

VOUSOIR, UMA FERRAMENTA BIM PARA O DESENHO DE ESTRUTURAS ESTEREOTÓMICAS

Pedro de Azambuja Varela⁽¹⁾, Afonso de Matos Silva⁽²⁾, Margarida Amândio⁽³⁾, Luís Sanhudo⁽⁴⁾, Nycolas Glerean⁽⁵⁾, Cristina Paixão⁽⁵⁾

(1) Faculdade de Arquitectura da Universidade do Porto, Porto, 0000-0002-7319-5019

(2) Faculdade de Arquitectura da Universidade do Porto, Porto, 0009-0009-5221-3263

(3) Built CoLAB, Porto, 0000-0002-6340-0648

(4) Built CoLAB, Porto, 0000-0002-2578-6981

(5) Built CoLAB, Porto

Resumo

Os ambientes BIM consolidaram-se como o principal espaço de trabalho para o projeto arquitetónico, integrando geometria, semântica e dados materiais num único modelo. Porém, as ferramentas atualmente disponíveis permanecem maioritariamente ancoradas em lógicas construtivas correntes, oferecendo suporte limitado a sistemas compressivos e de baixo carbono. Este artigo apresenta o desenvolvimento de um plugin para o *software* Autodesk Revit que amplia o fluxo de trabalho BIM, incorporando o desenho estereotómico e permitindo a geração de arcos, abóbadas e outros sistemas compressivos dentro da interface nativa do software.

O plugin assenta num motor estereotómico que produz geometrias como famílias Revit, totalmente compatíveis com a estrutura paramétrica da plataforma. O utilizador controla parâmetros como planta, curvatura, espessura ou subdivisão através de mecanismos nativos, obtendo atualizações instantâneas do modelo. Quantidades e dados materiais são gerados automaticamente, assegurando que a experimentação geométrica permanece ligada a informação construtiva verificável. Adicionalmente, um módulo de exportação cria ficheiros 3D identificados para fabrico digital, compatíveis com software CAM.

Embora inspirado pelo uso de materiais de baixo carbono como pedra, terra comprimida ou betão ecológico, o foco reside na integração desta lógica de projeto na prática BIM. Combinando análise UX/UI, implementação algorítmica e testes de fabrico, o projeto demonstra que a geometria estereotómica pode funcionar como entidade BIM nativa, articulando projeto, quantificação e produção num mesmo fluxo de trabalho. O resultado é uma proposta que promove uma construção sustentável, tecnicamente rigorosa e guiada pela geometria, dentro das ferramentas BIM já adotadas na indústria.

1. Introdução

O presente artigo apresenta o desenvolvimento de um *software* capaz de integrar estruturas estereotómicas em ambientes *Building Information Modelling* (BIM). A pertinência de desenvolver um Stereotomy BIM [1] reside na necessidade de aproximar o universo conceptual da estereotomia, historicamente centrado na geometria e na experimentação formal, das práticas contemporâneas de projeto, que atualmente operam quase exclusivamente em ambientes BIM. Embora a investigação académica tenha produzido ferramentas avançadas para conceção de formas funiculares e sistemas discretos em compressão, estas permanecem, em grande medida, afastadas da prática profissional corrente, seja pela exigência de competências técnicas especializadas, seja pela ausência de integração nos fluxos de trabalho que estruturam o setor. Este *software* operaria assim como ponto de convergência entre tradição construtiva e prática digital, integrando o raciocínio estereotómico na gramática quotidiana do projeto.

Ao transportar para o BIM conceitos como *macro-shape*, subdivisão da superfície, organização em cursos e definição de *voussoirs*, torna-se possível transformar a estereotomia num sistema operativo verdadeiramente utilizável no mercado. Deste modo, o *software* deixa de constituir um nicho experimental para se afirmar como um dispositivo projetual capaz de gerar informação geométrica e semântica compatível com processos colaborativos, documentação de obra e cadeias de fabrico digital. Esta integração responde à lacuna identificada entre o elevado potencial das estruturas funiculares na redução do carbono incorporado e a dificuldade prática de as conceber, orçamentar e construir no contexto real do projeto.

Por fim, o *software* proposto posiciona a estereotomia no paradigma da Indústria 4.0, permitindo que decisões de projeto incluam desde cedo variáveis de material, desempenho, fabrico e montagem. Ao associar o *Stereotomic Semantic Classification* (SSC) [2] à estrutura informacional do BIM, estas construções deixam de ser exceções prototípicas e passam a constituir alternativas plausíveis às soluções dominantes em betão armado. A pertinência é, portanto, simultaneamente ambiental, tecnológica e disciplinar, contribuindo para uma linguagem arquitetónica mais responsável, mais informada e mais alinhada com desafios contemporâneos de sustentabilidade.

2. Estereotomia e relação com CAD e BIM

2.1. A construção compressiva até aos nossos dias

A história das abóbadas e dos sistemas comprimidos acompanha a evolução das primeiras civilizações. As abóbadas mesopotâmicas em tijolo moldado ao sol constituem uma das primeiras coberturas contínuas, revelando já a intuição de que formas funiculares permitem vencer vãos com materiais aparentemente frágeis quando mantidos em compressão. Os gregos conheceram e utilizaram arcos verdadeiros em contextos técnicos específicos, como obras hidráulicas e pequenas pontes, demonstrando um domínio pontual, mas sofisticado da estereotomia. Em Roma, a introdução sistemática do arco, das abóbadas e das cúpulas de grande escala marca um ponto de viragem, combinando geometria, materiais e logística construtiva numa tecnologia robusta e replicável à escala imperial. A Idade Média herda e refina este legado, culminando nas catedrais góticas, cuja complexidade geométrica impulsiona uma ciência avançada da pedra cortada [3]. Entre os séculos XVI e XVIII, esta ciência cristaliza nos tratados de estereotomia, que sistematizam métodos rigorosos de traçado, subdivisão e corte de blocos.

Com a Revolução Industrial, este conhecimento é profundamente interrompido. O surgimento do ferro, seguido do aço e do betão armado, altera a economia da construção e desloca a prática arquitetónica para sistemas que dependem menos da geometria e mais da resistência material. A precisão geométrica da estereotomia, antes indispensável, passa a ser secundária perante a plasticidade do betão e a eficiência das estruturas metálicas. Este abandono progressivo leva ao esquecimento de um vasto património técnico e construtivo, que apenas no século XXI começa a ser recuperado através da computação, da fabricação digital e do interesse renovado por materiais de baixo carbono. Hoje, no contexto de urgência ambiental, a reintrodução de uma lógica estereotómica – atualizada, precisa e novamente produtiva – surge não como nostalgia, mas como uma alternativa tecnológica viável ao paradigma dominante de betão e aço.

2.2. Manifestações digitais estereotómicas

As manifestações digitais da estereotomia surgem no início do século XXI como continuação natural da tradição geométrica dos tratados, agora transposta para ferramentas de modelação e fabrico digital. Trevisan inaugura este movimento ao demonstrar, no início dos anos 2000, como a trompe clássica pode ser rigorosamente reconstruída através de *Computer-Aided Design* (CAD) [4], revelando que a lógica estereotómica permanece plenamente operativa em ambiente digital. Fallacara expande este território ao articular CAD e *Computer-Aided Manufacturing* (CAM), mostrando que a estereotomia não é apenas um problema de geometria, mas um ciclo completo que envolve modelação, discretização, corte e montagem, abrindo caminho para um renascimento tecnodigital da construção em pedra [5].

Em paralelo, Kilian desenvolve o CADenary [6], recuperando a tradição dos modelos pendurados de Gaudí e convertendo-a num método computacional para gerar formas funiculares que, mais tarde, foi operacionalizado por Piker [7] no plugin Kangaroo para Grasshopper. Rippmann [8] consolida este percurso com a formulação gráfica tridimensional do equilíbrio, permitindo projetar e subdividir estruturas comprimidas complexas com precisão inédita. Conjuntamente, estes contributos mostram que a estereotomia digital deixou de ser apenas estudo histórico e passou a constituir um domínio operativo, que articula forma, força e fabrico dentro de um mesmo ecossistema computacional.

3. Funcionamento do BIM estereotómico

3.1. Parâmetros

Uma abóbada estereotómica não é um sólido contínuo, mas um sistema discreto de peças em compressão. Neste contexto, a sua definição em ambiente BIM assenta num conjunto de parâmetros que controlam a geometria global, a lógica construtiva e a discretização do sistema.

A geometria da abóbada é determinada pelo tipo de curva geratriz, que pode ser circular, parabólica ou catenária e pelas suas alturas; bem como pela forma da planta de implantação, resultante do quadrilátero definido pelas paredes selecionadas (Figura 1).

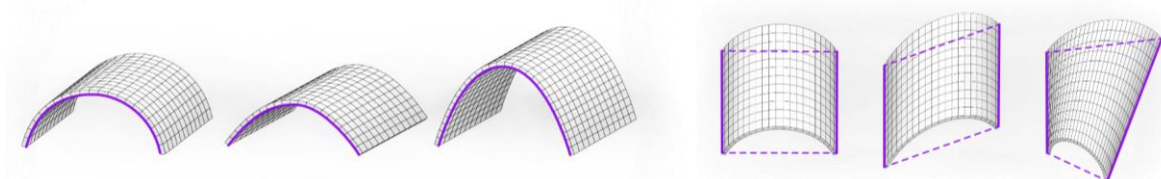


Figura 1: Tipos de curvas geratrizes e configurações de planta.

A discretização do sistema é controlada pelos parâmetros das aduelas, que permitem definir a metodologia de divisão, por subdivisões transversais e longitudinais ou por dimensionamento direto; bem como o número, a largura, o comprimento e a espessura das peças.

3.2. Estrutura estereotómica como objeto BIM paramétrico

Para representar este sistema em ambiente BIM foi realizado um estudo inicial sobre a estratégia de modelação mais adequada para articular a geometria complexa das abóbadas com a lógica paramétrica e relacional do Revit. Foram testadas três abordagens principais para a representação dos diferentes constituintes do sistema (abóbada, aduelas e saiméis): (i) a utilização de famílias de sistema com famílias adaptativas aninhadas, (ii) o aninhamento de famílias adaptativas entre si, e (iii) a organização das peças através de um grupo de famílias adaptativas.

A primeira abordagem foi invalidada, uma vez que as famílias de sistema do Revit (como *roofs*, *floors* ou *ceilings*) não suportam o aninhamento de componentes adaptativos, inviabilizando a definição das aduelas e dos saiméis como entidades paramétricas independentes. A segunda opção, baseada em famílias adaptativas aninhadas, mostrou igualmente limitações significativas, pois apenas a família adaptativa de nível superior pode ser controlada através de pontos adaptativos, perdendo-se nos elementos aninhados a capacidade de posicionamento e manipulação geométrica direta.

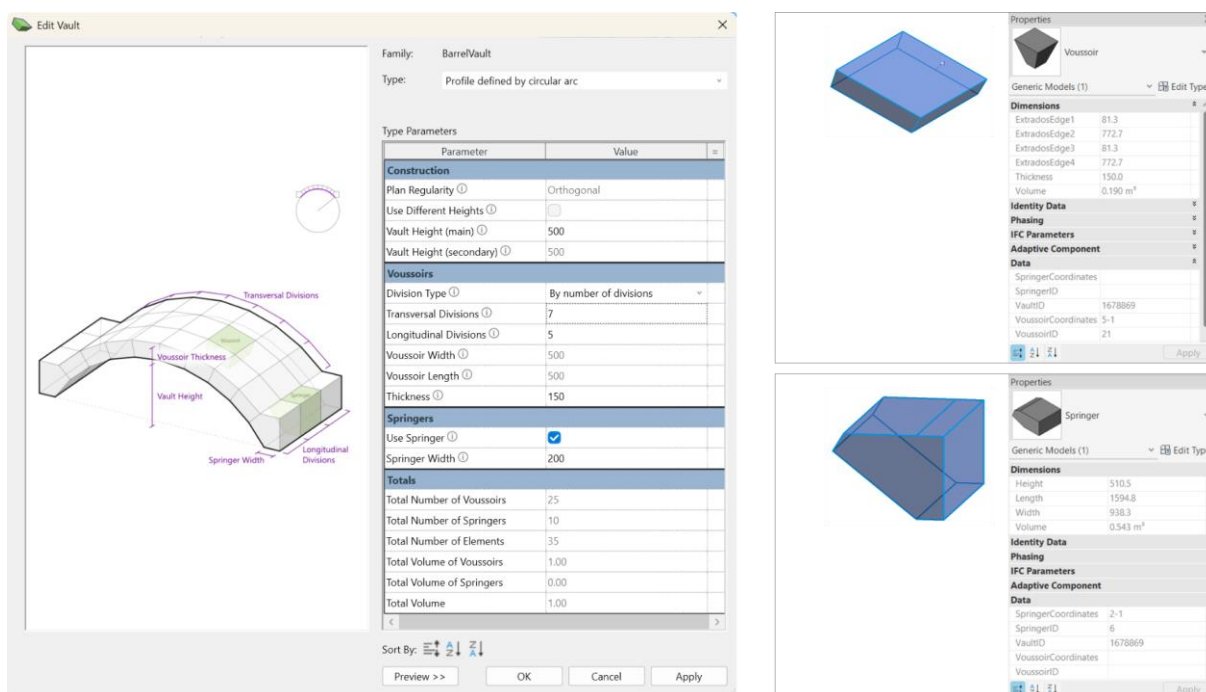


Figura 2: a) Interface de edição de abóbadas; b) Interfaces de visualização de parâmetros das aduelas; c) Interfaces de visualização de parâmetros dos saiméis.

Face a estas limitações, foi adotada a terceira estratégia, baseada na organização das peças através de um grupo (*Model Group*) constituído por famílias adaptativas. Esta solução permite instanciar cada aduela e cada saimel como um objeto BIM independente, controlado por pontos adaptativos e parâmetros próprios, mantendo simultaneamente a sua articulação num sistema global cuja lógica geométrica e distributiva é garantida pelo motor de cálculo do *plugin*. Deste

modo, a abóbada é representada como uma macro entidade relacional, composta por um conjunto de famílias adaptativas. Neste sistema existem duas famílias adaptativas distintas, as aduelas e os saiméis (Figura 2b), com 8 e 12 pontos adaptativos, respetivamente.

Estas famílias, criadas em ambiente Revit, são utilizadas na modelação de estruturas estereotómicas através do comando *Create* disponibilizado pelo plugin que, após a seleção de duas paredes opostas, gera automaticamente uma configuração inicial de uma abóbada, instanciando e organizando as famílias de aduelas e saiméis segundo os princípios e regras geométricas que constituem o motor de cálculo descrito na secção 4.

Os parâmetros das abóbadas são definidos e editados através da interface *Edit* do plugin (Figura 2a). A edição pode ser realizada para uma ou múltiplas abóbadas com o mesmo tipo de forma de planta, sendo que, no caso de existirem valores distintos, o campo aparece vazio e qualquer alteração é aplicada a todos os elementos seleccionados.

O sistema permite ainda ativar ou desativar os saiméis e definir a sua largura. Para além dos parâmetros geométricos e construtivos, o modelo calcula automaticamente as quantidades e os volumes das aduelas, dos saiméis e do conjunto total, assegurando a coerência entre forma, discretização e informação associada.

3.3. Modelo BIM e exportação

Uma vez gerada, a abóbada corresponde a um conjunto de objetos BIM discretos (aduelas e saiméis) interligados por relações paramétricas, em vez de sólidos independentes sem conexão (Figura 3). Cada um destes objetos BIM contém, para além da sua informação geométrica, outro tipo de parâmetros relacionados com volume, material e identidade. Esta estrutura de informação permite a extração direta de quantidades e a integração em mapas de quantidades (*Schedules*) e planeamentos, inserindo as estruturas estereotómicas nos fluxos de trabalho BIM.

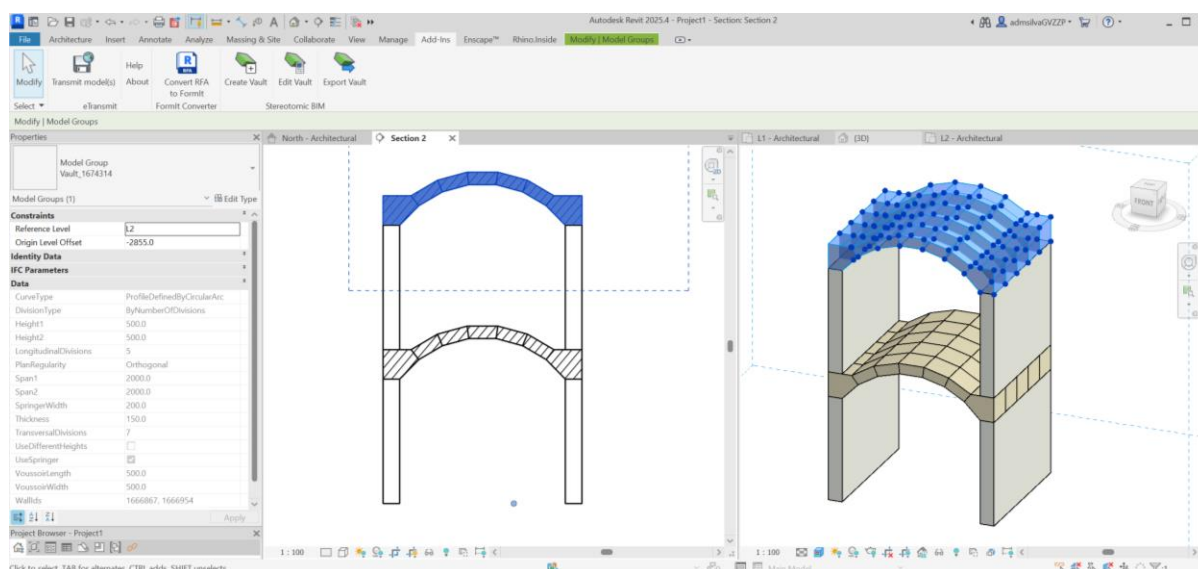


Figura 3: Abóbada gerada com o plugin *Voussoir* em ambiente Revit.

A abóbada passa, assim, a constituir um sistema paramétrico editável no Revit a partir do plugin, cuja coerência geométrica é garantida pelo motor de cálculo apresentado na secção seguinte. As alterações introduzidas através da interface de edição (*Edit*) enumeradas na secção

anterior, conduzem à atualização global da abóbada, sendo todas as aduelas e saiméis novamente calculados e reposicionados de acordo com os novos parâmetros. Sempre que as paredes de apoio são deslocadas, rodadas ou têm dimensões alteradas, a abóbada é regenerada para acomodar essas variações. Este processo assegura a coerência entre a forma da superfície, a sua discretização em peças e a informação associada a cada elemento, resultando de um recálculo integral da geometria e não de uma edição manual isolada dos objetos.

Além do modelo BIM, o plugin disponibiliza uma funcionalidade de exportação orientada para a fabricação digital, permitindo gerar ficheiros tridimensionais em formatos standard (como .obj ou .step) a partir das peças individuais ou do conjunto da abóbada. Cada elemento é exportado preservando a sua geometria e identificação, possibilitando a correspondência direta entre o modelo BIM e os processos de produção assistida por computador. Deste modo, estabelece-se um fluxo contínuo entre conceção paramétrica, modelação informacional e fabrico, no qual a estereotomia passa a operar como um sistema construtivo plenamente integrado no ecossistema BIM.

4. Motor geométrico

O processo global de definição geométrica da abóbada encontra-se sintetizado no fluxograma apresentado na Figura 4, onde se identifica à esquerda os inputs e à direita os resultados.

Este processo inicia-se com a definição da superfície de força da abóbada (*thrust surface*), obtida através de um *loft* entre duas curvas geratrizes. Esta superfície de referência é utilizada para o cálculo das direções normais, as quais se encontram contidas nas superfícies de contacto entre as aduelas da abóbada

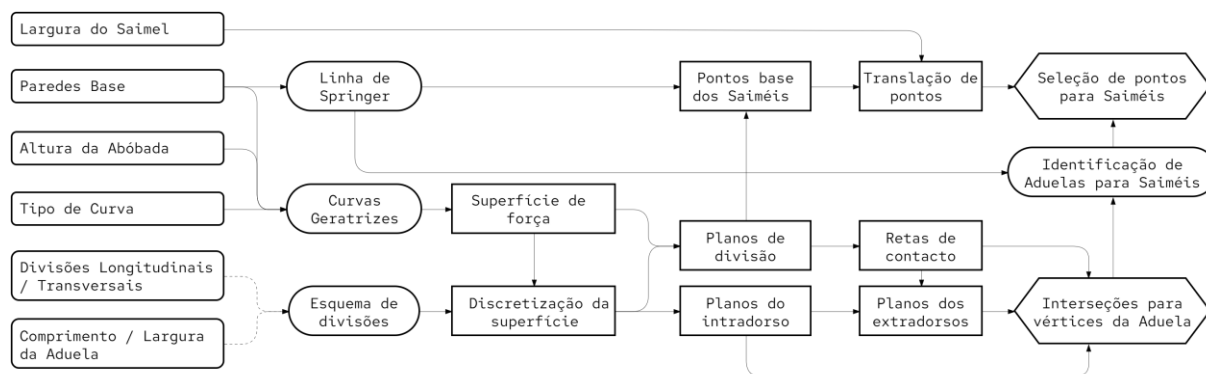


Figura 4: Fluxograma de princípios geométricos para a geração da abóbada.

A superfície de força resultante (Figura 5a) é discretizada através da subdivisão das curvas geratrizes, usando um número arbitrário de divisões ou calculando o número de aduelas conforme as suas dimensões. De seguida, os pontos correspondentes em cada uma das curvas de topo são ligados entre si, originando um conjunto de linhas diretrizes que estruturam a grelha de discretização da superfície. Estas linhas são, por sua vez, subdivididas utilizando o mesmo processo, originando uma grelha de pontos sobre a superfície (Figura 5b).

No contexto deste plugin, definiu-se que todas as aduelas são constituídas por superfícies planas, no sentido de facilitar a fabricação destes elementos. Assim, para cada conjunto de quatro

pontos de uma célula da grelha, define-se um plano por aproximação geométrica, representando o plano local do intradorso.

Para além dos planos do intradorso, foi também necessário criar planos de divisão longitudinal (planos paralelos às curvas geratrizes) e planos de divisão transversal (planos perpendiculares às curvas geratrizes) para poder definir as superfícies de contacto.

Todos os pontos da grelha foram previamente deslocados ao longo do vetor normal à superfície de força na sua respetiva posição. A partir desta amostra alargada de pontos, seleccionaram-se os pontos correspondentes a cada divisão longitudinal e transversal, aplicando-se a mesma metodologia utilizada para a definição dos planos do intradorso (Figura 5c).

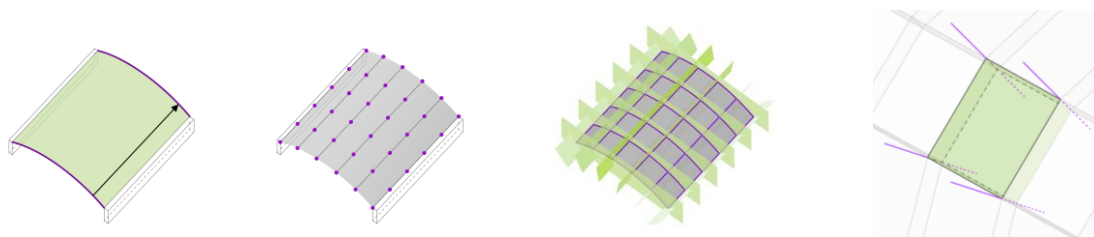


Figura 5: a) *Loft* entre curvas para criar a superfície de força; b) Discretização da superfície numa grelha de pontos; c) Criação dos planos de divisão; d) Finalização da Aduela.

Como referido, todas as faces das aduelas (*voussoirs*) são planas. Os limites laterais de cada aduela são definidos por quatro planos de divisão, dois correspondentes aos limites longitudinais da célula da grelha e os outros dois aos limites transversais.

A interseção de cada par de planos de divisão adjacentes gera uma reta de contacto. Estas, junto com o intradorso e extradorso, delimitam a superfície de contacto. A partir destas retas, calcula-se uma linha média, que é usada como direção para transladar o plano do intradorso, definindo assim o plano do extradorso.

Por fim, a interseção dos planos do intradorso e do extradorso com as retas de contacto permite identificar os oito pontos que definem a geometria final da aduela. Estes pontos correspondem aos vértices das faces superior e inferior e servem de base para a modelação tridimensional de cada peça (Figura 5d).

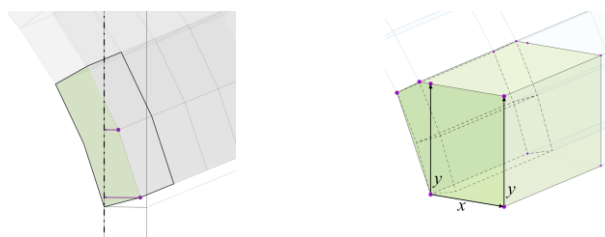


Figura 6: a) Seleção das aduelas a serem transformadas; b) Geração dos pontos do saimel por translação (x e y).

Os saiméis (*springers*) correspondem aos elementos de transição entre a geometria da parede de suporte e a geometria da abóbada. Embora derivados do sistema geométrico das aduelas, estes elementos assumem um carácter híbrido, uma vez que articulam a superfície curva da abóbada com um apoio vertical plano.

A sua definição tem início após a construção das aduelas da abóbada e baseia-se na identificação das peças localizadas na zona de arranque. Para isso, considera-se a interseção das aduelas com um plano vertical que contém a linha do springer (*springer line*). Esta linha é definida como a linha superior e interior da parede sobre a qual a abóbada assenta. Esta operação permite isolar as aduelas que participam diretamente na transição entre parede e abóbada (Figura 6a). Para cada divisão longitudinal correspondente a um saimel, são identificados quatro pontos a partir do conjunto de aduelas selecionadas: dois no extradorso e dois no intradorso, correspondendo às extremidades superiores de cada superfície.

Os restantes oito pontos necessários à definição completa da geometria do saimel são inferidos a partir do ponto de interseção dos planos transversais adjacentes a cada saimel com a linha do springer, e de diferentes operações de translação realizadas com o mesmo, garantindo a coerência geométrica e construtiva do elemento (Figura 6b).

5. Possibilidades

A utilização deste plugin abre um conjunto alargado de possibilidades no uso do Revit e expande significativamente o seu campo de aplicação a sistemas construtivos compressivos. Estas possibilidades estendem-se desde a representação de património construído ou não construído até à exploração de soluções arquitetónicas contemporâneas baseadas em arcos e abóbadas.

Como exemplo de modelação de património, foi modelada a Igreja Românica de São Martinho de Cedofeita, recorrendo a uma modelação esquemática que evidencia a abóbada de berço da nave, definida por um arco de volta perfeita. Para além desta, foram igualmente modelados os arcos torais, tirando partido da funcionalidade do plugin que permite criar abóbadas com uma única divisão longitudinal, possibilitando a geração de arcos como entidades estereotómicas BIM (Figura 7a).

Para explorar de forma mais extensiva esta capacidade do plugin, modelou-se o projeto de reabilitação do Mosteiro de Santa Maria do Bouro, da autoria do arquiteto Eduardo Souto de Moura, com foco numa das salas em que se verifica a presença de um grande número de arcos de pedra.

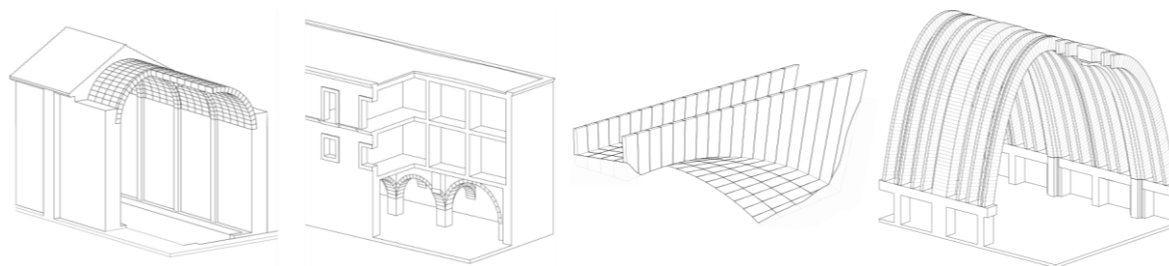


Figura 7: a) Igreja Românica de São Martinho de Cedofeita; b) Mosteiro de Santa Maria do Bouro; c) Schaufelschlucht Bridge; d) Utrecht Central Library & Post Office.

Este exercício permitiu avaliar de forma prática a capacidade do sistema estereotómico de se adaptar a geometrias já existentes, inseridas em contextos de reabilitação arquitetónica complexos. Ao trabalhar com elementos pré-existentes, como os numerosos arcos de pedra das salas do mosteiro, foi possível testar como o *plugin* consegue integrar estruturas tradicionais

dentro de um fluxo de trabalho digital moderno. Este processo mantém o rigor geométrico característico da estereotomia, traduzindo os elementos em entidades BIM.

Desta forma, estas experiências não apenas demonstram a versatilidade do plugin na representação de abóbadas e arcos, mas também evidenciam como, em casos de património e reabilitação, é possível conciliar documentação patrimonial, modelação paramétrica e interoperabilidade com plataformas digitais, revelando-se uma ferramenta útil para a representação e estudo de edifícios históricos (Figura 7b).

Adicionalmente, refere-se a Schaufelschlucht Bridge, do atelier Marte.Marte Architects que, construída em betão, é aqui usada como referência formal para modelar geometrias dominadas por compressão. A importância deste exemplo reside na demonstração da capacidade do plugin para lidar com superfícies regradas geradas por arcos assimétricos, procedendo à sua discretização em peças individuais (Figura 7c). Em paralelo, o átrio principal do projeto da Utrecht Central Library & Post Office foi modelado recorrendo a uma sequência de arcos parabólicos. Com este exemplo reforça-se a capacidade do plugin para operar com outro tipo de curvas que não circulares, permitindo avaliar o seu desempenho na modelação destas geometrias. Este conjunto de exercícios evidencia a aplicabilidade do plugin enquanto ferramenta de conceção e análise formal em contexto BIM, sublinhando a sua pertinência na exploração de soluções arquitetónicas desde fases iniciais do projeto (Figura 7d).

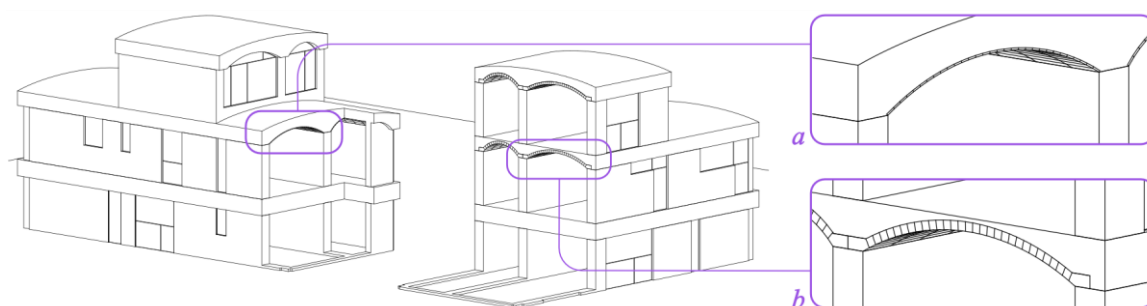


Figura 8: Maisons Jaoul; a) Abóbada construída com função formal; b) Abóbada reinterpretada como elemento estruturalmente ativo com saiméis.

No campo da arquitetura residencial, foi desenvolvida uma experiência de aplicação do plugin na modelação das Maisons Jaoul projetadas por Le Corbusier, enquadrando a sua utilização num contexto próximo da prática arquitetónica corrente. Este exemplo permitiu avaliar a adequação do sistema estereotómico à modelação de soluções construtivas repetitivas e racionais, típicas de programas habitacionais, através da utilização de abóbadas de geometria simples.

Com o objetivo de exemplificar diferentes modos de utilização do plugin, foram adotadas duas abordagens distintas na modelação deste projeto. A primeira consistiu na representação das abóbadas tal como no edifício, como lâminas finas embebidas no betão, com papel predominantemente formal. (Figura 8a). A segunda abordagem reinterpretou as abóbadas como elementos estruturalmente ativos, recorrendo aos saiméis como dispositivos construtivos que permitem a continuidade das paredes e a articulação coerente entre elementos verticais e sistemas abobadados, configurando um sistema estereotómico completo (Figura 8b).

6. Conclusão

Este artigo apresentou o *Voussoir*, um *plugin* para o Autodesk Revit que integra o desenho estereotómico no fluxo de trabalho BIM, permitindo a modelação de arcos e abóbadas como sistemas discretos de aduelas e saiméis. A ferramenta traduz princípios geométricos da estereotomia em objetos BIM paramétricos, assegurando coerência geométrica, atualização automática e extração de quantidades.

Os casos de estudo demonstram a aplicabilidade do sistema tanto na representação de património e reabilitação como na exploração de soluções arquitetónicas contemporâneas. Neste sentido, o *Voussoir* amplia o campo de aplicação do BIM a sistemas construtivos compressivos, reforçando a articulação entre conceção geométrica, informação construtiva e processos de fabrico digital.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado com o apoio da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) através do projeto com o título "BIM Estereotómico - Explorando o projeto e construção sustentável em pedra estrutural" 2023.15500.PEX, <https://doi.org/10.54499/2023.15500.PEX>. Contou ainda com o cofinanciamento do PRR – Plano de Recuperação e Resiliência e da União Europeia, no âmbito do investimento RE-C05-i02: Missão Interface - CoLAB (www.recuperarportugal.gov.pt).

Referências

- [1] P. Azambuja Varela e J. P. Sousa, «Stereotomic BIM – a tool for designing low carbon architecture», em *Proceedings of XXVII SIGraDi Congress - Accelerated Landscapes*, Punta del Este, Uruguay, nov. 2023. doi: 10.5151/sigradi2023-177.
- [2] P. Azambuja Varela e J. P. Sousa, «Digital Expansion of Stereotomy - A semantic classification», em *Sousa, JP, Xavier, JP and Castro Henriques, G (eds.), Architecture in the Age of the 4th Industrial Revolution - Proceedings of the 37th eCAADe and 23rd SIGraDi Conference - Volume 1*
- [3] J. Sakarovitch, *Epures d'architecture: De la coupe des pierres a la géométrie descriptive XVI-XIX siècles*, vol. 21. Springer Science & Business Media, 1998.
- [4] C. Trevisan, «Sulla stereotomia, il CAD e le varie trompe d'Anet», *Geom. E Archit. Strum. Dottorato Ric. Rilievo E Rappresent.*, 1999.
- [5] G. Fallacara e M. Barberio, «An Unfinished Manifesto for Stereotomy 2.0», *Nexus Netw. J.*, vol. 20, n.º 3, pp. 519–543, dez. 2018, doi: 10.1007/s00004-018-0390-z.
- [6] A. Kilian, M. Galbraith, e D. Chak, «CatenaryCAD: An Architectural Design Tool», MIT, 2003.
- [7] D. Piker, «Kangaroo: Form Finding with Computational Physics», *Archit. Des.*, vol. 83, n.º 2, pp. 136–137, mar. 2013, doi: 10.1002/ad.1569.
- [8] M. Rippmann, L. Lachauer, e P. Block, «Interactive Vault Design», *Int. J. Space Struct.*, vol. 27, n.º 4, pp. 219–230, dez. 2012, doi: 10.1260/0266-3511.27.4.219.