Universidades Lusíada

Pinto, Luís Filipe Gasparinho Marques, 1957-

Domo geodésico

http://hdl.handle.net/11067/3391

Metadados

Data de Publicação 2017-06-30

Resumo Devido à sua forma virtualmente esférica, os domos geodésicos são estruturas que se revelam altamente eficazes, do ponto de vista construtivo e do ponto de vista energético. Os domos geodésicos são eficazes do ponto de vista construtivo, dado que a forma esférica é aquela em que uma determinada superfície encerra maior volume e são eficazes do ponto de vista energético, uma vez que a forma esférica é aquela em que um determinado volume dispõe de menor superfície de encerramento. Ao longo deste ...

Palavras Chave Cúpulas geodésicas, Fuller, Richard Buckminster, 1895-1983

Tipo article

Revisão de Pares Não

Coleções [ULL-FAA] RAL, n. 7 (1.º semestre 2015)

Esta página foi gerada automaticamente em 2024-10-12T08:41:59Z com informação proveniente do Repositório

http://repositorio.ulusiada.pt

PINTO, Luís Filipe Marques (2015). Domo Geodésico. Revista Arquitectura Lusíada, N. 7 (1.º semestre 2015): p. 45-59. ISSN 1647-9009.

DOMO GEODÉSICO

Luís Filipe Marques Pinto

Resumo

Devido à sua forma virtualmente esférica, os domos geodésicos são estruturas que se revelam altamente eficazes, do ponto de vista construtivo e do ponto de vista energético. Os domos geodésicos são eficazes do ponto de vista construtivo, dado que a forma esférica é aquela em que uma determinada superfície encerra maior volume e são eficazes do ponto de vista energético, uma vez que a forma esférica é aquela em que um determinado volume dispõe de menor superfície de encerramento.

Ao longo deste artigo, veremos como o domo geodésico sempre esteve presente nas construções feitas pelo homem, desde tempos imemoriais, provavelmente devido à estabilidade estrutural que proporciona, e exemplificaremos como podemos obter domos geodésicos a partir de um poliedro regular – o icosaedro – e a partir de um poliedro semi-regular – o icosaedro truncado.

Palavras-chave

Domo geodésico; poliedro; icosaedro; Buckminster Fuller.

Abstract

Due to their virtually spherical shape, the geodesic domes are structures that happen to be highly efficient, from both constructive and energetic points of views. The geodesic domes are efficient from the constructive point of view, since the spherical shape is the one that, in a certain surface, comprises the biggest amount of volume. Furthermore, they are also efficient from the energetic aspect because the spherical shape is the one where a certain volume has the smallest surface of closure.

Throughout this article, we will find out that the dome geodesic was always present in the constructions made by Man, since immemorial times, probably due to the structural stability that it provides. We will therefore exemplify how can we obtain geodesic domes from a regular polyhedron - the icosahedron – and from a semi-regular polyhedron – truncated icosahedron.

Key-words

Geodesic dome; polyhedron; icosahedron; Buckminster Fuller.

1. Metodologia e conceitos

Este artigo representa um risco assumido (eventualmente não devidamente ponderado) por parte do autor, que opta por fazer uma análise de algumas propriedades geométricas de figuras planas e tenta deduzir, usando apenas a capacidade lógica e intuitiva, o comportamento mecânico das estruturas esféricas correspondentes. Se o texto que se segue suscitar quaisquer comentários ou correções, por parte de especialistas em estruturas, terá, ainda assim, sido útil...

Domo é uma palavra de origem grega (*dómos*) e latina (*domus*) que significa construção ou casa. Por sua vez, o termo geodésica remete-nos para a forma da Terra. Com efeito, a

Geodésica é um ramo da Geofísica que se ocupa da determinação da forma e das dimensões da Terra e da localização de pontos na sua superfície, a partir de um sistema de coordenadas esféricas.

Vulgarmente, relaciona-se o termo domo com o remate superior, em forma esférica, de um edifício, designando-se por cúpula o seu interior. Os domos geodésicos podem corresponder a uma esfera completa, a uma semi-esfera ou a outra porção qualquer da esfera.

Optámos por não incluir fotografias ao longo do texto, para não tornar este artigo excessivamente longo e tendo em conta que existem inúmeras imagens disponíveis na internet.

2. O Domo em construções nativas

Provavelmente, os primeiros "domos" foram erigidos nos primórdios da civilização humana e continuaram a ser construídos ininterruptamente, até aos nossos dias. Por vezes, as pedras de grandes dimensões que funcionam como lajes de cobertura nos dólmenes fazem lembrar domos, dando a impressão de que foram talhadas intencionalmente com a forma esférica[1]. Por outro lado, é sabido que era frequente os dólmenes serem protegidos por montículos de terra – as mamoas – cuja forma arredondada também faz lembrar um domo[2]. As mamoas serviam de rampa para deslocação das lajes que eram colocadas sobre os esteios e, além disso, também funcionam como elemento de proteção do dólmen à ação erosiva do vento e da chuva, criando condições favoráveis para que esses monumentos pré-históricos perdurassem até aos dias de hoje.

Nos nossos dias, a construção de abrigos com a forma parcialmente esférica é corrente entre tribos indígenas espalhadas pelo Mundo. O *wigwam* ou o *wickiup* – a designação depende da região – é uma construção esferóide usada pelo povo nativo norte americano feita de ramos de árvores ou paus, revestida com erva, palha ou peles de animais. Construções idênticas são usadas atualmente pelas tribos nómadas somalis, assim como por outros grupos étnicos na região do Corno de África. Peças gastas de vestiário, chapas de plástico e esteiras de fibras vegetais são alguns dos materiais utilizados para revestir estas construções nativas que se designam de *aqal*.

Os iglôs são construções rudimentares mas altamente eficazes, feitas pelos esquimós, sobretudo do norte do Canadá. Os construtores começam por escavar o solo até encontrarem água em estado líquido, para aproveitar a temperatura do interior da Terra que é, evidentemente, mais moderada e estável do que a temperatura atmosférica. O iglô é então erigido sobre a massa de água, ladeada por uma plataforma construída com blocos de gelo, que funcionará como zona de estar e de dormir. O piso desta zona é isolado com paus e peles de animais. O iglô é construído com grandes blocos de gelo que são dispostos em hélice esférica até formarem um domo geodésico perfeito. Os blocos de gelo são ligados entre si com neve que é, tal como o gelo, um bom isolante térmico.

3. O Domo em construções monumentais

A estabilidade estrutural proporcionada pelo domo hemisférico talvez justifique, pelo menos em parte, o bom estado de conservação a que chegaram até nós alguns edifícios antigos que têm nos respetivos domos o seu elemento compositivo mais marcante, como é o

[1] É o caso da Anta de Santa Marta, localizada em Penafiel, que, em 1910, foi classificada como monumento nacional.

[2] A forma arredondada das mamoas também faz lembrar uma *mama* – vocábulo de onde deriva, aliás, a sua designação.

caso do Panteão de Roma e da Basílica de Santa Sofia, erigida em Constantinopla[3].

Durante o império romano, ocorreu uma revolução dos processos construtivos devido à invenção do *opus caementicium* – o cimento hidráulico[4] – que começou a ser usado como material aglomerante, sobretudo na arquitetura monumental. Pela primeira vez na história da arquitetura, devido à utilização do cimento, a conceção espacial pôde assumir o papel de protagonista em relação ao sistema construtivo imposto pelos materiais tradicionais, que eram a pedra e o tijolo. Efetivamente, o Panteão de Roma é um edifício de matriz geométrica, com uma forte componente conceptual, em que a cúpula corresponde a uma semi-esfera perfeita e em que o pé-direito do edifício (43,2m) corresponde ao diâmetro da respetiva esfera circunscrita. O óculo, que constitui o remate superior da cúpula, é a única entrada direta de luz no edifício e poderá corresponder à transposição para a arquitetura do disco solar – sendo a cúpula uma metáfora óbvia da esfera celeste.

Santa Sofia tem uma planta basilical axial – entrada a poente, nave central e altar a nascente – que é totalmente neutralizada pela imposição espacial da cúpula central (com 55m de altura e 31m de diâmetro) que é o elemento arquitetónico mais marcante do conjunto e que confere ao edifício um forte caráter de centralidade e de verticalidade. Dois arcos de volta perfeita dispostos segundo o eixo nascente-poente têm a função de separar o domo central de dois semi-domos de diâmetro igual ao domo central, mas de pé-direito claramente inferior. Os elementos arquitetónicos que dominam o conjunto e conformam o espaço interior são a cúpula central, os pendentes em que esta se apoia e as duas semi-cúpulas. Os pendentes são os apoios, em forma de triângulos esféricos, colocados nos quatro cantos, que fazem a transição da base circular da cúpula para os apoios da respetiva planta quadrangular[5]. Na base do domo, existem 40 vãos, sendo as duas paredes laterais também vazadas, com dois níveis de vãos em arco. A luz, filtrada através destas aberturas, vai moldando o espaço em função da posição do sol que varia constantemente, ao longo do dia e ao longo do ano. Com efeito, a Basílica de Santa Sofia é famosa pela qualidade diáfana da luz que penetra no seu interior através das 40 aberturas situadas da base do domo principal, que vão deixando passar, à vez, os raios de sol para o interior.

A conclusão da construção do edifício que chegou até aos nossos dias data de 537. A cúpula original, com a forma de calote esférica, acabaria por ter uma existência breve – 21 anos apenas – já que colapsou na sequência de um terramoto ocorrido em 558. Decorridos cinco anos, foi construído um novo domo com 40 nervuras, com a forma hemisférica, 6m mais alto do que o antecedente, com o objetivo de reduzir as forças laterais exercidas nas paredes pelo seu peso.

Imaginemos que seccionamos uma esfera por um plano horizontal a um quarto da sua altura e que retemos a parte superior. Os planos tangentes à calote esférica ao longo do seu bordo inferior são inclinados. Por conseguinte, o peso de um domo que corresponda a um setor esférico é transmitido à estrutura do edifício através de linhas de força oblíquas, que tendem a 'abrir' a estrutura de apoio – terá sido o que sucedeu ao domo na versão de 537, quando foi sacudido pelo terramoto de 558 (Fig. 1).

[3] Em 1930, a cidade de Constantinopla passou a designar-se de Istambul.

[4] As propriedades do cimento hidráulico são semelhantes às do cimento *Portland* que usamos atualmente na construção.

[5] Os pendentes têm a função estrutural de transferir as cargas da base circular do domo para a planta de matriz quadrangular, restringindo as forças laterais e dirigindo-as para o solo.

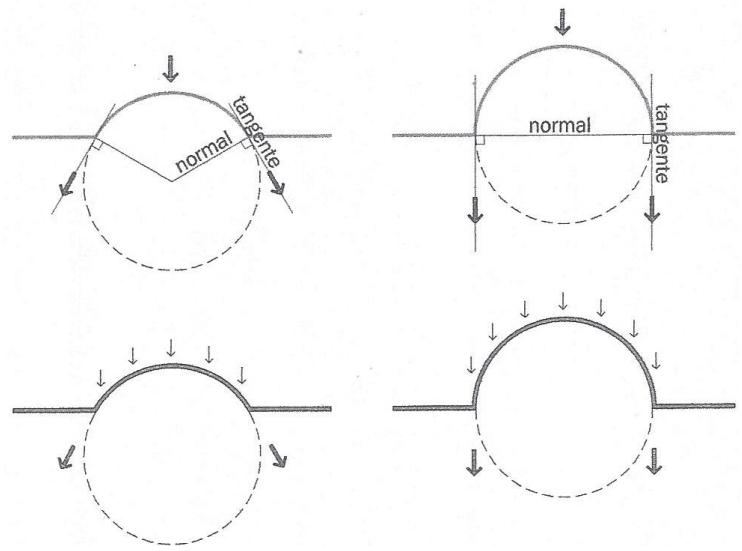

Fig. 1 - As cargas resultantes do peso de um domo com desenvolvimento inferior a uma semi-esfera transmitem-se obliquamente, enquanto as cargas de peso de um domo hemisférico transmitem-se verticalmente.

Imaginemos, em seguida, que seccionamos uma esfera, recorrendo a um plano horizontal que contém o seu centro, e que retemos a metade superior. Os planos tangentes à semi-esfera ao longo do bordo inferior são verticais. Por conseguinte, o peso de um domo hemisférico é transmitido à estrutura do edifício através de forças verticais – é o que se verifica com o domo atual, cuja construção data de 563 (Fig. 1).

Na realidade, o terramoto apenas pôs a nu – de forma drástica e brutal – a progressiva degradação que o edifício vinha a experimentar desde a sua construção. Embora a conceção do edifício seja quase 'perfeita', consta que o levantamento apressado das paredes terá enfraquecido a construção, do ponto de vista estrutural. Um número considerável de fiadas de tijolo terá sido assente em camadas sucessivas de argamassa, sem esta secar previamente. Quando o domo foi erigido (versão do ano 537), o seu peso fez com que as paredes se inclinassem para o exterior, embora não tenham chegado a colapsar.

Antes do domo atual ser construído, as paredes tiveram de ser verticalizadas. Adicionalmente, o arquiteto/engenheiro decidiu substituir a forma de calote esférica por uma semi-esfera, com o intuito de anular as forças laterais. A nova cúpula foi modulada com nervuras, aliviando o seu peso e transmitindo-o fluída e verticalmente para os pendentes, os pilares, as paredes, as colunas e, finalmente, as fundações.

4. Os poliedros irregulares

Se pretendermos ligar entre si pontos equidistantes uns dos outros dispostos numa folha de papel, a forma mais eficaz é recorrer a segmentos de reta que definem triângulos. Desta forma, através da justaposição de triângulos equiláteros, lograremos obter o preenchimento integral da superfície plana (Fig. 2). Ora, se aplicarmos o mesmo princípio à superfície esférica, obteremos um domo geodésico. No fundo, o domo geodésico é um poliedro[6] de faces geralmente triangulares, em que os vértices se encontram à mesma distância de um ponto fixo – que corresponde ao centro da esfera que circunscreve o poliedro. Oportunamente, veremos que, na transposição da superfície plana para a superfície esférica, a maioria dos triângulos deixam de ser equiláteros e passam a ser isósceles ou escalenos.

[6] Um poliedro é um sólido cujas faces são planas.

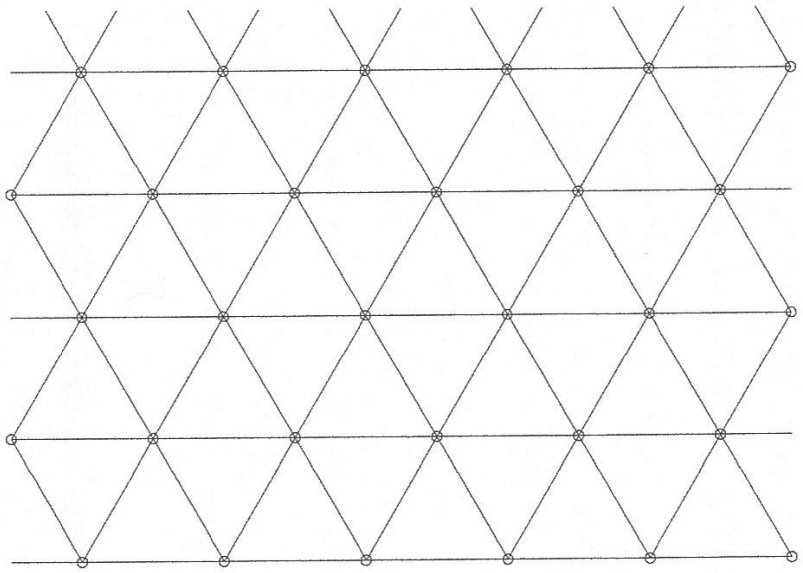

Fig. 2 - O preenchimento da superfície plana,
através da justaposição de triângulos equiláteros.

Os cinco poliedros regulares – sólidos cujas faces correspondem a polígonos regulares iguais – são os únicos sólidos convexos de faces iguais que são inscritíveis em esferas, podendo ser utilizados como sólidos geradores de domos geodésicos de diferentes tipos, a partir da divisão poligonal das respetivas faces. Como os nomes indicam, o tetraedro tem 4 faces, o hexaedro (ou cubo) tem 6, o octaedro tem 8, o dodecaedro tem 12 e o icosaedro tem 20 (Fig. 3).

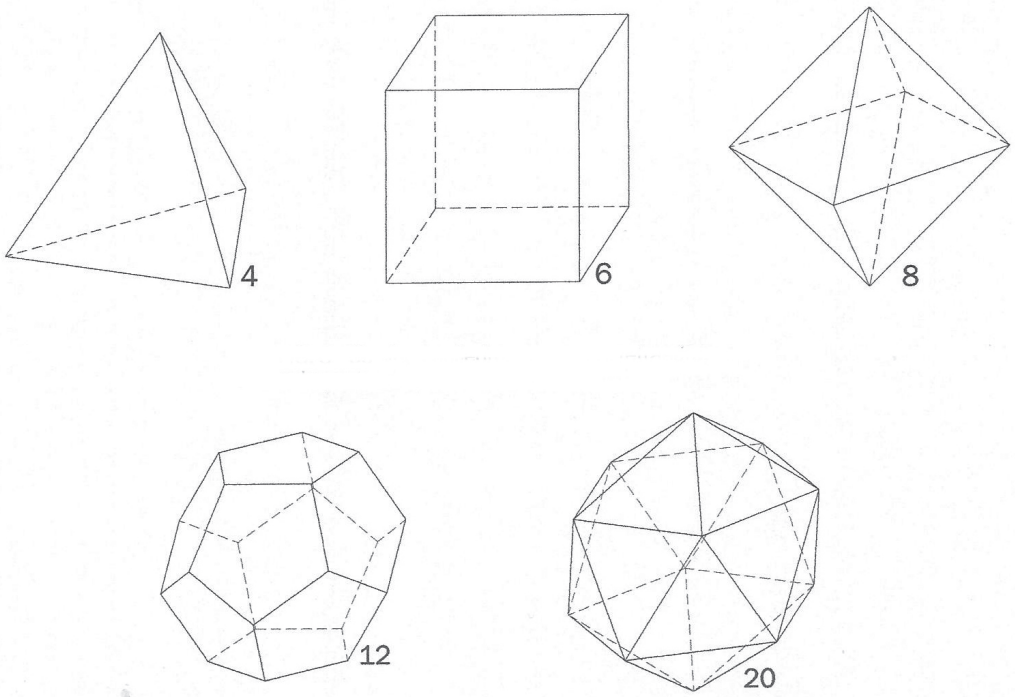

Fig. 3 - Os cinco poliedros regulares: Tetraedro, cubo, octaedro, dodecaedro e icosaedro.

Se tentarmos preencher integralmente a superfície plana, usando apenas um tipo de polígono regular, concluiremos facilmente que existem apenas três soluções, em que se emprega o hexágono, o quadrado e o triângulo, uma vez que os respetivos ângulos internos são os únicos submúltiplos de 360º (Fig. 4).

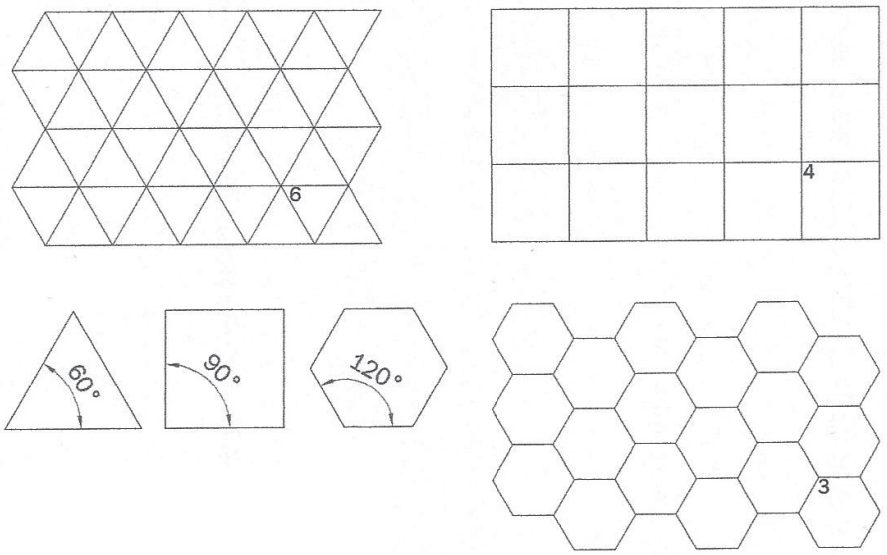

Fig. 4 - O triângulo, o quadrado e o hexágono no preenchimento integral da superfície plana.

No espaço, os únicos polígonos que, associados entre si, podem gerar poliedros regulares são o triângulo – que dá origem ao tetraedro, ao octaedro e ao icosaedro – o quadrado – que dá origem ao cubo – e o pentágono – que dá origem ao dodecaedro (Fig. 5). O tetraedro resulta da associação de três triângulos, em torno de cada vértice. O octaedro resulta da associação de quatro triângulos, em torno de cada vértice. O icosaedro resulta da associação de cinco triângulos, em torno de cada vértice. O cubo resulta da associação de três quadrados, em torno de cada vértice. O dodecaedro resulta da associação de três pentágonos, em torno de cada vértice (Fig. 5).

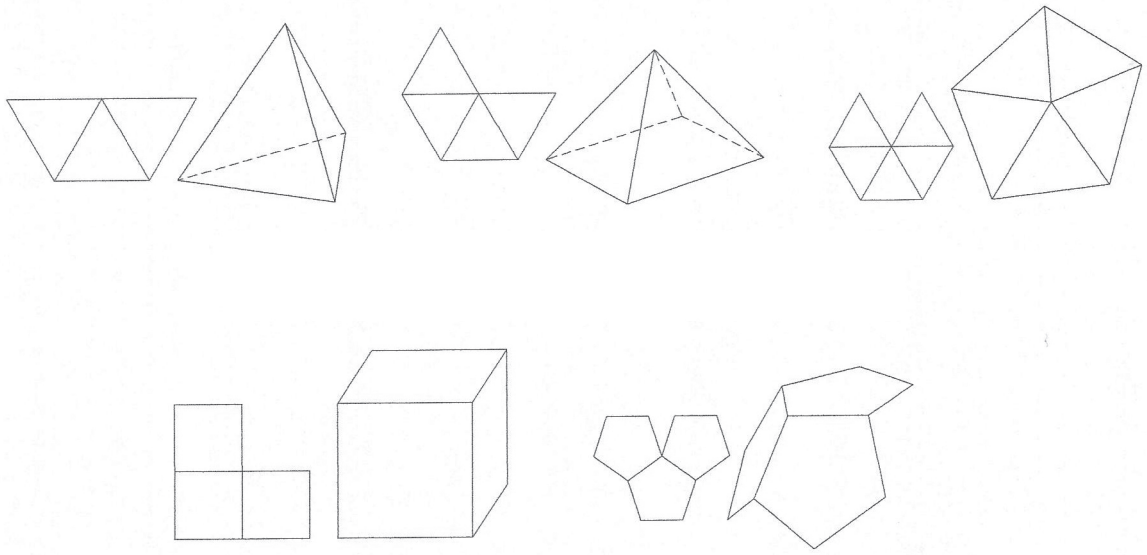

Fig. 5 - O triângulo na geração do tetraedro, do octaedro e do icosaedro; o quadrado na geração do cubo; e o pentágono na geração do dodecaedro.

Os poliedros regulares gozam de vários tipos de simetria. No presente contexto, o tipo de simetria que interessa considerar é a simetria central, em relação a um ponto do espaço que é equidistante dos vértices, das faces e das arestas e que corresponde, respetivamente, ao centro da esfera circunscrita, da esfera inscrita e da interesfera (Fig. 6).

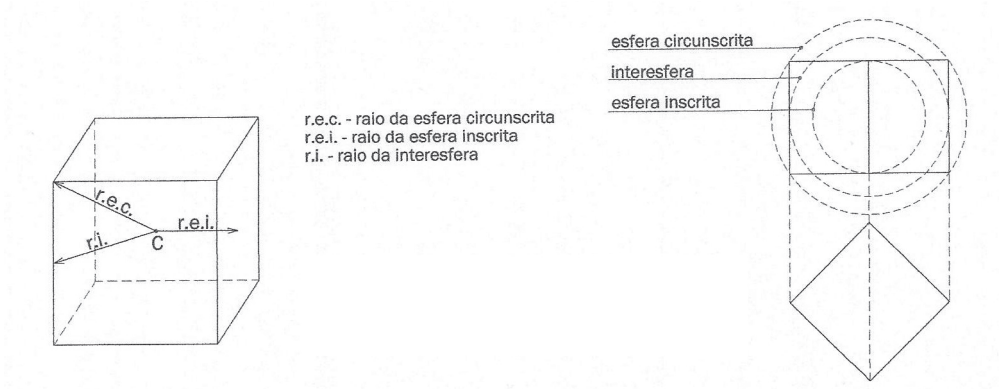

Fig. 6 - As distâncias do centro do sólido às faces e aos vértices correspondem aos raios das esferas inscrita e circunscrita.
A distância do centro às arestas corresponde ao raio da interesfera.

Uma reflexão prévia acerca do comportamento de malhas planas quando são sujeitas a forças exteriores talvez permita antecipar o comportamento mecânico dos domos geodésicos.

Sabemos que se for exercida pressão, em todas as direções do plano, sobre um conjunto de células circulares deformáveis, tenderá a emergir uma malha hexagonal – que, aliás, se encontra em muitos tecidos celulares, como, por exemplo, os olhos das trilobites e de várias famílias de insetos (Fig. 7). Construir um domo geodésico recorrendo à associação de hexágonos prefigura-se uma boa opção, sobretudo do ponto de vista da economia de meios, embora os hexágonos não possam ser (todos) regulares – uma vez que, através da justaposição de hexágonos regulares se logra preencher a superfície plana e não a superfície curva esférica, como já vimos.

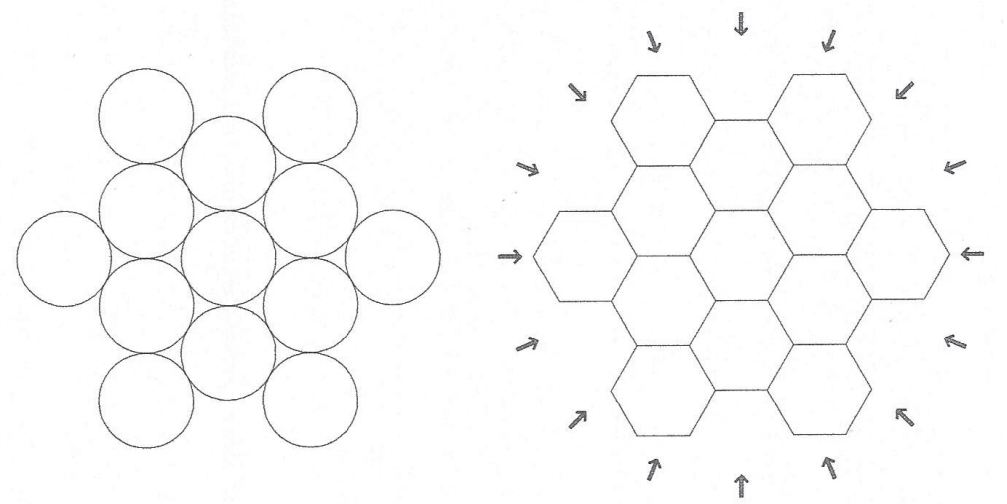

Fig. 7 - Células circulares sujeitas a pressão experior tendem a organizar-se segundo hexágonos - tal como sucede nos tecidos celulares dos olhos de muitos insetos.

A planificação do icosaedro – que conta com vinte triângulos equiláteros como faces – pode corresponder à da figura 8. Ora bem, se inscrevermos hexágonos nos triângulos, obteremos a planificação parcial de um poliedro que deriva evidentemente do icosaedro, em que as vinte faces hexagonais serão ligadas entre si através de pentágonos regulares. No final, obteremos um poliedro com 32 faces – 20 hexágonos e 12 pentágonos[7] (Fig. 9). Trata-se

[7] Podemos encarar o pentágono como uma 'contração' do hexágono que permite fazer a transposição das duas dimensões (do plano) para as três dimensões (da esfera).

de um poliedro semi-regular – o icosaedro truncado – em que os vértices se encontram todos à mesma distância do centro, mas as faces não, uma vez que são de dois tipos. Podemos afirmar que o icosaedro truncado tem esfera circunscrita, mas não tem esfera inscrita[8]. O icosaedro truncado é um dos poliedros mais frequentemente utilizados como elemento gerador de domos geodésicos, através da subdivisão das suas faces[9]. Na opinião de Attilio Marcolli,

Ma questa configurazione è quella dell'icosaedro tronco [...] che è pertanto la vera figura protagonista del processo di trasformazione sferica, la chiave interpretativa della grammatica trasformazionale, che è lo scopo di tutto questo nostro studio [...][10].

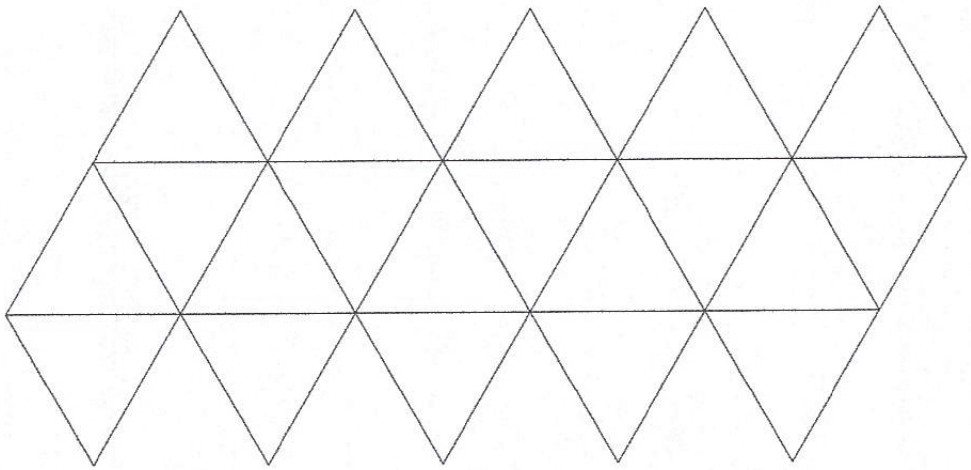

Fig. 8 - Planificação do icosaedro.

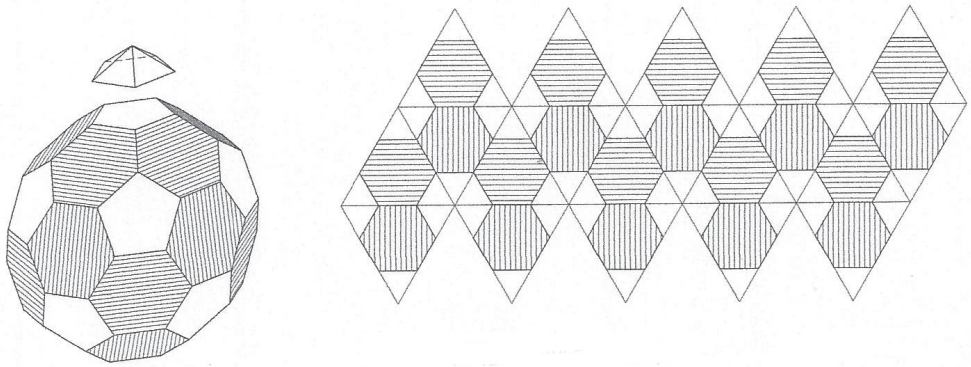

Fig. 9 - Icosaedro truncado obtido a partir da planificação do icosaedro.

Uma pressão exterior exercida nos dois sentidos de uma direção, aplicada a uma estrutura quadrangular deformável, tenderá a transformá-la numa malha de losangos, mais ou menos achatada, em função da intensidade da força e do grau de deformabilidade da estrutura (Fig. 10). Construir um domo geodésico recorrendo à associação de quadriláteros prefigura-se uma má opção, sobretudo do ponto de vista estrutural – embora seja geometricamente possível utilizar o cubo como elemento gerador de domos geodésicos.

[8] Reparemos que existe uma esfera que é tangente às vinte faces hexagonais e outra, com um raio ligeiramente maior, que é tangente às doze faces pentagonais. Como as faces não se encontram todas à mesma distância do centro, o sólido não tem esfera inscrita.

[9] Como o icosaedro truncado tem já um número relativamente elevado de faces, pode ser utilizado diretamente como domo, sem qualquer subdivisão das respetivas faces. O icosaedro truncado é também usado com frequência na fabricação de bolas de futebol.

[10] A. Marcolli, *Teoria del Campo 2 – corso di metolologia della visione*, p. 219.

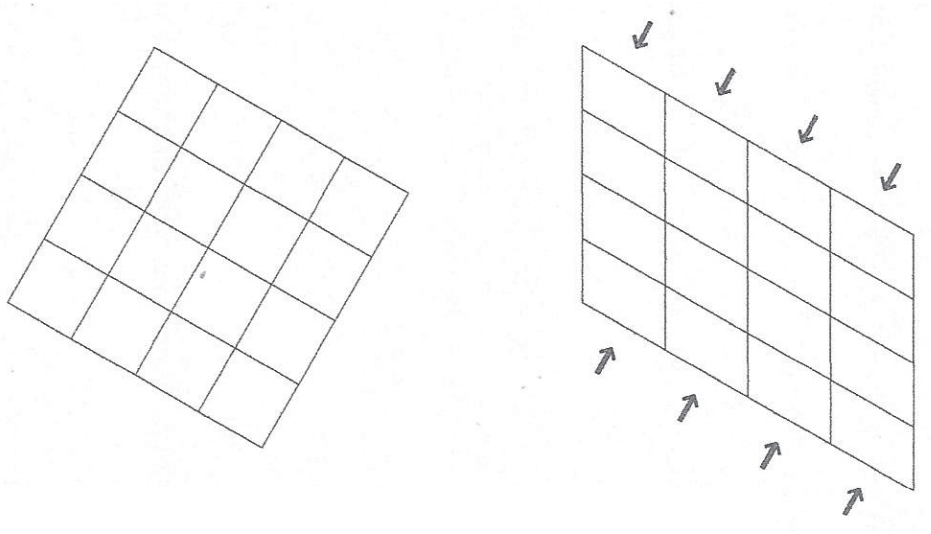

Fig. 10 - Deformação de uma estrutura quadrangular
pela ação de uma força exterior unidirecional.

Por outro lado, a malha triangular no preenchimento do plano dá origem à distribuição mais compacta de circunferências – tomando os vértices dos triângulos como centros das circunferências e os semi-lados dos triângulos como raios (Fig. 11). Esta propriedade indicia que a estrutura triangular é a mais isotrópica[11] no plano. Ou seja, a estrutura triangular, devido ao comprimento e aos ângulos uniformes definidos pelos seus componentes, é a mais homogénea e indeformável. Extrapolando as propriedades isotrópicas da estrutura triangular, do plano para a superfície esférica, é lícito pensar que continuará a ser a mais eficaz e indeformável, embora não seja possível obter uma malha tridimensional composta exclusivamente por triângulos equiláteros. Isso apenas sucede com os poliedros regulares de faces triangulares – o tetraedro, o octaedro e o icosaedro.

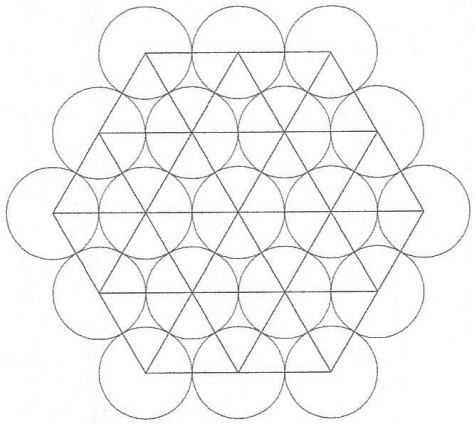

Fig. 11 - A malha triangular está na base da distribuição mais compacta de circunferências.

Embora seja possível gerar um domo geodésico a partir de qualquer poliedro regular, a escolha preferencial recai no icosaedro, por duas razões principais: por um lado, é o poliedro com maior número de faces e em que os ângulos diedros têm maior amplitude – no fundo, é o poliedro que mais se aproxima da superfície esférica – e, por outro lado, as suas faces correspondem a triângulos equiláteros que são facilmente subdivididos em triângulos semelhantes, garantindo-se, desta forma, a qualidade isotrópica da estrutura (Fig. 12).

[11] A isotropia é uma característica fundamental de algumas substâncias que consiste em conservarem as mesmas propriedades físicas e mecânicas em todas as direções do espaço.

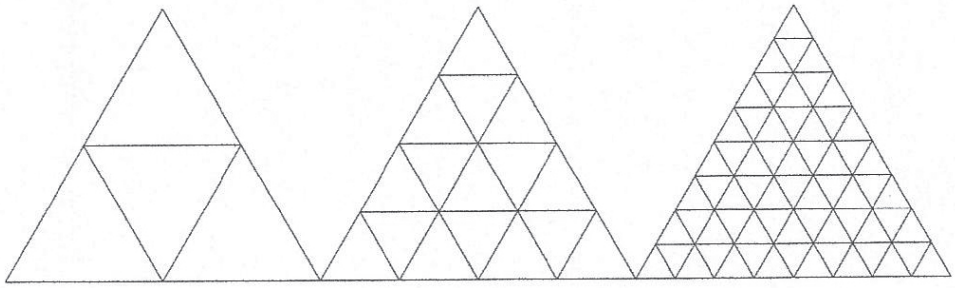

Fig. 12 - O triângulo equilátero pode ser subdividido indefinidamente em triângulos semelhantes.

5. O ICOSAEDRO E O ICOSAEDRO TRUNCADO

O icosaedro (poliedro regular) e o icosaedro truncado (poliedro semi-regular) são, pelas razões apontadas acima, os dois sólidos mais frequentemente utilizados na geração de domos geodésicos. Por isso, para construir um domo geodésico, é fundamental estudar previamente os poliedros regulares e os semi-regulares, devendo-se dispensar uma atenção especial ao icosaedro que é a peça chave, na medida em que está na origem da maioria dos domos geodésicos e do próprio icosaedro truncado. É isso precisamente que faremos em seguida, conservando os outros poliedros na sombra – devido à sua menor importância no universo dos domos geodésicos e de forma a evitar que este artigo assuma uma dimensão excessiva.

Iremos utilizar as projeções mais fáceis e intuitivas – na nossa opinião – do icosaedro, para definir geometricamente o sólido gerador do domo geodésico. Imaginemos o icosaedro com uma diagonal na vertical e definamos a sua projeção horizontal. Na posição escolhida, dez faces serão visíveis (encontrando-se viradas para cima) e dez faces serão não visíveis (encontrando-se viradas para baixo) (Fig. 13). O contorno aparente corresponderá a um decágono regular e os vértices distribuir-se-ão por quatro níveis: um vértice no nível inferior, cinco vértices no segundo nível, cinco vértices no terceiro nível e um vértice no nível superior. Para se determinar os quatro níveis a que se encontram os vértices e a projeção vertical do poliedro, consideramos um plano paralelo a duas arestas e perpendicular a quatro faces (duas visíveis e duas não visíveis, em projeção horizontal). As arestas frontais projetar-se-ão em verdadeira grandeza, enquanto que as faces perpendiculares projetar-se-ão segundo segmentos com o comprimento igual à altura dos triângulos das faces.

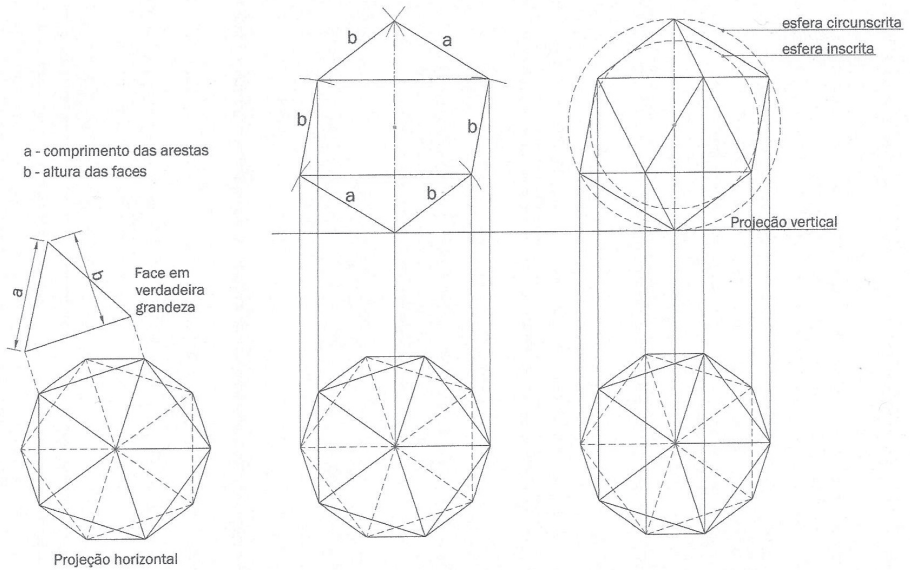

Fig. 13 - Projeções ortogonais do icosaedro.

O contorno aparente vertical do sólido é constituído pela projeção de quatro faces projetantes e duas arestas frontais. Para além das faces projetantes, a projeção vertical do icosaedro é constituída por 16 faces com projeção coincidente, duas a duas (Fig. 13).

Diretamente sobre a projeção vertical, podemos determinar o raio da esfera circunscrita e o raio da esfera inscrita no poliedro. O raio da esfera circunscrita corresponde à distância do centro do sólido aos vértices (das arestas frontais) e o raio da esfera inscrita corresponde à distância do centro do sólido às faces (projetantes)[12].

O icosaedro truncado obtém-se seccionando as arestas do icosaedro a 1/3 do seu comprimento e subtraindo ao sólido as doze pirâmides pentagonais resultantes (Fig. 14).

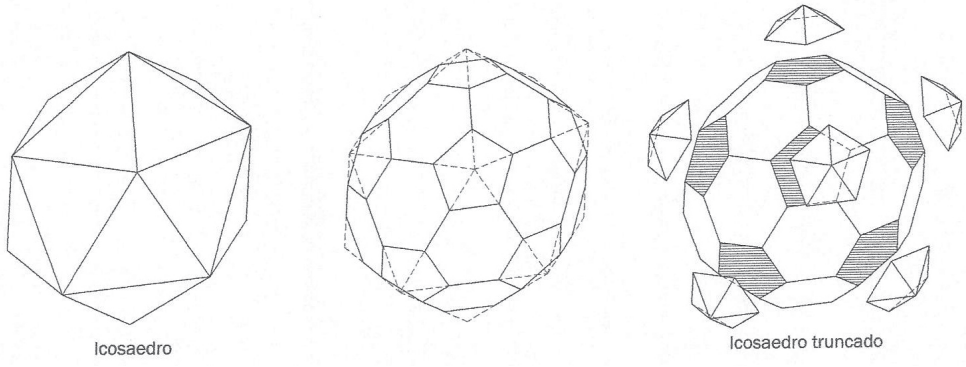

Fig. 14 - Obtenção do icosaedro truncado a partir do icosaedro.

6. Buckminster Fuller e o domo geodésico

Quando ouvimos a expressão "domo geodésico", existe a tendência para pensar exclusivamente em Buckminster Fuller, mas isso é um erro. Tanto do ponto de vista da história da arquitetura, como do ponto de vista da história da ciência, a Geodesia existiria sem o contributo de Fuller, que foi, no entanto, extraordinariamente importante.

Foi sob a orientação de um especialista em instrumentos óticos – o Eng.º Walhter Bauersfeld – que, em 1922, foi construído o primeiro domo no ocidente, mais precisamente na cidade de Jena, Alemanha. Com efeito, Bauersfeld desenhou uma estrutura geodésica a partir do icosaedro, com o objetivo de dar forma ao primeiro planetário do mundo com sistema de projeção. Isto ocorreu mais de 20 anos antes de Fuller sistematizar os processos de obtenção e de difundir a cúpula geodésica. Basicamente, o que Fuller fez, algumas décadas mais tarde, foi provar a universalidade do princípio da Geodesia – ou seja, que é possível obter uma cúpula geodésica a partir de qualquer poliedro regular ou semi-regular inscritível numa esfera – e desenvolveu a respetiva técnica construtiva, através de inúmeras estruturas que teve a oportunidade de construir ao longo da sua vida.

Vamos ver como podemos definir uma estrutura geodésica a partir do icosaedro, por um processo cuja autoria é atribuída a Buckminster Fuller e que é descrito por Attilio Marcolli[13]:

O processo consiste basicamente em dividir cada face do icosaedro em triângulos equiláteros iguais e projetar radialmente os vértices desses triângulos na esfera circunscrita. O centro de projeção será, naturalmente, o centro do icosaedro – que coincide com o centro das esferas inscrita e circunscrita – e a superfície de projeção é a esfera circunscrita. Quanto mais forem subdivididas as faces do icosaedro, mais triângulos obteremos e, consequentemente, mais faces terá a geodésica, que se aproximará cada vez mais da superfície esférica.

[12] A distância do centro do sólido às arestas (frontais) corresponderá ao raio da interesfera.
[13] A. Marcolli, *op. cit.*, pp. 203-206.

A frequência da geodésica corresponde ao número de vezes em que são divididas as arestas do icosaedro – 2, 3, 4, 5, etc. A geodésica de frequência 3, por exemplo, resulta da divisão em três partes da aresta do icosaedro, dando origem cada face do sólido a 9 faces da geodésica que será composta por 180 (9x20) faces, no total. A geodésica de frequência 5 resulta da divisão em cinco partes da aresta do icosaedro, dando origem cada face do sólido a 25 faces da geodésica que será composta por 500 (25x20) faces, no total (Fig. 15).

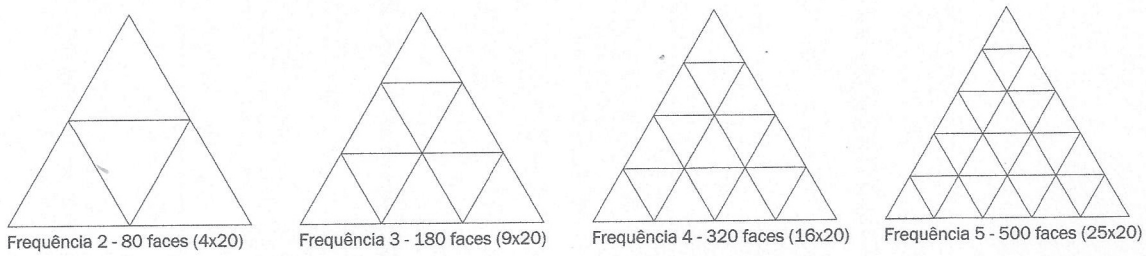

Fig. 15 - Subdivisão das faces do icosaedro, em função do número de faces pretendidas para o domo geodésico.

No caso da geodésica de frequência 2, obtemos três novos pontos que são os pontos médios das arestas do icosaedro e que serão transformados em vértices da geodésica. O triângulo que tem por vértices os pontos médios das arestas é transformado em outro triângulo equilátero (de maiores dimensões) porque é paralelo às faces do icosaedro gerador, mas os outros três são transformados em triângulos isósceles. Concluímos que a geodésica de frequência 2 será constituída por 20 faces que são triângulos equiláteros (paralelos às faces do icosaedro) e 60 faces que são triângulos isósceles iguais (Fig. 16).

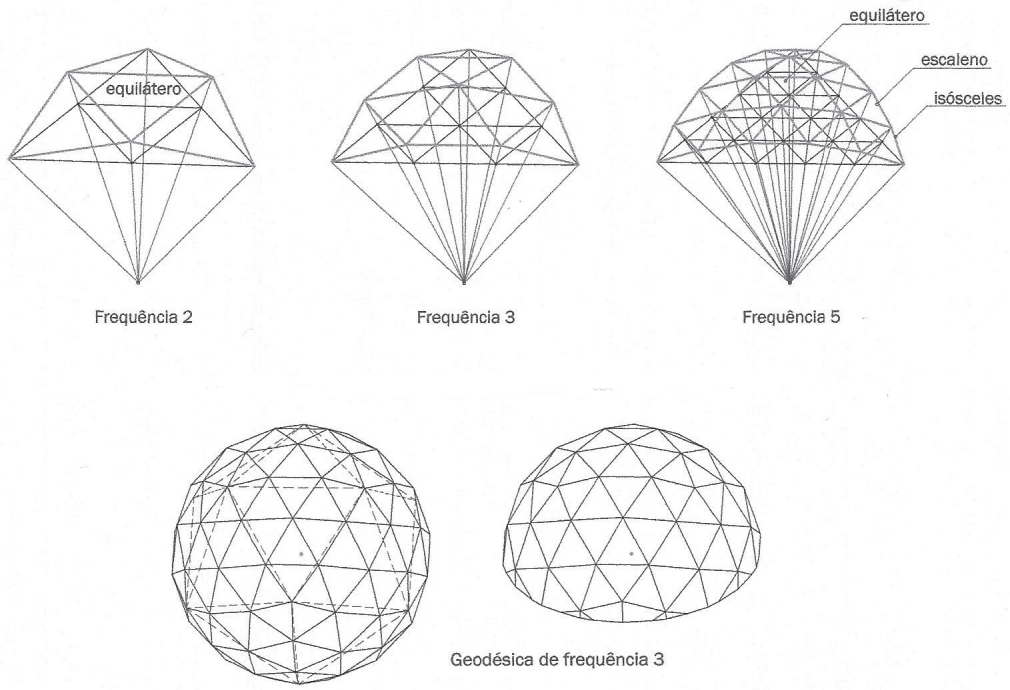

Fig. 16 - Geração de geodésicas de diferentes frequências.

No caso da geodésica de frequência 3, obtemos sete novos pontos que resultam da divisão das faces do icosaedro em nove partes e que vão ser transformados em vértices da geodésica. Neste caso, todos os triângulos da geodésica são isósceles, por serem oblíquos relativamente à face do icosaedro gerador – 60 (3x20) em torno dos vértices e 120 (6x20) em torno do centro das faces do icosaedro gerador (Fig. 16).

A geodésica de frequência 5 conta com 500 faces, em que 20 são triângulos equiláteros, 240 são triângulos isósceles de quatro tipos e 240 são triângulos escalenos de dois tipos (Fig. 15 e Fig. 16).

Na figura 17, está representada a estrutura geodésica constituída por 105 faces, obtida a partir do icosaedro truncado. A porção desenhada da estrutura desenvolve-se nos cinco níveis superiores da esfera circunscrita e corresponde a cerca de 5/9 da geodésica completa que tem 9 níveis e é composta por 180 faces (5x12)+(6x20).

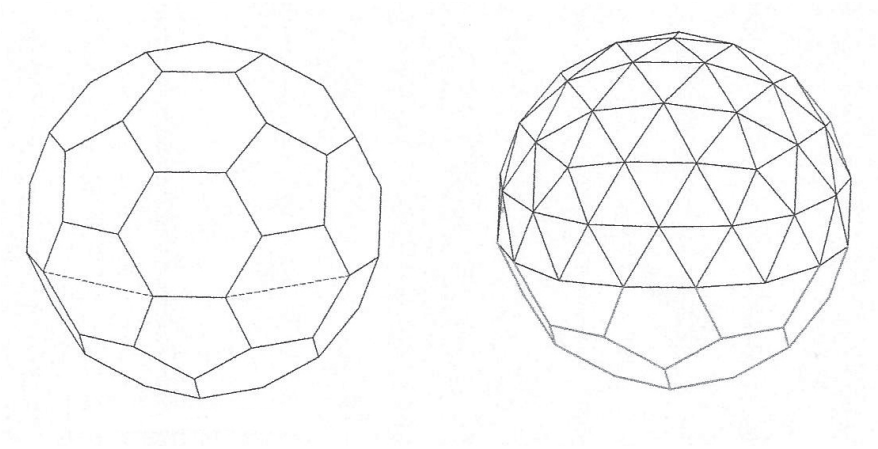

Fig. 17 - Estrutura geodésica obtida a partir do icosaedro truncado.

7. Algumas indicações úteis

Com as tecnologias disponíveis, é relativamente fácil definir geometricamente e com rigor um domo geodésico. Basta desenhar um icosaedro em três dimensões, usando as indicações dadas na secção 5, subdividir as faces, em função da frequência pretendida para a estrutura e unir os vértices dos triângulos inscritos nas faces ao centro do poliedro. Em seguida, deveremos medir o comprimento desses segmentos e o comprimento do raio da esfera circunscrita. Por fim, empregando uma regra de três simples, determinamos o fator de ampliação desses segmentos para que a sua extremidade fique situada na esfera circunscrita. A extremidade desses segmentos ampliados a partir do centro corresponderá aos vértices da geodésica.

Quando se constrói um domo geodésico, é frequente pretendermos que cumpra a função de cúpula. Daí ser frequente que o domo assuma a forma hemisférica, verificando-se a redução para cerca de metade do número de faces.

Apenas as geodésicas em que a frequência corresponde a um número par são passíveis de serem divididas exatamente a meio. Apenas estas geodésicas contêm os vértices que resultam da projeção dos pontos médios das arestas do icosaedro gerador e que são complanares com o centro de projeção. As cúpulas geodésicas que resultam de domos em que a frequência corresponde a um número ímpar não podem ser rigorosamente hemisféricas e, neste caso, as arestas da base não são complanares. Isto quer dizer que, se a superfície de assentamento for plana, a cúpula ficará apoiada apenas em alguns vértices – circunstância que enfraquecerá a estrutura. Se seccionarmos a geodésica pelo plano horizontal que contém o seu centro, a base passa a ser horizontal – evidentemente – mas a sua faixa inferior passa a ser irregular, como está patente na geodésica de frequência 3 da figura 16.

À partida, parece-nos que existem duas posições de referência para o icosaedro gerador da geodésica – com uma diagonal vertical e com as bases horizontais (Fig. 18). Se tivermos a intenção de seccionar a geodésica para a assentar num plano horizontal, o icosaedro gerador deverá ser colocado com uma diagonal na vertical. Se colocarmos o icosaedro com

as bases horizontais, o seccionamento da geodésica é complexo e não é contínuo, o que está exemplificado na figura 19, através de uma geodésica hemisférica de frequência 4. Se não tivermos a intenção de seccionar a geodésica, a posição do icosaedro gerador não é relevante.

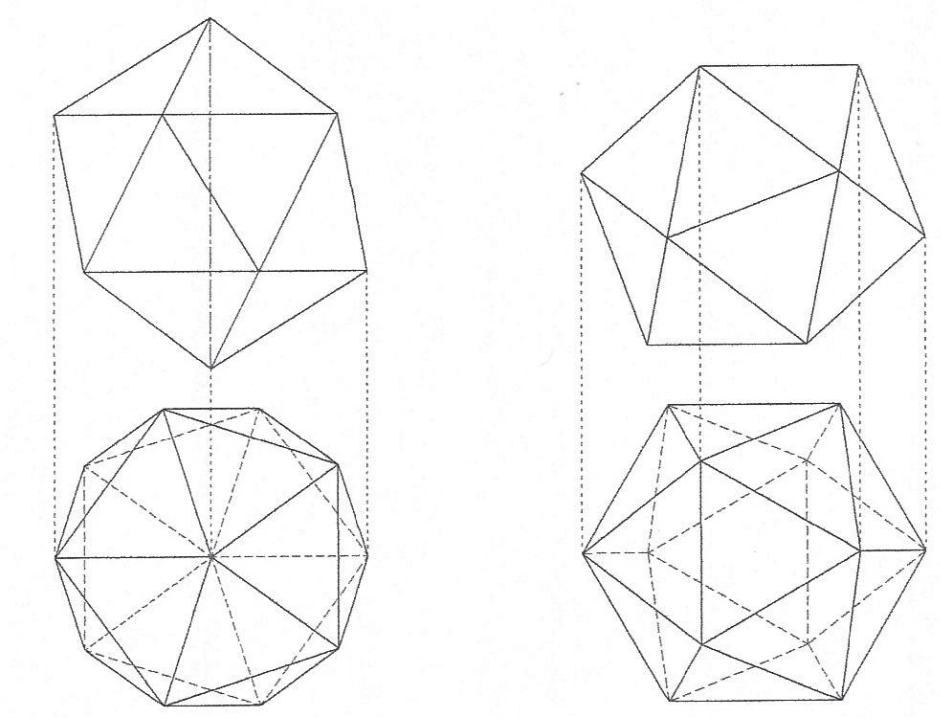

Fig. 18 - Posições de referência do icosaedro gerador da geodésica.

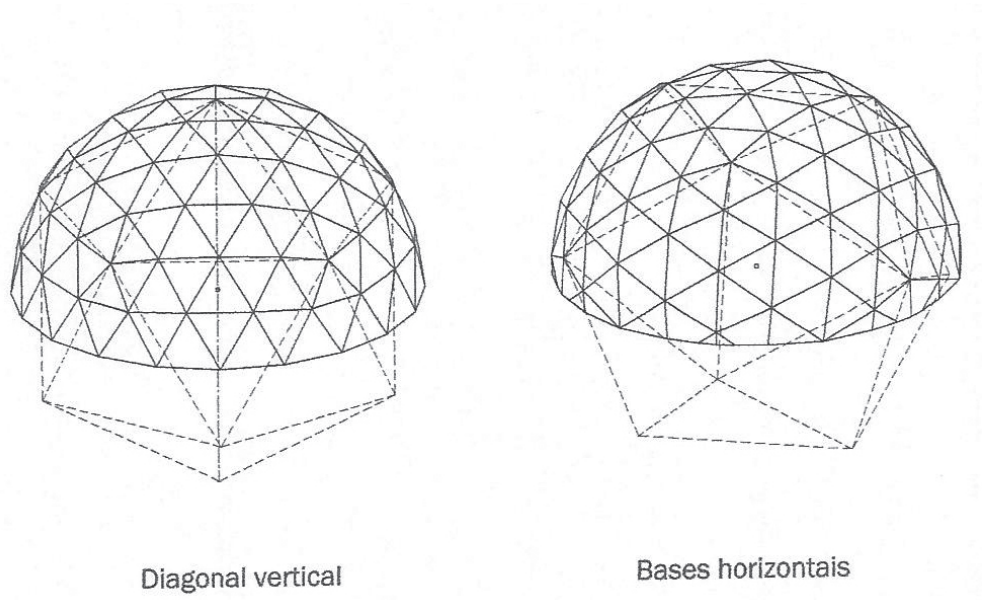

Fig. 19 - As posições de referência do icosaedro gerador da geodésica.

8. Conclusão

O autor deste artigo teve a oportunidade de construir três domos geodésicos de diferentes tipos e dimensões, explorando diversas técnicas e materiais. A opção construtiva que se revelou mais económica e eficaz foi o recurso a tubo de ferro. Nos vértices da estrutura, as extremidades dos tubos foram esmagadas, com o objetivo de serem sobrepostas e

atravessadas por um parafuso de aço. Para além de esmagadas, as extremidades dos tubos também foram arredondadas, de forma a preservar-se a tela de revestimento.

Para terminar, sugerimos que o leitor (re)veja a imponente e bela geodésica de frequência 16, obtida a partir do icosaedro, que Buckminster Fuller desenhou para Montreal, construída em 1967. Se o domo geodésico não fosse seccionado na base, teria 5120 (162x20) faces.

Sugerimos também que (re)visite o Instituto público ligado à gestão do meio ambiente, da autoria de Shuhei Endo, situado em Sayo-cho, no Japão (2006).

E sugerimos, finalmente, que (re)veja as casas pré-fabricadas desenhadas pela dupla dinamarquesa Kári Thomsen (arquiteto) e Ole Vanggaard (engenheiro) para as ilhas Faroé, na Dinamarca.

A contínua descoberta de novos materiais e processos construtivos contribui para a evolução permanente da arquitetura, em geral, e da construção dos domos geodésicos, em particular. Após a leitura deste texto e após (re)visitar as obras propostas, esperamos que o leitor se sinta tocado pelo universo dos domos geodésicos. Pela nossa parte, achamos fascinante a beleza e consideramos que a eficiência construtiva e energética dos domos geodésicos – devido à sua forma esférica – dificilmente será ultrapassável.

Bibliografia

CORAZZI, Roberto, Geometria delle forme I poliedri semiregolari, Alinea editrice, Firenze, 1984.

GHYKA, Matila C., Esthétique des proportions dans la nature et dans les arts, Éditions du Rocher, Floch à Mayenne, 1998.

MARCOLLI, Attilio, Teoria del campo 2 – Corso di metodologia della visione, 3.ª edição, Sansoni, Firenze, 1991.

LUÍS FILIPE MARQUES PINTO

Arquiteto. Professor Auxiliar na Faculdade de Arquitetura da Universidade Lusíada do Porto.

lfgmpinto@gmail.com