

# TetraScript: Sistema integrado para otimizar a iluminação natural num espaço circunscrito

**Gonçalo Castro Henriques**

Faculdade Arquitectura Universidade Técnica Lisboa /X-Ref Architectural Research & Development, Portugal  
gch@x-ref.org

**José Pinto Duarte**

Faculdade Arquitectura Universidade Técnica Lisboa, Portugal  
jduarte@fa.utl.pt

**Joaquim Oliveira Fonseca**

Faculdade Engenharia Porto, Portugal  
fonseca@fe.up.pt

**Abstract.** *The purpose of this research is to develop a process capable of optimizing the capture of light in a circumscribed space, using a responsive system of skylights. Research is focused on the design of irregular dome-like pavilion spaces but the envisioned process might be applied to other functional, formal, and spatial typologies. A process based on scripting generates a matrix of components based on geographic situation, and sun orientation. The integration of conception and fabrication with digital tools (CAD-CAM) enabled the construction of this non standard, parametric geometry, diminishing the costs of production, allowing personalization and assuring global sustainability.*

**Keywords:** *digital fabrication; generative systems; cad-cam.*

## 1. Introdução

No modelo de desenvolvimento actual, a indústria da construção consome muitos recursos físicos, energéticos e humanos. O resultado deste modelo de construção é observável no meio construído que esgota recursos naturais. Quando comparadas as estratégias humana e natural para os utilizar, a primeira é pouco eficiente. A estratégia natural está assente em leis gerais de optimização e processos de adaptação locais, construindo com o mínimo de matéria e energia, enquanto a estratégia dominante na construção utiliza muitos recursos, valorizando aspectos económicos imediatos, atribuindo pouca relevância às características locais e pessoais.

A tecnologia é vista como processo global com poucas contrapartidas locais e ambientais. Com a investigação presente pretende-se demonstrar como as novas tecnologias podem ter uma actuação global no processo de construção tornando o mesmo mais eficiente e permitindo uma maior personalização, ao desenvolver estratégias de actuação locais de interacção com o meio. O projecto e fabrico de um pavilhão, chamado TetraScript, capaz de auto-controlar o nível de iluminação natural é usado como caso de estudo. O desenvolvimento da solução exigiu conhecimentos de várias áreas disciplinares para além da arquitectura, como Engenharia Civil (estruturas), Engenharia Mecânica (fabricação) e Engenharia Electrotécnica e de Computadores (optimização e automação). A inclusão de um protótipo do pavilhão numa exposição em Florença motivou o desenvolvimento da investigação, exigindo exequibilidade ao projecto. O protótipo representa um estádio intermédio da investigação e constitui o foco deste artigo.

## 2. Estrutura da investigação

A literatura actual inclui exemplos de pesquisa relacionada com a optimização material de sistemas naturais (Weinstock, 2004), com a optimização ambiental de projectos de edificios (Caldas, 2003), com a fabricação em série personalizada (Sass et al., 2005) e com a automatização do controlo ambiental (Cardoso et al., 2007). A pesquisa desenvolvida propõe um sistema simplificado que combina aspectos destas três últimas abordagens para viabilizar a estrutura

pavilhonar desejada, a qual inclui três etapas independentes mas interligadas: (1) o desenvolvimento de um sistema de projecto para a geração de soluções adequadas à localização geográfica com recurso a uma linguagem de programação de elevada abstracção (scripting); (2) o desenvolvimento de um sistema de produção para materializar as soluções com recurso a tecnologias de CAD/CAM (fabricação); e (3) o uso de sistemas de controlo automático das aberturas para controlar a luz no interior do pavilhão (automação).

Na primeira fase, foi desenvolvido um algoritmo - em Visual Basic - para dividir uma superfície curva base, gerando clarabóias individuais, que se podem abrir controlando a iluminação interior. Cada clarabóia tem a forma de uma pirâmide, com quatro faces triangulares que para abrir rodam sobre a aresta da base. O recurso à programação permitiu testar diferentes variações paramétricas das clarabóias em diferentes superfícies. Foram experimentados vários interfaces para definir o valor das aberturas. No primeiro, os valores eram simplesmente importados de uma folha de Excel para o sistema de CAD utilizado, o Rhinoceros. Noutra solução, os valores eram obtidos a partir de bitmaps. Na solução final, evolui-se para um algoritmo capaz de relacionar a luz (factor global) com a inclinação da superfície (factor local).

Foi desenvolvido um pavilhão, com 6x4x3 m, em forma de cúpula, para testar a optimização da iluminação interior em função da localização geográfica e da hora do dia. A superfície base escolhida, de acordo com as restrições geográficas e dimensionais, procurou maximizar a capacidade da superfície receber luz natural. A selecção da forma foi efectuada manualmente, mas o objectivo é automatizar o processo no futuro. Para mais detalhes sobre esta fase, consultar Henriques et al. (2009).

Na segunda fase foram tidas em consideração a realidade física, incluindo factores como as propriedades dos materiais e a escala, para optimizar a forma, de modo a respondendo a restrições estruturais e de fabrico. Esta fase constitui o focus deste artigo. O resultado destas duas primeiras fases encontra-se representado no Figura 1.

Na terceira fase, está a ser desenvolvido um sistema inteligente para controlar as aberturas, tendo em conta factores climáticos externos e

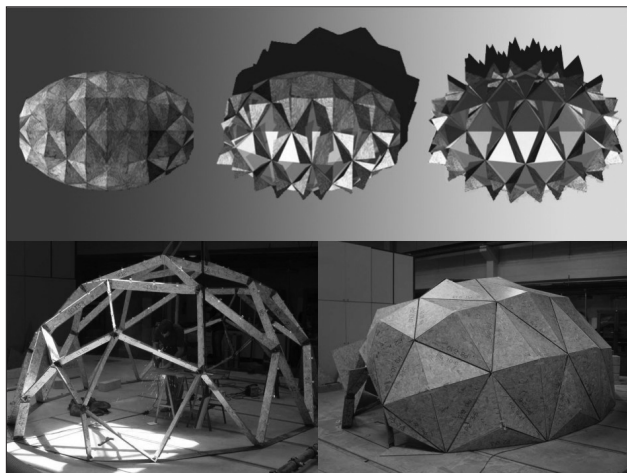


Figura 1. Conceito TetraScript e montagem do pavilhão.

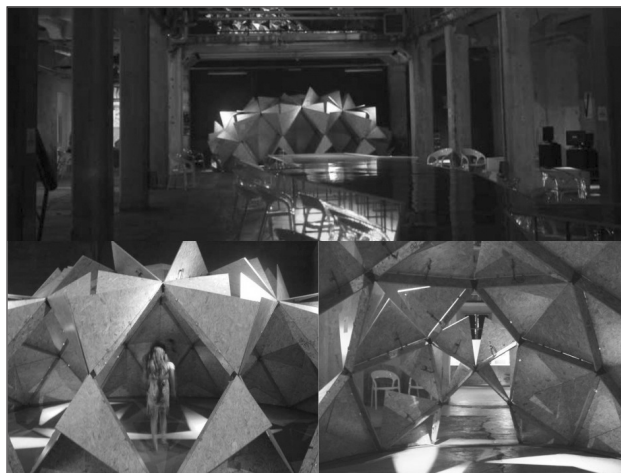


Figura 2

necessidades de iluminação internas. Aplicando o algoritmo criado na primeira fase é possível, através da definição da posição da fonte de luz, obter valores para o grau de abertura das clarabóias para o local e hora pretendidos. Combinando estas informações com valores medidos por sensores, é possível implementar um sistema responsivo, transmitindo os dados a uma máquina de inteligência central (computador) através de um interface (controlador de lógica programável) para gerir as variações de posição e intensidade da fonte de luz natural de modo a informar localmente os actuadores. Foram estudadas diferentes soluções para a implementação do sistema recorrendo a diferentes tecnologias, procurando a de mais fácil aplicação prática. Espera-se que a solução adoptada, que foi testada num módulo, possa servir de base para a implementação futura de um sistema integrado que englobe todas as clarabóias.

## 3. Processo e solução.

### 3.1 Características e particularidades geométricas

Historicamente, a utilização de determinadas geometrias é influenciada pela tecnologia disponível para construir. Neste pavilhão, a capacidade de captar luz e as opções de fabrico e construção, antecederam a optimização estrutural, ao contrário do que sucede frequentemente na construção tradicional. O objectivo foi construir uma estrutura leve do tipo alveolar e encontrar um princípio geométrico para a gerar e materializar. A superfície base, esferóide, foi dividida em alvéolos correspondentes às clarabóias através de um programa de computador, sendo definido um conjunto de pontos correspondentes ao encontro dos alvéolos e criado em cada um deles um vector normal com comprimento constante correspondente à altura dos alvéolos, mas que resulta com diferentes inclinações. Concebeu-se ligações da mesma família, planificáveis que permitem fechar geometricamente a estrutura. As barras da estrutura são definidas com base em duas rectas que unem os pontos superiores e inferiores de dois vectores consecutivos. A estrutura construída é constituída por 42 nós, 82 barras e 140 placas de revestimento com forma triangular de dimensão variável formando a cobertura. As ligações entre as barras foram idealizadas como ligações aço-madeira em que as vigas de madeira são ligadas por chapas de aço fixadas com ligadores metálicos.

### 3.2 Forma

Apresentar uma cobertura em cúpula em Florença, onde foi construída a maior cúpula em alvenaria, foi um desafio. Os materiais e processo construtivos utilizados são determinantes para concretizar fisicamente qualquer tipo de geometria. Após estudar a cúpula da catedral da igreja de Santa Maria del Fiore (Brunelleschi, 1420-36), conhecida como Il Duomo, e a estrutura proposta verificou-se que não sendo a forma base um sólido platónico, existe um desafio geométrico adicional.

Il Duomo tem como base um octaedro, com uma secção em forma de arco parabólico. Geometricamente difere da esfera, por não ser uma superfície de revolução perfeita, o que tem consequências construtivas. As cúpulas esféricas em alvenaria são construídas utilizando uma técnica em que os tijolos são colocados em fiadas, tendo cada uma inclinação crescente. Para evitar que aqueles caíam à medida que a construção cresce, são colocados tijolos ao cutelo, na vertical sobre a menor face, de quando em quando. Não sendo esférica e tendo quebras, foi necessário desenvolver um processo para resolver o encontro dos tijolos nas arestas, o que foi feito com recurso a oito arcos que asseguram o fecho da estrutura. As superfícies a que pertencem os tijolos não são esféricas, mas esferóides, os tijolos ao cutelo pertencem a uma curva helicoidal em vez de esférica, existindo uma relação estreita entre geometria, materiais e processo construtivo.

No protótipo TetraScript o desafio foi construir uma cobertura leve mas resistente, o mais permeável possível à luz, sendo para tal definida uma estrutura de suporte ligeira e esbelta, baseada em vectores normais à superfície esferóide, como o intuito de favorecer a entrada de luz. Uma vez definidas as dimensões máximas do protótipo (6x4x3 m) em função do espaço disponível na exposição, utilizou-se um processo iterativo selectivo para encontrar a superfície esferóide de base e alçado elípticos com maior área por volume e a melhor divisão e orientação das entradas de luz. A estrutura de suporte tem como base nós normais à superfície. Como vimos, os nós, apesar de terem inclinações diferentes, são da mesma família, possibilitando a codificação paramétrica da forma, o que permitiu fabrico e montagem expeditos.

A estrutura proposta está, em termos materiais, mais relacionada com as formas geodésicas desenvolvidas por Buckminster Fuller. No entanto, nas coberturas geodésicas, existe um procedimento matemático para racionalizar a estrutura, que resulta na padronização de elementos e nós de ligação. Normalmente tal procedimento tem como base um polígono ou esfera, que é triangulado e normalizado para que o seu comprimento seja unitário (Müller, 2008). Conforme já referido a estrutura TetraScript não teve como ponto de partida um sólido platónico, nem como objectivo primeiro a optimização estrutural e a normalização dos seus componentes. O princípio orientador foi a optimização da entrada de luz e da superfície base o que obrigou a uma definição geométrica local, topológica e não genérica. Em vez de uma resposta global platónica ou ideal, há uma geometria associativa para cada ponto.

O processo utilizado por Fuller, após a revolução industrial, está baseado na repetição de elementos e na produção em série resultando em elementos modulares preferencialmente iguais. Com as novas tecnologias digitais emergiu o paradigma da variação paramétrica que permite a personalização em série (Davis, 1987). Como vimos com o caso apresentado, estas tecnologias permitem resolver problemas

geométricos complexos e codificar soluções parametrizadas que resultam na geração de componentes diferenciados, possíveis de produzir com o fabrico digital.

### 3.3 Material

O material base escolhido foi um derivado de madeira - aglomerado de partículas longas e orientadas (OSB) - de fácil tratabilidade e corte, apropriado para estruturas personalizadas, com boa relação densidade/resistência e custo baixo. O OSB oferece novas possibilidades estruturais como material compósito, no entanto, o seu comportamento estrutural é ainda pouco conhecido. Isto exigiu a sistematização das suas características físicas necessárias para o cálculo como densidade, tensão de ruptura, módulo young, entre outras.

### 3.4 Fabrico, processos e recursos

O pavilhão foi decomposto em subconjuntos de componentes cada vez menores, tendo sido indispensável a sua racionalização para evitar um aumento exponencial de elementos. Foi também desenvolvido um programa para planificar e identificar os elementos para fabrico CNC. Primeiro, definiram-se os formatos e o processo de fabrico das barras e painéis em OSB. Depois, estes foram mecanizados e receberam acabamento final. As máquinas disponíveis para fabricar os nós metálicos tinham dimensões pequenas e software antiquado. Estes condicionantes obrigaram a cortar as chapas numa guilhotina industrial e a desenvolver um programa para preparar os ficheiros DXF, depois ISO para cada máquina. O corte de contornos, nomenclatura e furos de cada peça foram efectuados separadamente em diferentes máquinas. Caso a operação fosse toda realizada numa chapa e máquinas únicas, seria mais rápido, haveria um menor número operações e seria reduzida a possibilidade de erro humano. Os nós foram unidos por soldadura de precisão de eléctrodo-tungsténio (TIG, soldadura tungsténio inerte com gás).

### 3.5 Análise estrutural

Dada a geometria complexa do pavilhão, foi necessário utilizar um programa de cálculo com interface gráfico que pudesse importar a geometria para análise, o SAP2000. Foi utilizado o modelo tridimensional inicial, considerando secções de OSB disponíveis de 12 e 18 mm. A estrutura foi analisada como um conjunto de arcos tridimensionais, em que foi desprezada a resistência da cobertura e o seu papel de casca, em virtude de esta estar frequentemente aberta e não poder ser considerada como tal. A acção de cargas e sua combinação foi definida segundo os Eurocódigos 0-1-5. Foram consideradas as seguintes acções: cargas permanentes (peso próprio das barras, placas de revestimento e ferragens, 600 kg) e cargas variáveis (sobrecarga utilização 0,3 kN/m<sup>2</sup>), considerando a cobertura acessível para trabalhos de manutenção. As acções do vento e sismo não foram consideradas. Os resultados demonstram, considerando a classe risco1 que a estrutura é auto-portante e pode sustentar uma carga pontual de duas pessoas. Foram definidos um nó semi-rígido e o número e dimensões dos ligadores, tendo em vista o fabrico. Estas escolhas foram sendo compatibilizadas com fornecedores e ferragens existentes.

### 3.6 Elementos móveis da cobertura

Foi desenvolvido um sistema automatizado para a abertura de um módulo, utilizando um processador central e 4 actuadores lineares. Foi implementado um programa de actuação diária para a exposição em Florença, assim como um comando manual dos actuadores em simultâneo e individualmente. Para os restantes painéis adaptou-se uma ferragem existente, criando várias posições de abertura para cada painel.

## 4. Discussão de resultados

O protótipo demonstrou utilidade como instrumento mediador entre conceito, processo e material, produzindo uma solução em que estes são interdependentes. A construção de soluções personalizadas com resultados tangíveis, ainda que experimentais, dificilmente seria possível recorrendo às tecnologias tradicionais. A integração digital

amplia o universo criativo. A limitação de recursos dedicados estimulou a colaboração, reforçou o pragmatismo das escolhas e estimulou a ligação universidade-indústria.

A experiência do projecto e construção do protótipo apresentou como pontos fortes: (1) processo criativo capaz de ultrapassar limites disciplinares com trabalho de equipa, (2) integração de diferentes interfaces, ferramentas e software e (3) desenvolvimento virtual e material segundo um processo de tentativa e erro. Apresentou como pontos a melhorar: (1) a necessidade de melhor integração digital, agilização de processos e software, reduzindo operações e possibilidades de erro; (2) inexistência de formatos de software standard para indústria, (3) necessidade de melhorar componentes e ligações, diminuindo o número de peças e aumentando o rigor, e (4) maior adequação ao transporte e redução de acertos de montagem, ainda que não possam ser totalmente eliminados.

## 5. Conclusões

Nos anos 60 e 70 surgiu uma vaga utópica, preocupada com valores como a sustentabilidade e a ecologia, utilizando descobertas da ciência, de que são exemplo as construções geodésicas de Fuller. No entanto, estas construções revelaram-se de desenho complexo e com diversos problemas de implementação, tendo gradualmente diminuído o seu número e não se generalizando como pretendia o seu criador. Hoje existindo a capacidade de integrar todo o processo desde o desenho ao fabrico e à construção é possível renovar estas ideias progressistas com outra segurança na sua implementação, resultado de um visão holística do processo.

As ferramentas digitais podem libertar-nos das restrições das formas platónicas e ideais, permitindo explorar outras geometrias baseadas em relações topológicas. Simultaneamente podem permitir a complementaridade entre geometria e materiais em vez de excluir este diálogo, relacionando a realidade virtual e material. Nesta perspectiva o espaço criativo digital e físico podem expandir-se com a tecnologia ao nosso dispor. Esta visão e a experimentação, num processo de tentativa e erro, assumidamente prático, foram fundamentais para conseguir materializar com sucesso o pavilhão TetraScript.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio científico do professor A. T. Estévez da ESARQ/UIC, e dos professores J. Fonseca (fabricação digital), A. Faria e R. Sousa (análise estrutural), A. C. de Brito (programação), M. R. Barbosa (automação) da FEUP. Agradecem também o apoio material e técnico das empresas Sonae Indústria, J&J Teixeira e Teclena. Gonçalo Henriques é financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) através da bolsa SFRH/BD/39034/2007.

## Referencias

- Caldas, Luísa G.:2003, Shape Generation Using Pareto Genetic Algorithms Integrating Conflicting Design Objectives in Low-Energy Architecture, CAADRIA 2003 [Proceedings of the 8th International Conference on Computer Aided Architectural Design Research in Asia, Bangkok Thailand 18-20 October 2003, pp. 681-694.
- Cardoso, Daniel; Michaud, Dennis; Sass, Lawrence: 2007, Soft Façade: Steps into the Definition of a Responsive ETFE Façade for High-rise Buildings, in Predicting the Future, 25th eCAADe Conference Proceedings, Frankfurt am Main (Germany) 26-29 September 2007, pp. 567-573.
- Henriques, Gonçalo Castro; Duarte, José Pinto; Brito, António Carvalho: 2009, TetraScript: Development of an Integrated System Capable of Optimizing Light in a Circumscribed Space, Computation: The New Realm of Architectural Design [27th eCAADe Conference Proceedings / ISBN 978-0-9541183-8-9] Istanbul (Turkey) 16-19 September 2009, pp. 31-38
- Sass, Lawrence, Shea, Kristina and Powell, Michael: 2005, Design Production: Constructing Freeform Designs with Rapid Prototyping, in Digital Design: The Quest for New Paradigms, 23rd eCAADe Conference Proceedings, Lisbon (Portugal) 21-24 September 2005, pp. 261-268.