

A-BIM: ALGORITHMIC-BASED BUILDING INFORMATION MODELLING

Sofia Feist ⁽¹⁾, **António Leitão** ⁽¹⁾

(1) Instituto Superior Técnico, Lisboa

Resumo

O Projeto Algorítmico (PA) é uma abordagem de design baseada em programação em que, ao invés de ser criado o modelo 3D do design pretendido, é criado um programa que gera o modelo 3D do design pretendido. Esta abordagem permite trazer grandes vantagens a todo o processo de design e de construção, incluindo, por exemplo, a produção de geometrias complexas e a automatização de tarefas e processos repetitivos que seriam muito morosos na modelação manual. Graças à sua natureza parametrizável, esta abordagem permite também a fácil e rápida exploração de alternativas ao modelo inicial.

Apesar destas vantagens, o PA tem sido pouco explorado em combinação com a metodologia *Building Information Modelling* (BIM). Ao combinar processos algorítmicos com a metodologia BIM surge uma nova abordagem de design baseada no desenvolvimento de programas que geram modelos BIM do design pretendido. A esta abordagem designamos *Algorithmic-based Building Information Modelling* (A-BIM).

Neste paper, definimos, exploramos e avaliamos o A-BIM num contexto arquitetónico. A partir de um caso de estudo, comparamos o A-BIM a uma abordagem BIM manual, e demonstramos que o A-BIM pode oferecer grandes vantagens à prática arquitetónica.

1. Introdução

Apesar das ferramentas de *Computer-Aided Design* (CAD), i.e., Desenho Assistido por Computadores, trazerem várias melhorias ao processo de design e de construção de edifícios, estas têm algumas limitações na mecanização de tarefas e na criação e manipulação de geometrias complexas. Estas limitações podem ser ultrapassadas através da introdução, na arquitectura, da programação e de processos algorítmicos.

O Projeto Algorítmico (PA) é uma abordagem de design baseada em programação que permite a geração de modelos 3D através de algoritmos. Usando esta abordagem, ao invés de ser criado o modelo 3D do design pretendido, é criado um programa que gera o modelo 3D do design pretendido. O PA promove a exploração em arquitetura, permitindo aos arquitetos abordar formas geométricas complexas difíceis de produzir usando meios manuais [1]. Para além disso, sendo o modelo gerado com PA tipicamente paramétrico, ao variar os parâmetros que controlam o modelo torna-se possível produzir rapidamente várias alternativas ao design. Finalmente, o PA permite a automatização de tarefas e processos repetitivos que consumiriam demasiado tempo e esforço se tivessem de ser executados manualmente.

Para tirar partido do PA, vários ambientes de programação têm vindo a ser introduzidos em ferramentas de design geralmente usadas por arquitetos, e.g., AutoCAD e Rhinoceros 3D, permitindo-lhes desenvolver programas que geram modelos nessas ferramentas. O Grasshopper [2] é um dos exemplos mais populares.

Apesar das vantagens do PA, esta abordagem tem sido pouco utilizada em combinação com o *Building Information Modelling* (BIM), uma metodologia de trabalho que traz várias vantagens ao processo de design e de construção de edifícios [3]. Esta combinação de processos algorítmicos com a metodologia BIM cria uma nova abordagem de design baseada no desenvolvimento de programas que geram modelos BIM, uma abordagem que denominamos *Algorithmic-based Building Information Modelling* (A-BIM).

Neste paper, definimos, exploramos e avaliamos o A-BIM no contexto arquitetónico. Através de um caso de estudo, comparamos o A-BIM com a abordagem BIM manual, e analisamos as diferenças. No final, avaliamos o A-BIM, explicando as vantagens e desvantagens de trabalhar com esta abordagem.

2. Algorithmic-based Building Information Modelling

O A-BIM é uma abordagem algorítmica para BIM que permite gerar modelos BIM através de algoritmos. Tal como no PA, o A-BIM oferece uma nova abordagem de projecto: ao invés de ser desenvolvido o modelo do design pretendido diretamente na ferramenta BIM, é desenvolvido o programa que vai gerar esse modelo na ferramenta BIM.

Semelhante a uma abordagem BIM manual, o modelo gerado através da abordagem A-BIM contém informação relevante para o projeto, sendo a intenção final simular digitalmente todo o processo de design e de construção do edifício. No entanto, ao contrário da abordagem manual, a origem desta informação é o programa que gera o modelo. Este programa, tal como um modelo BIM, pode ser partilhado e desenvolvido em paralelo entre os diversos intervenientes do projeto assegurando assim a colaboração e coordenação destes durante todo o desenvolvimento do projeto. Naturalmente, este processo pressupõe que todos estes intervenientes saibam programar, um requisito que, no século XXI, começa a ser tão importante como saber ler e escrever.

Para utilizar uma abordagem algorítmica como o A-BIM é necessário a formalização das intenções e ideias do projecto de forma a construir um algoritmo que produza a solução de design pretendida. Este algoritmo é depois transformado num programa, i.e., numa série de instruções específicas e rigorosas escritas numa linguagem de programação que o computador consiga compreender e executar.

Antes de percebermos como é que o A-BIM se aplica em arquitetura e quais as vantagens que podemos obter desta abordagem, é necessário primeiro perceber exactamente o que é que significa programar para BIM. Para isso, é relevante perceber como é que as ferramentas BIM funcionam e quais as diferenças entre estas e as suas precedentes: as ferramentas CAD. Dadas as diferenças entre estas ferramentas, as suas metodologias de programação vão também diferir. Na secção seguinte, definimos uma metodologia de programação para BIM baseada nestas diferenças.

2.1 Do CAD para o BIM

A principal diferença entre trabalhar com ferramentas CAD e ferramentas BIM está ligada ao facto de que, enquanto que a ferramenta CAD lida essencialmente com entidades geométricas, e.g., cilindros e paralelepípedos, uma ferramenta BIM não lida só com geometria; lida com representações digitais de objetos arquitetónicos, semanticamente identificados e contendo toda a informação relevante sobre esse objeto [3]. Como exemplo, podemos considerar uma laje e uma laje de cobertura genéricas: geometricamente, são muito semelhantes mas semanticamente são objetos distintos com funções, propriedades e requisitos diferentes. Ao programar para CAD, que se baseia apenas nas propriedades geométricas dos objectos, tanto a laje como a laje da cobertura podem ser criadas usando uma mesma operação geométrica genérica, (e.g., 'box'). Por outro lado, ao programar para BIM, estes objetos requerem operações distintas, específicas do tipo de objeto que se pretende criar.

Outra diferença entre CAD e BIM resulta do facto dos objetos BIM terem regras paramétricas e associativas que controlam o seu comportamento no modelo e conferem aos objetos um sentido arquitetónico. Por exemplo, em BIM, uma porta só pode existir numa parede. Isto quer dizer que, para criar uma porta, é necessário primeiro criar uma parede. Estas regras refletem-se na programação onde, de facto, uma parede é um dos parâmetros necessários para criar uma porta. Diferentemente, em CAD, os objetos podem ser criados separadamente e a ordem de criação dos elementos é irrelevante para o resultado final.

Finalmente, uma outra diferença entre as ferramentas CAD e BIM está nas bibliotecas de objetos paramétricos pré-modelados. Por exemplo, enquanto que numa ferramenta BIM uma porta pode ser selecionada de uma biblioteca, numa ferramenta CAD todos os subcomponentes da mesma porta poderão ter de ser criados de raiz. Quando esta modelação é feita através da programação, isto traduz-se num programa longo e complexo, que pode demorar demasiado tempo a desenvolver. Embora as ferramentas CAD também permitam a importação de blocos externos de geometria pré-modelada, tipicamente estes objetos não são paramétricos, o que dificulta a manipulação da sua geometria. Em muitos casos, esta geometria tem de ser manualmente alterada para se adequar às especificações do projeto, sendo muitas vezes mais simples reconstruí-la de raiz.

3. Caso de Estudo: As Torres *Absolute World*

Para testar e avaliar as capacidades da abordagem A-BIM, seleccionámos um caso de estudo arquitetónico - as Torres *Absolute World* (TAWs), projetadas pelos MAD Architects e localizada em Mississauga, no Canadá (ver Figura 1) - que modelámos com (1) uma abordagem BIM manual, e (2) a abordagem A-BIM proposta. Este processo de modelação permitiu analisar e comparar diretamente estas duas abordagens de modo a perceber quais as vantagens e desvantagens de cada uma.

Enquanto que a abordagem BIM manual foi modelada diretamente em Revit, a abordagem A-BIM foi implementada usando o Rosetta. Esta ferramenta de programação foi escolhida devido à sua característica portátil [4] que, ao contrário de outras ferramentas recentemente desenvolvidas tal como o Dynamo e o Rhino-Grasshopper-ArchiCAD, permite a geração do mesmo modelo em mais do que apenas uma ferramenta BIM. Usando o Rosetta, o modelo das TAWs podem ser igualmente geradas tanto no Revit como no ArchiCAD.



Figura 1: As Torres *Absolute World*, localizadas em Mississauga, no Canadá (Fonte da imagem: www.domusweb.it/).

O processo de modelação foi dividido nos vários objetos arquitetónicos que compõem o edifício uma vez que o mesmo objeto pode ser modelado de duas maneiras completamente distintas dependendo da abordagem usada. Os objetos considerados foram: os níveis (embora não exatamente um objeto arquitetónico, são um elemento BIM importante), as lajes, as aberturas nas lajes, as paredes, a laje da cobertura, as escadas, as portas e as guardas.

Como exemplo, vamos considerar a modelação das paredes das TAWs. Ambas as torres possuem uma grelha de paredes estruturais que se repete em todos os pisos, garantindo assim a continuidade estrutural da torre. No entanto, devido à rotação da torre, o comprimento destas paredes aumenta e encolhe de piso para piso de forma a adaptar as paredes à forma do edifício, tal como ilustrado na Figura 2.



Figura 2: Diagrama estrutural das TAWs [5].

Nas secções seguintes, o processo de modelação das paredes é explicado para as duas abordagens consideradas, sendo estas de seguida comparadas para descobrir as vantagens e desvantagens entre elas.

3.1 BIM Manual

Antes de criar as paredes, foram definidas as propriedades desejadas para as mesmas, e.g., as camadas de materiais e as respetivas espessuras. De seguida, foi usada a funcionalidade disponível no Revit para criar paredes. Para isso, escolhemos um nível inferior para a base das paredes, um nível superior onde estas acabam e colocámos as paredes de acordo com a configuração em planta desejada.

Ao colocar as paredes entre níveis, torna-se mais fácil controlar a sua altura já que esta passa a ser calculada como a distância entre o nível inferior e superior. Neste caso, cada nível corresponde a um piso das TAWs. Deste modo, se for aplicada alguma mudança às alturas dos pisos da torre, as paredes e as suas respetivas alturas irão ajustar-se automaticamente.

Devido à rotação da torre, o comprimento das paredes varia consoante o piso, pelo que as restantes paredes tiveram de ser criadas individualmente (ou copiadas do piso anterior) e os seus comprimentos ajustados manualmente a cada piso, para todos os pisos das TAWs, um processo moroso e entediante.

3.2 A-BIM

Usando o Rosetta, podemos tirar partido dos objetos paramétricos pré-modelados fornecidos pelas ferramentas BIM e manipulá-los consoante os requisitos do projeto. Estes objetos são disponibilizados pelo Rosetta sob a forma de operações pré-definidas que permitem a criação dos respetivos objetos nas ferramentas BIM.

Para criar paredes, a correspondente operação requer como parâmetros uma lista de pontos que representa os eixos das paredes e o nível inferior e superior dessas paredes que determinam o

seu posicionamento e altura. Esta operação pode também receber como parâmetros adicionais as propriedades desejadas das paredes, sendo utilizados valores genéricos pré-definidos caso estes parâmetros não sejam fornecidos.

Usando esta operação, criámos uma grelha de paredes de acordo com a configuração em planta das TAWs, a qual distribuímos para todos os pisos. Para representar os pisos, foi criada uma lista de níveis correspondente ao conjunto das alturas de todos os pisos das TAWs. Usando esta lista, podemos facilmente controlar o número de pisos e, conseqüentemente, o número de grelhas de paredes distribuídas pela torre.

Para simplificar o processo de modelação, considerámos uma grelha de paredes com comprimentos idênticos para todos os pisos que depois adaptamos à rotação da torre. Isto foi conseguido através da implementação de um procedimento que simula uma intersecção entre paredes e lajes, não deixando as paredes ultrapassar os limites da laje. No caso das TAWs, o comprimento das paredes é calculado em relação a uma laje auxiliar que corresponde ao espaço interior do edifício num dado piso, tal como ilustrado na Figura 3. Devido à rotação da torre, isto implica que as paredes terão comprimentos diferentes em cada piso. No final deste processo, as lajes auxiliares são eliminadas.

Finalmente, para generalizar a forma do edifício e oferecer uma maior flexibilidade de soluções, a grelha de paredes que é distribuída pelos pisos e a forma da laje auxiliar correspondente ao espaço interior do edifício são dados com parâmetros independentes que podem ser facilmente modificados pelo utilizador.

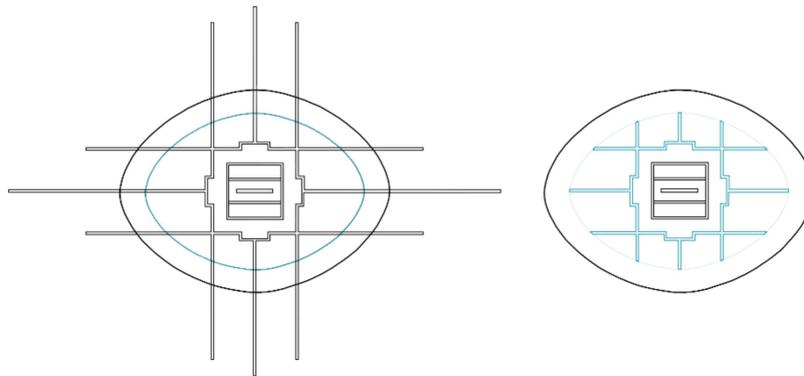


Figura 3: Para cada piso, o comprimento das paredes é ajustado em relação ao perímetro de uma laje auxiliar correspondente ao espaço interior do edifício nesse piso.

3.3 Comparação

Enquanto que para a abordagem manual as paredes tiveram de ser criadas e adaptadas manualmente a cada piso devido à rotação da torre, ao usarmos uma abordagem algorítmica podemos tirar partido da lógica construtiva das paredes ser a mesma para todos os pisos, permitindo assim que a criação e a adaptação destas à rotação da torre seja automatizada.

Para ambas as abordagens, as paredes foram criadas de forma a estarem parametricamente contidas entre níveis consecutivos garantindo assim que, se houver alguma alteração às alturas dos pisos, essas alterações serão automaticamente propagadas para as paredes.

Embora útil, esta capacidade de propagação de alterações proporcionada pelas ferramentas BIM não é tão abrangente nem flexível como a de uma abordagem algorítmica. Por exemplo, esta propagação não tem em consideração o ajuste necessário no comprimento das paredes das TAWs, que terá de ser executado manualmente em todos os pisos para as adaptar à forma e rotação de cada piso. Este processo repetitivo e moroso pode efetivamente desencorajar alterações futuras, sendo portanto um obstáculo à exploração.

Em contraponto, numa abordagem algorítmica, os objetos criados são parametricamente dependentes entre si, o que quer dizer que as alterações são propagadas a todo o modelo.

Para além disto, uma vez que no modelo das TAWs, tanto a grelha de paredes como a forma interior do edifício são parâmetros independentes, podemos variá-los de forma ortogonal: podemos experimentar diferentes grelhas de paredes que serão automaticamente adaptadas à forma do edifício, tal como podemos experimentar diferentes formas para o interior do edifício, que ajustará automaticamente o comprimento das paredes.

4. Avaliação

O A-BIM tem uma vasta aplicabilidade em arquitetura: pode ser usado para desenvolver modelos paramétricos de partes de edifícios (e.g., uma fachada), de edifícios inteiros, ou até de cidades inteiras. No entanto, esta abordagem poderá nem sempre ser a mais apropriada para um dado projeto, pois necessita de um investimento inicial de esforço e tempo que poderá não ser inteiramente recuperado no final. Como tal, antes de escolher a abordagem que se pretende usar num projeto, é essencial que os arquitetos primeiro estabeleçam as prioridades do projeto em questão e avaliem se o desenvolvimento deste poderá beneficiar da abordagem A-BIM. Nas secções seguintes, discutimos alguns aspetos importantes a ter em consideração nesta avaliação.

4.1 Automatização de Tarefas Repetitivas

Devido à sua natureza algorítmica, o A-BIM permite a automatização de procedimentos repetitivos e morosos, permitindo assim poupar bastante tempo e trabalho que poderá ser melhor aproveitado em tarefas mais importantes. Tal como demonstrado no ajustamento do comprimento das paredes à forma e rotação das TAWs, isto pode ser muito útil em edifícios com carácter repetitivo, sendo portanto uma importante vantagem.

4.2 Propagação de Alterações

Tal como explicado na secção 3.3, os objetos gerados a partir de uma abordagem A-BIM são parametricamente dependentes entre si, sendo as alterações propagadas em todo o modelo de forma muito mais abrangente e flexível do que a tipicamente disponível nas ferramentas BIM. Isto não só permite poupar bastante tempo e trabalho em processos de atualização do modelo, como também evita erros e inconsistências. Para uma metodologia BIM, isto é especialmente

importante para que se possa extrair informação (e.g., quantidades de materiais) correcta para a construção do edifício.

4.3 Exploração de Alternativas

Sendo o programa desenvolvido intrinsecamente paramétrico, é possível explorar e visualizar mais facilmente e rapidamente uma maior variedade de alternativas ao design inicial das torres sem ser necessário modificar ou refazer o algoritmo que as gera. Na verdade, ao usarmos A-BIM não estamos a desenvolver uma solução fixa mas sim uma infinidade de potenciais variações da mesma solução. A Figura 4 ilustra apenas alguns exemplos de variações que se conseguem explorar com o algoritmo desenvolvido, fazendo variar os parâmetros que controlam o modelo:

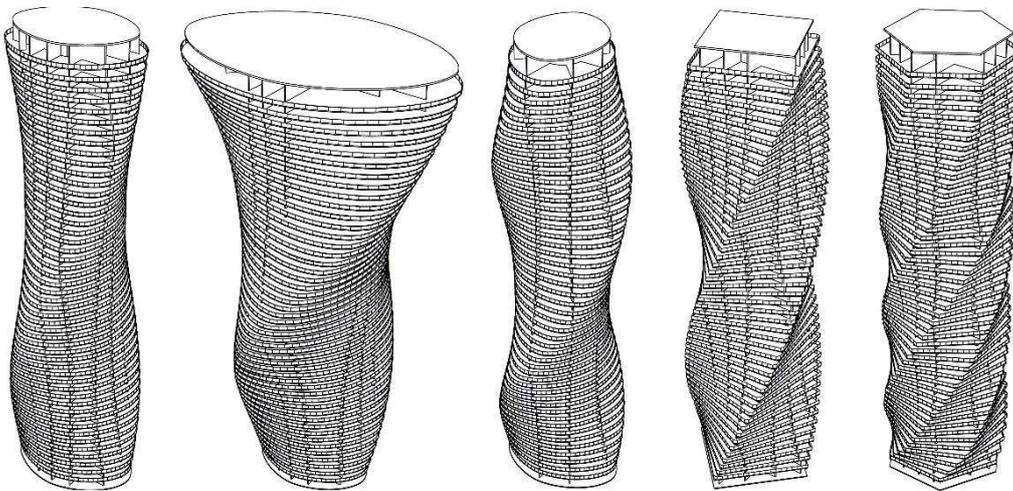


Figura 4: Possíveis variações das TAWs.

Neste aspeto, o A-BIM promove significativamente a exploração durante todo o desenvolvimento do projeto e, como tal, pode beneficiar bastante a atividade de design que prospera com exploração.

4.4 Otimização

As variações ao design inicial discutidas na secção anterior podem também ser analisadas e comparadas em relação, por exemplo, à sua performance térmica ou às suas características aerodinâmicas. No caso das TAWs, poderíamos rapidamente testar diferentes formas para a laje e diferentes ângulos de rotação de modo a perceber qual a forma e ângulo que oferecem melhores condições aerodinâmicas para as torres.

O próximo passo neste cenário seria automatizar esse processo de análise e comparação de alternativas de forma a deixar o computador encontrar as que melhor satisfazem certos critérios, o que conduzirá a um processo de otimização do design. Isto permite priorizar aspectos da performance de um edifício sobre a sua forma, o que constitui uma diferença significativa em relação aos métodos tradicionais onde as análises de performance (e.g., estruturais, térmicas e aerodinâmicas) são tipicamente feitas no final do processo de design, já depois da forma estar estabelecida, sendo raramente uma prioridade [6].

4.5 Investimento inicial

Devido aos desafios impostos pela abordagem algorítmica, o A-BIM requer um maior investimento inicial em termos de tempo e trabalho, não só para produzir o programa que gera o modelo, como também para o tornar flexível e facilitar a exploração de alternativas.

Para avaliar este investimento inicial, foi simulado um processo de design onde são exploradas uma série de alternativas ao design inicial das TAWs de forma a medir o impacto que esta exploração tem no projeto, i.e., o tempo e esforço necessários, tanto na abordagem A-BIM como na abordagem BIM manual. A simulação para a abordagem A-BIM foi implementada por nós usando o Rosetta, enquanto que a abordagem manual foi implementada em Revit por um utilizador experiente.

Como exemplo, vamos considerar o modelo da segunda TAW tal como ela é na realidade, i.e., com 50 pisos e rotação constante de 4° por piso (ver primeiro modelo na Figura 4). Os tempos de modelação desta torre em ambas as abordagens podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1: Tempo necessário para produzir o modelo da segunda TAW na abordagem A-BIM e na abordagem BIM Manual.

	Tempo de Modelação (aprox.)
A-BIM	14h
BIM Manual	2h

Ao comparar os tempos, podemos observar que a abordagem A-BIM requer mais tempo para a produção do modelo inicial, consequência do maior esforço intelectual necessário para formular o algoritmo e tornar o programa parametrizável. Neste caso, se o modelo inicial não sofresse mais alterações, a abordagem A-BIM seria muito menos eficiente do que a modelação manual. No entanto, se tivermos em consideração alterações futuras e a possibilidade de explorar alternativas ao modelo inicial, esta situação pode mudar consideravelmente.

Considerando um outro exemplo, vamos supor que se pretende mudar o ângulo de rotação da torre de 4° para 6°. Esta alteração implica actualizar todas as lajes (incluindo a da cobertura) e guardas para o novo ângulo de rotação, bem como ajustar todas as paredes à nova forma do edifício.

Para aplicar esta alteração na abordagem A-BIM, temos simplesmente de mudar o parâmetro correspondente ao ângulo de rotação da torre e as dependências no modelo tratam de propagar esta alteração para o modelo inteiro. Por outro lado, numa abordagem manual, a maioria destas alterações têm de ser aplicadas manualmente, o que resulta em tempos significativamente diferentes para executar estas alterações em ambas as abordagens, tal como ilustrado na Tabela 2:

Tabela 2: Tempo necessário para alterar o ângulo de rotação da torre na abordagem A-BIM e na abordagem BIM Manual.

	Tempo de Modelação (aprox.)
A-BIM	1min
BIM Manual	1h 40min

Numa situação inversa da verificada para a produção do modelo inicial, a abordagem manual requer bastante mais tempo para aplicar alterações ao modelo. Isto acontece pois, apesar das capacidades paramétricas das ferramentas BIM, muitas das mudanças continuam a ter de ser executadas manualmente.

Finalmente, vamos supor que se pretende explorar uma variação ao design inicial da torre, fazendo diminuir consistentemente as dimensões das lajes ao longo do edifício. Mais uma vez, esta alteração implica atualizar todas as lajes, paredes e guardas.

Para a abordagem A-BIM, podemos simplesmente aplicar um factor decrescente tanto à forma da laje como à forma que define o interior do edifício e esta alteração ir-se-á propagar para os restantes elementos. Por outro lado, para a abordagem manual, temos de refazer manualmente todas as lajes e adaptar todas as paredes às novas dimensões do edifício. Temos também de redesenhar todas as guardas em todos os pisos. Os tempos resultantes desta alteração são os seguintes:

Tabela 3: Tempo necessário para aplicar um factor decrescente às dimensões da torre na abordagem A-BIM e na abordagem BIM Manual.

	Tempo de Modelação (aprox.)
A-BIM	1min
BIM Manual	1h 50min

Mais uma vez, a abordagem manual requer mais tempo para a execução das alterações ao modelo, sendo mesmo necessário quase tanto tempo para aplicar as alterações como para refazer o modelo de raiz. Este tempo torna-se um obstáculo quando se pretende explorar rapidamente alternativas ao design inicial.

A tendência observada com estes exemplos é para que, à medida que o projeto evolui e as alterações são cada vez mais frequentes, o processo de actualização manual do modelo torna-se moroso e dispendioso. Ao mesmo tempo, a exploração de alternativas só é viável e produtiva se esta puder ser executada facilmente e rapidamente. Nestes casos, o investimento inicial pode ser recuperado à medida que o projecto evolui.

5. Conclusão

O A-BIM combina o Projeto Algorítmico com a metodologia de *Building Information Modelling*, oferecendo uma nova abordagem de projecto que permite a automatização de processos repetitivos e facilita a exploração rápida e sem esforço de alternativas. Esta abordagem oferece também a capacidade de propagar alterações ao design de forma mais vasta e flexível do que aquela usualmente permitida pelas ferramentas BIM.

Apesar destas características, o modelo gerado com a abordagem A-BIM continua a ser um modelo BIM idêntico a um modelo criado manualmente, i.e., carregado de informação de construção, permitindo assim a integração desta abordagem nos processos tradicionais baseados em BIM. A partir desta informação, o modelo pode ser trabalhado para além da sua forma, usando por exemplo processos de otimização para combinar e gerir os requisitos do projeto e priorizar aspetos da performance durante o desenvolvimento do mesmo.

Embora a abordagem A-BIM tenha uma grande aplicabilidade em arquitetura, nem sempre é a abordagem mais vantajosa para um determinado projeto, pois é necessário um investimento inicial para formular o algoritmo que gera o modelo. Neste artigo, demonstramos que esse investimento pode ser rapidamente recuperado em projectos em que ocorrem mudanças frequentes.

No futuro, pretendemos continuar a explorar as capacidades do A-BIM, nomeadamente perceber melhor qual o impacto desta abordagem na colaboração entre os vários intervenientes de um projeto e combinar processos de otimização com A-BIM.

Referências

- [1] K. Terzidis, *Expressive Form: a conceptual approach to computational design*. London, U.K.: Spon Press, 2003.
- [2] A. Tedeschi, *AAD Algorithms-aided design: Parametric strategies using Grasshopper*. Brienza, Italy: Edizioni Le Pensur, 2014.
- [3] C. M. Eastman, P. Teicholz, R. Sacks, and K. Liston, *BIM handbook : a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors*. Hoboken, N.J.: Wiley, 2008.
- [4] S. Feist, G. Barreto, B. Ferreira, A. Leitão, “Portable Generative Design for Building Information Modelling,” in *Proceedings of the 21st International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA 2016)*, Melbourne, Australia, 2016, pp. 147-156.
- [5] B. Lagendijk, S. Vadlotto, and A. Pignetti “Case Study: Absolute World Towers, Mississauga,” *CTBUH Journal*, Issue IV, pp. 12-17, 2012.
- [6] Y. Kalay, *Architecture’s new media : principles, theories and methods of computer-aided design*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 2004.