

MODULIB: PLATAFORMA PARA CONCEÇÃO E INDUSTRIALIZAÇÃO DE MÓDULOS ARQUITETÓNICOS

Sofia Feist ⁽¹⁾, Pedro Andrade ⁽²⁾, Margarida Amândio ⁽³⁾, Luís Sanhudo ⁽⁴⁾, Maria João Tomé ⁽⁵⁾, Vitor E.M. Cardoso ⁽⁶⁾, Fábio Gonçalves ⁽⁷⁾

(1) BUILT CoLAB, Lisboa, 0000-0003-2525-2899

(2) Blufab, Braga, 0000-0001-6953-7082

(3) BUILT CoLAB, Lisboa, 0000-0002-6340-0648

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

(5) BUILT CoLAB, Porto, 0009-0004-5020-3399

(6) BUILT CoLAB, Porto, 0000-0002-4886-2406

(7) TopBIM, Braga, 0009-0008-3768-1950

Resumo

A arquitetura modular tem-se afirmado como uma abordagem que potencia uma construção mais eficiente e sustentável, permitindo a redução de custos, prazos de execução e desperdício de materiais. A sua integração com metodologias digitais, como o BIM, reforça este potencial ao viabilizar a parametrização de elementos construtivos, a coordenação entre especialidades e a geração automatizada de informação e documentação.

Com base nestes princípios, este artigo apresenta o *ModuLIB*, uma solução composta por uma plataforma *web* e um *plug-in* para *Autodesk Revit*, que integra ferramentas de criação, configuração e desenvolvimento de divisórias modulares, com especial foco em instalações sanitárias, bem como uma biblioteca de objetos modulares acessível dentro e fora de ambientes BIM.

As ferramentas de criação de arquitetura modular abrangem o processo de construção desde a conceção até à execução, incluindo a definição paramétrica dos elementos construtivos, adaptada à configuração arquitetónica pretendida e otimizada para fabrico industrial, bem como a verificação automática do cumprimento de requisitos ergonómicos e regulamentares dos módulos resultantes. A plataforma permite ainda a produção de desenhos gráficos 2D para fabrico, a extração automática de tabelas de quantidades para orçamentação e a exportação dos módulos criados em formato IFC facilitando a sua integração com ferramentas BIM.

Desta forma, o *ModuLIB* contribui para a customização em massa, transformando soluções arquitetónicas em produtos configuráveis e preparados para a produção industrializada, alinhando o processo de projeto com a lógica *BIM-to-Fabrication*.

1. Introdução

Apesar dos avanços na adoção de metodologias *Building Information Modelling* (BIM) e na crescente industrialização da construção, o desenvolvimento de arquitetura modular continua a enfrentar desafios significativos, tanto ao nível do projeto como da produção. Por um lado, os projetistas carecem de ferramentas que facilitem a modelação de arquitectura modular *construction-ready*, capazes de traduzir soluções arquitetónicas em sistemas construtivos modularizados e subdivididos em painéis, preparados para a produção industrial e a execução em obra. Por outro lado, os fabricantes e os fornecedores, de soluções modulares enfrentam limitações no acesso a ferramentas de modelação flexíveis fora de ambientes BIM, que lhes permitam fornecer um catálogo de soluções industrializadas, e configuráveis às especificidades de cada projeto, mantendo a consistência técnica e a interoperabilidade com os processos de projeto digital.

Este artigo apresenta o *ModuLIB*, uma solução integrada composta por uma biblioteca de objetos BIM modulares, inicialmente criados e configurados em ambiente BIM através das ferramentas de gestão *AdminTools*, e um Configurador *Web*, como um ambiente de modelação 3D na *web*, que visa apoiar a criação, configuração e validação de arquitetura modular com documentação pronta para fabrico. A plataforma permite traduzir soluções arquitetónicas em sistemas construtivos modularizados e subdivididos em painéis, suportados por objetos BIM e alinhados com processos de produção industrial. Esta solução foi desenvolvida em parceria entre o BUILT CoLAB e o Grupo CASAIS com objetivo de desenvolver e facilitar o acesso a soluções modulares configuráveis e industrializadas.

A interoperabilidade da solução com ferramentas BIM é assegurada pela compatibilidade da biblioteca *ModuLIB* dentro e fora do ambiente BIM, bem como através da exportação das soluções arquitetónicas configuradas em formato *Industry Foundation Classes* (IFC), um formato aberto e normalizado que assegura a interoperabilidade entre ferramentas BIM. Adicionalmente, o sistema gera automaticamente documentação 2D e tabelas de quantidades, apoiando a transição do modelo digital para processos de orçamentação e fabrico.

2. Estado da Arte

A industrialização da construção tem sido amplamente reconhecida como um caminho para responder a desafios estruturais do setor, como a baixa produtividade, a fragmentação dos processos e a dificuldade em garantir previsibilidade de custos, prazos e qualidade. Neste contexto, a arquitetura modular destaca-se por promover a padronização, a produção *off-site* assente em princípios e processos *Lean* e a repetição controlada de soluções, permitindo ganhos significativos de eficiência e sustentabilidade. A adoção de metodologias BIM reforça este potencial ao suportar a modelação paramétrica, a coordenação entre especialidades e a geração automática de informação técnica. Contudo, a maioria das bibliotecas BIM existentes permanece centrada em componentes isolados, oferecendo um suporte limitado à definição e gestão de sistemas modulares completos, preparados para fabrico industrial.

Paralelamente, a literatura identifica uma transição progressiva de abordagens *Engineer-to-Order* (ETO), baseadas no desenvolvimento específico de soluções para cada projeto, para estratégias *Configure-to-Order* (CTO), em que a customização é realizada através da configuração de módulos e opções previamente definidas. Esta mudança está associada ao

conceito de customização em massa, que procura conciliar variabilidade arquitetónica com eficiência produtiva através da definição explícita de um espaço de soluções configurável [1, 2]. Neste enquadramento, os configuradores digitais assumem um papel central, ao permitir a configuração controlada de soluções modulares com base em regras geométricas, técnicas e regulamentares, reduzindo a necessidade de engenharia em diferentes fases do projeto.

Apesar destes avanços, persistem desafios relacionados com a interoperabilidade e com o acesso a ferramentas de configuração fora de ambientes BIM tradicionais. A integração entre bibliotecas modulares, configuradores e fluxos de trabalho *BIM-to-Fabrication* continua fragmentada, limitando a adoção de práticas de industrialização ao longo da cadeia de valor. Assim, a literatura aponta para a necessidade de soluções integradas que combinem objetos BIM modulares, mecanismos de configuração baseados em regras e interfaces digitais interoperáveis, capazes de suportar a conceção, validação e preparação para fabrico de arquitetura modular de forma consistente e escalável [3, 4].

3. Ecossistema *ModuLIB*: Arquitetura

O ecossistema *ModuLIB* foi concebido como uma arquitetura distribuída composta por diferentes componentes interligados que, em conjunto, suportam a criação, gestão e configuração de um catálogo de objetos modulares. Este ecossistema, ilustrado na Figura 1, integra o *ModuLIB*, uma biblioteca de objetos BIM modulares, o *AdminTools*, ferramenta de gestão que permite popular e gerir esta biblioteca, e um Configurador *Web*, um modelador 3D hospedado na *web*, capaz de traduzir soluções arquitetónicas modulares simples em sistemas construtivos detalhados e completos, assim como gerar automaticamente a documentação necessária para fabricação.

A arquitetura adotada visa apoiar a consulta do catálogo de objetos modulares, assim como a sua gestão e configuração, dentro e fora de ambiente BIM. Esta secção apresenta a arquitetura do sistema, descrevendo os conceitos fundamentais que estruturam a biblioteca e explicando o papel e a interação entre a biblioteca *ModuLIB*, as *AdminTools* e o Configurador *Web* no suporte a fluxos de trabalho BIM e *BIM-to-Fabrication*.

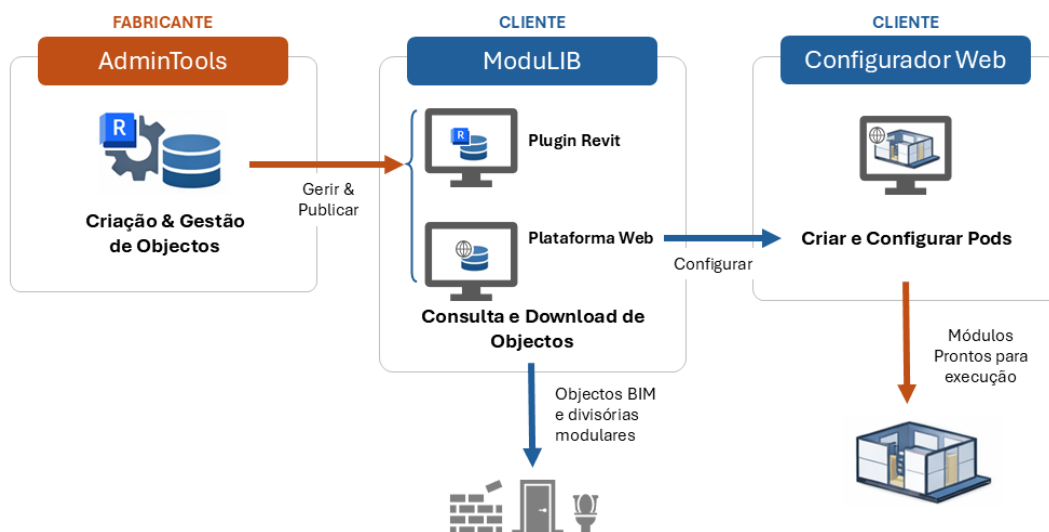


Figura 1: Diagrama da arquitetura do ecossistema *ModuLIB*.

3.1 Conceitos base

A biblioteca *ModuLIB* é composta por três tipos de objetos modulares, com diferentes graus de granularidade: *Pods*, Elementos e Texturas. Os *Pods* são unidades modulares volumétricas, compostas por múltiplos Elementos. Estes podem corresponder a quartos ou espaços 3D modulares completos, ou apenas a um conjunto de objetos que funcionam como uma unidade; e.g. uma instalação sanitária completa, composta por paredes, pavimento e equipamentos. Os Elementos correspondem aos tipos de objetos que compõem os *Pods*, i.e., tipos de paredes, tipos de pavimentos, tipos de tetos, ou outros tipos de objetos. As Texturas correspondem aos materiais que compõem cada Elemento; por exemplo, uma porta poderá ser composta por diferentes materiais, e.g. o pano da porta em madeira maciça, a maçaneta e dobradiças em aço inox.

Estes objetos seguem a seguinte hierarquia: os *Pods* são compostos por Elementos, e os Elementos contêm Texturas.

3.2 Biblioteca *ModuLIB*

A biblioteca *ModuLIB* constitui o principal ponto de acesso ao catálogo de *Pods*, Elementos e Texturas, suportando a navegação e consulta do catálogo através de grelhas de cartões com pré-visualização tridimensional (ver Figura 2). A exploração dos conteúdos é facilitada por funcionalidades integradas de filtragem, ordenação e pesquisa, que permitem refinar e reorganizar os resultados com base em atributos técnicos, metadados e métricas geométricas dos objetos (e.g., filtrar *Pods* pela sua área). A biblioteca *ModuLIB* inclui também uma funcionalidade de comparação de objetos que permite a análise lado a lado de *Pods*, Elementos ou Texturas, através de vistas dedicadas a cada tipo de objeto. A informação é apresentada de forma estruturada, com tabelas de atributos relevantes, o que facilita a identificação de semelhanças e diferenças entre objetos.

A biblioteca *ModuLIB* existe sobre a forma de *plug-in* para o *Autodesk Revit*, podendo ser acedida dentro de ambiente BIM, e sob a forma de plataforma *web*, acessível fora de ambiente BIM. Dentro do *Revit*, os objetos podem ser consultados, comparados, e inseridos diretamente no projeto aberto. Na plataforma *web*, o utilizador pode também aceder ao configurador *web* que permite usar os objetos da biblioteca para configurar novos *Pods* com toda a documentação necessária para fabrico. As funcionalidades do configurador serão apresentadas na secção 3.4.

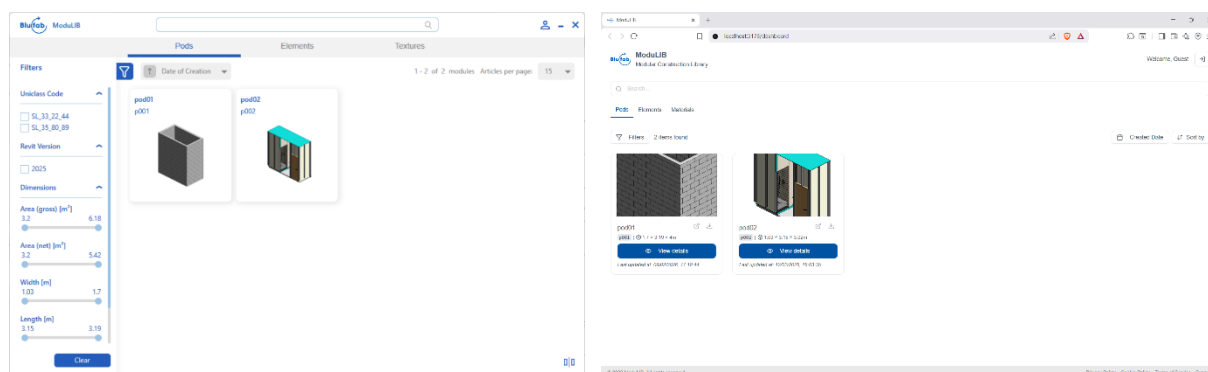


Figura 2: Interface gráfica do *ModuLIB*. Esquerda, *ModuLIB* *plug-in* em ambiente *Autodesk Revit*. Direita, *ModuLIB* *web* em ambiente *web*.

3.3 *ModuLIB AdminTools*

O *AdminTools* é uma extensão do *ModuLIB* que disponibiliza funcionalidades de gestão e administração da biblioteca. O *Admin Tools* foi desenvolvido como um *plug-in* para o *Autodesk Revit* devido à necessidade de reaproveitar modelos BIM de fabricantes já modelados em *Revit*, e de integrar o ecossistema *ModuLIB* com o fluxo de trabalho *BIM-to-Fabrication* existente. Para além das funcionalidades base de navegação e consulta do catálogo *ModuLIB* (incluindo filtragem, ordenação e pesquisa), o *AdminTools* dispõe também de todas as ferramentas necessárias para a criação, atualização e eliminação de objetos na biblioteca, em ambiente BIM. Todos os *Pods*, Elementos e Texturas disponíveis na biblioteca, quer em ambiente *Revit* quer na plataforma *web*, devem ser criados através destas ferramentas, configurando os objetos com todas as informações BIM e metadados necessários para serem usados na biblioteca e no configurador.

3.4 *Configurador Web*

O *Configurador Web* é um modelador 3D de *Pods* que permite criar, configurar e transformar soluções arquitetónicas em sistemas construtivos modularizados e subdivididos em painéis. A plataforma recorre aos objetos BIM disponibilizados na biblioteca *ModuLIB* para a modelação tridimensional, possibilitando simultaneamente a modelação e configuração de modelos 3D de *Pods* em ambiente *web*. A partir da plataforma *ModuLIB web*, o utilizador pode configurar novos *Pods*, quer a partir de *Pods* existentes, quer através da criação de soluções de raiz.

O *Configurador Web* foi concebido para suportar diferentes fases do desenvolvimento de arquitetura modular, desde a definição da sua configuração espacial até à preparação da informação necessária para fabrico. Para tal, integra mecanismos de validação automática que permitem verificar, em tempo real, a conformidade da solução configurada com requisitos geométricos, ergonómicos e regulamentares, reduzindo a ocorrência de erros de projeto em fases posteriores.

Para além da modelação e validação, o *Configurador Web* suporta também a geração automática de informação técnica associada aos *Pods* configurados, incluindo a definição de sistemas construtivos subdivididos em painéis, a extração de quantidades e a produção de documentação 2D para fabrico. A interoperabilidade com ferramentas BIM é assegurada através da exportação dos *Pods* em formato IFC, permitindo a sua reintegração em modelos BIM de projeto e coordenação.

4. *Workflow: towards BIM-to-Fabrication*

Esta secção apresenta uma demonstração do *workflow* de utilização do ecossistema *ModuLIB*, ilustrando a integração entre a biblioteca de objetos BIM, o configurador *web* e as ferramentas de gestão *AdminTools*. O objetivo é evidenciar a continuidade do fluxo de informação desde a conceção arquitetónica até à preparação para fabrico, bem como a interoperabilidade entre ambientes BIM e plataformas externas.

O *workflow* tem início no *AdminTools*, onde os fabricantes podem introduzir os seus produtos na biblioteca, sob a forma de objetos BIM. Ao contrário das bibliotecas tradicionais de objetos BIM, o *ModuLIB* inclui não só famílias de objetos, como também materiais e soluções modulares completas, i.e., *Pods*. O primeiro passo seria então popular a biblioteca com estes objectos para poderem ser utilizados no *ModuLIB* e no configurador.

4.1 *AdminTools*

Através das ferramentas de criação do *AdminTools*, é possível criar *Pods*, Elementos e Texturas, com os seus respetivos metadados, e publicá-los na biblioteca.

Para os *Pods*, são registados metadados identificadores do *Pod*, tais como o nome, a descrição e o *Uniclass Code* do quarto modelado que identifica o tipo de espaço (e.g., casa de banho, lavabo, etc), assim como as dimensões gerais da divisão (e.g., área, altura, largura, profundidade) e a lista de Elementos que o compõem. Esta lista de elementos contém ainda a informação necessária para a reconstrução do *Pod* em ambientes tridimensionais, como o configurador. Para cada instância de elemento são registados os parâmetros de localização, escala e orientação no espaço. É igualmente gerada automaticamente uma imagem representativa do *Pod*, a partir de uma vista 3D do modelo BIM que evidencie a sua arquitetura e os respetivos elementos, a qual serve como imagem de capa do *Pod* na biblioteca. Adicionalmente, são armazenados diversos ficheiros de geometria associados ao *Pods*, nomeadamente um ficheiro .rvt com a sua arquitetura, permitindo a sua futura reinserção no *Revit* através do *plug-in ModuLIB*, e ficheiros .obj e .mtl destinados ao visualizador 3D da biblioteca.

Os Elementos estão associados a uma família de objetos no contexto do *Revit*, sendo registadas informações relativas à família e ao tipo correspondente, bem como metadados introduzidos pelo utilizador, incluindo categoria, descrição e código único identificador e, opcionalmente, um URL para a ficha técnica ou página do produto. Adicionalmente, são registados parâmetros extraídos automaticamente do *Revit*, incluindo parâmetros obtidos para todos os elementos e outros específicos da categoria do elemento. Entre os parâmetros comuns incluem-se o *host* e a normal, necessários para a correta reutilização do elemento no configurador. O *host* define a existência e o tipo de superfície onde deve ser colocado (chão, teto ou parede), enquanto a normal permite determinar o posicionamento do elemento relativamente a essa superfície, quando existente. Podem ainda ser guardadas as Texturas associadas aos diferentes componentes do objeto. No momento da publicação, são armazenados uma imagem representativa do Elemento, ficheiros .obj e .mtl relativos à sua geometria e, consoante o caso, um ficheiro .rfa caso se trate de uma família *Revit*, ou um ficheiro .rvt com o objeto reduzido a dimensões unitárias caso se trate de uma família de sistema (e.g. tipos de paredes, chão ou tetos). Este último permite a reutilização do mesmo objeto em diferentes configurações, alterando as medidas unitárias através de operações de transformação geométrica (e.g., translação, rotação, escala).

As Texturas estão associadas aos materiais definidos no *Revit* e devem ser registadas com o respetivo nome, descrição, categoria, fabricante, modelo, custo, cor e transparência, conforme especificado no material original do *Revit*. Sempre que aplicável, o objeto é também publicado com a respetiva imagem de *mapping*.

4.2 *ModuLIB*

Uma vez publicados na biblioteca, os objetos ficam disponíveis tanto em ambiente BIM, através do *plug-in ModuLIB* para *Revit*, como na plataforma *ModuLIB web*. A base de dados de objetos é partilhada entre as plataformas e ambas disponibilizam o mesmo catálogo estruturado de *Pods*, Elementos e Texturas, permitindo a sua consulta, filtragem, comparação e seleção de objetos com base em atributos técnicos, ou geométricos.

Cada objeto pode ser consultado para examinar os metadados e dados técnicos associados a esse objeto (ver Figura 3), tal como inseridos no *AdminTools*, adicionado à lista de favoritos do

utilizador e os ficheiros podem ser descarregados localmente. Dentro do *plug-in Revit*, o utilizador pode ainda optar por importar os objetos da biblioteca diretamente para dentro de um projeto *Revit* aberto, usando os ficheiros .rvt guardados na biblioteca, sob a forma de ficheiros vinculados. Fora do *Revit*, o utilizador pode também iniciar a configuração de *Pods* existentes no Configurador *Web*.

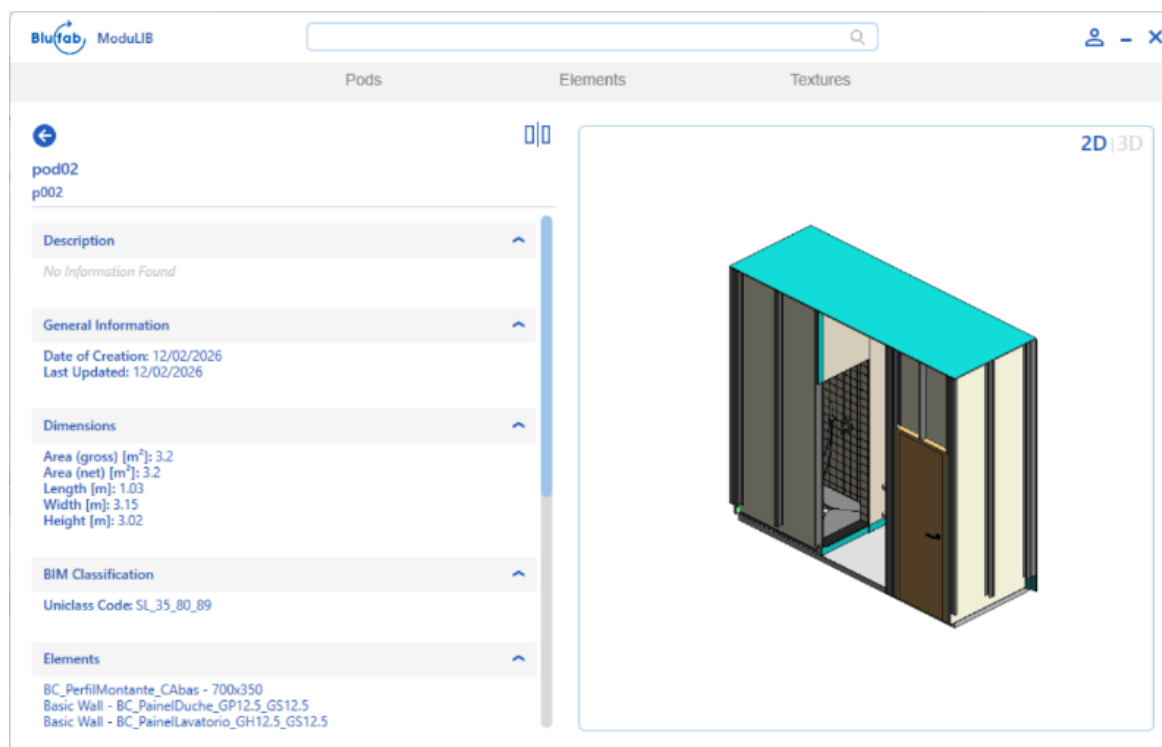


Figura 3: Interface gráfica da página de um *Pod* no *ModuLIB plug-in*.

4.3 Configurador *Web*

Na configuração de um *Pod*, o configurador segue um *workflow* com cinco fases: *Layout*, *Finishes*, *Equipment*, *Panels* e *Export*, visíveis nos separadores na Figura 4.

Na fase *Layout*, o utilizador pode definir a arquitetura geral do *Pod*, subdividindo, movendo ou eliminando paredes, e ajustando dimensões para obter a configuração arquitetónica pretendida. Nesta fase também é definida a altura das paredes, e o posicionamento e dimensionamento das portas e aberturas.

Na fase *Finishes*, o utilizador pode configurar os acabamentos e a composição construtiva das paredes, incluindo a introdução de secções horizontais de parede tais como, rodapé, lambrim, e cornilha. Para cada secção, pode ser atribuído um material da biblioteca de Texturas disponíveis na biblioteca *ModuLIB*, a sua altura, espessura, e posicionamento do mapa UV na geometria da parede.

Na fase *Equipment*, são introduzidos e configurados os equipamentos do *Pod*, recorrendo aos Elementos BIM provenientes da biblioteca *ModuLIB*. Durante esta fase, o sistema executa automaticamente verificações de colisões e de conformidade com requisitos ergonómicos e regulamentares (e.g., distâncias mínimas entre equipamentos), ao colocar e movimentar os objectos em cena, assinalando eventuais incumprimentos com avisos para serem corrigidos (e.g. uma sanita não deve ser colocada a menos de 51cm de um lavatório). Numa instalação

sanitária de acessibilidades são feitas verificações adicionais de requisitos, e qualquer incumprimento no modelo 3D é reportado ao utilizador.

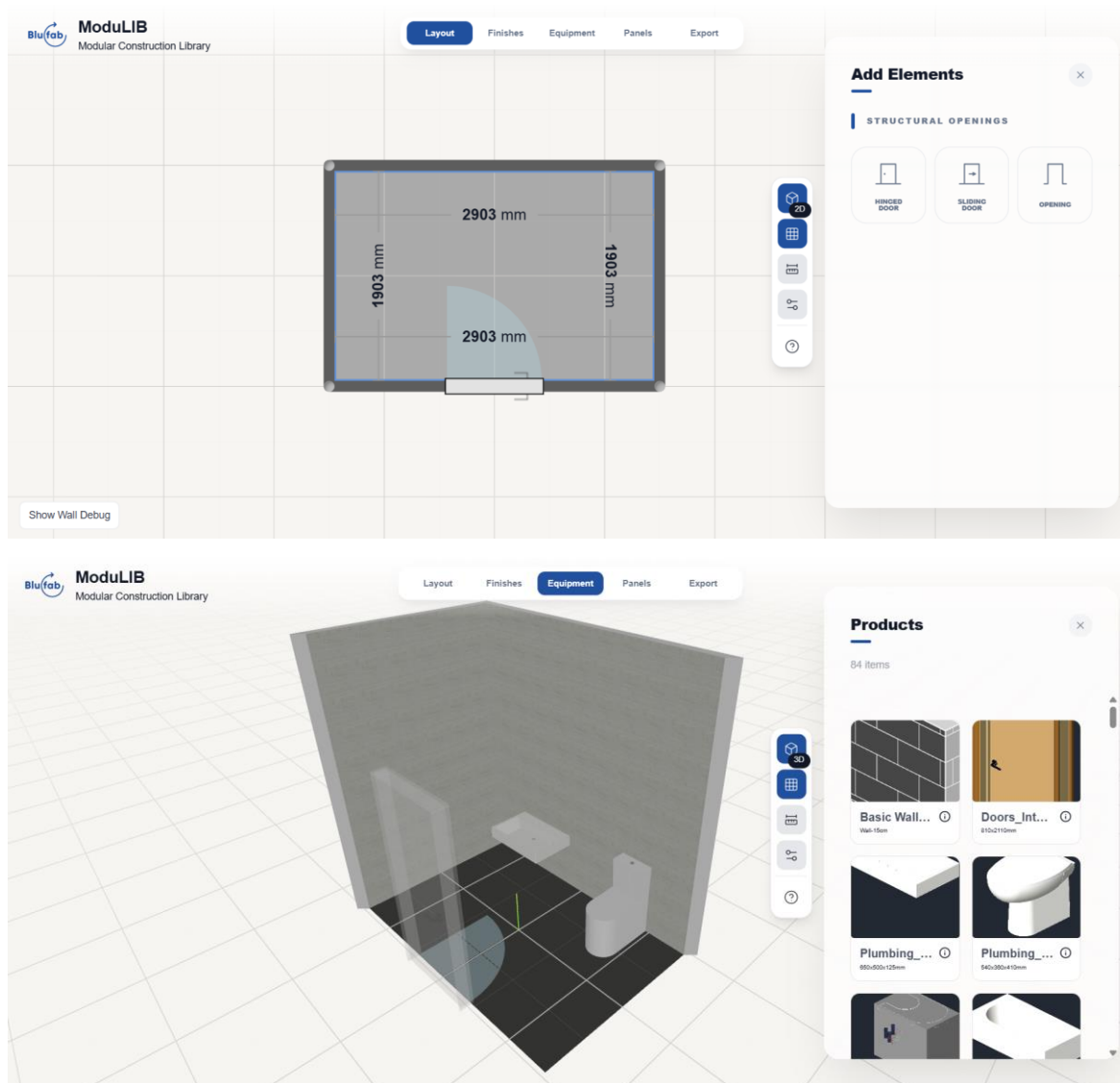


Figura 4: Interface gráfica do *Configurador Web*. Em cima: vista 2D; em baixo: vista 3D

A fase de *Panels* traduz a solução arquitetónica configurada num sistema construtivo modularizado e subdividido em painéis, através da definição de regras paramétricas de divisão e especificação dos painéis. Esta etapa assegura a correspondência entre o modelo digital e a lógica de produção industrial, permitindo a geração consistente dos elementos construtivos necessários à fabricação.

Finalmente, na fase *Export*, o *Pod* configurado pode ser exportado em diferentes formatos, incluindo modelos IFC compatíveis com ferramentas BIM, tabelas de quantidades em formato CSV e documentação 2D em formato PDF. Estes outputs permitem a reintegração do *Pod* em projetos BIM, bem como o suporte a processos de orçamentação e fabrico, assegurando a continuidade do fluxo *BIM-to-Fabrication*.

Este *workflow* evidencia a capacidade do *ModuLIB* em articular a modelação arquitetónica, a configuração modular e a preparação para produção industrial num processo integrado e interoperável. Ao permitir a configuração de *Pods* fora do ambiente BIM, mantendo a compatibilidade com ferramentas BIM, o sistema contribui para a flexibilização dos fluxos de trabalho e para a aproximação entre projeto, fabrico e execução.

5. Discussão e Conclusão

Este artigo apresenta o *ModuLIB* como uma solução integrada para responder a desafios existentes no desenvolvimento de arquitetura modular, estabelecendo uma ponte entre a modelação BIM e os processos de fabricação industrial. Através da articulação entre uma biblioteca de objetos BIM modulares, ferramentas de gestão *AdminTools* e um Configurador *Web*, o sistema proposto demonstra a viabilidade de uma abordagem integrada que suporta todo o ciclo de desenvolvimento modular, desde a conceção até à preparação para fabrico.

A solução proposta promove a transição de abordagens *Engineer-to-Order* para *Configure-to-Order*, ao definir um espaço de soluções configurável sustentado por objetos modulares predefinidos e disponibilizados na biblioteca, regras geométricas, construtivas e regulamentares. No processo tradicional, a definição de arquitectura modular implicava múltiplas iterações entre projetista e fabricante, com sucessivos ciclos de validação e reformulação. Com o Configurador *Web*, parte deste processo é internalizado no próprio sistema, reduzindo o *back-and-forth* e a necessidade de engenharia corretiva em fases posteriores, contribuindo para maior eficiência e alinhamento com princípios de industrialização.

Os principais contributos da solução residem na possibilidade de traduzir soluções arquitetónicas em sistemas construtivos modularizados e estruturados em painéis, bem como na democratização do acesso à modelação modular fora de ambientes BIM tradicionais. Ao tornar explícitas as regras de fabrico durante o processo de configuração, o sistema aumenta a transparência técnica para o arquiteto, permitindo que decisões de projeto sejam tomadas com plena consciência das implicações construtivas e industriais. Ao mesmo tempo, ao permitir a configuração fora do ambiente BIM, o sistema contribui para uma maior continuidade do fluxo de informação e a compatibilidade com fluxos *BIM-to-Fabrication*.

Atualmente, a fase de panelização do Configurador *Web* do *ModuLIB* baseia-se numa lógica paramétrica simplificada, na definição da posição de montantes e na subdivisão de painéis baseada na configuração do utilizador, e sem incorporar ainda um nível de detalhe construtivo associado a furações, ligações mecânicas ou necessidades das especialidades. Desenvolvimentos futuros deverão aprofundar o nível de detalhe técnico do modelo de panelização, aproximando-o ainda mais da realidade de fabrico, bem como incorporar estratégias de otimização orientadas para a repetição de painéis, normalização dimensional e redução de desperdício de material, reforçando a eficiência produtiva e a escalabilidade da solução.

Em síntese, o *ModuLIB* demonstra o potencial de uma abordagem híbrida, que combina ambientes BIM e plataformas *web*, para suportar a industrialização da construção e o desenvolvimento de arquitetura modular. Ao promover interoperabilidade, configuração baseada em regras e articulação entre projeto e fabrico, a solução contribui para práticas mais eficientes, consistentes e alinhadas com os princípios da industrialização da construção.

Agradecimentos

Este trabalho tem o cofinanciamento do PRR – Plano de Recuperação e Resiliência e União Europeia – www.recuperarportugal.gov.pt | PRR - Investimento RE-C05-i02: Missão Interface - CoLAB, contando também com a colaboração e o apoio do Grupo CASAIS.

Referências

- [1] B. J. Pine, *Mass Customization: The New Frontier in Business Competition*. Boston, MA, EUA: Harvard Business School Press, 1993.
- [2] F. T. Piller, "Mass customization: Reflections on the state of the concept," *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, vol. 16, no. 4, pp. 313–334, 2004.
- [3] Hvam, N. H. Mortensen, and J. Riis, *Product Customization*. Berlin, Alemanha: Springer, 2008.
- [4] A. Haug, L. Hvam, and N. H. Mortensen, "Definition and evaluation of product configurator development strategies," *Computers in Industry*, vol. 63, no. 5, pp. 471–481, 2012.