membrana, introduzindo erros análise pela teoria da membrana. As condições são as seguintes:

- (a) O carregamento externo aplicado deve ser uniforme e livre de cargas concentradas na direção perpendicular à superfície. A existência dessas cargas concentradas implica que, ao considerar um elemento da casca que contenha o ponto de aplicação da carga, as tensões normais tendam para zero, não sendo possível estabelecer o equilíbrio entre a carga aplicada e os esforços internos sem considerar os esforços pertencentes ao grupo dos esforços de flexão;
- (b) O raio de curvatura, a espessura e a superfície da casca não podem ter variações bruscas, ou seja, é necessário garantir uma casca suave contínua. A existência de zonas de descontinuidade implicam esforços de flexão ou corte;
- (c) A forma da superfície da casca deve aproximar-se da superfície de equilíbrio gerada pelos carregamentos aplicados. Desta forma, as deformações sofridas são pequenas;
- (d) As zonas de apoio da casca devem estar livres de momentos ou forças de corte. Para isso, as reações de apoio da casca devem atuar tangencialmente à superfície média;
- (e) Nas extremidades da casca não devem existir restrições aos deslocamentos e às rotações, para que não se desenvolvam momentos ou forças de corte nessas zonas.

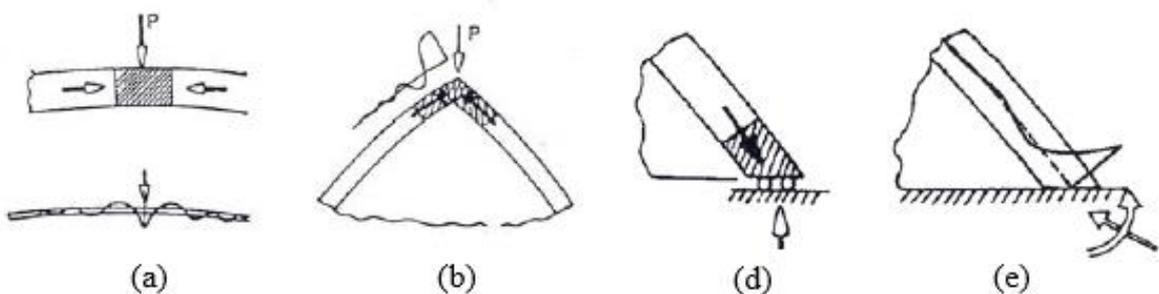


Figura 3.8 - Ilustração da violação das condições impostas para a validade da teoria da membrana; Adaptado de Farshad (1992)

Do ponto de vista de Smith (1969), apesar de as condições indicadas parecem ser bastante restritivas e, por isso, implicativas de uma extrema dificuldade em atingir o estado de tensão de membrana numa estrutura real (em particular as situações (d) e (e)), é possível localizar as tensões devidas à flexão em regiões próximas da fronteira da casca, aproximando o

comportamento do resto da estrutura ao desejado. É também de salientar que a própria estrutura irá privilegiar ao máximo um comportamento sem momento.

Quando se torna necessário considerar a rigidez de flexão no estudo das cascas, podem ser utilizadas outras metodologias de análise, como por exemplo a teoria elástica das cascas delgadas, uma vez que a teoria da membrana não apresenta resultados satisfatórios. De forma contrária, quando as estruturas possuem momento de inércia nulo, como num balão, a teoria da membrana é exata (LEM@).

3.5 Gridshells como cascas

As *gridshells*, cujos elementos estruturais funcionam como arcos, ficando sujeitos predominantemente a compressão, podem ser associadas às cascas. Como já foi apresentado anteriormente, as cascas são definidas como superfícies tridimensionais que resistem aos carregamentos aplicados através da sua forma duplamente curva. Se a espessura de uma casca for pequena (em comparação com as restantes dimensões), a sua rigidez de flexão também o será (uma vez que é proporcional ao momento de inércia). Nesse caso, pode desprezar-se a rigidez de flexão e a casca pode ser estudada pela teoria da membrana para cascas, uma vez que apresenta uma aproximação razoável.

Na definição de uma casca, parte-se do princípio que se analisa uma superfície contínua. Porém, as *gridshells* consistem num conjunto de elementos que discretizam essa superfície, tornando-a descontínua. Enquanto numa casca um carregamento atuante provoca tensões normais e tensões de corte na sua superfície, numa *gridshell* todo o material de um elemento de casca é concentrado nas suas extremidades, criando aberturas que impedem a transmissão das tensões de corte. O sistema resultante dessa discretização consiste em 4 ripas intersetadas entre si nos cantos do quadrilátero e no qual a transmissão de forças se dá apenas no sentido longitudinal das ripas (transmitindo apenas tensões normais) (Toussaint, 2007). Deste modo, enquanto numa casca existe uma infinidade de caminhos de transmissão da carga, numa *gridshell* as cargas são transmitidas exclusivamente pelos seus membros (Paoli, 2007), impondo restrições nos caminhos a percorrer pela carga. Para que se tenha o comportamento aproximado de uma casca, é necessário fazer com que as tensões de corte sejam também transmitidas ao longo da superfície, o que se pode alcançar de várias maneiras diferentes, como se explica em seguida. Dessa forma, é garantida a rigidez necessária para que a estrutura se comporte de forma mais próxima a uma casca.

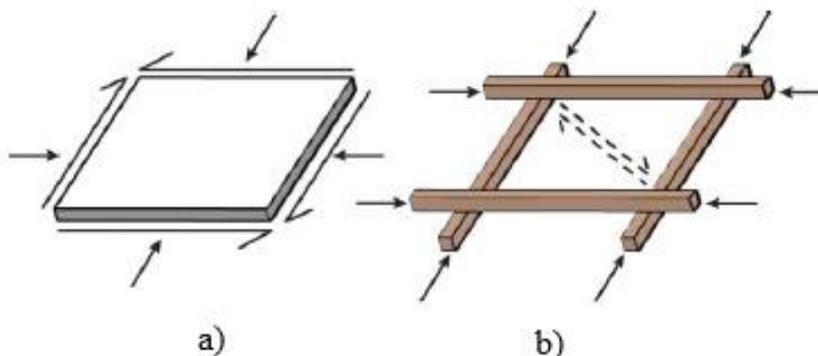


Figura 3.9 – a) Elemento casca; b) Elemento *gridshell* (Naicu et al, 2014)

O reforço diagonal tendo em vista a transmissão das tensões de corte ao longo da superfície pode ser providenciada de várias formas, nomeadamente através de ligações rígidas, através da colocação de cabos de aço ou travessas diagonais no quadrilátero (criando aberturas triangulares) ou ainda aplicando um revestimento que tenha função estrutural colaborante com as ripas de madeira, criando uma superfície contínua. Segundo Naicu et al (2014), quando o reforço diagonal é feito através da colocação de cabos de aço, é necessário colocar esses cabos ortogonalmente entre si, uma vez que suportam apenas tração. No caso da colocação de travessas diagonais rígidas (a alternativa mais comum) que suportam tanto tração como compressão, é só necessário colocá-las numa direção.

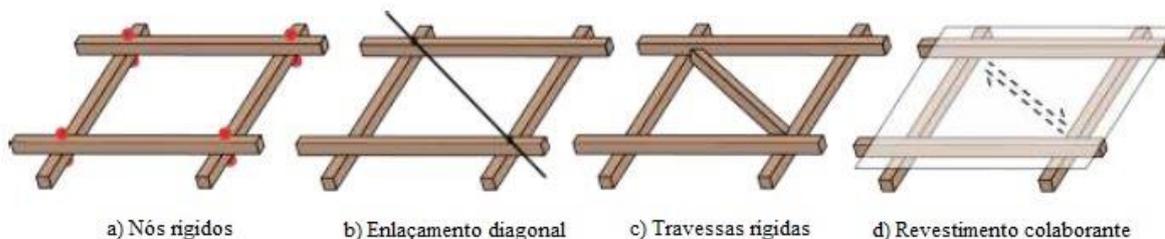


Figura 3.10 – Tipos de reforço diagonal para transmissão das tensões de corte; Adaptado de Naicu (2012)

Caso não seja conferida a rigidez diagonal necessária através dessas ligações diagonais complementares, a rigidez da estrutura depende da capacidade das ripas em se ajustarem a uma posição de equilíbrio e, conseqüentemente, da rigidez das próprias ripas. Esse ajuste envolve a flexão das ripas de madeira, para além da flexão existente que é inerente ao processo construtivo das *gridshells*, pelo que é de extrema importância ter em atenção a sua capacidade resistente última, que depende diretamente da tensão última do material, f_u (assumindo um comportamento elástico do material). Num elemento curvo como as ripas das *gridshells* em madeira, uma carga assimétrica resulta numa combinação de tensões normais devidas à compressão e à flexão do elemento (Toussaint, 2007). Considerando que uma força de

compressão N provoca uma tensão normal σ_N e que um momento M provoca uma tensão normal σ_M , para o elemento estar em segurança é necessário que:

$$\sigma_N + \sigma_M \leq f_u \quad (12)$$

Posto isto, caso o elemento esteja sujeito a uma tensão normal resultante da compressão muito elevada, adicionada à tensão normal que já existe devida à flexão da ripa no processo construtivo, não existe muita margem para o elemento fletir e se ajustar a uma nova posição sem que seja atingida a tensão última. Sendo assim, o devido reforço diagonal deve ser sempre feito, para impedir que a estrutura sofra deslocamentos significativos quando aplicados os carregamentos que podem colocar em causa a segurança da estrutura.

Outro aspeto relevante no funcionamento estrutural das *gridshells* é o facto de poderem ser constituídas por uma ou mais camadas de ripas. Entenda-se por camada um conjunto de ripas sobrepostas nas duas direções. A utilização de duas camadas, ou seja, quatro sobreposições de ripas (Figura 3.11), é feita quando se pretendem atingir curvaturas maiores de forma a criar arquiteturas mais sofisticadas (Naicu et al, 2014). Quando a estrutura vence grandes vãos e está sujeita a grandes cargas, necessita de elementos estruturais com secções de maior inércia que garantam uma menor suscetibilidade de instabilizarem fora do plano devido à compressão a que estão sujeitos; por outro lado, quanto maiores forem as dimensões da secção, mais difícil será provocar deformação elástica nos elementos, um aspeto crucial no processo de construção (Paoli, 2007). A utilização de camada dupla resolve ambos os problemas, uma vez que garante a inércia necessária para que os elementos não instabilizem, ao mesmo tempo que permite a utilização de ripas de pequena secção e facilmente deformáveis. Um exemplo de uma *gridshell* construída com camada dupla é a *Mannheim Multihalle Gridshell*, já apresentada anteriormente.

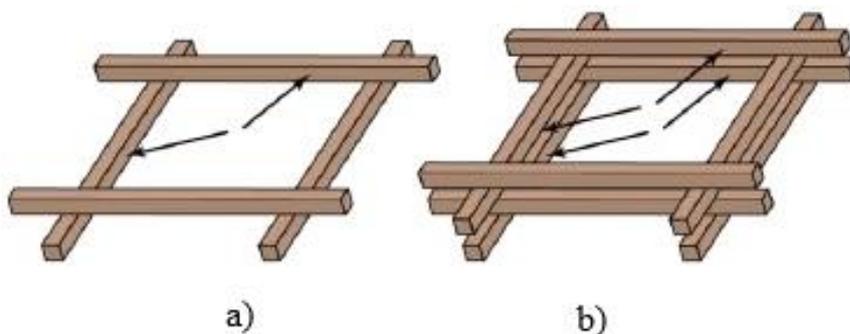


Figura 3.11 – a) Camada simples; b) Camada dupla (Naicu et al, 2014)

No caso da utilização de camada dupla, é necessário garantir a transmissão das tensões de corte entre as duas camadas. De acordo com Naicu et al (2014) é possível fazer a transmissão dessas

tensões entre camadas através das próprias ligações entre as ripas, bem como com a aplicação de blocos que liguem as ripas de cima e de baixo com a mesma direção, como se demonstra na Figura 3.12.

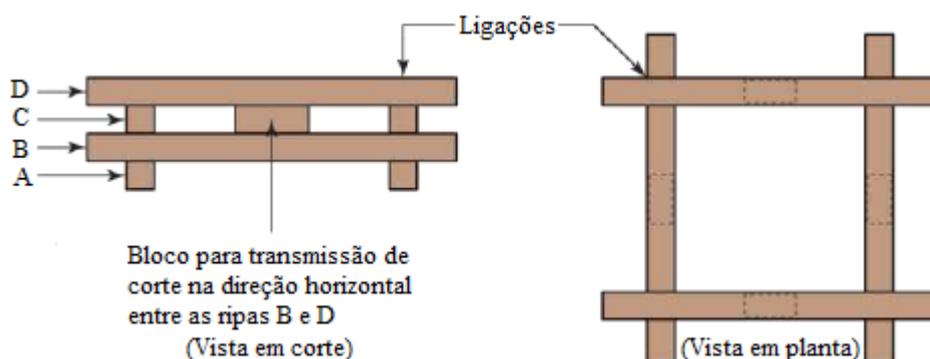


Figura 3.12 – Vista em corte e em planta do sistema de camada dupla, demonstrando os blocos de transmissão de corte; Adaptado de Naicu et al (2014)

3.6 Curvatura máxima dos elementos estruturais

Devido ao procedimento de execução das *gridshells* em madeira, partindo de uma situação inicial em que os elementos da grelha que forma a estrutura estão sobre uma superfície plana sendo posteriormente moldados para as suas posições finais, as ripas de madeira são fletidas até à sua posição definitiva. Isto significa que, para além das tensões geradas pelo estado de membrana introduzido na estrutura pelos carregamentos aplicados e às tensões normais de flexão que podem surgir devido a um possível ajuste da curvatura dos elementos da estrutura sujeita a esses carregamentos, existe um acréscimo de tensões normais nos elementos devido à sua flexão na fase de execução e que se torna permanente. Consequentemente é necessário avaliar se em algum momento (quer na fase de execução, quer na posição final dos elementos) é ultrapassada a tensão máxima admissível em uma ou mais ripas de madeira.

Toussaint (2007) sugere uma metodologia simples para descobrir o valor limite para a curvatura das ripas de madeira, baseado em conceitos simples da Resistência de Materiais.

Como se pode consultar em Dias da Silva (2004), estando em regime elástico linear, uma peça prismática (neste caso, retangular) sujeita a flexão circular reta (momento constante) tem uma relação entre curvatura e momento fletor atuante dada por:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} \quad (13)$$

Onde ρ representa o raio de curvatura da peça; M representa o momento fletor atuante; E representa o módulo de elasticidade do material; I representa o momento de inércia da secção relativamente ao eixo neutro (numa secção retangular, $I = \frac{bh^3}{12}$, onde b representa a largura da secção; h representa a altura da secção).

O mesmo autor apresenta a expressão que fornece o valor da tensão de flexão que ocorre nos pontos mais afastados do eixo neutro e que é dependente do valor do momento atuante (M) e do módulo de flexão (que, por sua vez, depende apenas da geometria da secção transversal da peça):

$$\sigma_m = \frac{M}{W} \quad (14)$$

Onde σ_m representa a tensão de flexão no material; W representa o módulo de flexão (numa secção retangular, $W = \frac{bh^2}{6}$).

Resolvendo a equação (14) em relação a M e substituindo na equação (13), é possível retirar o valor da curvatura máxima, dada por:

$$\rho_{max} = \frac{Eh}{2f_m} \quad (15)$$

Onde f_m representa a tensão resistente do material à flexão, em substituição do valor da tensão de flexão.

Assim, recorrendo a conceitos básicos da Resistência dos Materiais, consegue saber-se qual a curvatura admissível para as ripas de madeira a utilizar na construção. Facilmente se pode constatar pela expressão que a escolha do tipo de madeira a utilizar pode ter um critério de seleção com base no valor da razão E/f_m que lhe está associada, em função da necessidade de considerar raios de curvatura maiores ou menores.

4 TÉCNICAS DE PROJETO

4.1 Introdução

As *gridshells* são estruturas que, ao serem projetadas, implicam uma interação constante entre a Arquitetura e a Engenharia. No projeto de um edifício comum, a forma do edifício é idealizada em função de considerações arquitetônicas e só depois é projetada e otimizada uma estrutura capaz de suportar a forma pretendida. No projeto de uma *gridshell*, a geometria e o comportamento estrutural têm que ser otimizados em simultâneo, através de um processo que se designa por *form-finding*. Este processo consiste em determinar a geometria com maior eficiência a nível da resistência às solicitações externas atuantes (ações), ao mesmo tempo que cumpre os requisitos arquitetônicos (Paoli, 2007). Esta fase é, deste modo, essencial no projeto. Porém, antes de se iniciar esse processo é necessário realizar algumas etapas.

4.2 Definição da superfície

O primeiro passo para projetar uma *gridshell* consiste na definição de uma superfície que se ajuste à arquitetura pretendida. Esta superfície será o ponto de partida do estudo estrutural e pode ser definida de duas maneiras distintas: pode basear-se em elementos geométricos existentes (e seus derivados), possíveis de descrever matematicamente (à semelhança das cúpulas, hiperboloides, elipsoides, etc.); ou, em alternativa, pode ser concebida arquitetonicamente como uma forma livre, sem quaisquer elementos geométricos que a definam. Enquanto no primeiro caso, computacionalmente é fácil ter acesso a elementos presentes em sistemas CAD (*Computer-Aided Design systems*) que definam a superfície, no segundo caso a superfície tem que ser definida a partir de “figuras ou formas de equilíbrio” que são função das forças atuantes (Linkwitz, 1999). O mesmo autor apresenta dois exemplos da natureza que se formam a partir das “figuras de equilíbrio” resultantes da interação entre o material e as forças atuantes, nomeadamente as bolhas e películas de sabão (Figura 4.1). Uma condição essencial para estas formas se sustentarem é a imposição das condições de fronteira que permitam à superfície (com espessura extremamente fina e sem flexão atuante) manter-se em posição mesmo com as solicitações externas.

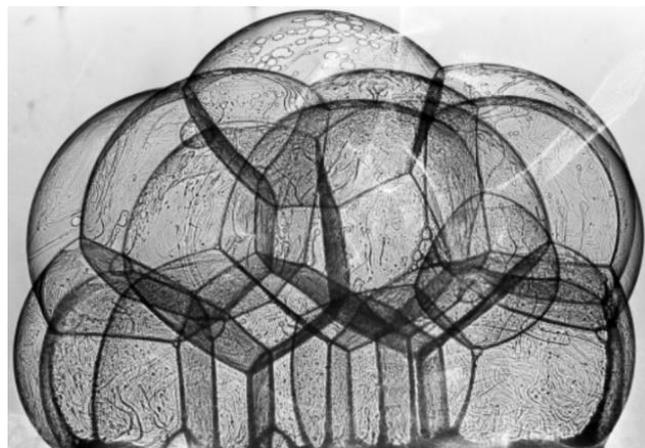


Figura 4.1 - Modelo das bolhas de sabão do Arquiteto alemão Frei Otto, *Seifenlaugenversuch* (DesignIsFine@)

Para fazer a analogia entre os exemplos mencionados e as *gridshells* é necessário recorrer às estruturas espaciais do tipo membrana, começando por referir mais um exemplo bastante conhecido de uma “figura de equilíbrio”: uma corda suspensa entre dois pontos de ancoragem, formando uma catenária por ação da gravidade. Ao inverter a corda em 180° sem alterar os pontos de ancoragem e admitindo que a corda seria capaz de se sustentar nessa nova posição (o que na realidade não acontece, uma vez que não tem a rigidez necessária), ter-se-ia um arco catenário, sendo que as forças de tração na corda suspensa se converteriam exclusivamente em forças de compressão no arco. Aplicando o mesmo princípio (baseado numa abordagem funicular) a um conjunto de cordas suspensas que formem a discretização de uma superfície (estrutura espacial do tipo membrana), obtém-se uma estrutura sujeita a forças de compressão nos seus elementos, ou seja, uma *gridshell*. A primeira *gridshell* em madeira de grandes dimensões construída (*Mannheim*, em 1975) foi um exemplo prático da aplicação deste princípio (PrincetonUniversity@, 2013) que serve de base à metodologia de *form-finding* do Modelo de Cordas, explicado com maior detalhe no subcapítulo 4.4.2.

Para que os elementos de madeira de uma *gridshell* fiquem predominantemente sujeitos a compressão, é importante que a sua forma se aproxime de uma “figura de equilíbrio”. Quanto menor for a aproximação, maior terá que ser a sua espessura para suportar a flexão existente nos elementos. A partir de certa altura, a *gridshell* deixa de fazer sentido e abre-se a possibilidade de utilização de outro tipo de solução, como as estruturas lamelares (Linkwitz, 2002).

A forma inicial que se concebe para a superfície a partir da qual se gera uma *gridshell* terá que ser estudada e ajustada até à sua geometria final definitiva. Sendo assim, esta primeira definição da forma fornece apenas uma primeira aproximação.

4.3 Discretização da superfície

Estando a forma da superfície inicial escolhida - numa fase inicial, apenas se pode definir a forma geral dos contornos da superfície, uma vez que a sua forma definitiva só é obtida no final da sua otimização -, o passo seguinte passa por fazer o ajuste de uma grelha (ou malha) de elementos lineares (representativos das ripas, no caso das *gridshells* em madeira) a essa mesma superfície. Esta é uma etapa crucial no projeto, pois define a posição das ripas e nós da estrutura real. De modo a poder fazer uma representação da estrutura com o maior rigor possível, os elementos lineares devem ser paralelos e equidistantes em cada sentido para que o espaçamento entre nós se mantenha constante em toda a grelha. Segundo Bouhaya (2010), do ponto de vista matemático estamos perante uma rede de *Tchebychev*. Estas redes, como se explica em Koenderink e van Doorn (1998), podem ser consideradas como deformações de redes cartesianas planares que conservam as dimensões dos seus elementos, sacrificando a ortogonalidade das suas linhas diretrizes. Aqui se pode fazer o paralelismo com as *gridshells*, cujo processo de execução se inicia exatamente com uma grelha de elementos plana, dispostos em duas direções, passando depois à modelação da superfície até à sua posição final.

Só após a definição da grelha na superfície, ao ter a posição exata dos elementos e suas interseções (nós), se pode passar à sua análise. Aqui reside uma das principais dificuldades no projeto deste tipo de estruturas. O *software* convencional de cálculo não possuía, até há relativamente pouco tempo, funcionalidades simples que permitissem o ajuste de uma grelha a uma superfície tridimensional de forma automática e com o rigor pretendido. Hoje em dia, estão já a surgir ferramentas informáticas que visam colmatar essa situação.

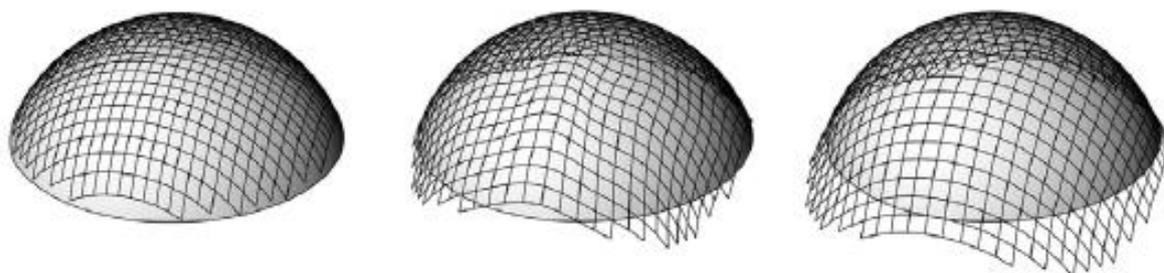


Figura 4.2 - Ajuste de uma grelha a uma superfície (D'Amico et al, 2014)

A qualidade do ajuste será preponderante na análise da estrutura, pelo que deve ser rigorosa. Antes da utilização das ferramentas computacionais, o método mais utilizado na definição de uma rede de *Tchebychev* numa superfície curva era o método do compasso, que continua a ser bastante utilizado devido à sua simplicidade e ao elevado rigor que garante e que pode também ser utilizado em modelos digitais.

De acordo com Bouhaya (2010), para além do método do compasso, existe a possibilidade da utilização do *fishnet algorithm*, um algoritmo fundamentalmente desenvolvido para o projeto e fabrico de tecidos compósitos, nomeadamente para a definição das redes de tecido, pelo que não revela grande potencial para aplicar neste caso. Também o *software* de análise por elementos finitos pode no futuro vir a oferecer funcionalidades neste sentido, o que ainda não acontece. Mais recentemente, têm vindo a ser desenvolvidos algoritmos com o intuito de criar uma rede de *Tchebychev* numa superfície tridimensional de forma automática.

4.3.1 Métodos geométricos: Método do compasso

O método do compasso, introduzido por Frei Otto, é um método baseado apenas em parâmetros geométricos que permite a criação de uma rede de paralelogramos numa superfície qualquer, através da utilização de um compasso, criando uma rede de *Tchebychev* (Bouhaya, 2010). Os pontos da grelha formados por este método são equidistantes entre si (Pone et al, 2013), uma vez que a medida do compasso permanece inalterada em todo o processo. Devido à simplicidade e eficiência deste método, tem sido e continua a ser bastante utilizado apesar de a sua aplicação levar o seu tempo quando se compara com o tempo requerido pelos métodos automáticos e, logo, mais expeditos que têm surgido, que apesar disso requerem um estudo aprofundado por parte do utilizador antes da sua aplicação.

A aplicabilidade do método do compasso está dependente do conhecimento das condições de fronteira impostas à superfície. No caso das *gridshells*, têm necessariamente que se conhecer as condições de apoio da estrutura para que se possa proceder ao traçado da grelha através da utilização desta técnica. Nos modelos desenvolvidos por computador, quando se define a forma da superfície a discretizar, são geralmente definidas as zonas de apoio da estrutura.

O procedimento é descrito de forma simples em Toussaint (2007) e em Bouhaya et al (2009) e segue as etapas a seguir descritas, que são ilustradas na Figura 4.3 e na Figura 4.4. Em primeiro lugar, delimita-se a superfície (um retângulo, no caso ilustrado); em seguida, traçam-se duas diretrizes arbitrárias que se intersectem num ponto (ponto 1); com a definição da largura dos elementos da grelha, fixa-se essa medida no compasso (medida igual ao raio das circunferências a desenhar) e, partindo do ponto de interseção entre as duas diretrizes, marca-se essa distância em cada uma das linhas (pontos 2 e 3); centrando o compasso nos pontos 2 e 3, traçam-se dois arcos de circunferência que se intersectam no ponto 4; a partir desse momento, há que optar por seguir o alinhamento de uma das diretrizes, traçando novos arcos de circunferência na interseção do arco anterior com a diretriz, como se ilustra na Figura 4.3 – c) e d), que por sua vez irão intersectar as novas circunferências que serão traçadas desde o ponto 4 e que seguem o mesmo alinhamento. A construção dos novos alinhamentos de pontos deve ser sempre paralela à anterior.

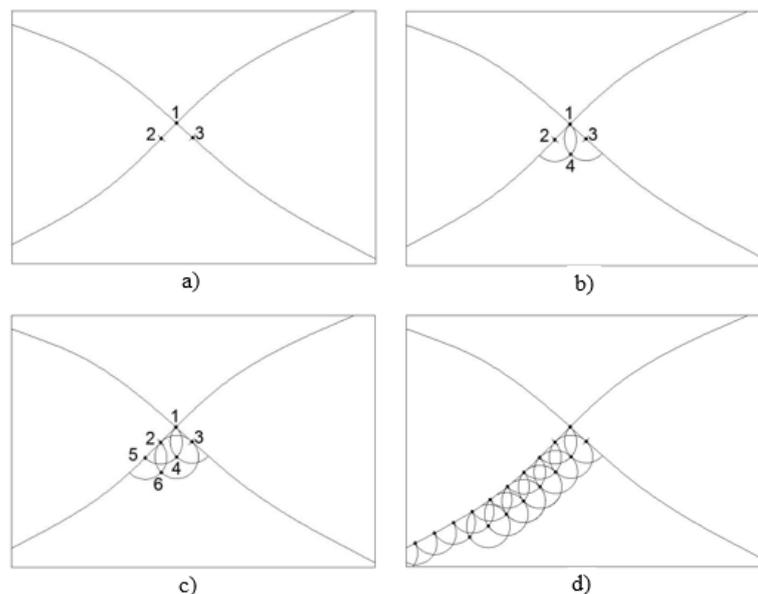


Figura 4.3 – Ilustração das etapas iniciais do método do compasso numa superfície plana

Repetindo o procedimento em toda a região delimitada pelos limites da superfície e pelas duas diretrizes, obtém-se a distribuição de pontos visível na Figura 4.4 – a) e b). Por sua vez, procedendo da mesma forma em cada uma das regiões da superfície e fazendo a união dos pontos de modo a formar os polígonos da grelha (que são quadrângulos mas não necessariamente quadrados), o resultado final será semelhante ao apresentado na Figura 4.4 – d). É de notar que, uma vez que as diretrizes são arbitrárias, existe uma infinidade de grelhas possíveis de definir, mas todas terão em comum a equidistância dos pontos que as definem.

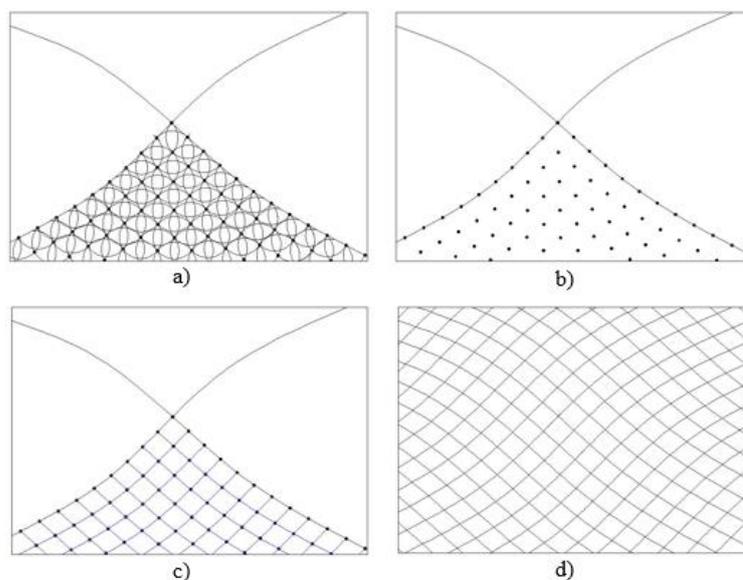


Figura 4.4 - Ilustração das etapas finais do método do compasso numa superfície plana

Apesar das diretrizes poderem tomar qualquer direção curva arbitrária, quando se aplica este método no projeto de uma *gridshell*, há que ter em conta que os seus elementos são, por norma, ripas linearmente retas em toda a superfície. Dessa forma, é preferível a utilização de diretrizes retas, pois a sua posição irá definir a posição das ripas.

No espaço tridimensional, a aplicação do método é em tudo semelhante. Neste caso, após a definição das diretrizes, são consideradas esferas que ao intersectarem a superfície definem as circunferências necessárias à execução do procedimento, conforme se ilustra na Figura 4.5.

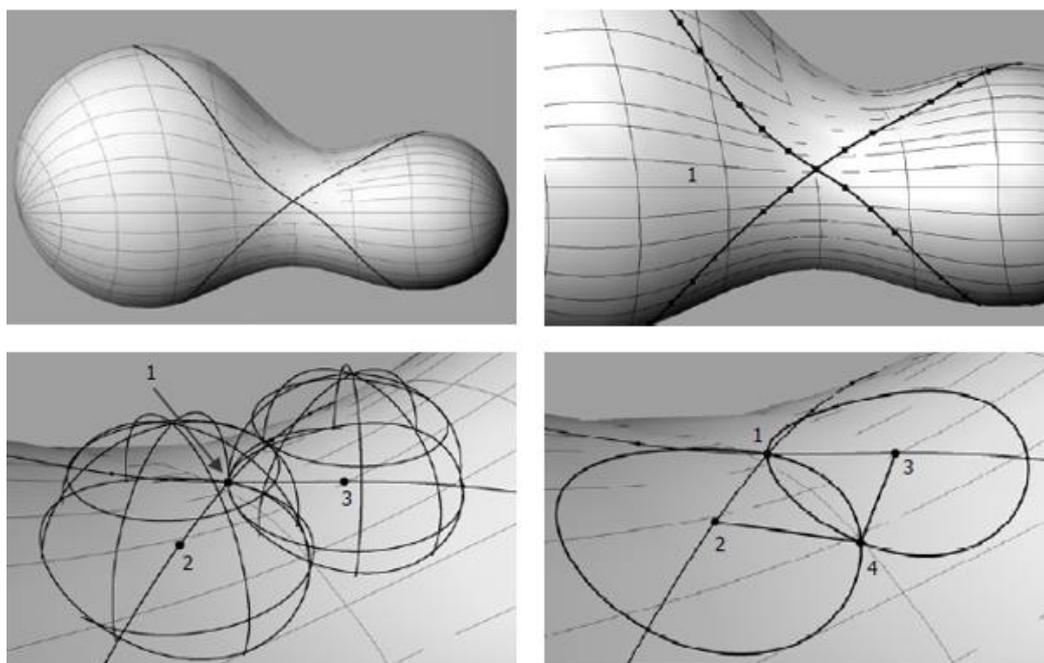


Figura 4.5 – Aplicação do método do compasso numa superfície tridimensional (Toussaint, 2007)

4.3.2 Métodos computacionais

Desde o início dos anos 90, com o aparecimento dos primeiros programas de análise por elementos finitos através de computadores, que é possível computacionalmente fazer a discretização de uma superfície. Apesar disso, conforme mencionado no ponto 4.3, até à relativamente pouco tempo essas técnicas não possuíam o rigor necessário para a criação de uma rede de *Tchebychev*, uma vez que os métodos utilizados para a discretização de superfícies não tinham como base da sua programação o objetivo de criar uma malha cujos pontos fossem todos eles equidistantes.

Neste subcapítulo abordam-se algumas técnicas computacionais para discretização de superfícies tridimensionais, sendo que se faz a distinção entre as que são adequadas para o projeto de *gridshells* e as que não o são, com as devidas justificações.

Conforme já foi referido, uma das possibilidades existentes passa pela aplicação do método do compasso nos modelos digitais, utilizando ferramentas geométricas simples que facilmente são encontradas nos programas convencionais de desenho.

No caso da utilização de programas de elementos finitos para a discretização de uma superfície, de uma forma geral, os parâmetros possíveis de calibrar na definição das características da malha a gerar estão relacionados com a forma e tamanho dos seus polígonos. Assim sendo, não existe possibilidade através do ajuste desses parâmetros de condicionar a malha para que todos os seus pontos sejam equidistantes, uma condição fundamental no projeto de uma *gridshell*. Consequentemente, após a geração da malha, irão existir irregularidades (maiores ou mais pequenas), como traços não paralelos naquela que devia ser a mesma direção ou polígonos com maiores dimensões que outros, que fazem com que não sejam respeitadas as regras para a formação de uma rede de *Tchebychev* (Figura 4.6).

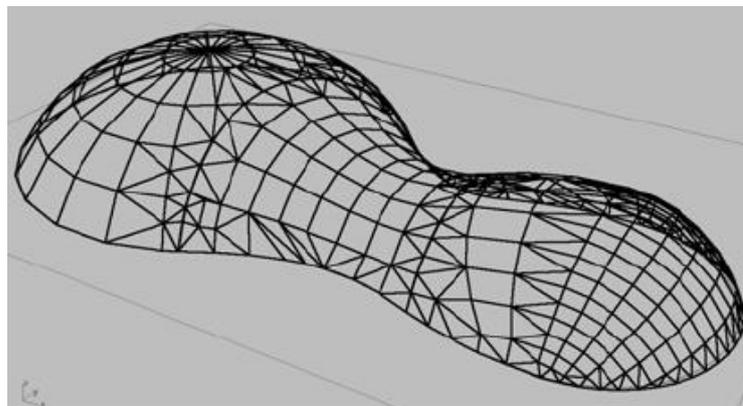


Figura 4.6 – Exemplo da discretização de uma superfície com uma malha de elementos finitos (Toussaint, 2007)

Dentro dos programas de desenho e modelação tridimensional, analisa-se agora a possibilidade da utilização de métodos de projeção de linhas ou pontos na direção perpendicular ao plano de referência onde se desenvolve o modelo. Facilmente se constata que, apesar de visualmente parecer adequado, não se pode utilizar esta metodologia num projeto deste tipo. Em rigor, tal como é descrito em Toussaint (2007), ao projetar uma grelha plana numa superfície, o que o programa faz é apenas criar a projeção vertical dos pontos ou linhas, fazendo com que a distância inicial no plano entre, por exemplo dois pontos, se possa alterar, violando o requisito da equidistância dos pontos.

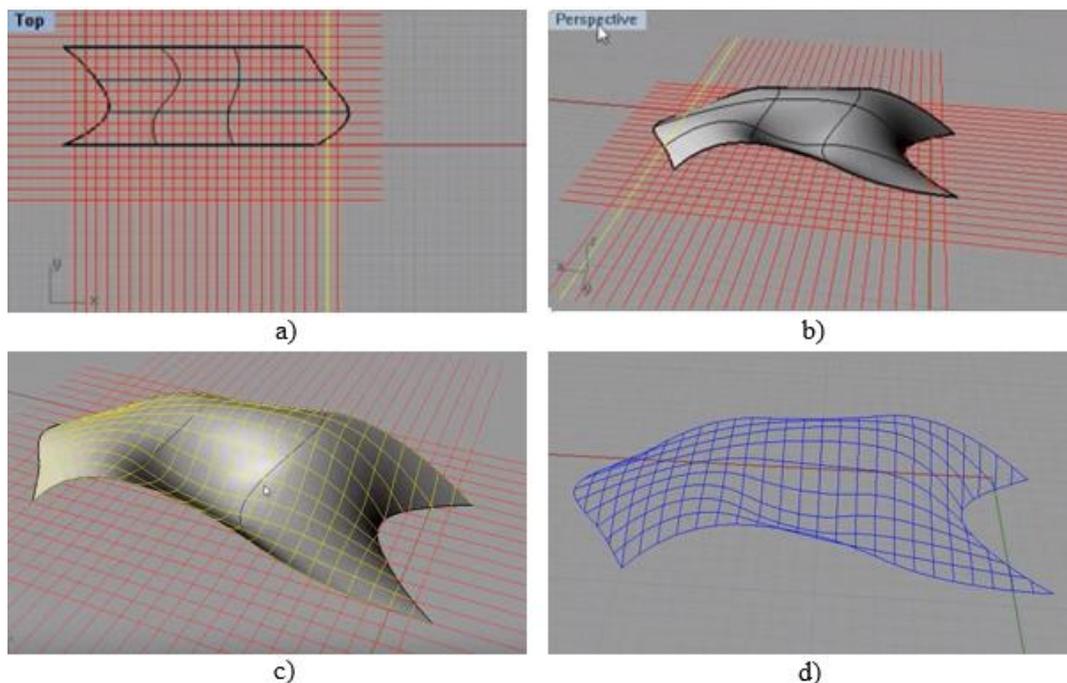


Figura 4.7 – Discretização de uma superfície através da projeção de uma grelha inicialmente plana (YouTube@, 2013); a) Criação da grelha de elementos lineares; b) Sobreposição da grelha e da superfície; c) Projeção automática da grelha na superfície; d) Resultado final

Finalmente, a possibilidade de ajuste automático de uma grelha de elementos lineares a uma superfície tridimensional de forma a cumprir os requisitos de uma rede de *Tchebychev* é recente, sendo possível graças à instalação de novos algoritmos em *software* já existente, como o *Rhinoceros* da empresa *Robert McNeel & Associates*, nomeadamente o *Grasshopper plug-in*. Deste modo, a discretização de uma superfície é feita de forma mais simples, com maior rapidez de execução e igualmente rigorosa.

Apesar de já serem uma possibilidade, à data de publicação deste estudo, estes algoritmos encontram-se ainda em fase de otimização e são ainda pouco dominados pelos utilizadores, pois envolvem alguma complexidade. Espera-se, no entanto, que em breve essas soluções estejam ao alcance de qualquer utilizador, através da sua integração em futuras versões dos programas de modelação tridimensional e com a criação de interfaces intuitivos. Esta será, muito provavelmente, a metodologia que irá ser utilizada com maior frequência no projeto de *gridshells*, substituindo os procedimentos utilizados antes, como o método do compasso.

4.4 *Form-finding*

4.4.1 Introdução

Estando definida a grelha de elementos que discretizam a superfície pode proceder-se à etapa com maior relevância e complexidade de todo o projeto: o *form-finding*.

O processo de *form-finding* é um processo iterativo que tem como objetivo a obtenção de uma solução otimizada para um problema de conceção estrutural, no qual se determina a melhor forma para uma estrutura com uma geometria complexa, de modo a que esta esteja em equilíbrio estático enquanto, simultaneamente, respeita a arquitetura pretendida. É um procedimento utilizado na definição da forma de estruturas do tipo casca, membrana, *gridshells* ou redes de cabos. Segundo Fund (2008), neste processo é a própria estrutura que define a sua forma baseada na sua “figura de equilíbrio” quando sujeita aos carregamentos aplicados.

A solução final deve ser otimizada através do estabelecimento prévio dos parâmetros a ter em conta e que podem ser de carácter arquitetónico, estrutural, económico ou qualquer outro que se considere relevante (Bouhaya, 2010). Para que qualquer estrutura venha a funcionar de forma eficiente, esta etapa é essencial e deve ser levada a cabo com extremo cuidado para que não sejam considerados erros no decorrer do processo que possam afetar a estrutura final.

O *form-finding* tem vindo a ser efetuado através de métodos físicos e computacionais (ou pela combinação de ambos), sendo que os métodos computacionais desenvolvidos nos últimos anos têm suplantado os métodos físicos devido à maior precisão que conferem e às capacidades de cálculo que oferecem.

4.4.2 Métodos físicos: Modelo de Cordas

A existência das *gridshells* é anterior ao aparecimento dos computadores como os conhecemos atualmente e, por isso, era necessário recorrer a outros meios de projeto. No âmbito das *gridshells*, a metodologia utilizada para encontrar a sua forma era o Modelo de Cordas, que consiste na criação de modelos físicos da estrutura para chegar à sua forma final.

Na natureza, a transmissão de forças faz-se com um consumo mínimo de energia dos materiais (Bouhaya, 2010). Desta forma, quando definidas as condições de apoio e de fronteira do modelo, ao fazer um modelo de cordas suspensas sujeitas apenas à ação da gravidade, estas ficam sujeitas a tração pura, ajustando a sua posição no espaço à melhor forma possível para suportar a carga aplicada (peso próprio). A forma final da estrutura suspensa irá corresponder ao modelo invertido da estrutura pretendida onde a tração se transforma em compressão nos seus elementos (Figura 4.8). Este modelo invertido não pode ser realizado com cordas, já que

não possuem a rigidez necessária para suportarem compressão. É, então, necessário fazê-lo com outro material, como a madeira, para que possa ser estudado.

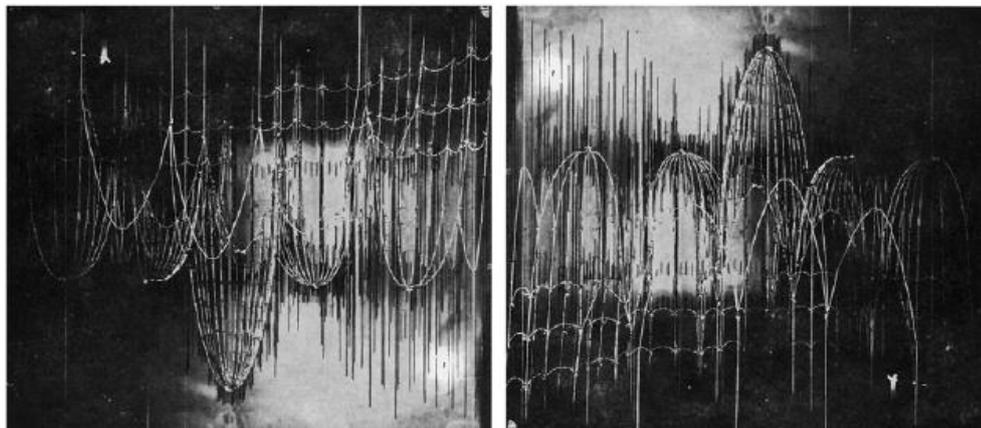


Figura 4.8 - Exemplo de aplicação do Modelo de Cordas (Paoli, 2007)

A título de curiosidade, este modelo, que é utilizado há muitos anos na concepção de catedrais góticas, foi utilizado por Antonio Gaudi na concepção da Sagrada Família, em Barcelona (Harris et al, 2003).

Este procedimento terá que ser simulado para todos os casos de carga possíveis, já que a solução final terá que ser capaz de suportar todos eles. Para isso, utiliza-se a envolvente de formas geradas nas várias configurações, sendo os elementos posteriormente dimensionados para lidar com o pior dos casos (Olsson, 2012).

Foi através da aplicação do Modelo de Cordas que Frei Otto desenvolveu o modelo experimental utilizado no projeto da *Mannheim Multihalle Gridshell*, a primeira de grandes dimensões construída em madeira e provavelmente a mais conhecida de todas. A partir desse modelo experimental foi possível determinar o comprimento dos elementos estruturais e as coordenadas iniciais de todos os nós através de fotogrametria, um processo em que através de fotografias métricas se conseguem determinar (ainda que de forma aproximada) as formas e as dimensões de um objeto em perspectiva. Com essas coordenadas, foi possível analisar a estrutura através de cálculo numérico, de modo a conhecer a carga de colapso da estrutura, bem como a sua carga de instabilidade.

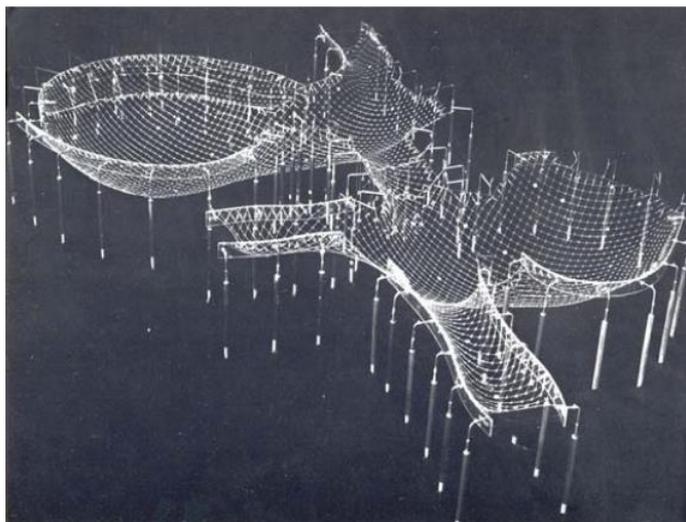


Figura 4.9 – Modelo de Cordas da *Mannheim Multihalle Gridshell* (Kuijvenhoven, 2009)

Existem ainda casos em que os elementos da estrutura não estão apenas sujeitos a compressão como consequência da obtenção da forma da superfície ter sido obtida com base numa abordagem não-funicular. Nesses casos, o Modelo de Cordas não é aplicável e são necessários outros procedimentos para obter a forma final da estrutura. Quando isso acontece, os meios computacionais são essenciais. Ainda assim, há a possibilidade da criação de modelos físicos experimentais à escala, como complementos ao projeto, para avaliar o comportamento da estrutura. Foi este o caso da *Downland Gridshell*, em que foram construídos modelos a várias escalas ao longo do projeto. O primeiro (Figura 4.10), à escala 1:100 e sendo apenas composto por arames, serviu apenas para mostrar ao cliente final e à restante equipa de projeto a forma tridimensional da geometria proposta e para demonstrar alguns princípios da Engenharia que seriam necessários compreender; O segundo, à escala 1:30, foi já construído em madeira com o objetivo de prever qual iria ser o comportamento da estrutura real no processo de execução; O terceiro modelo (escala 1:43) foi criado no âmbito de um projeto universitário e foi construído para examinar o comportamento da grelha de elementos ao transformá-la de uma superfície plana numa superfície curva (Harris et al, 2003). É de notar que foram ainda utilizados meios computacionais no projeto, tendo sido a construção dos modelos apenas um complemento ao mesmo.

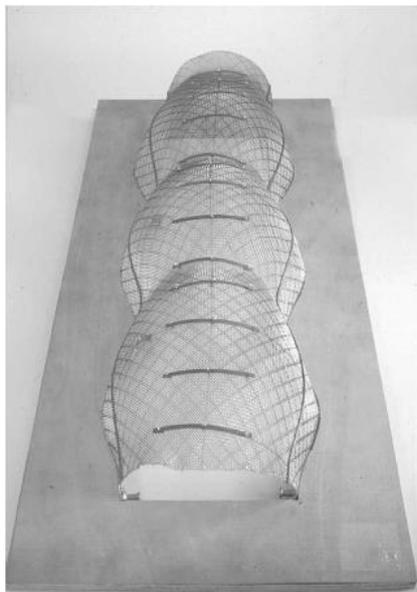


Figura 4.10 - Modelo à escala 1:100 da *Downland Gridshell* (Harris et al, 2003)

4.4.3 Métodos computacionais: Método da Relaxação Dinâmica

O desenvolvimento dos meios computacionais nos últimos anos trouxe novas formas de determinar a forma deste tipo de estruturas espaciais, tanto estruturas tipo membrana como casca. Para o processo de *form-finding*, existe a possibilidade de utilização do Método dos Elementos Finitos combinado com o método de Newton-Raphson (Guirardi, 2011), apesar de não se revelar a metodologia mais indicada para este procedimento, como se explica mais à frente. Para além dessa possibilidade, existem dois métodos especialmente desenvolvidos para este fim: o Método da Densidade-Força e o Método da Relaxação Dinâmica. O primeiro método é utilizado exclusivamente para estruturas do tipo membrana (Douthe et al, 2006), pelo que não tem particular interesse a sua apresentação; já o segundo, o Método da Relaxação Dinâmica, foi devidamente adaptado para aplicação no processo de *form-finding* de *gridshells*, tornando-se assim a ferramenta mais utilizada no projeto deste tipo de estruturas através de meios computacionais. Por essa razão, explicar-se-á esse método com detalhe neste subcapítulo.

Uma vez que ambas as metodologias possíveis de utilizar (Método dos Elementos Finitos combinado com o Método de Newton-Raphson e Método da Relaxação Dinâmica) envolvem análises não-lineares da estrutura, torna-se relevante abordar a questão da formulação do problema não-linear antes de se proceder à explicação dos métodos, explicando também o próprio conceito de não-linearidade. A não-linearidade divide-se em dois tipos: não-linearidade material e não-linearidade geométrica. A não-linearidade material ocorre quando a sua relação entre tensão e deformação não é linear. No caso da madeira, na generalidade dos casos, para tensões de serviço (ou seja, baixos níveis de tensão) é adotado um comportamento linear do

material. Quanto à não-linearidade geométrica, ocorre quando as deformações numa estrutura são de elevada ordem de grandeza e conseqüentemente produzem efeito nos seus esforços internos. Este fenómeno acontece no processo de *form-finding* das *gridshells*, que impõe grandes deslocamentos aos nós da estrutura. Desta forma, torna-se necessário ter em conta a sua configuração deformada no estabelecimento das equações de equilíbrio.

Antes de mais, é importante mencionar quais as razões pelas quais não deve ser utilizado o Método dos Elementos Finitos combinado com o Método de Newton-Raphson para o processo de *form-finding* na generalidade dos casos, apesar de existir essa possibilidade. Note-se que é necessário distinguir a utilização de *software* de análise por elementos finitos para a discretização de uma superfície (conforme mencionado no subcapítulo 4.3.2) da utilização do Método dos Elementos Finitos para o processo de *form-finding* da estrutura. De acordo com Pone et al (2013), uma análise de elementos finitos aplicada a um modelo de uma *gridshell* para encontrar a sua forma requer bastante tempo de cálculo computacional e uma calibração muito cuidadosa das imposições de deslocamentos nodais com o objetivo de evitar valores iterativos muito pequenos até chegar à solução de convergência. O processo de *form-finding* começa pela definição de uma grelha plana inicial (correspondente à planificação da grelha definida na superfície durante a etapa da sua discretização), na qual se define um vetor de deslocamentos impostos (que podem ser previamente obtidos em modelos físicos à escala), o que exige a resolução de um sistema altamente não-linear que envolve grandes deslocamentos. Por essa razão, o autor indica que o procedimento mais utilizado na generalidade dos casos envolve uma análise dinâmica explícita, nomeadamente através da utilização do Método da Relaxação Dinâmica.

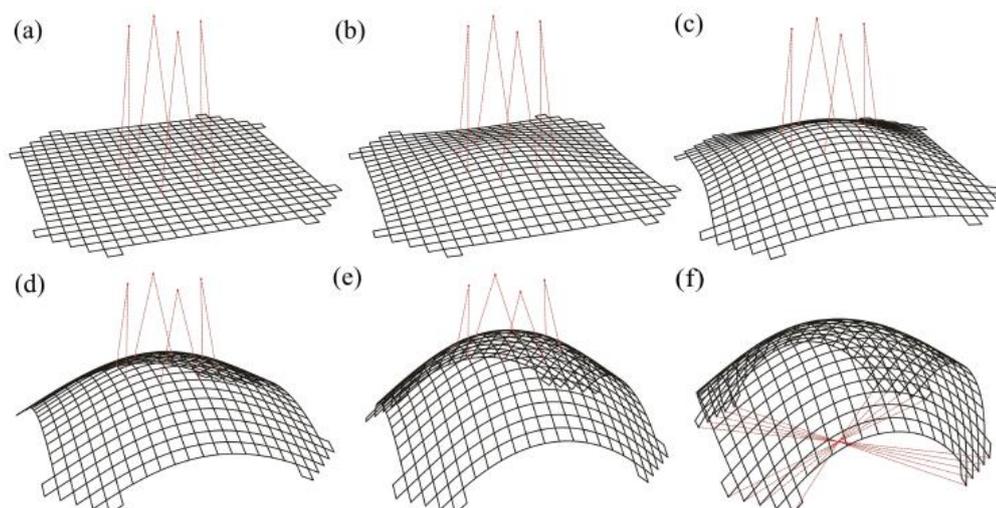


Figura 4.11 - Exemplo do processo de *form-finding* digital da *Toledo Gridshell*, em Nápoles (Itália), através do Método da Relaxação Dinâmica desde a sua fase inicial (a) até à posição final da estrutura (f) (D'Amico et al, 2015)

O Método da Relaxação Dinâmica pode definir-se resumidamente como um processo de análise computacional iterativo que resolve um conjunto de equações não-lineares, começando por uma aproximação inicial da forma desejada para a estrutura, modificando-a de modo a minimizar a energia cinética da malha de elementos (Harris et al, 2004). Apesar de este método ser geralmente utilizado para examinar oscilações na forma de estruturas catenárias, é possível modificá-lo para incluir a rigidez de flexão dos elementos estruturais, caso a estrutura não tenha essa forma (Toussaint, 2007). Essa modificação foi incluída no projeto da *Downland Gridshell* e revela-se essencial para possibilitar o projeto de *gridshells* em que os seus elementos não estejam exclusivamente sujeitos a esforços de compressão.

O Método da Relaxação Dinâmica foi criado nos anos 60 por A. S. Day e posteriormente desenvolvido por Mike Barnes, Professor de Engenharia na Universidade de Bath, (Harris et al, 2003) que tratou de estender a sua aplicação ao processo de *form-finding* de estruturas tracionadas e *gridshells* (Douthe et al, 2006). A sua aplicabilidade não se restringe à análise dinâmica de estruturas, podendo também ser utilizado em análise estática de estruturas, servindo principalmente para análise estrutural de problemas altamente não lineares (Olsson, 2012). Trata-se de um método numérico baseado na 2ª Lei de Newton que resolve a equação diferencial de movimento de cada nó da estrutura através de iterações ao longo de um período de tempo com pequenos incrementos Δt , calculando o movimento dos nós desde a sua posição inicial (grelha de elementos planificada) até que as suas posições de equilíbrio sejam encontradas e as vibrações se tenham dissipado devido ao amortecimento introduzido. O movimento de cada nó é gerado por uma força que resulta da falta de equilíbrio de forças nesse nó, sendo essas forças geradas pelos elementos que lhe são adjacentes e devidas aos carregamentos aplicados. Designe-se essa força resultante por F .

A 2ª Lei de Newton, que serve de base a este método, tem como princípio a proporcionalidade direta entre a força resultante aplicada a um corpo com uma determinada massa e a sua aceleração ($F = m.a$). Aplicando este princípio a uma superfície contínua discretizada por nós, tem-se que a força resultante em cada nó (F) provoca nesse nó uma aceleração na direção e sentido da resultante. A massa (m) do “corpo” que é representado pelo nó considera-se como a concentração da massa dos elementos estruturais adjacentes, que caso não seja quantificável facilmente, pode ser arbitrada. Sendo a aceleração dada pela divisão entre a força resultante e a massa, tem-se:

$$a = \frac{F}{m} \quad (16)$$

Integrando a aceleração do nó num determinado intervalo de tempo, obtém-se a velocidade com que o nó se movimenta; Ao integrar a velocidade no mesmo intervalo de tempo, obtém-se a

distância percorrida pelo nó devido à força resultante aplicada, no intervalo de tempo considerado.

Realizando esse procedimento para todos os nós da malha (obtendo o deslocamento sofrido por cada um deles), é determinada uma nova posição para a superfície da *gridshell*, uma vez que no intervalo de tempo considerado, cada nó se move com vista a anular a força resultante, ou seja, a estabelecer o equilíbrio de forças. Nesta nova posição, os elementos estruturais alteram os seus esforços internos, fazendo com que seja modificada a força resultante (F) em cada nó. A partir dessa força e através da massa concentrada definida inicialmente, é novamente repetido todo o processo, alterando de novo a geometria da superfície. Os nós ir-se-ão sempre mover para uma posição onde o equilíbrio entre as forças aplicadas e os esforços da estrutura tente ser alcançado. Quando todos os nós da estrutura estiverem numa posição de equilíbrio (ou muito próximo disso), a forma não se vai alterar em duas iterações consecutivas, fornecendo nesse momento a forma final da superfície. De forma a prevenir que os nós oscilem em torno da sua posição de equilíbrio, torna-se necessário aplicar amortecimento para que o equilíbrio dinâmico se transforme em equilíbrio estático (Kuijvenhoven, 2009).

A planificação da grelha definida na fase de discretização da superfície para que se possa aplicar o Método da Relaxação Dinâmica permite conhecer ao certo a delimitação dos seus contornos, sendo com isso possível fazer a fixação vertical das extremidades dos elementos que vão corresponder aos apoios da estrutura. Partindo dessa superfície plana, o primeiro valor dos deslocamentos nodais tem que ser imposto pelo utilizador e pode ser determinado com modelos físicos à escala, ou mesmo através da medição dessas distâncias em modelos feitos em computador. É de notar que não são impostos deslocamentos em todos os nós da grelha, mas sim em pontos estratégicos que permitam a obtenção de uma forma semelhante à desejada.

O amortecimento introduzido, tal como mencionam Kuijvenhoven (2009), Bouhaya et al (2009), Guirardi (2011), entre outros autores, pode ser viscoso ou cinético. O amortecimento viscoso, utilizado na versão original do Método da Relaxação Dinâmica, consiste na diminuição gradual da velocidade dos nós através da atribuição de coeficientes de amortecimento. O amortecimento cinético consiste num amortecimento artificial que confere maior estabilidade ao método pois reduz significativamente o número de equações necessárias para que seja atingida a convergência da solução. Neste tipo de amortecimento, as oscilações da estrutura são livres até atingirem um valor máximo de energia cinética. Nesse estado, todas as velocidades são artificialmente reduzidas para zero e é permitida uma nova oscilação à estrutura até ao próximo pico de energia cinética, onde novamente as velocidades são colocadas a zero. Este procedimento repete-se até que toda a energia cinética dos modos de vibração existentes se tenha dissipado e a estrutura tenha atingido o seu equilíbrio estático.

Observando mais acima a Figura 4.11, onde é apresentado um exemplo prático da aplicação digital do Método da Relaxação Dinâmica no processo de *form-finding* de uma *gridshell*, verificam-se as seguintes etapas: Desde o passo (a), que consiste na posição inicial da estrutura colocada num plano e onde se impõem os deslocamentos de alguns dos nós da grelha (linhas a vermelho), até ao passo (e) são realizadas iterações com determinados incrementos de tempo Δt onde se vão estabelecendo novas configurações para a estrutura. Durante essa fase, os nós dos cantos (onde são os apoios ao solo) são fixados na sua posição vertical, permitindo apenas a sua translação no plano; Quando a superfície atinge a forma que se verifica em (f), correspondente à sua forma final e onde se atinge o equilíbrio estático, são impedidos os movimentos de translação dos apoios, para que a estrutura se mantenha em posição.

4.4.4 Evolução do processo de *form-finding* e perspetivas de futuro

O surgimento e desenvolvimento dos meios tecnológicos permitiu que o processo de *form-finding* evoluísse desde a utilização de modelos físicos experimentais baseados nas leis da física, a partir dos quais apenas poderiam resultar estruturas funiculares, até à adaptação computacional de metodologias de cálculo extremamente poderosas que permitem obter soluções não-funiculares.

Apesar da existência do Método da Relaxação Dinâmica descrito no subcapítulo 4.4.3, a sua aplicação computacional para o *form-finding* de *gridshells* está ainda pouco desenvolvida. Paoli (2007) referia, à data da sua publicação, que o *software* ideal para a elaboração desta fase do projeto de uma *gridshell* ainda não existia e que, à semelhança do que fazem os modelos físicos, esse *software* teria que ser capaz de encontrar a forma ideal para a estrutura em função dos carregamentos aplicados, ao alterar a forma da estrutura inicial e apresentando as formas finais possíveis para a estrutura de forma automática.

É neste ponto que reside aquela que se tem apresentado como a maior contrariedade ao projeto de *gridshells* e a razão pela qual existem tão poucos casos práticos em todo o mundo. Em suma, é necessário um *software* com uma base de programação fundamentada no Método da Relaxação Dinâmica que permita uma automatização deste método, para que seja possível determinar a forma final da estrutura de uma forma eficiente e simples.

Vários estudos mais recentes, como por exemplo Kuijvenhoven (2009), Olsson (2012), Pone et al (2013), entre outros, comprovam que os primeiros passos para a criação de ferramentas com esse objetivo foram já dados, pois apresentam diversos desenvolvimentos nesse sentido, seja através da criação *plug-ins* (módulos de extensão para outros programas) ou mesmo através da criação de *software* para esse fim.

A partir do momento em que essas ferramentas sejam integradas em programas de modelação e análise de estruturas tridimensionais, com interfaces de simples utilização e que sejam fáceis de compreender e executar por parte do utilizador comum, rapidamente irão desaparecer os constrangimentos em relação ao projeto de *gridshells*, pois a elevada complexidade do projeto tornar-se-á significativamente menor.

4.5 Análise estrutural e dimensionamento

4.5.1 Análise estrutural

O processo de *form-finding* é necessariamente seguido de uma análise estrutural tendo em vista o dimensionamento dos elementos da estrutura (Naicu et al, 2014). A partir do momento em que está definida a sua forma final, é necessário proceder à sua análise pelos métodos convencionais, como seja o Método dos Elementos Finitos. Nesta fase é já possível a aplicação do Método dos Elementos Finitos combinado com o Método de Newton-Raphson – que consiste num método iterativo que permite análises não lineares - através de *software* apropriado, como por exemplo o *Robot Structural Analysis* (que permite também a simulação do comportamento de casca), utilizado na análise dos modelos estudados em (Harris, 2011), (Naicu, 2012) ou mesmo no modelo da *Savill Building Gridshell*, como é referido em (Harris et al, 2008). A análise estrutural tendo em vista o dimensionamento da estrutura consiste, igualmente, num processo iterativo com a finalidade de chegar a um resultado otimizado, tal como é referido em (Harris, 2011).

Nos casos em que a *gridshell* a projetar tenha a sua forma definida com base numa abordagem funicular (tal como acontecia quando eram projetadas através de modelos físicos), não se torna necessário utilizar o Método da Relaxação Dinâmica para achar a sua forma de equilíbrio, uma vez que naturalmente a sua forma estará próxima do equilíbrio estático.

É importante que ao utilizar um programa informático para a análise da estrutura, no caso concreto das *gridshells* em madeira, esteja garantida a correta modelação do comportamento mecânico da madeira, devendo também ser assegurado que as ligações do modelo traduzem o que se passa na realidade, no que toca às possibilidades de movimento e rotação relativos entre elementos estruturais. Para além desses aspetos, de modo a chegar à melhor solução possível em termos dimensionais para uma *gridshell*, devem ser testados vários modelos com diferentes larguras da malha e diferentes secções dos elementos para ver qual das soluções cumpre melhor os critérios de otimização definidos.

As ações que devem ser consideradas dependem de caso para caso, podendo incluir o peso próprio, revestimentos, neve, vento, ou qualquer outra que se considere relevante. É importante mencionar que os carregamentos aplicados ao modelo devem ser aplicados perpendicularmente

à superfície que define a forma da estrutura, de modo a simular o comportamento de uma casca com carregamento uniformemente distribuído aplicado. Outro aspeto extremamente importante que deve ser tido em conta no estabelecimento dos casos de carga, como é referido em Kuijvenhoven (2009), consiste na flexão existente nos elementos da estrutura que se devem ao processo construtivo e que estará sempre presente.

No caso de um programa como o *Robot Structural Analysis*, é possível fazer a análise estrutural com base nos mapas de tensões para os elementos estruturais e também com base na determinação da deformação sofrida pela estrutura. Na Figura 4.12 apresenta-se o exemplo de um modelo analisado com este *software*.

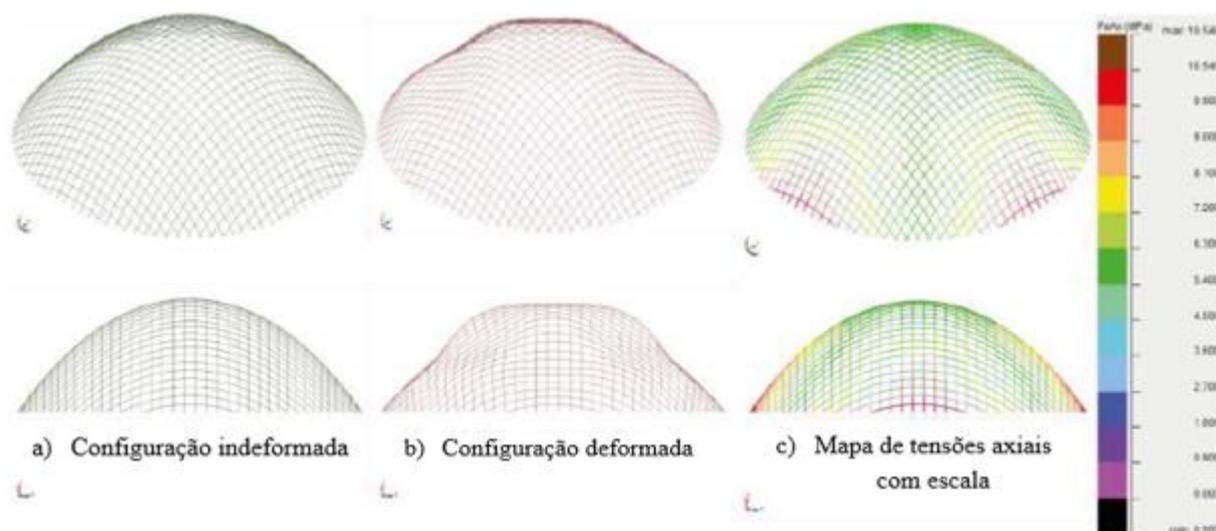


Figura 4.12 – Exemplo da análise de um modelo computacional de uma *gridshell* através do mapa de tensões; Em cima: Vista em perspetiva; Em baixo: Vista frontal; Adaptado de Naicu (2012)

O facto de os elementos estruturais de uma *gridshell* em madeira estarem sujeitos a esforços de compressão, faz com que se tenha que ter em conta a possibilidade de instabilizarem fora do seu plano (Harris et al, 2003). Dessa forma, deve também ser efetuada uma análise de estabilidade local e global dos elementos, uma vez que pode ser condicionante relativamente à carga de colapso da estrutura. Este fenómeno será tão mais importante, quanto maior for o espaçamento entre os elementos da grelha ou menores forem as secções transversais das ripas. No caso de serem testados vários modelos para a estrutura com diferentes dimensões das aberturas ou com diferentes secções para as ripas, deve analisar-se a estabilidade de cada um de forma individual.

4.5.2 Dimensionamento dos elementos de madeira

São apresentadas neste subcapítulo as verificações regulamentares exigidas para o dimensionamento dos elementos de madeira ao abrigo de dois documentos normativos: EN 1995-1-1 (em vigor em Portugal) e NBR 7190 (em vigor no Brasil). Apresentam-se as verificações efetuadas no Brasil uma vez que, estando esta Dissertação escrita em Português, pode ser útil em qualquer dos dois países. A simbologia apresentada é descrita na Simbologia desta Dissertação.

Verificações regulamentares para Estados Limites Últimos

Devido à similaridade existente entre as verificações apresentadas por ambas as Normas, apresentam-se aqui as expressões da EN 1995-1-1 e, onde existem, assinalam-se as devidas diferenças em relação à NBR 7190. Apresentam-se apenas as verificações com maior relevância no dimensionamento das *gridshells*.

- Verificação da tração na direção paralela à direção das fibras:

Esta verificação é necessária quando, devido à forma da estrutura, existem elementos que em certas zonas ficam tracionados.

$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d} \quad (17)$$

Sendo as correspondências na NBR 7190 as seguintes: $\sigma_{t,0,d} = \sigma_{td}$ e $f_{t,0,d} = f_{td}$;

- Verificação da flexão composta (esforço axial de compressão):

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (18)$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (19)$$

Neste caso, a NBR 7190 apresenta duas expressões ligeiramente diferentes, na medida em que não utiliza o valor da resistência à flexão, $f_{m,d}$, colocando no seu lugar o valor da resistência à compressão na direção paralela à direção das fibras, $f_{c,0,d}$.

As restantes correspondências são as seguintes: $\sigma_{c,0,d} = \sigma_{Nc,d}$; $f_{c,0,d} = f_{c,0,d}$; $\sigma_{m,y,d} = \sigma_{Mx,d}$; $\sigma_{m,z,d} = \sigma_{My,d}$; $k_m = k_M$;

- Verificação do corte:

$$\tau_d \leq f_{v,d} \quad (20)$$

Sendo as correspondências na NBR 7190 as seguintes: $f_{v,d} = f_{v0,d}$;

- Verificação da torção:

Esta verificação é necessária quando, devido à assimetria dos carregamentos aplicados, alguns elementos fiquem sujeitos a torção.

$$\tau_{tor,d} \leq k_{shape} f_{v,d} \quad (21)$$

Neste caso, a NBR 7190 não considera o fator de forma k_{shape} na verificação. As correspondências são as seguintes: $\tau_{tor,d} = \tau_{T,d}$ e $f_{v,d} = f_{v0,d}$.

4.6 Esquematização do projeto de uma *gridshell*

Terminada a explicação de cada etapa necessária ao projeto de uma *gridshell*, é importante esquematizar essa informação para que se perceba com maior clareza a sequência de passos que é seguida no projeto. Dessa forma, apresenta-se na Figura 4.13 uma esquematização simples de todo o processo.

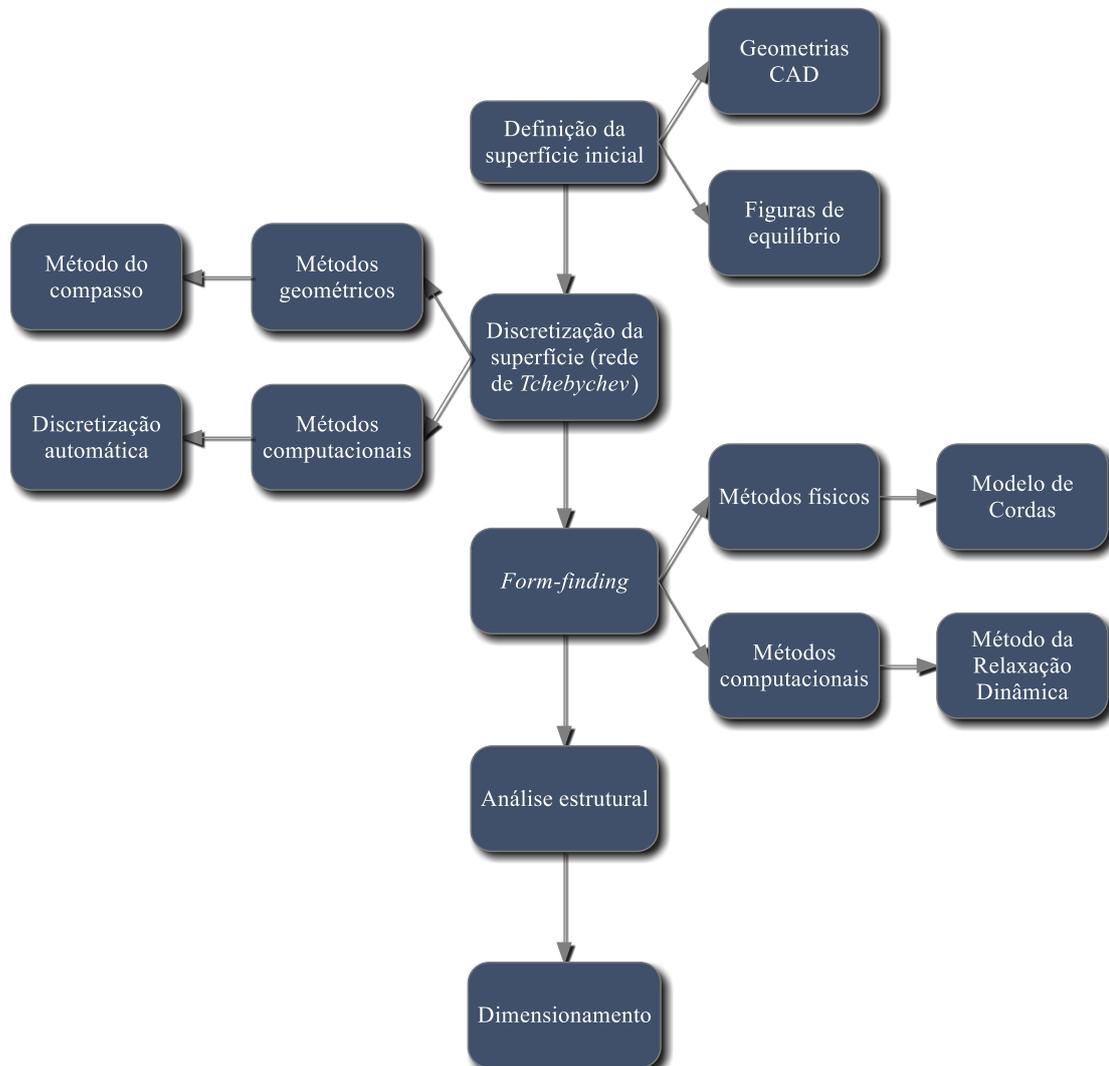


Figura 4.13 – Esquematização do projeto de uma *gridshell*

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este estudo de síntese bibliográfica apresenta as *gridshells* construídas em madeira em todos os seus aspetos característicos. De modo geral, abordam-se diversos temas relacionados com as suas características gerais, com o seu comportamento estrutural e com as técnicas e métodos de projeto existentes. Para permitir um enquadramento apropriado, foram também introduzidas algumas temáticas mais abrangentes que são essenciais para dotar o leitor da capacidade de entender certos aspetos relativos às *gridshells*.

A construção da *Mannheim Multihalle Gridshell*, a primeira de grandes dimensões a ser construída em madeira e projetada por um dos maiores impulsionadores das estruturas de formas livres, o Professor Frei Otto, foi o primeiro grande passo na divulgação e desenvolvimento destas estruturas. Seguiram-se, anos mais tarde e já no novo milénio, a *Downland Gridshell* e a *Savill Building Gridshell*, que vieram trazer avanços significativos nas metodologias de projeto, substituindo os modelos físicos experimentais por métodos computacionais que continuam a ser desenvolvidos nos dias de hoje.

As *gridshells* apresentam-se como soluções viáveis e que permitem a criação de soluções inovadoras. Se no presente existem escassos exemplos práticos de *gridshells* em madeira construídas em todo o mundo (principalmente de grandes dimensões), esse fator deve-se ao desconhecimento e à falta de técnicas de projeto eficazes e otimizadas que permitam o seu crescimento sustentado. De facto, os pontos fortes inerentes a este tipo de estrutura conferem-lhe um grande potencial em vários níveis - arquitetónico, estrutural e ambiental - que ainda não está a ser devidamente aproveitado.

O interesse crescente por este tipo de solução estrutural tem sido notório nos últimos anos e, como consequência, espera-se um aumento cada vez maior dos estudos efetuados sobre vários temas relativos às *gridshells*, tornando as perspetivas de futuro bastante positivas, uma vez que com a divulgação do conhecimento irão com certeza surgir novos casos práticos construídos. Relativamente aos meios de projeto, o desenvolvimento tecnológico dos últimos anos faz com que existam já algumas soluções que com os devidos aperfeiçoamentos irão permitir projetar *gridshells* com relativa facilidade num futuro bastante próximo, permitindo dessa forma reduzir os custos associados e também criar um modelo geral de projeto que ainda não está implementado hoje em dia. Espera-se que esta Dissertação possa também servir de impulso ao

interesse pelo conhecimento sobre estas estruturas em Portugal, até pela disponibilidade de recursos (madeira com características adequadas) para a construção que existem no nosso país.

Como trabalhos futuros a sugerir, existem inúmeras possibilidades dada a grande margem de desenvolvimento que se verifica. Destacam-se aqui algumas com potencial relevância para o seguimento deste estudo.

Teria particular interesse o desenvolvimento do projeto de um caso prático de pequenas dimensões, em que fossem aplicadas as técnicas aqui apresentadas para cada fase. Uma vez que neste estudo são apenas apresentados os conceitos numa vertente teórica, seria bastante interessante transpô-los para a prática de modo a conhecer as suas limitações e dificuldades, verificando ao mesmo tempo a sua viabilidade.

Numa vertente mais ligada ao desenvolvimento de técnicas e *software* de projeto, existe ainda bastante por fazer. Posto isto, é necessário que hajam mais equipas de trabalho focadas nesse objetivo. Seria extremamente interessante o desenvolvimento de um *software* de projeto para *gridshells*, que a partir do modelo de uma superfície concebida num outro programa de modelação tridimensional, permitisse colocar em prática todas as etapas do projeto, desde a discretização dessa superfície, ao *form-finding*, à análise estrutural e ao dimensionamento dos elementos estruturais. Reunindo toda a informação disponível sobre as novas técnicas que têm surgido, juntar-se-ia uma boa base para o seu desenvolvimento.

Por fim, seria também importante estudar a otimização do processo construtivo, das ligações entre elementos estruturais e entre camadas, onde pudessem ser propostas novas técnicas para elevação ou suporte durante a construção, novas ligações e até novos sistemas para as condições de fronteira a implementar em novas estruturas. O processo construtivo utilizado na construção destas estruturas envolve cuidados redobrados pois implica a introdução de grandes deformações nos elementos construtivos, o que tem levado a que haja muitas peças partidas e que são desaproveitadas, implicando custos acrescidos. Quanto às ligações, as soluções utilizadas até agora são algo rudimentares e tomam o seu tempo a ser efetuadas. Numa estrutura onde são necessárias centenas ou até milhares de ligações, quanto mais rápida for a sua colocação, melhor. Posto isto, também nesse campo há espaço para a inovação através da criação de soluções que sejam tecnicamente viáveis, competitivas em termos económicos e de rápida execução.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (1997). "NBR 7190". Projeto de estruturas de madeira.

AtelierTen@ (2007). <http://www.atelierten.com/2011/projects/the-savill-building/#>. "The Savill Building, Windsor, UK."

Austriaangloalliance@. <http://austriaangloalliance.deviantart.com/art/L-Oceanografic-347721627>.

Behance@. <https://www.behance.net/gallery/6950327/Smithsonian-Portrait-Gallery-courtyard>.

Bouhaya, L. (2010). "Optimization Structurelle Des Gridshells". Université Paris-Est, Paris.

Bouhaya, L., Baverel, O. e Caron, J. F. (2009). "Mapping two-way continuous elastic grid on an imposed surface: Application to grid shells". Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures. Universidad Politecnica de Valencia, Spain.

Buildingforafuture@. http://www.buildingforafuture.co.uk/winter02/gridshell_building.pdf.

Cardoso, F. (2008). "Coberturas em betão armado e pré-esforçado - Solução estrutural tipo casca". Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

CarpenterOak&Woodland@. <http://www.carpenteroakandwoodland.com/gallery/timber-engineering/chiddingstone-castle-orangery-gridshell>.

CEN (2004). "EN 1995-1-1". Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings.

Coutinho, J. (1999). "Apontamentos da Disciplina de Materiais de Construção 1 - Madeiras", Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

D'Amico, B., Kermani, A. e Zhang, H. (2014). "Form finding and structural analysis of actively bent timber grid shells". Engineering Structures, Vol. 81, pp. 195-207.

D'Amico, B., Kermani, A., Zhang, H., Pugnale, A., Colabella, S. e Pone, S. (2015). "Timber gridshells: Numerical simulation, design and construction of a full scale structure". Structures.

DesignIsFine@. <http://www.design-is-fine.org/post/51247150247/frei-otto-seifenlaugenversuch-the-soap-film>.

Dias, A. (2014). "Apontamentos de Apoio à disciplina de Estruturas de Madeira e Avenaria 2014/2015". Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra.

Dias da Silva, V. (2004). "Mecânica e Resistência dos Materiais", Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

Douthe, C., Baverel, O. e Caron, J. F. (2006). "Form-finding of a Grid Shell in Composite Materials". Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures (J. IASS), Vol. 47,(No. 1 April n. 150), pp. 53-62.

E-kultura@ (2015). <http://e-kultura.cz/oskara-za-architekturu-ziskal-v-pondeli-zesnuly-architekt-otto/>.

Farshad, M. (1992). "Design and Analysis of Shell Structures". Kluwer Academic Publishers.

Flügge, W. (1973). "Stresses in Shells". Springer, Berlin.

FourthDoor@. http://www.fourthdoor.org/annular/?page_id=453. "The Savill Gardens Gridshell, Glen Howells Architects."

Fund, A. (2008). "Form-Finding Structures". Dept. of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts.

Geniesseroasen.ch@. <http://www.geniesseroasen.ch/GeniesserOasen/GeniesserOasen-von-A-Z/Bad-Duerrheim>.

Gridshell.it@. <http://www.gridshell.it/>.

Guirardi, D. (2011). "O Método da Relaxação Dinâmica aplicado à análise de estruturas de cabos e membranas". Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

Hannover.de@. <http://www.hannover.de/en/Welcome-to-Hannover/Economy-Business2/Congress-City-Hannover/Conference-Venues/Deutsche-Messe-AG-Exhibition-Grounds>.

Harris, R. (2011). "Design of timber gridded shell structures". Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings, Vol. 164,(Issue 2), pp. 105-116.

Harris, R., Dickson, M. e Kelly, O. (2004). "The Use Of Timber Gridshells For Long Span Structures". 8th International Conference on Timber Engineering. Lahti, Finland.

Harris, R., Haskins, S. e Roynon, J. (2008). "The Savill Garden gridshell : Design and construction". The Structural Engineer, Vol. 86,(Issue 17), pp. 27-34.

Harris, R., Romer, J., Kelly, O. e Johnson, S. (2003). "Design and construction of the Downland Gridshell". *Building Research and Information*, Vol. 31,(Issue 6), pp. 427-454.

Koenderink, J. e van Doorn, A. (1998). "Shape from Chebyshev nets". *Computer Vision - ECCV'98*. Freiburg, Germany, Springer Berlin Heidelberg, pp. 215-225.

Kuijvenhoven, M. (2009). "A design method for timber grid shells". Delft University of Technology, Delft.

LEM@. www.lem.ep.usp.br/pef604/cascas.doc.

Linkwitz, K. (1999). "About formfinding of double-curved structures". *Engineering Structures*, Vol. 21,(Issue 8), pp. 709-718.

Linkwitz, K. (2002). "On Some Peculiarities of Timber Shells Concerning Formfinding, Manufacturing, Building Physics". *Lightweight Structures in Civil Engineering*. Poland.

Malek, S. (2012). "The Effect of Geometry and Topology on the Mechanics of Grid Shells". Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts.

Naicu, D. (2012). "Geometry and Performance of Timber Gridshells". Department of Architecture and Civil Engineering, The University of Bath, Bath.

Naicu, D., Harris, R. e Williams, C. (2014). "Timber Gridshells: Design Methods and Their Application to a Temporary Pavilion". *World Conference on Timber Engineering*. Quebec City, Canada.

Negrão, J. (2009). "Estática Aplicada para Engenharia Civil e Arquitetura", Coimbra.

Negrão, J. e Faria, A. (2009). "Projecto de Estruturas de Madeira".

Olsson, J. (2012). "Form finding and size optimization: Implementation of beam elements and size optimization in real time form finding using dynamic relaxation". Department of Applied Mechanics, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.

Paoli, C. (2007). "Past and Future of Grid Shell Structures". *Ecole Spéciale des Travaux Publics*, Paris.

Pone, S., Colabella, S., D'Amico, B., Fiore, A., Lancia, D. e Parenti, B. (2013). "Timber Post-formed Gridshell: Digital Form-finding / drawing and building tool". *IASS 2013: Beyond the Limits of Man*. Wroclaw University of Technology, Poland.

PrincetonUniversity@ (2013). <http://shells.princeton.edu/Mann1.html>. "Evolution of German Shells - Efficiency in Form."

Santos, J., Duarte, M., Santos, J. e Pestana, L. (2011). "Bem utilizar madeiras portuguesas na construção/reabilitação". 1º Congresso Ibero-Latino Americano da Madeira na Construção. Coimbra, Portugal.

Sia-tage.ch@. <http://www.sia-tage.ch/de/visiteurs/manifestations/manifestations.php>.

Smith, P. G. (1969). "Membrane Shapes for Shell Structures". University Microfilms, University of California, Berkeley.

Toussaint, M. H. (2007). "A Design Tool for Timber Gridshells". Delft University of Technology, Delft.

Weald&DownlandMuseum@. <http://www.wealddown.co.uk/buildings/downland-gridshell/>. "Weald & Downland Open Air Museum."

YouTube@ (2013). <https://www.youtube.com/watch?v=DDw47ZdEXDU>. "Creating a Roof Structure."