

**Desenvolvimento de uma Solução de Interoperabilidade
entre BIM e Programa de Análise de Estruturas: Aplicação
à Avaliação Sísmica Global do Chalet da Condessa d'Edla**

João André Gancho Barroso

Dissertação para a obtenção de grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientadores:

Professora Doutora Rita Maria do Pranto Nogueira Leite Pereira Bento

Professor Doutor Alexandre Bacelar Gonçalves

Júri

Presidente: Professor Doutor Mário Manuel Paisana dos Santos Lopes

Orientador: Professor Doutor Alexandre Bacelar Gonçalves

Vogal: Professora Doutora Ana Paula Martins Falcão Flor

Outubro de 2021

Agradecimentos

Com este trabalho acabará também o meu percurso no Instituto Superior Técnico. Foram sete anos de histórias e superação em que encontrei algumas das pessoas mais inspiradoras que já conheci, professores e alunos que trabalham todos os dias para superarem as expectativas e para conseguirem fazer muito com pouco. Aos funcionários, professores e alunos que fazem desta uma instituição de renome deixo um sentido agradecimento. Gostaria de destacar e deixar um agradecimento muito especial a quem me acompanhou na redação deste trabalho: a professora Rita Bento, o professor Alexandre Gonçalves e a Madalena Ponte. Um muito obrigado pela paciência, motivação e acima de tudo pela dedicação inabalável que me servirá de exemplo no futuro.

À minha família tenho que agradecer o esforço para me proporcionarem a possibilidade de embarcar nesta aventura e o incentivo a olhar sempre em frente e nunca baixar os braços. Graças a vocês consegui este triunfo, que também é vosso.

Por fim aos amigos que fiz ao longo dos anos e que me acompanharam. Nem sempre foi uma viagem fácil, mas graças a vocês será sempre uma que recordarei com saudade pelos momentos fantásticos e pelas experiências únicas. Novas aventuras virão e será um prazer seguir a vida com a vossa companhia.

Resumo

No presente estado da indústria da construção, a falta de interoperabilidade é um dos maiores entraves à utilização generalizada da metodologia BIM como plataforma central de modelação. Isto acontece por se tratar de uma indústria altamente heterogénea, existindo centenas de fornecedores e utilizadores de *software* especializado para os quais é extremamente difícil criar um meio único de conversão de dados. Devido a este problema a ligação entre o *Revit* e o *3Muri*, um programa de avaliação de estruturas de alvenaria, é substancialmente mais difícil que o necessário. Apesar disso e tirando partido das ferramentas disponíveis no *Revit*, especialmente o *Dynamo* (um *plugin* de programação visual), este problema pode ser parcialmente resolvido.

Na modelação em *3Muri* o utilizador deve importar uma planta simplificada em CAD da estrutura para cada piso e a partir desta planta modelar as paredes e aberturas. Utilizando o *Dynamo* foi desenvolvido um programa (R3AD) para criar, automaticamente, uma planta com tanta informação relevante à análise sísmica quanto possível e assim simplificar o trabalho de conversão de BIM para *3Muri*.

Por fim, a ferramenta desenvolvida será aplicada a um caso de estudo, o do *Chalet* da Condessa d'Edla em Sintra na sua conceção original, para demonstrar a sua utilização e flexibilidade, bem como as suas limitações.

Ao modelo *3Muri* desenvolvido foi feita uma avaliação do comportamento sísmico global e os resultados obtidos foram comparados com um estudo anterior desenvolvido para o edifício no seu estado atual incluindo os elementos de reforço estrutural acrescentados em 2009 na sua reabilitação.

Palavras-Chave

Interoperabilidade BIM, *Dynamo* BIM, *Revit*, *3Muri*, Análise estática não linear (Análise *Pushover*), *Chalet* da Condessa de Edla

Abstract

In the current state of the construction industry, the lack of interoperability is one of the major obstacles to the generalized BIM utilization as a centralized platform for modelling. This happens because it is a highly heterogeneous industry, with hundreds of specialized software providers and users for whom it is extremely difficult to create a single way to exchange data. Because of this, the connection between Revit and *3Muri*, a seismic analysis program, is substantially more difficult than expected. However, by using the tools available in Revit, specifically Dynamo (a visual programming plugin), this problem can partially be solved.

To create the *3Muri* model a user uploads a simplified CAD floor plan for each of the levels which is used as a base to support the placement of walls and openings in the model. Using Dynamo, a program (R3AD) was developed to create, automatically, this floor plan and include in it as much information about the seismic analysis as possible and, in this way, facilitate the task of converting the BIM model into a *3Muri* model.

Lastly, this developed tool was used in a case study, the Chalet of the Countess of Edla in Sintra in its as-built configuration, to demonstrate its use and flexibility, and to support a discussion on the extent of the proposed automation.

With the developed *3Muri* model, the global seismic behaviour of the Chalet was assessed and the results obtained were compared to a previous study developed to the building in its current state, i.e. including the structural strengthening elements added in 2009 in its rehabilitation.

Keywords

BIM Interoperability, Dynamo BIM, Revit, *3Muri*, Non-linear Static Analysis (Pushover Analysis), Chalet of the Countess of Edla

Índice

Agradecimentos.....	ii
Resumo	iv
Abstract.....	vi
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Estrutura da dissertação.....	4
2 Interoperabilidade e Características Gerais <i>Revit / 3Muri</i>	5
2.1 Introdução.....	5
2.2 Características gerais do <i>Revit</i>	6
2.2.1 Hierarquia no <i>Revit</i>	6
2.2.2 <i>Parametric Design</i> no <i>Revit</i>	8
2.3 Características gerais do <i>3Muri</i>	9
2.3.1 Avaliação Sísmica de Edifícios.....	10
2.3.2 Validação do Programa	21
2.3.3 Modelação no <i>3Muri</i>	22
2.4 Interoperabilidade Utilizando <i>Industry Foundation Classes</i>	24
2.5 Automatização de Tarefas.....	26
2.5.1 <i>Revit API</i>	27
2.5.2 <i>Dynamo</i>	27
3 Ferramenta de Automação em <i>Dynamo: Revit to 3Muri Automated Drawing (R3AD)</i>	33
3.1 Abordagem ao Problema.....	33
3.2 Programação Visual em <i>Dynamo</i>	34
3.2.1 Nós ou <i>nodes</i>	35
3.2.2 Bibliotecas e <i>Packages</i>	36
3.3 Condicionantes a Aplicar ao Modelo <i>Revit</i>	36
3.4 Funcionamento do Programa Desenvolvido	38
3.4.1 <i>Input</i>	39

3.4.2	Seleção dos Elementos Relevantes para a Modelação no <i>3Muri</i>	40
3.4.3	Compilação de Informação.....	41
3.4.4	Resumo da Informação	42
3.4.5	Extração da Informação	44
3.4.6	Pós-Processamento	45
3.4.7	Versão Final.....	46
4	Aplicação do <i>R3AD</i>	47
4.1	Caso de Estudo 1: Modelo Simples	47
4.1.1	Utilização da Ferramenta Desenvolvida.....	48
4.1.2	Exportação da Planta para Formato <i>CAD</i>	49
4.1.3	Utilização do <i>Dynamo Player</i>	50
4.1.4	Conversão do ficheiro em <i>.dxf</i> e importação para o <i>3Muri</i>	50
4.2	Aplicação ao <i>Chalet</i> da Condessa d'Edla	51
4.2.1	Descrição da Estrutura	52
4.2.2	Configuração do <i>R3AD</i>	60
4.2.3	Definição da Ação Sísmica.....	63
4.3	Análise Comparativa do <i>Chalet</i>	64
4.3.1	Análise Modal e Espectros de Resposta.....	64
4.3.2	Curvas de Capacidade Resistente	66
4.3.3	Curva Bilinear e Verificação da Segurança.....	69
5	Conclusões.....	75
5.1	Programação e Automatização no Ambiente BIM	76
5.2	Integração Total do <i>BIM</i>	76
5.3	Avaliação Sísmica Global do <i>Chalet</i> da Condessa d'Edla - Efeitos dos Reforços Estruturais... ..	77
5.4	Desenvolvimentos Futuros	78
	Referências	81

Índice de Figuras

Figura 1 - Hierarquia do Revit (About The Dynamo Primer, consultado a 09/09/2021)	6
Figura 2 - Exemplo da hierarquia do Revit, com a Category Windows (1), Family vão duplo e Type vão duplo. É também possível ver os parâmetros de dimensions do Instance em causa	7
Figura 3 - Exemplo de parâmetros de uma Family no ambiente Revit, neste caso definidos como valores fixos	8
Figura 4 - Representação esquemática do processo de interoperabilidade entre o Revit e o 3Muri	10
Figura 5 - Exemplo da idealização de uma parede regular em pórticos equivalentes com os passos seguidos pelo 3Muri para subdividir a parede (Lagomarsino et al., 2013b)	14
Figura 6 - Exemplo da idealização de uma parede irregular em pórticos equivalentes (Lagomarsino et al., 2013).....	15
Figura 7 - Modos de rotura associados a painéis de alvenaria sujeitos a forças laterais no plano (Penna, et al., 2014).....	17
Figura 8 - a) Nembo com forças interiores (N, V, M) e variáveis cinemáticas (u, w, ϕ) representadas; b) Gráfico com critérios de rotura à flexão e ao corte em função do esforço axial (à esquerda) e gráfico com comportamento bilinear do nembo (à direita) (adaptado de Lagomarsino et al., 2013)	18
Figura 9 - Exemplo de curva de capacidade que compara as forças horizontais aplicadas com os deslocamentos (S.T.A. DATA, 2021)	20
Figura 10 - Comparação das curvas de capacidade estimadas pelos softwares de avaliação sísmica e as reais (Marques e Lourenço, 2014)	22
Figura 11 - Interface do 3Muri (S.T.A. DATA, 2021).....	23
Figura 12 - Exemplo de representação das paredes em planta no 3Muri (S.T.A. DATA, 2021).....	23
Figura 13 - Janela para introdução da geometria das aberturas (S.T.A. DATA, 2021).....	24
Figura 14 - Exemplo de secção horizontal resultante do módulo IFC - BIM (S.T.A. DATA, no date)	26
Figura 15 - Exemplo de um algoritmo em Dynamo descrito no modelo de programação visual	28
Figura 16 - Referencias geométricas do modelo (Ostrowska-Wawryniuk e Nazar, 2018)	30
Figura 17 - Exemplo de algoritmo básico no Dynamo	34
Figura 18 - Geometria que resulta do algoritmo do exemplo anterior	35
Figura 19 - Exemplo de um nó em Dynamo (About The Dynamo Primer, s/d)	35
Figura 20 - Exemplo de parametrização de uma abertura em que os parâmetros Altura Total, Largura Total e Alt. Parapeito estão devidamente identificados	37
Figura 21 - Representação esquemática do funcionamento da ferramenta R3AD desenvolvida, dividida em grupos de funções	38
Figura 22 - Grupo de input para a ferramenta.....	39
Figura 23 - Grupo de filtragem de elementos de parede	40
Figura 24 - Grupo de filtragem das aberturas	41
Figura 25 - Grupo de conversão dos elementos de parede em geometria (retas)	41

Figura 26 - Grupo de cálculo da espessura das paredes resistentes.....	42
Figura 27 - Grupo de cálculo dos parâmetros relevantes para as aberturas.....	42
Figura 28 - Exemplo de conversão de elementos escritos em geometrias	43
Figura 29 - Exemplo de algoritmo para extração de informação para Excel (à esquerda) e informação extraída do Dynamo em formato Excel (à direita).....	43
Figura 30 - Grupo de compilação da informação das paredes	44
Figura 31 - Grupo de compilação da informação para as aberturas	44
Figura 32 - Grupos de extração de informação para ficheiros CAD para aberturas, paredes e legendas .	45
Figura 33 - Exemplo do alinhamento das paredes da planta do edifício para transição para o 3Muri. À esquerda antes do alinhamento das paredes e à direita com a correção já efetuada	46
Figura 34 - Estrutura modelo para aplicação da metodologia	47
Figura 35 - Dynamo Launcher no UI do Revit.....	48
Figura 36 - Workspace do Dynamo.....	48
Figura 37 - Planta em formato .dwg	49
Figura 38 -Janelas do Dynamo Player. À esquerda com a lista das funções disponíveis. À direita os inputs e outputs do R3AD.	50
Figura 39 - Workplace do 3Muri com a planta criada já importada	51
Figura 40 - Modelo do Chalet da Condessa d'Edla em Revit: elementos exteriores (esq.); planta do 1.º piso (dir.)	52
Figura 41 - Plantas dos pisos térreo (esq.) e primeiro piso (dir.) com a identificação do tipo de parede, imagem adaptada de Neves da Silva (2020)	53
Figura 42 - Arcos em alvenaria do piso térreo (crédito: Parques de Sintra – Monte da Lua, S.A.).....	54
Figura 43 - Reforço da estrutura sob os arcos em alvenaria (Imagens da PSML e CivilSer)	54
Figura 44 - Distribuição das cargas da cobertura nas paredes do edifício, adaptado de Neves da Silva (2020)	58
Figura 45 – Utilização dos pisos: a verde as divisões do segundo piso acessíveis ao público, a laranja a localização do piso intermédio (que não é acessível ao público) em relação ao primeiro piso.	58
Figura 46 - Tetos decorativos por divisão: a verde o teto sanqueado com esteira e a laranja os tetos sanqueados ou fasquiados.....	59
Figura 47 - Grupo para correção da localização das aberturas.....	61
Figura 48 - Incompatibilidades encontradas na localização das paredes resistentes	62
Figura 49 - Doors Family no Revit em que não estão parametrizadas as medidas da alturas e largura da abertura	62
Figura 50 – Translações do primeiro e quarto modos de vibração para o modelo não reforçado (à esquerda) e para o modelo reforçado (à direita)	66
Figura 51 - Espectros de resposta e períodos principais para o modelo reforçado	66
Figura 52 - Posição dos nós no modelo não reforçado	67
Figura 53 - Curvas de capacidade resistente na direção x.....	67

Figura 54 - Curvas de capacidade resistente na direção y	68
Figura 55 - Posição dos reforços metálicos em relação aos arcos de alvenaria e aos alinhamentos das paredes, retirado do modelo Revit (arcos a verde, estrutura metálica a azul)	68
Figura 56 - Curvas de capacidade bilineares para um sistema de um grau de liberdade da estrutura não reforçada.....	69
Figura 57 - Curvas de capacidade bilineares para um sistema de um grau de liberdade da estrutura reforçada.....	69
Figura 58 - Verificação da segurança para a estrutura não reforçada	73
Figura 59 - Verificação da segurança para a estrutura reforçada.....	73

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Estimativas de propriedades mecânicas de paredes de diferentes tipos (Candeias et al., 2020)	16
Tabela 2 - Propriedades mecânicas consideradas para os materiais das paredes resistentes, adaptado de Neves da Silva (2020)	55
Tabela 3 – Relação entre estados limite e capacidades para a avaliação de paredes de alvenaria não armadas sujeitas a esforços no seu plano, adaptado de Candeias et al. (2020)	56
Tabela 4 – Propriedades mecânicas da madeira do pavimento, adaptado de Neves da Silva (2020)	57
Tabela 5 – Resumo das cargas verticais aplicadas, adaptado de Neves da Silva (2020)	60
Tabela 6 – Valores recomendados dos parâmetros descrevendo os espectros de resposta elástica para sismos do tipo 1 e 2 em terrenos do tipo A (European Committee for Standardization, 2010)	64
Tabela 7 - Valores da aceleração máxima a_g (m/s ²), adaptado de Neves da Silva (2020)	64
Tabela 8 - Modos de vibração e participação de massas para o modelo não reforçado	65
Tabela 9 - Modos de vibração e participação das massas no modelo reforçado	65
Tabela 10 - Propriedades da curva bilinear para o modelo não reforçado	70
Tabela 11 - Propriedades da curva bilinear para o modelo reforçado	71
Tabela 12 - Deslocamentos último e objetivo para a estrutura não reforçada com múltiplos graus de liberdade	72
Tabela 13 - Deslocamentos último e objetivo para a estrutura reforçada com múltiplos graus de liberdade	72

1 Introdução

1.1 Enquadramento

O *Building Information Modeling* (BIM) é um procedimento que permite criar e partilhar, em ambiente virtual, um modelo de um edifício contendo toda a informação relevante para as diferentes especialidades envolvidas no processo da sua conceção, construção, manutenção e utilização (Azhar e Asce, 2011). Surgiu na década de 1990 como um desenvolvimento natural dos sistemas de CAD (*Computer Aided Design*) permitindo anexar a um modelo 3D informação paramétrica complementar, facilitando a sua partilha e estimulando a colaboração entre todas as áreas de especialização presentes num projeto de arquitetura, engenharia e construção (AEC) (Grilo e Jardim-Gonçalves, 2010).

A característica mais marcante que distingue BIM e CAD é a disponibilidade de uma base de dados onde toda a informação relativa à construção é guardada (seja em formato de texto associado a um elemento tridimensional ou no próprio formato geométrico do elemento no modelo), editada e consultada pelos vários intervenientes no projeto. Esta metodologia de conceção tem óbvias vantagens, como a de facilitar a identificação de qualquer tipo de incompatibilidade entre as especialidades (visto estarem todas inseridas no mesmo ambiente) e a de facilitar a partilha de informação, tornando o BIM numa das mais versáteis e revolucionárias ferramentas da área da AEC.

Estes novos meios, para além da já reconhecida utilidade nas várias fases de vida de uma construção nova, mostram-se também promissores na preservação e manutenção de edifícios históricos, conhecida como *Heritage Building Information Modelling* (H-BIM). Esta metodologia tem como objetivo criar uma plataforma de partilha e armazenamento de informação detalhada de edifícios históricos ao aplicar a metodologia BIM à manutenção e reabilitação de património construído. Esses modelos são especialmente úteis quando: existe perda de património construído que tem de ser recuperado conforme estava ou são utilizados para manter o registo de intervenções e manutenções ao longo da vida útil do edifício (Machete *et al.*, 2021).

Ainda assim, esta metodologia de partilha de informação tem algumas dificuldades de implementação significativas. Um dos principais desafios à implementação do BIM passa por contornar as dificuldades de compatibilidade entre sistemas, tanto entre programas de BIM de diferentes fornecedores como com outros programas utilizados por profissionais da indústria (Grilo e Jardim-Gonçalves, 2010). Atualmente existem vários fornecedores de soluções BIM no mercado (*Autodesk, Archicad, Allplan*, entre outros) e cada um oferece no seu sistema a possibilidade de interoperabilidade (com maior ou menor flexibilidade) entre programas da mesma família (i.e., programas do mesmo fornecedor como é o caso do *Revit* e do *Robot*, ambos da *Autodesk*). Todavia, numa indústria heterogénea como a da construção em que os vários intervenientes, muitos deles de pequena dimensão, utilizam a ferramenta que melhor se adequa à sua

função no projeto, essa interoperabilidade muitas vezes é insuficiente, ficando a faltar um elemento de ligação entre sistemas de diferentes fornecedores.

É no contexto da interoperabilidade entre sistemas que surge o interesse em ligar o *Revit* (um dos programas de BIM de maior divulgação no mercado) ao *3Muri* (um *software* de análise sísmica de estruturas em alvenaria que se baseia na geometria tridimensional dos elementos estruturais e nas suas propriedades físicas para prever o comportamento do edifício). O *Revit* foi lançado em 2000 pela *Charles River Software* e posteriormente comprado pela *Autodesk* em 2002. O *3Muri* foi criado inicialmente como uma ferramenta para simular o comportamento de estruturas de alvenaria sujeitas a ações sísmicas por professores das Universidades de Génova e de Pavia sob o nome *Tremuri* (versão científica) e, posteriormente, serviu de base para uma versão comercial simplificada, o *3Muri*.

À semelhança de muitos outros programas utilizados pelas diversas áreas de especialização da AEC a interoperabilidade entre *Revit* e *3Muri* não é imediata e requer a utilização de módulos específicos que não estão incluídos no *package* de base (e que mesmo assim revela algumas limitações ao nível da quantidade de informação que consegue transmitir). É este tipo de situação que reside o verdadeiro problema para a interoperabilidade, como refere Turk (2020), os sistemas fechados, em que a transmissão de informação só é possível com programas da mesma família, e a que se adiciona a falta de normas que se apliquem a toda a indústria e que permitam aos vários programas “comunicar a uma só língua”. Infelizmente este problema mantém-se desde a origem dos sistemas BIM, e é previsível que se venha a agravar com o desenvolvimento de novas tecnologias e o despontar de novos programas mais avançados, embora existam alternativas que possam permitir, até certo nível, automatizar a desejada transmissão de dados.

Uma das alternativas é a criação de um sistema internacional que todos os fornecedores aceitem e de utilização livre, que permita a troca de dados entre programas, como o *Industry Foundation Classes* (IFC). Com várias versões desde 1995 (neste momento o *IFC4* encontra-se em fase de testes, sendo esta a 8.^a versão lançada), o IFC é um sistema assente num repositório de dados que permite capturar a geometria e a informação associadas a um ficheiro BIM e transferi-la entre *softwares* (Thein, 2011). Têm sido publicadas novas versões com sucessivos aperfeiçoamentos e com maior capacidade de interoperabilidade (Pinho, 2013). O IFC assenta sobre um formato aberto (*open source*), algo que lhe confere a vantagem de poder ser utilizado, alterado e partilhado por qualquer interveniente na área. Este formato de dados é desenvolvido pela *buildingSMART* (anteriormente conhecida por *International Alliance for Interoperability* ou *IAI*) e tem como objetivo combater a fragmentação da indústria da construção ao criar um padrão que permita a interoperabilidade entre programas na área do BIM. Neste momento é especialmente utilizado para interligar programas de BIM de diferentes fornecedores, mas outros intervenientes, como a *STAdata* com o *3Muri*, também utilizam este formato numa tentativa de permitir alguma interligação entre os seus produtos e os *softwares* de *BIM*.

Uma outra possibilidade é o recurso a linguagens de programação que permitam aos utilizadores criar e partilhar as suas próprias soluções adaptadas ao problema que querem resolver. Tal é possível fazer no

âmbito do *Revit* através do seu API (*application programming interface*), uma interface de programação existente no programa que utiliza linguagens de programação comuns – como C# – e dá ao utilizador a possibilidade de criar *add-ins* ou programas no *Revit*. O *Dynamo* é uma ferramenta de programação visual (*Visual Programming* ou VP), disponível em conjunto com o *Revit* desde a versão de 2020 como *plug-in*, com capacidade para adicionar e ajustar parâmetros no ambiente BIM e que tira partido do API (sem para isso ser necessário conhecimentos profundos de programação), podendo desempenhar funções semelhantes. A primeira versão do *Dynamo* surgiu em 2010, e desde então tem evoluído com o apoio da *Autodesk* e de uma comunidade particularmente ativa no seu desenvolvimento e enriquecimento. Esta participação da comunidade acontece porque o *Dynamo* é um programa de *open source*, para o qual a comunidade desenvolveu ao longo dos anos milhares de *packages*, ou seja, funcionalidades adicionadas pelos utilizadores que podem ser partilhadas livremente com toda a comunidade, com as quais expandiu o reportório de funcionalidades (Soto Ogueta, 2012). Esta ferramenta de VP tem duas grandes vantagens que a distinguem: o facto de ser *open source* e, por esse motivo, ter uma comunidade que é incentivada a partilhar (de forma gratuita e simples) os seus programas; e o facto de utilizar a programação visual como meio de *input*, tornando muito mais simples a sua compreensão e utilização mesmo por utilizadores que não têm conhecimentos aprofundados em programação. Assim, a sua utilização por estes últimos é relativamente simples, tornando-se ideal para permitir aos intervenientes da área da AEC tirar partido da capacidade de programação no ambiente *Revit* sem ser preciso conhecimentos profundos de código para utilizar o API.

1.2 Objetivos

A presente dissertação tem como objetivo principal desenvolver uma metodologia que permita uma transferência da informação geométrica e paramétrica de uma estrutura de alvenaria de forma automática, ou tão próxima disso quanto possível, entre os programas *Revit* e *3Muri*. Associado a esse objetivo pretende-se ainda ilustrar a utilização dessa metodologia e aplicá-la a dois casos de estudo: um primeiro extremamente simples que pretende demonstrar como funciona a ferramenta desenvolvida (R3AD); e um segundo mais complexo em que são comparados os resultados obtidos pela metodologia com os resultados de estudos anteriores. Neste estudo serão comparados os resultados da avaliação sísmica do *Chalet* da Condessa d'Edla, em Sintra, antes e depois do reforço estrutural a que foi sujeito durante o processo de restauro que sofreu (Neves da Silva, 2020).

Este trabalho servirá também como demonstração das possibilidades que a programação, mesmo que em código de baixo nível (*low-code*), apresenta no contexto da automatização de tarefas na indústria da AEC.

O *3Muri* permite a utilização de elementos estruturais de vários materiais, desde betão armado a alvenaria reforçada ou estrutura metálica, mas, tratando-se de um programa com especial utilidade na avaliação de estruturas de alvenaria não armada, será esse o foco da metodologia desenvolvida.

Para atingir os objetivos propostos será necessário:

- Explorar as possibilidades de interoperabilidade existentes entre *Revit* e *3Muri* utilizando os métodos já mencionados (*Revit API*, *Dynamo* ou ficheiros *IFC*) com recurso à literatura disponível. Este ponto requer conhecimentos quanto ao funcionamento do *Revit* de forma a compreender como são definidos os vários elementos que compõem o modelo, e conhecimentos relativos ao funcionamento do *3Muri* que permitam avaliar a informação que é necessário recolher do modelo e quais são os métodos de introdução de informação no *3Muri* existentes;
- Desenvolver um método que permita a interoperabilidade entre ambos os sistemas com recurso a uma das possibilidades avançadas. O método desenvolvido deverá ser de simples aplicação pelo utilizador final, definindo regras para o desenvolvimento do modelo em BIM que permitam a sua fácil aplicação ao ambiente *3Muri*. Ainda assim, deve ao mesmo tempo permitir ao utilizador ajustar o programa às suas necessidades, adicionando funções ou alterando os parâmetros porque, tratando-se o *3Muri* de um programa de avaliação muito utilizado para edifícios antigos de alvenaria, o julgamento do projetista relativamente à informação a ter em conta é essencial.
- Aplicar o método desenvolvido a dois casos de estudo: em primeiro lugar, será aplicado a um caso muito simples, mas que permita demonstrar as capacidades do programa; num segundo caso, a metodologia será aplicada a um modelo mais complexo, neste caso do Chalet da Condessa d'Edla, para demonstrar a flexibilidade do *Dynamo*. Este modelo mais complexo permitirá explorar a aplicabilidade do método bem como algumas das suas limitações.

1.3 Estrutura da dissertação

A estrutura do presente trabalho encontra-se organizada em cinco capítulos:

- Num primeiro capítulo, o presente, faz-se uma breve apresentação do tema da dissertação, dos seus objetivos, e dos programas e metodologias utilizados ao longo do mesmo.
- No capítulo seguinte é feita uma exposição mais detalhada sobre: a questão da interoperabilidade entre *softwares*, as capacidades e limitações do *Revit* incluindo a utilização de ferramentas de programação e sobre a utilização e modelação do *3Muri*.
- No terceiro capítulo é explorada a ferramenta de programação *Dynamo*, inserida no *Revit*, e o processo de desenvolvimento do *Revit to 3Muri Automated Design (R3AD)*, a ferramenta em *Dynamo* desenvolvida para facilitar o processo de transição entre *softwares*.
- O quarto capítulo consiste na aplicação da ferramenta R3AD a dois casos de estudo onde se pretende ilustrar a sua utilização, capacidades e limitações. Será também feita a avaliação comparativa de um dos casos de estudo, o *Chalet* da Condessa d'Edla em Sintra, restaurado recentemente. Neste caso de estudo serão comparados os resultados da avaliação sísmica após o restauro e reforço da estrutura (estrutura reforçada) e antes do restauro (estrutura não reforçada).
- Por fim, conclui-se acerca do estudo desenvolvido, tanto em termos da utilização de ferramentas de programação em ambiente BIM como da ferramenta desenvolvida, e são feitas algumas sugestões de possíveis estudos futuros na área da programação na área da AEC.

2 Interoperabilidade e Características Gerais *Revit* / *3Muri*

2.1 Introdução

A indústria AEC, à semelhança de outras na área das tecnologias, tem evoluído no sentido de tirar o maior proveito possível dos avanços nas tecnologias digitais e de computação, seja através de sistemas que permitam uma comunicação mais eficiente entre as áreas envolvidas num projeto (como é o caso das metodologias de *BIM*) seja através de programas que permitam um melhor aproveitamento dos recursos existentes (por exemplo utilizando programas de análise não linear de estruturas como o *3Muri*). Apesar de se traduzir em múltiplos benefícios, a adoção destas tecnologias traz também novos desafios e um dos mais relevantes é o da interoperabilidade, ou seja, permitir que cada interveniente utilize os programas que melhor se adequem à sua função sem que para isso seja necessário despende tempo e recursos (sejam monetários na compra de *software* ou recursos humanos) na transição entre os vários programas. Este problema da interoperabilidade é transversal a toda a indústria da construção e, segundo o Departamento de Comércio, Tecnologia e Administração dos E.U.A representa também um custo muito significativo para as empresas - cerca de 15 mil milhões de dólares em 2004 (Gallaher et al., 2004).

No sentido de melhorar a organização e partilha de dados a utilização de plataformas colaborativas sólidas, que tirem proveito dos modelos BIM como base de dados para a construção, podem ser vistas como uma base de partida dado que permite a partilha de informação detalhada entre as várias especialidades e o armazenamento de toda a informação relativa ao projeto. Porém, nem sempre é possível extrair diretamente informação do BIM para outros formatos de forma automática. Por esse motivo o potencial do BIM de agregar toda a informação relevante para as especialidades no mesmo ambiente virtual acaba por não ser totalmente explorado. O ideal seria utilizar o BIM simultaneamente como base de dados da construção e como ponto de partida onde os utilizadores possam, de forma relativamente simples, retirar a informação necessária para os seus vários modelos de análise. Ainda assim, para alcançar esse objetivo é necessário encontrar meios que permitam uma troca de informação integrada e simples entre sistemas.

Para melhor compreender este problema da interoperabilidade é necessário, em primeiro lugar, compreender o que significa: no âmbito das tecnologias de informação e comunicação (TIC) e segundo Pinho (2013) pode definir-se interoperabilidade como a capacidade de gerir e trocar informação eletrónica por via computacional, podendo, por exemplo, tratar-se de troca de dados referentes a projeto entre diferentes intervenientes, especialidades ou *softwares*. No caso do *Revit* e do *3Muri* a troca de informação é entre programas distintos com capacidades de modelação 3D e meios de introdução de informação diferentes, pelo que essa troca não é de todo elementar. Para solucionar este problema é necessário compreender como interagem e funcionam os vários programas nesta operação (*Revit* e *3Muri*) e, utilizando os métodos disponíveis, encontrar uma forma de ligar ambos os programas.

2.2 Características gerais do Revit

Antes de estudar possíveis soluções para o problema de interoperabilidade é essencial compreender o que é realmente o BIM e como funciona o programa utilizado: o *Revit* da *Autodesk*. Este programa foi escolhido para o presente trabalho por ser um dos mais utilizados na indústria da construção. Trata-se de um programa de modelação 3D que permite modelar, de forma paramétrica, os mais variados objetos tridimensionais e armazenar informação relevante sobre os mesmos, tudo num mesmo ambiente virtual. A sua utilização oferece grandes vantagens quando aplicada apropriadamente, nomeadamente na redução de custos e atrasos com erros e omissões (que são mais facilmente detetados) e na fácil partilha de informação através da base de dados que é o BIM (Eastman, 2008). Para além destas vantagens, o BIM possibilita a aglomeração de toda a informação relativa ao projeto num único ambiente, permitindo aos intervenientes consultarem e atualizarem-na conforme seja necessário.

2.2.1 Hierarquia no Revit

A informação armazenada num ficheiro *Revit* segue uma lógica hierárquica, em que cada elemento pertence a uma determinada categoria, família e tipo, conforme ilustrado na Figura 1. A compreensão desta hierarquia de dados é essencial para o objetivo de criar uma metodologia de interoperabilidade entre o *Revit* e o *3Muri*.

No topo da hierarquia do *Revit* estão as *Categories*, entidades pré-definidas no *software* que não podem ser alteradas ou adicionadas. Estas por sua vez subdividem-se em grupos, sendo que para Aubin (2016) os mais importantes são: *Model Categories*, que incluem todos os elementos que compõem o modelo como paredes, portas, janelas, etc. que são representadas em todas as vistas do modelo; e *Annotation Categories*, que são elementos textuais apenas visíveis na vista em que estão representados como dimensões de objetos ou anotações do nome de divisões.

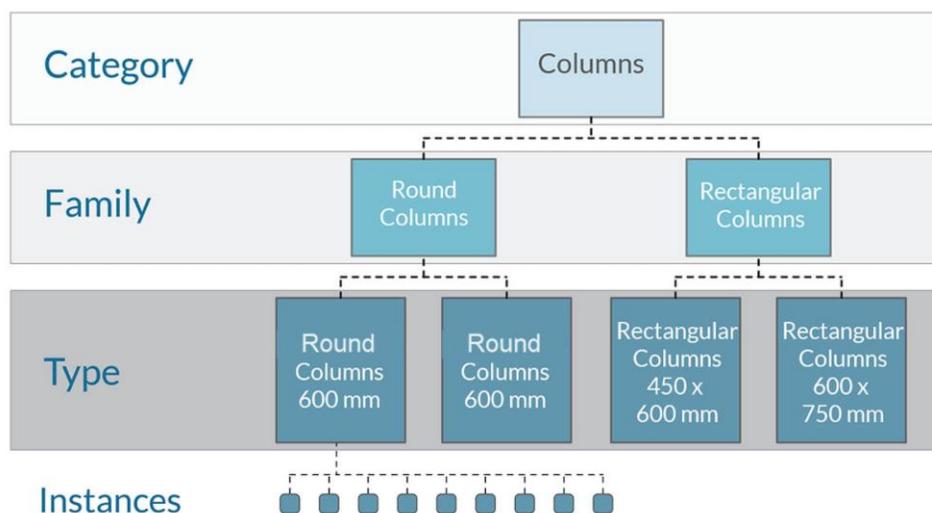


Figura 1 - Hierarquia do Revit (About | The Dynamo Primer, consultado a 09/09/2021)

Imediatamente abaixo na hierarquia estão as *Families*, “uma coleção de itens semelhantes que partilham o mesmo aspeto e comportamento” (Aubin, 2016), isto é, em cada categoria estão todos os elementos do modelo que desempenham a mesma função por exemplo as colunas de secção circular de um modelo. As *Families* por sua vez subdividem-se em *System Families*, que incluem os objetos que estão pré-definidos no *software* e não podem ser manipulados no *Family Editor* do *Revit*; e as *Component Families*, que são as famílias editáveis no programa e podem ser partilhadas e utilizadas em vários modelos (utilizam ficheiros próprios, os *.rfa* ou *Autodesk Revit Family* e que podem ser importadas para qualquer modelo).

Abaixo das *Families* estão os *Types*, “uma coleção de parâmetros variáveis aos quais é definido um determinado valor e nome”, isto é, neste patamar da hierarquia do *Revit* estão todos os objetos de uma *Family* que partilham os mesmos parâmetros, como por exemplo as colunas de secção circular em mármore e com diâmetro de 600 mm. Uma *Family* pode conter um ou vários *Types*, cada um com os seus próprios parâmetros que pode ser replicado tantas vezes quantas as necessárias para povoar o modelo.

Por fim estão os *Instances*, que são a representação individual de cada elemento com um número de identificação próprio. Estes elementos são únicos, podem ser editados, mas não podem ser replicados. No exemplo na Figura 1 isso corresponderia à coluna circular de 600 mm num alinhamento específico (elemento único). Estes elementos específicos são criados pelo utilizador do BIM a partir de uma *Family* ou *Type* base no programa *Revit* e adaptada às necessidades do projeto, sendo que qualquer alteração à *Family* ou ao *Type* poderá ser refletida nos objetos localizados abaixo na hierarquia (Figura 2).

É importante compreender o significado desta hierarquia para selecionar a informação a retirar de um modelo. No caso do *Dynamo* é possível selecionar todos os elementos de uma *Category* ou de uma *Family* e posteriormente filtrar os que não são necessários impondo condições geométricas (só elementos com localização ou dimensões específicas) ou parâmetros que são precisos cumprir (só elementos de materiais ou pisos específicos).

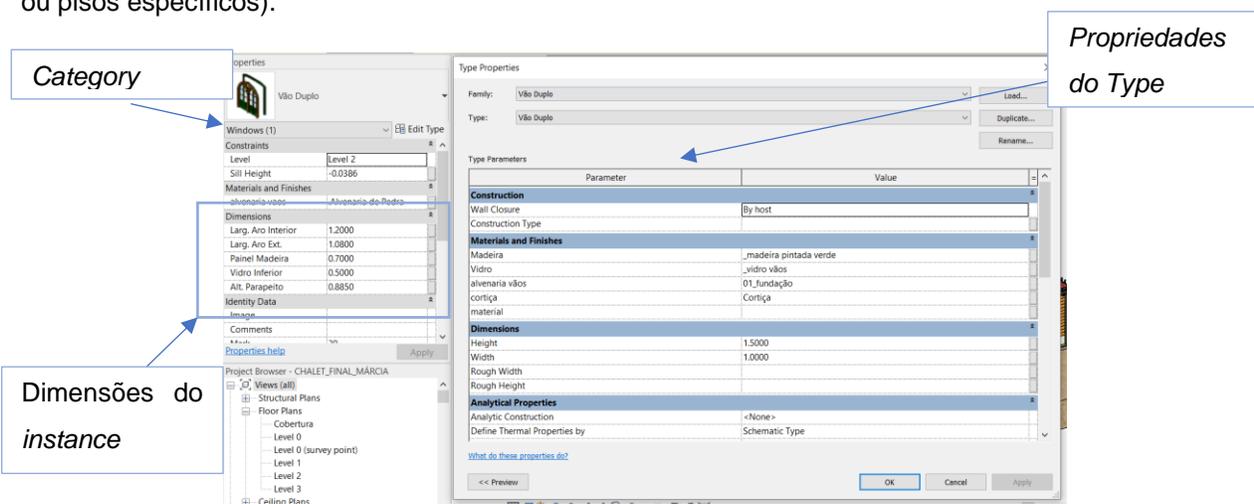


Figura 2 - Exemplo da hierarquia do *Revit*, com a *Category* Windows (1), *Family* vão duplo e *Type* vão duplo. É também possível ver os parâmetros de *dimensions* do *Instance* em causa

2.2.2 Parametric Design no Revit

No *Revit* é utilizado o conceito de design paramétrico (*parametric design*) que consiste em utilizar regras e relações matemáticas para definir e associar todos os elementos (geométricos) do projeto, permitindo a modelação de elementos complexos, a sua replicação e alteração de forma simples (Autodesk Knowledge Network, s/d). Estas relações são chamadas de parâmetros, podem ser definidas pelo utilizador ou pelo próprio *software* e servem para interligar vários elementos do modelo. De forma simplificada este funcionamento pode ser comparado à utilização de folhas de cálculo em programas como o *Microsoft Excel*, em que alterar um valor tem repercussões em todos os que lhe estão associados. Segundo Ajouz (2021) a utilização deste princípio permite aos utilizadores do programa criar várias versões do mesmo projeto com pequenas diferenças (parametrizadas), permitindo assim testar uma vasta gama de soluções em tempo reduzido.

Segundo esta metodologia, cada elemento é modelado individualmente e depois replicado no modelo geral da construção, tendo por isso uma enorme influência a forma como a informação é armazenada, isto é, a nomenclatura escolhida pelo utilizador do *Revit*. Isso torna-se um contratempo para o desenvolvimento de um programa capaz de a reconhecer.

Toda a informação de um *Instance* está guardada em parâmetros, podendo esta ser geométrica ou não, conforme ilustra a Figura 3. Quando estes parâmetros são definidos pelo utilizador raramente são utilizadas as mesmas terminologias entre projetos. Isto implica que, a menos que sejam implementadas normas claras de utilização do BIM no projeto, existe uma enorme variabilidade na forma como cada parâmetro é definido.

A utilização deste conceito também implica que podem existir valores nas *Families* definidos como paramétricos, podendo alterar-se ao longo do modelo. Esta ideia é especialmente importante na definição de geometrias que podem ser influenciadas por outros elementos do modelo.

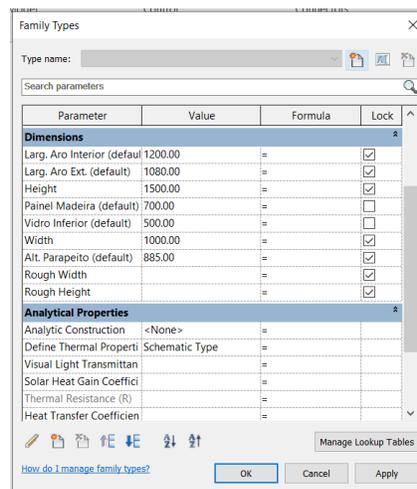


Figura 3 - Exemplo de parâmetros de uma *Family* no ambiente *Revit*, neste caso definidos como valores fixos

2.3 Características gerais do *3Muri*

O *3Muri* é um programa de avaliação sísmica de estruturas, especialmente dotado para estruturas de alvenaria, que utiliza métodos não lineares nas suas análises conseguindo assim um resultado mais realista e permitindo uma avaliação expedita e pouco dispendiosa. Este programa, apesar de tirar partido de métodos complexos para a avaliação, é na realidade muito simples de utilizar, sendo por isso perfeito para gabinetes de projeto (General description – *3Muri*, s/d).

O seu desenvolvimento resulta da otimização para utilização comercial do programa *Tremuri* (desenvolvido pelos professores Sergio Lagomarsino, Andrea Penna, Alessandro Galasco e Serena Cattari, das Universidades de Génova e de Pavia), que foi criado inicialmente para a avaliação não linear de estruturas de alvenaria em ambiente académico e de investigação científica. Nesta versão científica do programa o utilizador deve introduzir em formato de texto todos os parâmetros da estrutura (localização das aberturas, características mecânicas e geométricas das paredes, localização e ligações entre os nós, etc.) e este posteriormente executa a análise não linear.

A versão comercial (*3Muri*) resulta da simplificação da versão científica agilizando o processo de modelação e análise de resultados. Nesta versão, em vez de o *input* ser um ficheiro de texto, o utilizador deve criar um modelo tridimensional da estrutura contendo toda a informação relevante para a análise (informação geométrica dos elementos e propriedades mecânicas). O modelo é posteriormente decomposto numa malha de elementos finitos de forma automática e traduzido num ficheiro de texto que a versão científica consiga ler e analisar. Isso significa que a versão comercial é semelhante à versão científica, diferindo apenas no seguinte: um pré-processamento que cria o ficheiro de texto necessário para a análise de forma automática a partir de um modelo criado pelo utilizador no ambiente *3Muri*; e uma apresentação de resultados também mais conveniente, representando um modelo dos danos estruturais e gráficos de força – deslocamentos que podem ser utilizados com relativamente pouca intervenção no tratamento de dados (*TreMuri*, s/d).

Para qualquer uma das versões, a geometria dos elementos resistentes e as suas propriedades mecânicas são dados essenciais ao modelo, e em ambos a introdução dessa informação é manual. Isto significa que a modelação da estrutura é feita parâmetro-a-parâmetro (no caso da versão científica em formato texto e no caso da versão comercial diretamente na interface do programa). Para facilitar a construção do modelo, a versão comercial oferece a possibilidade de introduzir a planta em formato *.dxf* (*Drawing Exchange Format*, um formato universal de ficheiros CAD), o que facilita significativamente a modelação pois permite ao utilizador ter uma referência para a colocação dos elementos (tanto paredes como aberturas). Atualmente esse ficheiro *.dxf* pode ser criado em CAD e *uploaded* pelo utilizador, ou convertido de um ficheiro BIM numa planta simplificada utilizando um *add-on* para o *3Muri*, o módulo *IFC-BIM*, que tira partido de ficheiros *IFC* para fazer a transição. Infelizmente esse é o único facilitismo no que toca a agilizar a passagem de informação, sendo todo o restante processo obrigatoriamente manual. Este processo de interoperabilidade encontra-se ilustrado na Figura 4.

A desconexão entre o modelo arquitetónico (em BIM) e o modelo de estudo (em *3Muri*) implica um processo moroso e propício a erros na criação do modelo. Por estes motivos considerou-se interessante estudar metodologias que possam automatizar parte deste processo, nomeadamente a criação da planta em .dxf sem para isso serem necessário outros programas como o módulo *IFC-BIM*, que representam custos acrescidos de utilização na compra de licenças.

Com esse objetivo em mente é necessário em primeiro lugar compreender qual é realmente a informação relevante para o modelo *3Muri*. Para isso é essencial compreender os métodos utilizados na criação do modelo e como funciona o *3Muri*.

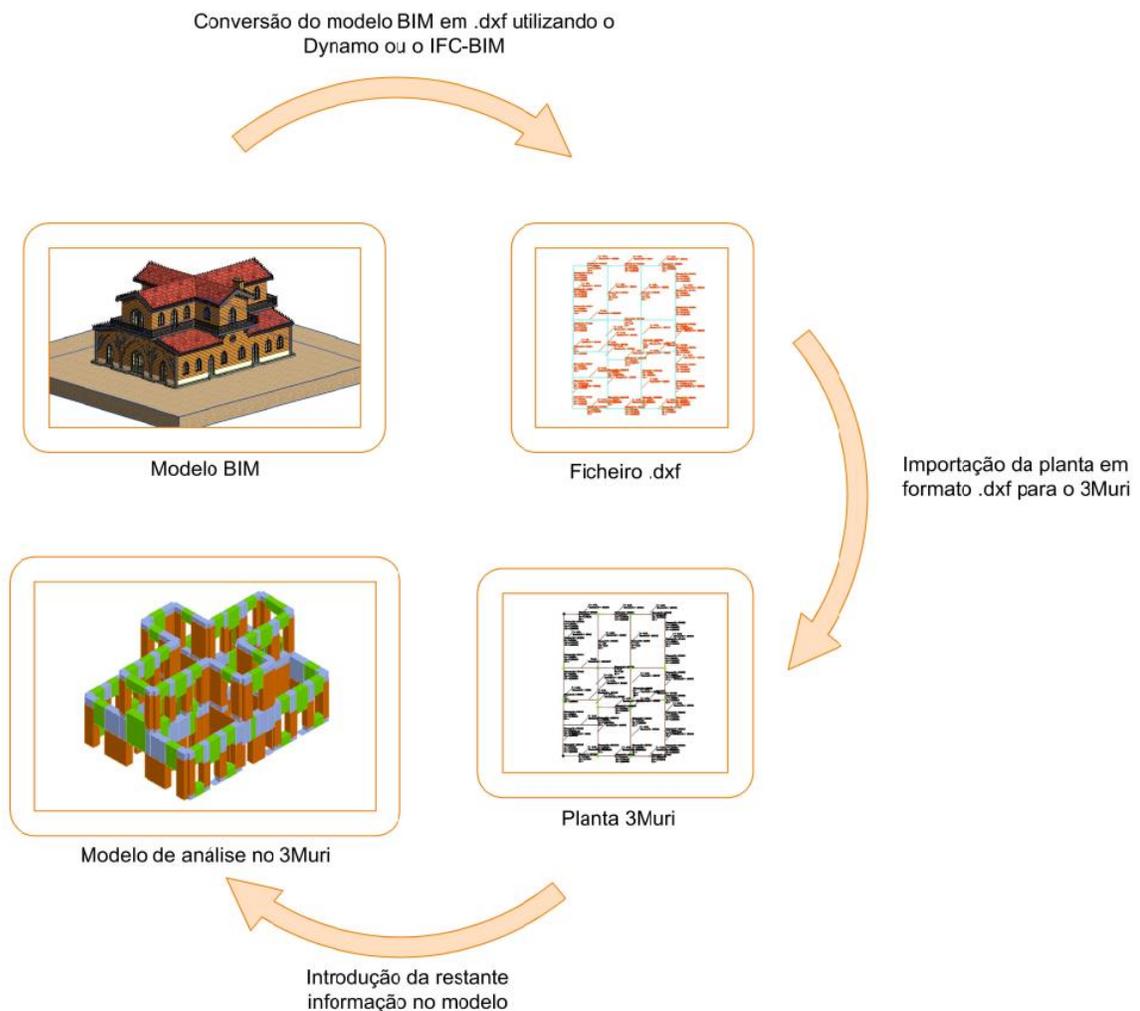


Figura 4 - Representação esquemática do processo de interoperabilidade entre o *Revit* e o *3Muri*

2.3.1 Avaliação Sísmica de Edifícios

Os Eurocódigos Estruturais (em vigor em Portugal desde 18 de junho de 2019) consistem num conjunto de normas europeias relativas aos projetos de engenharia civil que visam a uniformização de práticas e métodos na indústria da AEC na União Europeia. De entre essas normas destacam-se no presente trabalho

o Eurocódigo 8– parte 3: Avaliação e Reabilitação de Edifícios (EC8-3) (European Committee for Standardization, 2005c) e o Eurocódigo 8 – parte 1: Regras Gerais, Ações Sísmicas e Regras para Edifícios (EC8-1) (European Committee for Standardization, 2010) que, mediante condições relacionadas com o projeto, exigem e regulam a elaboração de relatórios de avaliação de vulnerabilidade sísmica de edifícios. Segundo Candeias et al. (2020) a avaliação sísmica elaborada nestes relatórios consiste num “procedimento através do qual se verifica se um edifício existente (...) satisfaz ou não os requisitos de desempenho”, estando “envolvidos a definição da ação sísmica, a modelação da estrutura, os métodos de análise para determinação dos efeitos das ações e as verificações de segurança”. Os autores referem ainda que a elaboração de um relatório de avaliação da vulnerabilidade sísmica é exigível em “obras de ampliação, alteração ou reconstrução”, podendo ser utilizado o método que o projetista considerar mais adequado de entre os propostos no EC8-1 e EC8-3.

Com a adoção desta nova regulamentação, em que estes relatórios de avaliação da vulnerabilidade sísmica são exigidos, é explicada a crescente necessidade de adoção de novos métodos para a sua realização. Essa necessidade aliada à grande percentagem de edifícios de alvenaria em Portugal, em que cerca de 50% dos edifícios existentes são construídos em alvenaria estrutural (Instituto Nacional de Estatística, 2012), aumentam o interesse na utilização de ferramentas informáticas que otimizem o processo de elaboração do relatório ao mesmo tempo que fornecem o resultado mais fiel possível à realidade (i.e., um resultado menos conservador, mas mantendo a segurança dentro dos limites permitidos).

Dada a sua complexidade, ou as consequências que podem resultar de uma má abordagem, este problema da avaliação de vulnerabilidade sísmica deve ser tratado com cuidado e essa avaliação deve sempre ser realizada numa perspetiva de reduzir ao máximo os custos garantindo a segurança. Por estes motivos e “dada a diversidade e vasto inventário de edifícios com estrutura em alvenaria são necessários métodos simples, mas racionais para abordar a avaliação, baseados e validados por investigação experimental” (Magenes, Calvi e Kingsley, 1995), permitindo uma avaliação sísmica expedita e sem gastos excessivos de recursos (quer humanos quer financeiros).

Hoje em dia esses relatórios são feitos com o auxílio de programas informáticos que permitem fazer uma previsão do comportamento dos edifícios numa situação de sismo. Nesse sentido, um programa como o *3Muri*, que através de algumas simplificações permite uma avaliação expedita de estruturas de alvenaria, é a ferramenta ideal para a elaboração destes relatórios no caso de estruturas de alvenaria existentes.

2.3.1.1 Bases para a Avaliação Sísmica de Estruturas de Alvenaria

O efeito de sismos em estruturas é hoje amplamente estudado com o auxílio de métodos computacionais avançados, mas muitos dos princípios aplicados à conceção de estruturas de alvenaria são, na realidade, utilizados há séculos. Segundo (Lourenço, 2002) e citando Pirro Ligorino, arquiteto italiano do século XVI, “paredes grandes e pesadas, realizadas perpendicularmente e com boas fundações, retornam ao seu lugar sempre e recebem menos danos sendo bem ligadas”. Este princípio de utilizar paredes espessas e

travadas entre si mantém-se relevante nos dias de hoje, isto significa que a malha estrutural do edifício deverá prever a existência de paredes resistentes perpendiculares nas duas direções, capazes de resistir a cargas verticais no seu plano e também de servir de contraventamento às restantes paredes, devendo existir uma boa ligação entre elementos. As paredes resistentes devem ser verticais, contínuas desde a base até à cobertura, retilíneas e ligadas em cada piso a elementos horizontais, rígidos ou não, capazes de transmitir as cargas verticais às paredes.

Para além destas recomendações para os elementos verticais e as suas disposições, segundo o mesmo autor, existem algumas características essenciais para garantir um bom comportamento a ações sísmicas de edifícios de alvenaria: regularidade (em planta e altura) e utilização de materiais capazes de resistir aos esforços provocados pelas ações sísmicas. A sugestão dada pelo autor é a de conceber a estrutura como um sistema integrado e tridimensional de elementos resistentes com formas (aproximadamente) cúbicas, conseguindo assim cumprir as recomendações anteriores para a forma do edifício e de conceção de paredes resistentes (regularidade e contraventamento de paredes).

Relativamente aos elementos horizontais (pisos) e de acordo com Marques (2014) as construções em alvenaria podem ser classificadas em dois tipos, dependendo da rigidez do piso e da qualidade da ligação entre as paredes perpendiculares: aquelas que apresentam um comportamento global de conjunto ou em caixa, quando o piso se comporta como um diafragma rígido e a ligação entre elemento garante o seu comportamento conjunto; e aquelas que não apresentam comportamento conjunto, quando o piso se apresenta como flexível e a ligação entre paredes não garante um trabalho em conjunto dos elementos. No caso de não apresentar um comportamento em caixa, as paredes comportam-se de forma independente, sendo por isso predominantes os danos fora do plano da parede. Nesta situação a localização das aberturas, a sua dimensão, a espessura da parede e os materiais que a constituem são os fatores preponderantes para evitar o colapso parcial da estrutura. Por outro lado, caso seja admitido um comportamento em caixa, o edifício comporta-se como um conjunto de elementos contraventados entre si apresentando predominantemente danos no plano das paredes. Neste caso, para além das características geométricas e propriedades mecânicas já mencionadas, é ainda de grande importância a interação entre as paredes que se encontram ligadas e a forma como são transmitidos os esforços entre si. Este comportamento em conjunto é um princípio chave nos programas de avaliação sísmica porque permite às estruturas de alvenaria apresentar uma ductilidade significativa (muito superior à de paredes isoladas) quando sujeitas a ações sísmicas, das quais os projetistas podem e devem tirar proveito.

Por estes motivos os edifícios de alvenaria têm a particularidade de estar altamente dependentes da distribuição geométrica de elementos estruturais, isto porque caso não exista um bom contraventamento entre elementos a rotura das paredes ocorrerá fora do plano e não será possível tirar partido de toda a sua capacidade resistente. Sendo assim, na elaboração de um modelo de avaliação da vulnerabilidade sísmica, a localização dos elementos resistentes e das aberturas tem uma importância elevada, visto poder afetar negativamente a resistência da estrutura.

No *3Muri* a modelação tridimensional da estrutura baseia-se em três hipóteses básicas, segundo Lagomarsino et al. (2013a):

- Os elementos estruturais, tanto verticais como horizontais, são identificados como paredes estruturais e diafragmas horizontais (pisos, coberturas ou arcos), respetivamente;
- As paredes são os elementos estruturais, enquanto os diafragmas determinam a distribuição das cargas verticais pelas paredes;
- A resistência à flexão dos diafragmas e a resposta fora do plano das paredes não são calculadas por se considerarem desprezáveis para a resposta global da estrutura (que depende da resistência no plano das paredes), sendo necessários métodos próprios para verificar em separado a resistência fora do plano das paredes.

O modelo *3Muri* é criado com o objetivo de fazer uma avaliação global e, portanto, partindo do princípio de que a ligação entre as paredes resistentes e os elementos horizontais tem suficiente resistência para não se dar uma rotura para fora do plano. Essa análise fora do plano também deve ser feita e existe um módulo do programa capaz de fazer a avaliação local (à semelhança de outros módulos é comercializado à parte). Nesse caso, os princípios de modelação são os mesmos que os apresentados para a avaliação global, pelo que não se considerou essencial explorar a lógica e os métodos utilizados dado que a sua influência na criação do modelo de análise é limitada.

2.3.1.2 Modelação por Pórticos Equivalentes

Assumindo que uma boa ligação entre as paredes previne a formação de instabilidade para fora do plano a resistência de uma estrutura está apenas relacionada com a sua capacidade de resistir a cargas no plano das paredes e com a distribuição de esforços entre os elementos horizontais e verticais. Por esse motivo é necessário utilizar um método de modelação tridimensional da estrutura que permita estimar os esforços em cada elemento à medida que a deformação da estrutura aumenta de forma gradual. Uma das possibilidades é utilizar uma idealização da estrutura através de pórticos equivalentes, em que cada parede resistente é modelada como um pórtico em duas dimensões, por sua vez subdividido em elementos deformáveis (nos quais a resposta não linear é concentrada) e elementos rígidos (que têm como função ligar os elementos deformáveis). Os elementos deformáveis são ainda subdivididos em:

- Nembos ou *piers*: elementos estruturais que simulam as propriedades mecânicas não lineares dos elementos verticais, estando sujeitos a cargas verticais e laterais;
- Lintéis ou *spandrels*: elementos estruturais que simulam as propriedades mecânicas não lineares dos elementos horizontais e que conectam os nembos adjacentes, garantindo uma resposta em conjunto para as cargas laterais;

Esta abordagem, utilizada pelo *3Muri*, resulta da observação de danos causados por sismos, e replicados em ensaios laboratoriais, a partir dos quais se pôde concluir que os danos se concentram em zonas específicas da parede dependendo essencialmente das suas características geométricas. Por isso é nestes

elementos que apresentam danos quando sujeitos à ação sísmica que deve ser simulado o comportamento não linear da alvenaria, sendo que os locais que não revelam danos apenas transmitem cargas nunca chegando à cedência, comportando-se aproximadamente como elementos rígidos.

Na avaliação de cada pórtico a transição entre diferentes estados de distribuição de esforços é única e resultado dos danos provocados na estrutura, i.e., a distribuição dos esforços é o resultado da cedência/rotura de vários elementos deformáveis à medida que estes são carregados de forma incremental. Por este motivo a influência que a posição e dimensão das aberturas e a classificação que cada secção do pórtico (deformável ou não deformável) têm na resistência de um determinado painel é enorme. Um dos grandes desafios em criar um *software* de avaliação sísmica de estruturas de alvenaria passa por automatizar este processo de definição dos elementos deformáveis e rígidos nas paredes com aberturas.

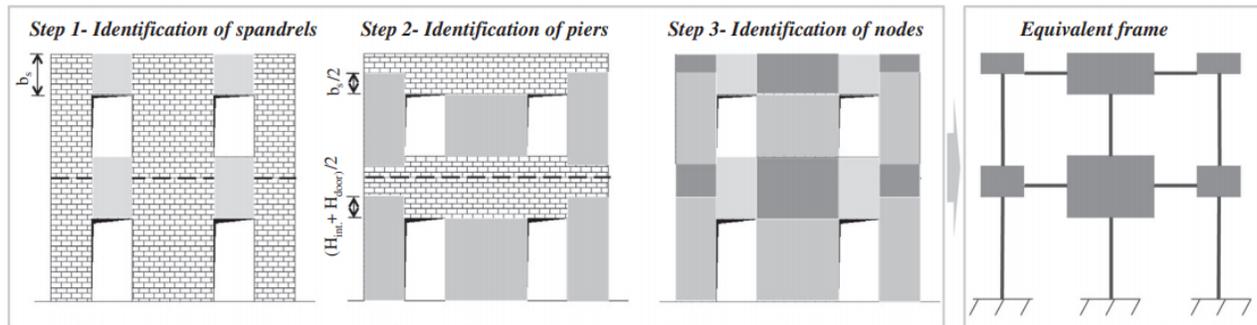


Figura 5 - Exemplo da idealização de uma parede regular em pórticos equivalentes com os passos seguidos pelo *3Muri* para subdividir a parede (Lagomarsino et al., 2013b)

Para estruturas regulares (aberturas, nembos e lintéis perfeitamente alinhados entre si), seguindo os passos ilustrados na Figura 5 e segundo Lagomarsino et al.(2013), os elementos horizontais são definidos com base nas aberturas adjacentes tendo a mesma largura que a abertura e altura igual à distância entre aberturas. Na definição dos elementos verticais é necessário ter em conta a formação de fendas inclinadas a partir do canto da abertura. Sendo assim os critérios utilizados são: largura igual à distância entre aberturas (nembos interiores) ou igual à largura total do elemento vertical (nembos exteriores); altura igual à da abertura (nembos interiores) ou igual à média entre a distância entre aberturas e a altura da abertura (nembos exteriores). Por fim, os elementos rígidos são definidos como as áreas que não são nembos nem lintéis. Este processo deverá ser repetido em todas as paredes e para todos os pisos, formando os pórticos equivalentes a cada parede, juntando todos os painéis consegue-se representar em três dimensões toda a estrutura.

A distinção entre lintéis e nembos é relativamente simples de compreender e automatizar no caso de paredes com distribuição regular de aberturas, mas esse caso não é garantido, existindo inúmeros casos em que o contrário é a verdade tornando esta tarefa de definir a distribuição de elementos na parede consideravelmente mais complexa, conforme ilustrado na Figura 6. Esta é a principal função da versão

comercial do *3Muri* (conversão de elementos de parede em malhas de elementos deformáveis e indeformáveis), que não está presente na versão científica (definição dos elementos é manual).

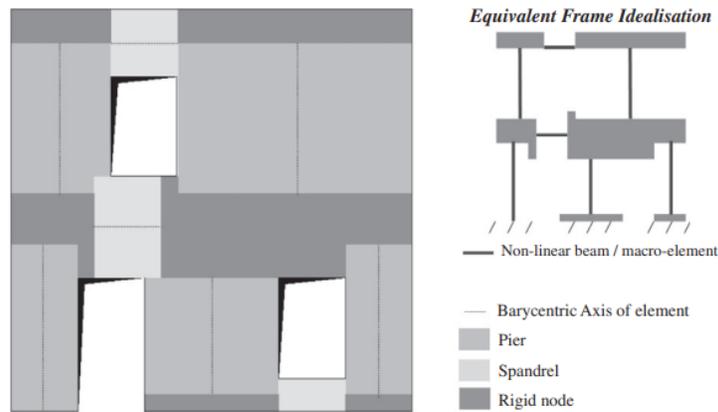


Figura 6 - Exemplo da idealização de uma parede irregular em pórticos equivalentes (Lagomarsino et al., 2013)

2.3.1.3 Macro-Elementos

Após modelar a estrutura como um conjunto de elementos deformáveis e indeformáveis, é necessário definir o comportamento não linear de cada elemento deformável. Para isso existem várias abordagens com diferentes graus de simplificação numa tentativa de simular o comportamento da alvenaria causado pela interação entre os materiais que a constituem (argamassa e unidades).

Uma possibilidade é utilizar elementos finitos para simular esta interação, modelando a argamassa e as unidades individualmente sem simplificações significativas. Esta abordagem tem a vantagem de fornecer um resultado extremamente preciso, mas tem desvantagens: em primeiro lugar requer um conhecimento detalhado das propriedades dos materiais, que nem sempre existe quando são estudados edifícios existentes e extremamente difícil de obter em alvenaria de pedra ordinária; em segundo lugar é necessária uma grande capacidade computacional para efetuar todos os cálculos de interação entre os elementos. Por ambos os motivos esta abordagem não é a mais apropriada para a avaliação sísmica de edifícios de alvenaria no contexto comercial.

Outra abordagem consiste em homogeneizar as propriedades dos materiais e simular os elementos de parede como macro-elementos não lineares, nos quais as propriedades médias dos materiais utilizados são aproximadas como um todo. Essas propriedades médias são estimadas com recurso a testes experimentais (em laboratório ou *in-situ*), permitindo definir os parâmetros relevantes para o desenvolvimento de análises não lineares, como os apresentados na Tabela 1. Desta forma é possível obter um resultado com uma precisão aceitável sem as desvantagens referidas (Penna et al., 2014).

Tabela 1 – Estimativas de propriedades mecânicas de paredes de diferentes tipos (Candeias et al., 2020)

Tipo de alvenaria	f_c (MPa)	f_t (MPa)	f_{v0} (MPa)	E (MPa)	G (MPa)	w (kN/m ³)
Alvenaria de pedra irregular, com seixos e pedras irregulares distribuídas de forma errática	1,1 a 1,9	0,03 a 0,05	–	900	300	19
Alvenaria de pedra não aparelhada com folhas externas de espessura limitada e núcleo de enchimento (três folhas)	2,0 a 3,0	0,05 a 0,08	–	1200	400	20
Alvenaria de pedra aparelhada com boa aderência	2,6 a 3,8	0,08 a 0,11	–	1700	600	21
Alvenaria regular de pedra macia (blocos de tufo ou arenito)	1,4 a 2,2	0,05 a 0,06	–	1100	400	13 a 16
Alvenaria de pedra aparelhada rija (aparelho regular)	2,0 a 3,2	–	0,10 a 0,19	1400	500	13 a 16
Cantaria construída com pedras de boa qualidade	6,0 a 8,0	–	0,19 a 0,25	2800	900	22
Alvenaria de tijolo maciço com argamassa à base de cal	2,5 a 3,4	0,09 a 0,14	0,13 a 0,19	1500	500	18
Alvenaria de tijolo perfurado (índice de furação vertical < 40%) com argamassa à base de cimento e cal	4,9 a 8,1	–	0,24 a 0,32	4600	1100	15

Em que:

f_c é a resistência à compressão.

f_t é a resistência à tração.

f_{v0} é a resistência inicial ao corte para esforço axial nulo (coesão do modelo Mohr-Coulomb).

E é o módulo de elasticidade.

G é o módulo de distorção.

W é o peso volúmico.

A Figura 7 ilustra os modos de rotura associados a painéis de alvenaria sujeitos a forças laterais no plano.

Os modos de rotura identificados são:

- rotura por rotação e esmagamento;
- rotura por deslizamento por corte ao longo das juntas em argamassa;
- rotura por fendilhação diagonal por corte através das juntas em argamassa e das unidades de alvenaria.

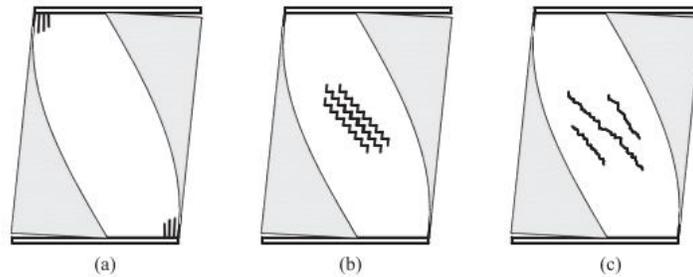


Figura 7 - Modos de rotura associados a painéis de alvenaria sujeitos a forças laterais no plano (Penna, et al., 2014)

No *3Muri* a modelação da estrutura de um edifício é feita através de pórticos equivalentes compostos por macroelementos não lineares, em que cada um representa uma componente da estrutura. Segundo este método, que é sugerido em vários códigos e normas, “cada parede de alvenaria resistente é subdividida em macroelementos deformáveis, nos quais a resposta não linear é concentrada, e elementos rígidos, que ligam os elementos deformáveis uns aos outros” (Lagomarsino et al., 2013). Desta forma é possível obter um modelo da estrutura formado por elementos com comportamento não linear capaz de ter em consideração a influência das aberturas nas paredes de alvenaria que suportam o edifício.

Esta abordagem permite fazer a modelação de outros elementos estruturais não constituídos por alvenaria, possibilitando de forma simples a modelação de uma estrutura mista com elementos de outros tipos (perfis de aço, elementos de betão, vigas de madeira, etc.) (Lagomarsino et al., 2013). Ainda assim a sua utilização é especialmente recomendada para estruturas de alvenaria estando presente nas recomendações para a aplicação de EC8 em Portugal (Candeias et al., 2020).

No *3Muri* os elementos estruturais deformáveis são simulados como uma viga não-linear devendo cumprir os seguintes critérios:

- A rigidez inicial deve ser dada pelas propriedades elásticas do painel, tendo em conta a fendilhação a rigidez deverá ser metade da rigidez elástica não fendilhada dado pelo EC8 – 3: 9.4 (3) (European Committee for Standardization, 2005c);
- Comportamento bilinear com valores máximos de resistência ao corte e à flexão calculados para o estado limite último;
- Redistribuição de esforços de acordo com o equilíbrio;
- Deteção de estados limite de danos tendo em conta parâmetros locais e globais;
- Degradação da rigidez na fase plástica;
- Rigidez secante ao descarregar;
- Rotura do elemento ao atingir o deslocamento último relativo normalizado entre as extremidades do elemento sem interromper a análise global;
- Controlo de ductilidade pela definição do deslocamento último relativo normalizado entre as extremidades do elemento (δ_u), conforme sugerido no EC8 - 3;

$$\delta = \frac{(u_j - u_i)}{h} + \frac{(\varphi_j + \varphi_i)}{2} \leq \delta_u \quad (1)$$

Em que:

- δ_u – representa o deslocamento último relativo normalizado entre as extremidades;
- u_j e u_i representam os deslocamentos nos nós i e j;
- φ_j e φ_i representam as rotações nos nós i e j;
- h representa a altura do elemento.

Segundo Lagomarsino et al. (2008) o comportamento não linear é iniciado quando um dos esforços atinge o valor máximo definido *a priori* para o macro-elemento, sendo a rotura segundo um dos modos ilustrados na figura 7. Na Figura 8 apresenta-se um nembro com os seus esforços (N, V, M) e variáveis cinemáticas (u,w,φ) representadas nos nós. Também na Figura 8 são apresentados dois gráficos com a relação que o 3Muri considera na modelação entre os critérios de rotura e o comportamento bilinear do macro-elemento.

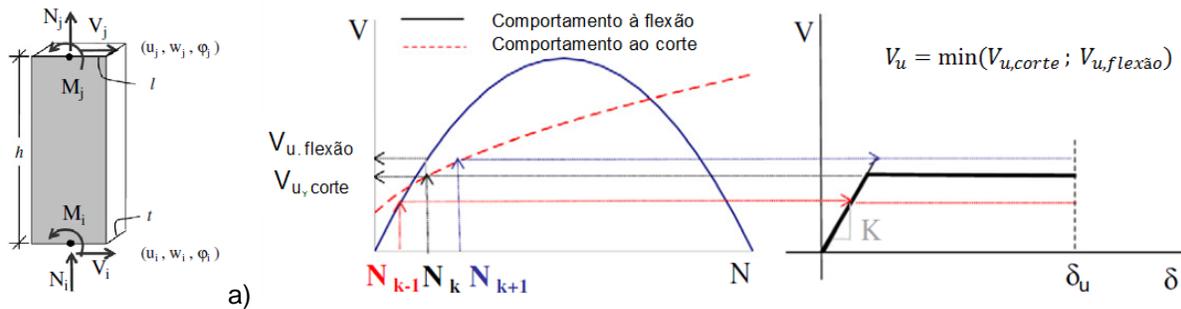


Figura 8 - a) Nembro com forças interiores (N, V, M) e variáveis cinemáticas (u, w, φ) representadas; b) Gráfico com critérios de rotura à flexão e ao corte em função do esforço axial (à esquerda) e gráfico com comportamento bilinear do nembro (à direita) (adaptado de Lagomarsino et al., 2013)

2.3.1.4 Análise Estática Não Linear (Pushover)

Segundo a Parte 3 do Eurocódigo 8 (European Committee for Standardization, 2005c) (EC8-3), os efeitos da ação sísmica deverão ser avaliados segundo um dos seguintes métodos:

- Análise estática linear, por forças laterais (linear);
- Análise dinâmica linear pelo espectro de resposta modal;
- Análise estática não linear (*pushover*);
- Análise dinâmica não linear;
- Análise pelo coeficiente de comportamento q .

De entre os métodos apresentados, o método de análise pelo coeficiente de comportamento não é aplicável a estruturas de alvenaria, não sendo sequer apresentado no anexo nacional.

Segundo Magenes e Penna (2009) a utilização de métodos lineares é “impraticável” para a avaliação de estruturas de alvenaria porque pressupõe uma distinção clara entre mecanismos de colapso dúcteis, algo

que em estruturas de alvenaria é raro. Assumir ainda estes mecanismos como frágeis, não tendo em conta qualquer parcela de comportamento não linear, dá lugar a uma grosseira subestimação da capacidade resistente real da estrutura levando a um sobredimensionamento da mesma.

Os métodos não lineares têm algumas vantagens na avaliação sísmica, nomeadamente por conseguirem reproduzir de forma mais adequada o comportamento real das estruturas sujeitas à ação sísmica e pelo campo de utilização ser mais geral (não estão sujeitos a condições de aplicabilidade no EC8-3 tão apertadas como os métodos lineares). A sua grande desvantagem prende-se com a maior complexidade na definição da estrutura, a partir na caracterização mecânica dos materiais em termos de capacidade resistentes e de deformação, e no cálculo dos deslocamentos resultante da necessidade de simular adequadamente o comportamento não linear.

De entre os métodos não lineares propostos a análise estática não linear (*pushover*), é a mais simples de aplicar, apresentando resultados satisfatórios e necessitando de capacidade computacional relativamente reduzida quando comparada com as análises dinâmicas não lineares. Segundo defendem Magenes e Penna (2009), a “ideia de favorecer uma análise estática não linear é bem aceite embora, quando se esteja a lidar com edifícios existentes, a escolha do método de análise a utilizar deva recair sobre o projetista”. Esta análise não linear utiliza duas distribuições de cargas laterais para estimar a resposta à ação sísmica, em particular o deslocamento num ponto conhecido da estrutura, o nó de controlo. Após ser atingido o valor máximo de esforço de corte (igual ao valor máximo das distribuições de carga, e correspondente à capacidade resistente da estrutura) o mesmo padrão de carga é mantido e são aumentados os deslocamentos de forma a estudar a degradação da força de corte à medida que os vários elementos deformáveis cedem e entram em regime não linear até atingirem o colapso. Comparando as forças horizontais com os deslocamentos no nó de controlo é possível calcular a curva de capacidade da estrutura como uma função força – deslocamento, até um limite de deslocamento máximo. Este cálculo da deformação respeita o comportamento não linear dos elementos e a distribuição de esforços na estrutura causado pelo deslocamento horizontal e permite descrever o comportamento inelástico da estrutura quando sujeita a forças horizontais. Este processo deve ser repetido para ambas as direções principais da estrutura e em ambos os sentidos, podendo existir variação nos resultados obtidos para diferentes nós de controlo. Na Figura 9 é apresentado um exemplo de curvas de capacidade, retiradas diretamente do *3Muri* para ambas as direções principais de um edifício, ambos os sentidos e para duas distribuições laterais de forças horizontais.

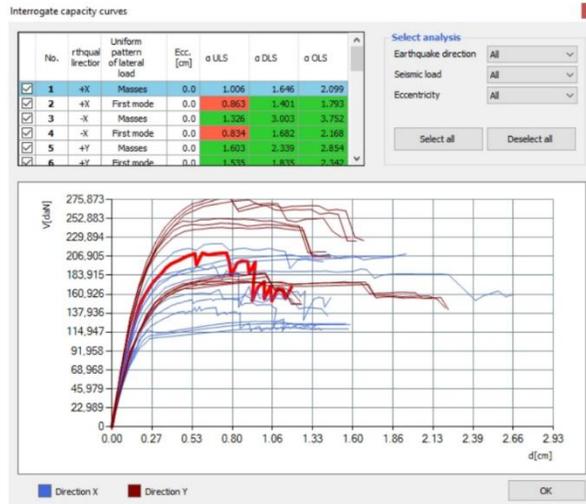


Figura 9 - Exemplo de curva de capacidade que compara as forças horizontais aplicadas com os deslocamentos (S.T.A. DATA, 2021)

Esta análise, prevista no EC8-1 com a metodologia N2 proposta por Fajfar e Fischinger (1988), é “uma análise estática não linear sob forças gravíticas constantes e cargas horizontais de crescimento monotónico” e poderá ser aplicada para a verificação do desempenho estrutural de edifícios existentes (EC8-3), em particular:

- Verificar ou rever os valores do coeficiente de sobre-resistência;
- Avaliar mecanismos plásticos previstos e distribuição de danos;
- Avaliar o desempenho estrutural de edifícios existentes ou reabilitados.

Apesar de ser indicado na literatura (e.g. no EC8-1) que em edifícios o nó de controlo seja um ponto do centro de gravidade (CG) da cobertura, é preciso ter presente que esta recomendação é adequada apenas para edifícios com pisos rígidos no seu plano. No *3Muri*, e para edifícios de alvenaria com pisos de madeira (que não tem comportamento de diafragma rígido) esse ponto poderá não ser no CG, pelo que se deverá seguir a sugestão apresentada por Galasco et al. (2006) de utilizar o nó de controlo no primeiro elemento vertical a colapsar.

Segundo o EC8-1 as cargas horizontais deverão ser aplicadas em ambas as direções e ambos os sentidos, aplicadas ao nível dos pisos e com duas distribuições de carga: uma distribuição de cargas uniforme, proporcional à massa de cada piso; e uma distribuição de cargas modal, proporcional às forças laterais correspondentes ao modo de vibração principal na direção considerada, determinada na análise modal. Para além destas duas são propostas por vários autores outras distribuições, entre elas a distribuição pseudo-triangular que, como referido em Simões (2018), apresenta melhores resultados para estruturas de alvenaria correntes, com baixa participação modal dos modos fundamentais devido aos pisos flexíveis em madeira.

O deslocamento último do nó de controlo deve ser calculado de acordo com os estados limite a ser considerados para a verificação de segurança estrutural: limitação de danos (DL), danos severos (SD) e colapso iminente (NC), tendo em conta as indicações do EC8-3 e segundo um dos seguintes critérios, sendo escolhido o mais condicionante:

- Redução de 20% da força de corte basal.
- Colapso do primeiro elemento vertical.

A curva de capacidade resistente da estrutura é uma característica do edifício, sendo independente da ação sísmica a que este está sujeito. Para verificar a segurança é necessário comparar o deslocamento último correspondendo ao estado limite (EL) com o deslocamento objetivo, obtido pelo método N2 (EC8-1) e para a intensidade de ação sísmica correspondente ao EL. O método N2 recorre à curva de capacidade resistente obtida com o espectro de resposta elástica da ação sísmica. Para isso é preciso em primeiro lugar transformar a curva de capacidade resistente para o edifício numa curva de capacidade de um sistema equivalente de um grau de liberdade, processo descrito no Anexo B do EC8-1.

2.3.2 Validação do Programa

Conforme referido, os princípios em que se baseia o *3Muri* para a modelação da estrutura são o resultado da observação de danos provocados por sismos reais em edifícios de alvenaria. Como validação para as observações e simplificações utilizadas no programa existem estudos à escala real em que um painel de parede é submetido a um teste *pushover*, como é o caso do trabalho de Magenes, Calvi e Kingsley (1995). A partir dos resultados obtidos por estes ensaios é possível verificar a qualidade dos resultados obtidos pelos programas de avaliação sísmica disponíveis comercialmente.

Deve dar-se um especial destaque ao trabalho de Marques e Lourenço (2014) que compara os resultados da avaliação com vários *softwares* de avaliação de estruturas de alvenaria (incluindo o *3Muri*) com o resultado prático de um teste *pushover* à escala 1:1. As conclusões, ilustradas abaixo na Figura 10, indicam uma satisfatória aproximação entre o modelo e a realidade, especialmente no que toca à “rigidez inicial, resistência ao corte da base e capacidade de deformação”.

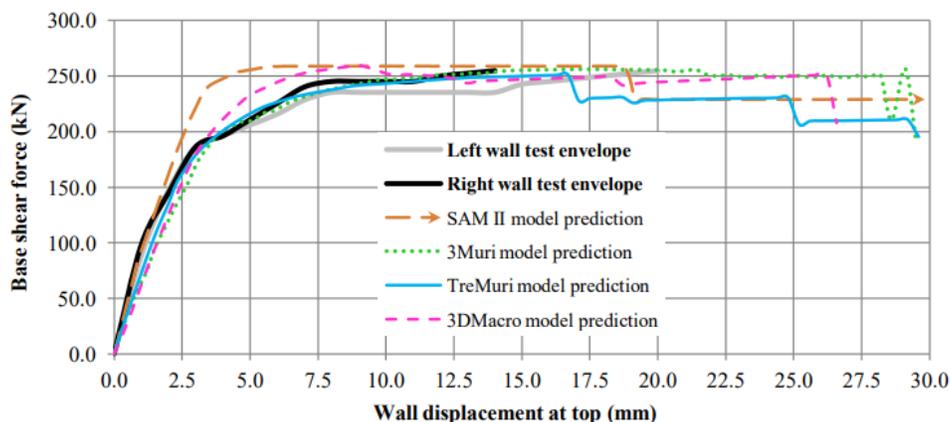


Figura 10 - Comparação das curvas de capacidade estimadas pelos *softwares* de avaliação sísmica e as reais (Marques e Lourenço, 2014)

Segundo Lagomarsino et al. (2013a), as características que distinguem o *3Muri* de outros métodos comercializados e que tornam o programa tão apropriado para a análise de estruturas de alvenaria são:

- A possibilidade de facilmente implementar formulações diferentes de painéis de alvenaria e diferentes algoritmos para a análise *pushover*;
- A modelação explícita de diafragmas horizontais flexíveis, que são muito comuns em edifícios antigos de alvenaria;
- A modelação 3D das paredes e dos diafragmas que reduz o número de graus de liberdade, tornando o programa mais leve do ponto de vista computacional.

2.3.3 Modelação no *3Muri*

A modelação de uma estrutura no *3Muri* é, em grande parte, um processo manual dividido em três fases: na primeira fase são introduzidos os pisos e os alinhamentos das paredes tendo por base uma planta criada em *.dxf* ou diretamente no ambiente de desenho do programa; a segunda fase em que as propriedades dos materiais são introduzidas; e uma fase em que são modelados os elementos geométricos da estrutura com a colocação no modelo das paredes, aberturas, varandas e coberturas, entre outros.

A interface do *3Muri* divide-se em quatro funcionalidades básicas (Figura 11): a área de desenho para introdução da geometria, a área de desenho para introdução de elementos estruturais, a área de avaliação de mecanismos globais e apresentação de resultados e por fim a área de avaliação de mecanismos locais (S.T.A. DATA, 2021).

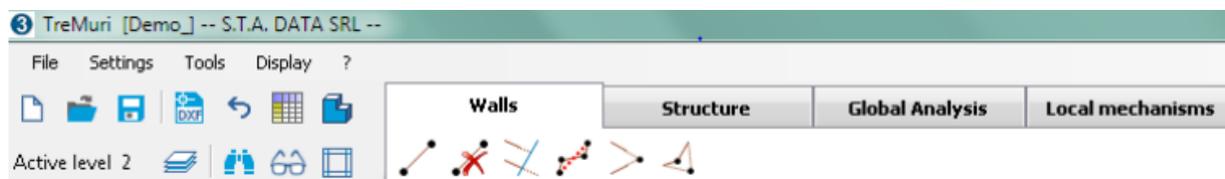


Figura 11 - Interface do 3Muri (S.T.A. DATA, 2021)

Para introduzir os dados geométricos no programa o utilizador deve começar por definir a altura entre os pisos. Em seguida deve ser traçada em planta a linha média das paredes estruturais (Figura 12). Para facilitar a tarefa o programa permite a utilização de um ficheiro *.dxf* com a planta sobre a qual o utilizador pode traçar a linha média das paredes. Todas as paredes devem intersectar outra parede pelo menos em ambas as extremidades, visto que o programa não consegue representar elementos salientes devendo, por isso, ser ignorados. Paredes não estruturais (com espessuras muito reduzidas ou construídas com materiais muito pobres) não devem ser tidas em conta enquanto elementos resistentes.

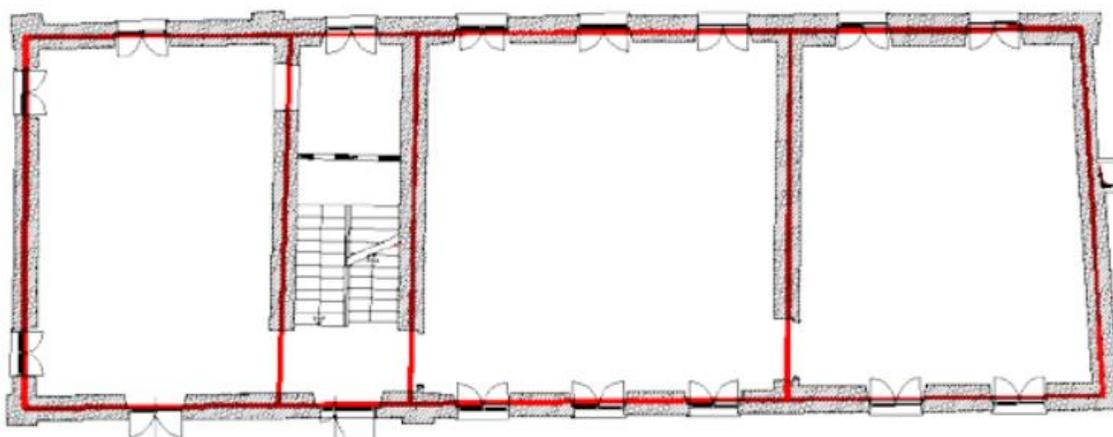


Figura 12 - Exemplo de representação das paredes em planta no 3Muri (S.T.A. DATA, 2021)

Em seguida definem-se os materiais que compõem cada parede. No caso de edifícios de alvenaria as características a conhecer são:

- módulo de elasticidade (E);
- módulo de distorção (G);
- peso volúmico (w);
- resistência à compressão média e característica (f_m e f_k respetivamente);
- fator de segurança (γ_m) (que em Portugal é o definido nos Eurocódigos);
- fator de confiança (FC);

Para além destes valores é preciso ainda definir qual a lei constitutiva a utilizar para a modelação do comportamento condicionado pelo corte, Mohr-Coulomb ou Turnšek-Čačovič. No caso de edifícios de

alvenaria existente sugere-se a utilização da lei de Čačovič - Turnšek (1970). Para estas é necessário definir ainda:

- a resistência média e máxima ao corte no caso de Mohr-Coulomb (f_{vm0} e f_{vlim});
- a resistência ao corte segundo Turnšek-Čačovič (τ);

Posteriormente estes materiais devem ser associados às respetivas paredes e definidas as suas espessuras. É também nesta fase que se introduzem as aberturas nas paredes de alvenaria (Figura 13), sendo para isso necessária a altura em relação ao piso, a altura da abertura e a largura da mesma. Aberturas com áreas pequenas (próximas ou inferiores dos 50 cm²) podem ser desprezadas.

Na representação de pisos o *3Muri* oferece várias possibilidades, como pisos de madeira, com vigas metálicas ou lajes aligeiradas. Em Portugal os pisos em madeira são muito comuns e oferecem baixa resistência ao sismo, devendo ser tratados com especial cuidado e representados tendo em conta a distribuição de cargas nas paredes (em uma ou ambas as direções). Nesta fase é essencial conseguir uma boa representação da geometria do piso e das suas propriedades (espessura, módulo de elasticidade em ambas as direções, módulo de distorção e coeficiente de Poisson).

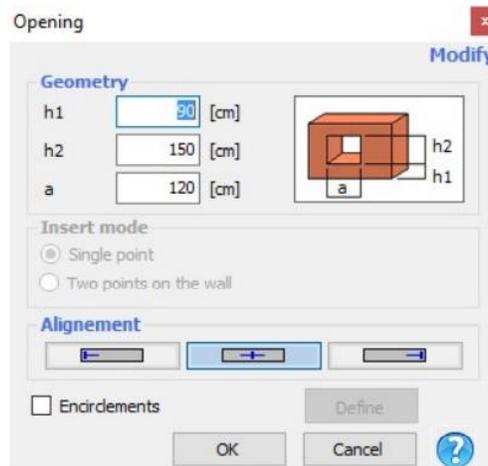


Figura 13 - Janela para introdução da geometria das aberturas (S.T.A. DATA, 2021)

Por fim, deve ser modelada a cobertura ou ser introduzido apenas o seu efeito no resto da estrutura. Em Portugal, à semelhança dos pisos, as coberturas são geralmente em madeira, muitas vezes degradada devido a infiltrações, e por isso oferecem pouca rigidez à estrutura sendo por isso o peso (e a sua distribuição nas paredes estruturais) o parâmetro relevante para a sua representação.

2.4 Interoperabilidade Utilizando *Industry Foundation Classes*

De forma a simplificar o processo de passagem de informação entre o BIM e o *3Muri*, este último oferece um módulo (*IFC-BIM Module*, extra ao programa base) que permite a interoperabilidade entre sistemas utilizando ficheiros IFC. Os ficheiros IFC são um formato de ficheiro desenvolvidos pela *buildSMART* para permitir a partilha de informação relativa ao projeto BIM de forma transversal a vários *softwares* de vários

fornecedores (Autodesk Inc., 2018). É assim possível criar uma representação digital do edifício num ambiente aberto que permita a troca de informação entre programas que de outra forma não poderiam ser interoperáveis. A *buildSMART* é uma comunidade internacional de engenheiros, arquitetos, fornecedores de *software* e outros intervenientes, criada em 1995 com o objetivo de promover a centralização da informação nos projetos da indústria da construção e “contribuir para um ambiente sustentável na indústria da construção através de uma partilha de informação mais inteligente (...) criando e mantendo as especificações para as *Industry Foundation Classes*” (Thein, 2011).

Como uma das empresas fundadoras da *buildingSMART*, a *Autodesk*, proprietária do programa *Revit*, é também um dos seus maiores promotores. Atualmente o *Revit* consegue exportar informação *BIM* para ficheiros *IFC 4*, a versão mais recente, e que ainda se encontra em fase de testes, através da qual é possível partilhar não só informação geométrica como também informação paramétrica e até ciclos de vida entre programas. A utilização de *IFC* na interoperabilidade entre programas de diferentes fornecedores e a sua aplicação a programas de simulação/análise não é nova, existindo vários exemplos na área da análise energética de edifícios como é o caso do trabalho apresentado por Ramaji, Messner e Mostavi (2020) ou o trabalho de Katsigarakis et al. (2019).

Ambos os trabalhos referidos exploram a utilização dos *IFC* como plataforma de interoperabilidade entre sistemas. O primeiro propõem uma metodologia que utiliza os ficheiros *IFC* para converter um modelo *BIM* num modelo de *Building Energy Model (BEM)* no formato *open source* do *OpenStudio*, um conjunto de ferramentas que dão apoio à modelação de edifícios no *EnergyPlus*, um *software* de análise energética de edifícios. O segundo trabalho tem como objetivo propor uma metodologia para a verificação da qualidade dos ficheiros *IFC* utilizados para fazer a transição automática entre o *BIM* e os programas de avaliação energética, que por vezes não apresentam a qualidade necessária à avaliação, sendo por isso necessário verificar a informação antes da análise.

Apesar de promissores, os *IFC* apresentam ainda algumas limitações, nomeadamente na falta de precisão na posição geométrica dos elementos e na falta de suporte para alguns elementos construtivos (a influência na modelação 3D do modelador é muito grande, tendo por vezes os *IFC* dificuldades em representar todos os pormenores) são os principais problemas que este projeto ainda enfrenta. Uma análise detalhada da qualidade da informação transmitida por *IFC* foi feita por Pazlar e Turk (2008). Neste estudo elementos foram modelados em *BIM* e, utilizando *IFC*, foram transmitidos de forma cíclica entre diferentes programas sendo comparados os ficheiros ao longo do processo. Foram detetadas diferenças no tamanho dos ficheiros, indicando perdas de informação. Para além disso foram também encontradas diferenças significativas na geometria, dimensão e localização de certos elementos.

A aplicação prática dos *IFC* consiste, na maioria dos casos, na exportação do modelo criado em *BIM* para ficheiros *IFC*, e posteriormente na importação desses ficheiros para o programa recetor desejado.

Aplicado ao *3Muri*, o módulo *IFC-BIM* (Figura 14) tem algumas limitações relativamente à quantidade de informação que consegue realmente migrar de um ambiente para o outro, sendo apenas capaz de criar uma planta em que assinala a linha média das paredes e a posição das aberturas nessas paredes. Existe por isso interesse em conceber uma metodologia que permita criar um ficheiro *.dxf* mais detalhado a partir do modelo *BIM* e, se possível, um resumo da restante informação necessária ao modelo *3Muri* (dimensões das aberturas, e se estiver inserido no modelo *BIM*, ainda propriedades mecânicas dos materiais, localização e propriedades mecânicas dos pisos).

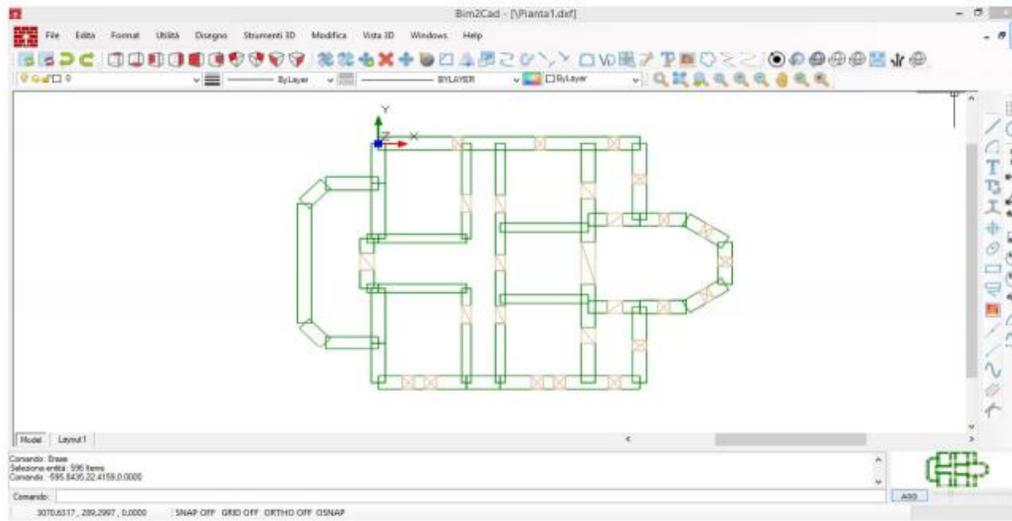


Figura 14 - Exemplo de secção horizontal resultante do módulo *IFC - BIM* (S.T.A. DATA, no date)

2.5 Automatização de Tarefas

Apesar das vantagens já apresentadas, a utilização do *BIM* na indústria da construção ainda não é tão comum como seria de esperar por vários motivos, destacando-se quatro na opinião de Azhar e Asce (2011):

- I. A necessidade de um processo de modelação e interoperabilidade que facilite a partilha de informação entre os vários intervenientes;
- II. A criação de guias de utilização do *BIM* que possibilitem a standardização da modelação;
- III. A complicada curva de aprendizagem dos programas que dissuadem muitos dos utilizadores que tentam aprender;
- IV. A dificuldade na criação de novas ferramentas no ambiente *BIM* que permitam expandir o repertório dos diferentes programas.

Dos desafios expostos o presente trabalho centra-se essencialmente no primeiro e no quarto, em linha com argumento de que os utilizadores devem ser o motor do desenvolvimento de novas funções para este ambiente (Kensek, 2015). Tirando partido das ferramentas existentes em conjunto com o *BIM* é possível, com relativamente pouco esforço, criar novas soluções para estes problemas de interoperabilidade. Esta

solução permite uma maior flexibilidade ao utilizador que pode adaptar o programa às suas necessidades, e nesse sentido a programação diretamente no ambiente *Revit* é a solução perfeita.

2.5.1 *Revit API*

No *Revit*, à semelhança de outros *softwares* de utilização corrente, existe uma interface de programação que permite ao utilizador expandir as capacidades do programa se assim o desejar e na medida que os seus conhecimentos o permitam. Essa interface de programação, chamada *Revit API*, funciona “como um intermediário possibilitando a interação entre *softwares*, dando aos utilizadores a possibilidade de adicionar *scripts* ou funções ao programa estendendo as suas capacidades” (Extending BIM Design Value Using the Revit Api | AUGI, s/d). Das capacidades que o utilizador pode adicionar, a AUGI, um grupo mundial de utilizadores de BIM e CAD, destaca:

- A importação e exportação de dados;
- A manipulação de propriedades;
- A automação de tarefas;
- A análise de edifícios.

No API são utilizadas linguagens de programação tradicionais para criar algoritmos que operam diretamente no *Revit* como *C#* ou *Python*. Estas linguagens têm três grandes mais valias: são amplamente conhecidas e utilizadas no mundo da programação; permitem a utilização de bibliotecas externas que facilitam a partilha de funções de forma simples e são relativamente simples de aprender, para utilizadores com bases sólidas de programação.

Ainda assim, apesar das promessas de automação de tarefas complexas existe uma grande desvantagem à utilização do API para esse efeito: a complexidade do programa que requer conhecimento significativo, não só do próprio *Revit*, como também das linguagens de programação referidas e de princípios de programação que muitos dos intervenientes da indústria da AEC não possuem. Por esse motivo, até agora, grande parte dos utilizadores tira muito pouco partido desta ferramenta.

2.5.2 *Dynamo*

O *Dynamo* é uma aplicação/ferramenta de programação visual que “procura ser acessível a programadores e não programadores” e que quando aliada ao *Revit* permite “estender as capacidades dos programas BIM através da utilização de dados e lógica ... oferecendo uma nova perspetiva para as suas possíveis aplicações” (About | The Dynamo Primer, s/d). Com esta ferramenta é possível, de forma relativamente simples, definir algoritmos que permitam manipular a informação geométrica e paramétrica no ambiente *Revit*, abrindo assim todo um novo leque de possibilidades quer no que toca a design e automação de tarefas.

Esta ferramenta foi criada em 2011 por Ian Keouht, um *software architect* com extensa experiência no desenvolvimento de *software* na área do BIM (trabalhou ainda no *GoBIM*, uma aplicação móvel de BIM),

que desenvolveu e lançou o *Dynamo* com a intenção de criar uma ferramenta que permitisse tirar partido do design paramétrico do *Revit* possibilitando às várias *Families* interagir entre si ou com parâmetros exteriores definidos pelo utilizador (Kensek, 2015).

A ideia de programação visual, utilizada pelo *Dynamo* para tornar a sua utilização o mais simples possível, é segundo Myers (1986), referente a qualquer sistema com duas ou mais dimensões que permite ao utilizador programar uma função (sendo que as linguagens de programação tradicionais têm apenas uma dimensão dado que o compilador lê o programa como uma lista contínua de instruções). Isto significa que os comandos não são dados na forma escrita ao programa, em vez disso os algoritmos são encriptados em componentes (nós) que podem posteriormente ser ligadas entre si para formar programas completos. Este método de programação tem grandes vantagens em relação às linguagens tradicionais visto permitir a compreensão do programa desenvolvido por qualquer pessoa sem a necessidade de conhecimentos profundos de programação ou de linguagens de programação, bastando seguir as ligações entre cada componente e a função que cada uma desempenha.

Na Figura 15 está representado um algoritmo em *Dynamo*, no qual o programa está a alterar a largura de todas as janelas do modelo *Revit* ao qual está ligado para um valor variável dependente da altura máxima das paredes. Desta forma todos os elementos de um modelo podem ser alterados de forma simples, paramétrica e automatizada.

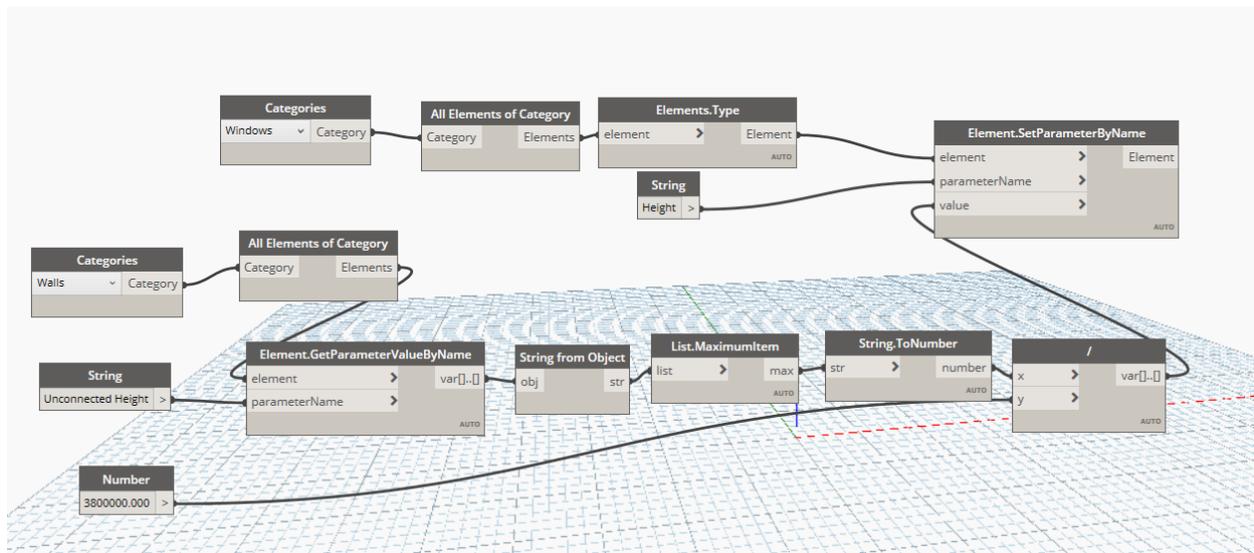


Figura 15 - Exemplo de um algoritmo em *Dynamo* descrito no modelo de programação visual

Segundo Menzies (2002), os sistemas de programação visual devem cumprir duas regras para poderem ser assim definidos:

- O sistema deve executar, ou seja, deve ser mais que apenas uma representação esquemática de ideias tendo para isso que desempenhar uma ação no contexto digital;

- As especificações do programa deverão ser alteráveis no ambiente virtual, ou seja, deve ser possível modificá-lo alterando os nós (elemento do algoritmo em que cada tarefa é programada e que pode ser ligado a outros para formar um fluxo de informação) e ligações entre elas.

Apesar de recente (incluído no pacote do *Revit* de 2020, mas disponível como adição desde 2014), o *Dynamo* atraiu a atenção de empresas, arquitetos e engenheiros graças à capacidade de simplificar e automatizar processos. Entre agosto de 2014 e maio de 2015 o número de *downloads* da versão *stand alone* do programa triplicou (25 000 para 75 000) e o número de *packages* criadas pelos utilizadores quase duplicou (de 350 para 550), isto na infância do programa (Kensek, 2015). Até 2021 o programa foi descarregado mais de três milhões de vezes, oferece mais de mil e quinhentas *packages* partilhadas por quase mil autores diferentes, provando a capacidade que a comunidade tem de evoluir e criar novas funcionalidades. Desta forma a oferta de possíveis utilizações é expandida por cada utilizador que, para resolver os problemas com que se depara, cria os seus próprios nós e os partilha com a comunidade. Este sentido de comunidade criado é uma clara vantagem, permitindo aos utilizadores partilhar conhecimento e entreajudar-se. Para além da programação visual o *Dynamo* permite ainda a utilização de programação textual para a criação de nós utilizando o *Python*, uma das linguagens de programação textual mais simples e comuns.

Pelos motivos citados e por estar já integrada no ambiente do *Revit* (ao contrário de outros programas, está incluído no pacote *Revit*) o *Dynamo* torna-se uma proposta atrativa para resolver alguns dos problemas de automação e interoperabilidade já expostos. Quando aplicada ao ambiente *BIM*, esta ferramenta de programação incentiva o aumento da produtividade individual de cada utilizador, libertando recursos humanos das tarefas repetitivas e contribuindo para um decréscimo no número de erros humanos no projeto. Nesse sentido, a sua utilização para automatizar estas pequenas tarefas de interoperabilidade entre sistemas é um tópico que faz sentido explorar pela facilidade de utilização e de partilha, embora a principal função seja de automatização de funções no *Revit* e não a interoperabilidade entre sistemas. Ainda assim, e como se pretende demonstrar com este trabalho, enquanto não forem desenvolvidas pelos fornecedores de *software* ferramentas para facilitar estas transições este método pode ser útil em muitos projetos.

A relação entre o *Dynamo* e a API do *Revit* é muito próxima, podendo ambos desempenhar o mesmo papel ou mesmo complementar-se. No fundo o *Dynamo* utiliza os recursos da API para, de uma forma mais simples, desempenhar um trabalho semelhante (Miller, 2014). A grande desvantagem desta ferramenta é a menor capacidade de lidar com grandes quantidades de dados e a maior lentidão no desempenho das tarefas.

Em termos práticos as ferramentas de programação visual são utilizadas essencialmente na automatização de tarefas ou na análise dinâmica em ambiente *BIM*, *i.e.*, avaliação do impacto que alguns parâmetros geométricos têm em tempo real. Em seguida deixam-se alguns exemplos de ferramentas desenvolvidas

com o *Dynamo* para ilustrar as possibilidades que surgem quando estes *softwares* são utilizados para a resolução de problemas de engenharia civil:

- Um bom exemplo de utilização da automação de processos é o trabalho de Ostrowska-Wawryniuk e Nazar, (2018) que tem como objetivo “explorar o potencial do design paramétrico e das ferramentas presentes no BIM para auxiliar no dimensionamento de habitações multifamiliares em elementos pré-fabricados”. Para isso foi desenvolvido um programa em *Dynamo* que recebe o modelo *BIM*, analisa e converte os elementos arquitetônicos em módulos pré-fabricados consoante as condicionantes de fabrico. Essas condicionantes de fabrico são essencialmente de natureza geométrica, conforme se ilustra na figura 16, (espessura das paredes, localização e dimensão das aberturas, etc.), pelo que é essencial extrair de forma eficaz essa informação, tal como no programa proposto pelo presente trabalho.

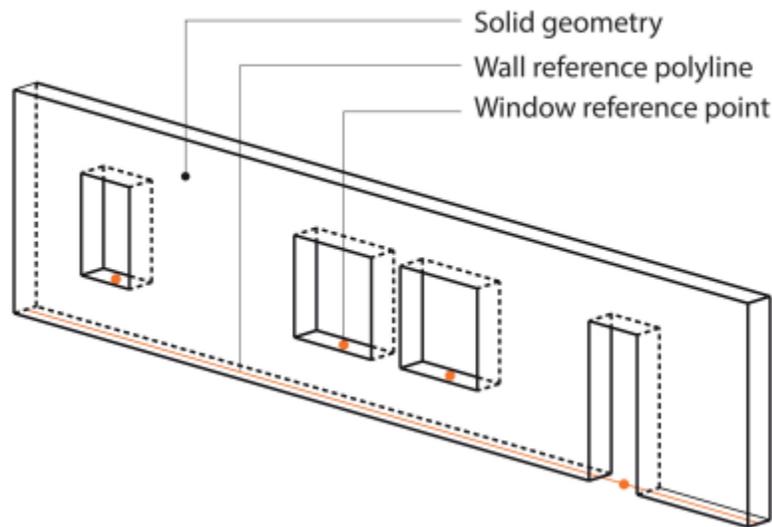


Figura 16 - Referencias geométricas do modelo (Ostrowska-Wawryniuk e Nazar, 2018)

- Existem ainda múltiplos exemplos de utilização do *Dynamo* na análise da eficiência energética de edifícios, mas destaca-se o trabalho de Kensek (2015) especialmente a utilização do *Dynamo* na interoperabilidade entre o *Revit* e o *Green Building Studio*, um serviço fornecido pela *Autodesk* que permite correr simulações de otimização de eficiência energética. Neste caso o *Dynamo* faz a ligação entre o *Revit* e o *Green Building Studio* ao conectar os ambientes de modelação de ambos os programas.
- No ramo de análise estrutural existe o trabalho de Salamak et al. (2019) em que o *Dynamo* foi utilizado para facilitar a transição entre o BIM e programas de análise de elementos finitos, corrigindo eventuais erros existentes na interoperabilidade entre os programas. Embora os resultados estejam ainda longe de permitir uma integração completa entre softwares, os autores

acreditam que no futuro com o desenvolvimento de novas tecnologias (como inteligência artificial) este método poderá ser aplicado para suprimir completamente os erros.

- Por fim é necessário referir os cursos e documentos disponíveis na *Autodesk University* (Autodesk University, s/d) sobre a utilização do *Dynamo*, dando especial destaque ao trabalho de Tomasz Fudala (2019) que desenvolveu a *package* “*Structural Design*”. No curso são sugeridas abordagens para o dimensionamento paramétrico de diferentes casos como o dimensionamento de estruturas porticadas metálicas de um piso, pormenorização do reforço de janelas em estruturas de betão, etc.

3 Ferramenta de Automação em *Dynamo*: *Revit to 3Muri Automated Drawing* (R3AD)

3.1 Abordagem ao Problema

No contexto do objetivo do presente trabalho, foi desenvolvida uma metodologia capaz de facilitar a interoperabilidade entre o *Revit* e o *3Muri*. Essa interoperabilidade não é automática, ou seja, todo o processo carece de *input* da parte do utilizador. Por sua vez o *3Muri* não oferece quaisquer plataformas para facilitar essa operação para além das já descritas: módulo de *IFC-BIM* utilizando ficheiros IFC ou importando um desenho em *.dxf*.

A utilização do módulo disponibilizado pela *STAdata* para ficheiros IFC revela vários inconvenientes, nomeadamente o não reconhecimento com todas as *Families* no modelo ou o facto de ser comercializado em separado do programa *3Muri* base, mas o mais significativo é a pouca informação que consegue realmente compilar e colocar num formato que o utilizador final consiga utilizar facilmente. Por outras palavras, apenas a geometria das paredes e a localização das aberturas é realmente incluída no ficheiro *.dxf*, sendo necessário ao utilizador compilar manualmente a restante informação necessária ao modelo. A função desse módulo acaba por ser criar de forma automática e a partir de um ficheiro BIM uma planta em *.dxf*, o que é manifestamente insuficiente para a criação do modelo em *3Muri*.

Devido a esta fraca capacidade de resumo e transmissão da informação considerou-se interessante criar uma ferramenta com a mesma capacidade de automaticamente criar um ficheiro de desenho a partir do modelo *BIM* e, ao mesmo tempo, capaz de resumir mais informação desse modelo no ficheiro de desenho (como as dimensões das aberturas ou as propriedades mecânicas de cada parede). Desta forma é possível transformar um problema de interoperabilidade entre sistemas completamente diferentes, algo que requer conhecimentos não básicos de programação, base de dados, análise sísmica e modelação BIM para resolver, num problema de automatização da operação de resumo de informação e passagem do modelo para uma planta em ficheiro de desenho, um problema com uma solução significativamente mais simples na qual se pode tirar partido das vantagens já referidas do *Dynamo*.

O *Revit* oferece algumas capacidades de automatização de tarefas sem exigir conhecimentos avançados de programação (através do *Dynamo*), permitindo o desenvolvimento de um programa em *Revit* que tem como função extrair os elementos essenciais para o modelo *3Muri* e resumi-los / esquematizá-los de forma automática. Com base nesta ideia a ferramenta *Revit to 3Muri Automated Drawing* ou R3AD foi criada.

Os processos que esta ferramenta se propõe a automatizar são os seguintes:

- Receber do *Revit* a informação necessária à criação do modelo;

- Filtrar as paredes relevantes para o modelo (i.e., ser capaz de distinguir entre uma parede estrutural de uma parede não estrutural);
- Filtrar as aberturas relevantes para o modelo (i.e., ser capaz de, a partir do modelo, perceber quais as aberturas que estão inseridas nas paredes estruturais, e por isso relevantes);
- Resumir as paredes estruturais à sua linha média (meio da parede em planta);
- Assinalar em planta a localização das aberturas;
- Processar a informação relevante relativa às paredes (por exemplo a espessura);
- Processar a informação relevante relativa às aberturas (altura, altura do parapeito, largura e espessura do parapeito);
- Representar a informação relevante das aberturas e paredes na planta com as linhas médias das paredes;
- Exportar toda a geometria para formato *.dwg* ou *.dxf*;

3.2 Programação Visual em Dynamo

O princípio da programação em *Dynamo* é muito simples: ligar nós entre si formando relações e sequências de ações e assim construir algoritmos. Desta forma é facilitada a compreensão do raciocínio lógico inerente ao algoritmo, como pode ser visto na Figura 17: neste caso o programa cria uma lista de pontos com coordenadas *xy* a partir de uma lista de números dada pelo utilizador. Posteriormente essa lista de pontos é povoada por cilindros de raio e altura variáveis, dependentes das coordenadas *x* e *y* em que se encontram. Essas geometrias podem posteriormente ser exportadas para o ambiente *Revit* – ou geometrias do *Revit* podem ser importadas para o ambiente *Dynamo* e editadas (Figura 18).

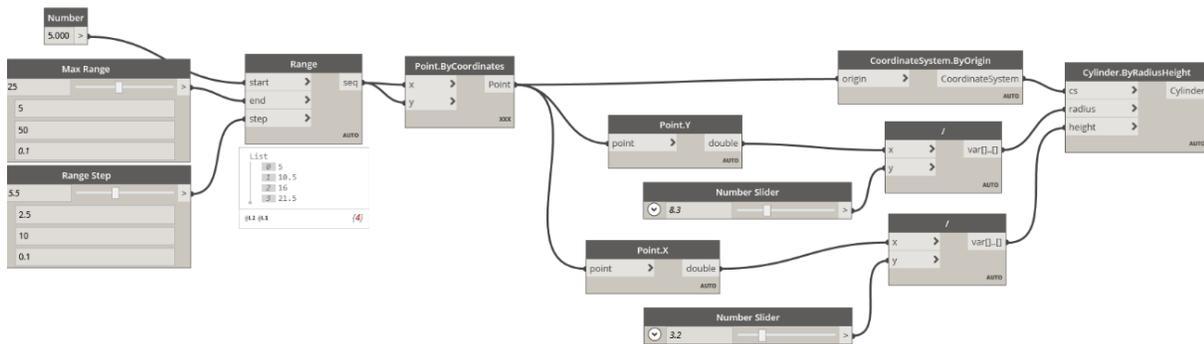


Figura 17 - Exemplo de algoritmo básico no *Dynamo*

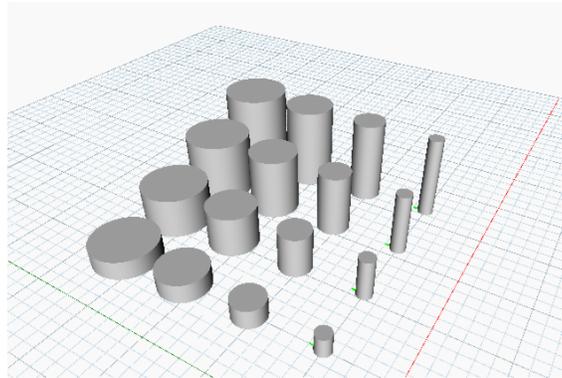


Figura 18 - Geometria que resulta do algoritmo do exemplo anterior

3.2.1 Nós ou *nodes*

As operações em VP são executadas pelo nós e podem ter vários graus de complexidade. Cada nó representa um elemento em *Revit*, uma operação matemática ou qualquer outra função que possa ser executada no API por uma linguagem textual (Vogt, 2016). A diferença entre utilizar a API e o *Dynamo* resume-se essencialmente à facilidade com que o algoritmo consegue ser montado, sendo que no *Dynamo* é consideravelmente mais simples. Algumas das funções disponíveis no *Dynamo* inclusive funcionam com os mesmos argumentos que na API (Miller, 2014).

A Figura 19 exemplifica o funcionamento do nó no *Dynamo*, onde:

1. Nome do nó, no formato “Categoria.Nome”, que é utilizado por todos os nós no programa;
2. Corpo do nó;
3. Pontos de *input* e *output* onde devem ser ligados os fios (*wires*) que conectam os vários nós. A informação entra da esquerda para a direita onde pode ser ligada a um novo nó já com a operação executada;
4. Opções de *lacing* do nó que permitem gerir as listas de elementos que cada nó trata;
5. *Default Value*, que indica o valor de *input* que cada ponto pode (ou não) ter por omissão.

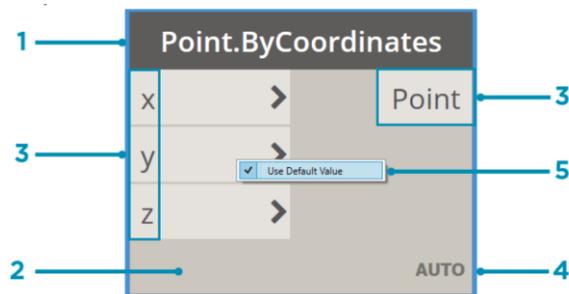


Figura 19 - Exemplo de um nó em *Dynamo* (*About | The Dynamo Primer, s/d*)

O *output* destes nós pode ser um valor, uma lista de valores ou uma lista de listas, dependendo do formato de *input*. Para além destas listas o *Dynamo* altera, adiciona ou subtrai elementos do *Revit*, sendo as ações

apresentadas como uma lista de novos elementos, sejam eles geometrias, *strings* (texto), valores paramétricos (como dimensões), *Instances*, entre outros. Estas listas são os elementos transmitidos entre os nós através dos *ires*.

3.2.2 Bibliotecas e *Packages*

O programa base do *Dynamo* fornece em si vários nós divididos nas várias bibliotecas e divididos por categorias. A esta biblioteca podem ser adicionados nós produzidos pelo próprio ou pela comunidade para serem utilizados noutros projetos

A utilização destes nós produzidos pela comunidade ajuda a ampliar as capacidades do programa sendo grande parte destes nós, disponíveis de forma gratuita, são feitos em *Python*. Por este motivo o verdadeiro potencial desta ferramenta está dependente dos conhecimentos do utilizador neste capítulo. Ainda assim, dada a facilidade com que podem ser usados, o conhecimento de programação em *Python* não é essencial para a utilização do *Dynamo*, sendo possível criar ferramentas de grande utilidade sem conhecimentos de programação tradicional.

No desenvolvimento da ferramenta R3AD foram utilizadas as seguintes *packages*:

- Archi-lab.net, desenvolvida por Konrad K. Sobon, versão 2020.23.3;
- Clockwork for Dynamo 1X, desenvolvida por andydandy, versão 1.34.0;
- DynamoText, desenvolvida por Ian Keough, versão 2.0.1;
- LinkDWG, desenvolvida por kozmos, versão 0.3.82;
- LunchBox for Dynamo, desenvolvida por achinate, versão 2018.7.7;
- MeshToolkit, desenvolvida pela DynamoTeam, versão 3.0.0.

3.3 Condicionantes a Aplicar ao Modelo *Revit*

De forma a possibilitar a facilitar a interoperabilidade entre sistemas é essencial que o programa consiga identificar toda a informação que precisa de sintetizar. Como exposto anteriormente essa identificação depende em parte da forma como o utilizador do BIM identifica os parâmetros de cada *Instance* no modelo *Revit*.

A Figura 20 ilustra, a título de exemplo, o processo de identificação da altura do parapeito: o programa em *Dynamo* tem que procurar especificamente o *parameter* "Alt. Parapeito (*default*)", que não é definido à partida pelo *Revit*, mas que é criado pelo utilizador. Dada essa limitação é recomendável definir algumas condições que o modelo *BIM* deve cumprir para possibilitar a identificação da informação: caso estas recomendações não sejam seguidas será necessário ajustar o programa criado ao projeto para conseguir identificar estes parâmetros.

Assim sendo, deixam-se algumas recomendações para a criação do modelo em BIM que possibilitam a utilização da ferramenta R3AD e que, para uma utilização correta, deverão ser respeitadas:

- A parede criada deverá ter a altura do piso em que se insere e começar nesse mesmo piso. Isto porque o *3Muri* modela cada piso individualmente, necessitando por isso de uma planta por piso (a não ser que a regularidade em altura permita a replicação do piso). No *Revit* por sua vez é possível criar paredes contínuas desde a fundação até à cobertura (quando a geometria do edifício o permite), algo que a ferramenta desenvolvida não consegue identificar (os elementos relevantes de cada planta são filtrados por piso e no *Revit* as paredes são parametrizadas de forma que o piso onde se inserem seja o da base).
- O *Dynamo* é consideravelmente mais eficiente em plantas com menor pormenorização, pelo que deverá ser utilizado o modelo BIM mais simples possível. Este facto deve-se à maior exigência computacional necessária para tratar modelos com um grande número de elementos. Por este motivo, e para tornar o processo o mais célere possível, recomenda-se a utilização de um modelo apenas com os dados que se considerem relevantes.

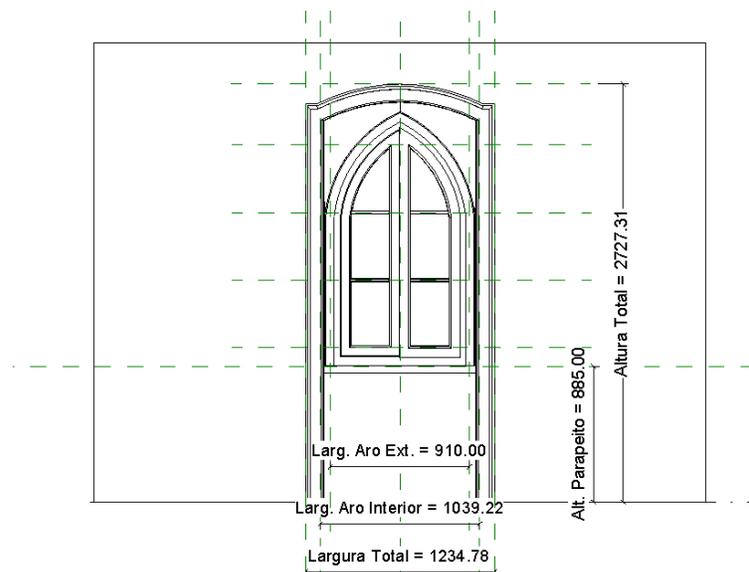


Figura 20 - Exemplo de parametrização de uma abertura em que os parâmetros Altura Total, Largura Total e Alt. Parapeito estão devidamente identificados

- Conforme referido, a parametrização dos elementos geométricos é um dos aspetos que tem influência na utilização do programa. Isto acontece porque o *Revit* só reconhece as medidas que estão parametrizadas, ou seja, só são quantificadas pelo programa as medidas que são definidas pelo utilizador como parâmetros. Recomenda-se, portanto, que estas medidas sejam parametrizadas conforme representado na Figura 20 em que a largura total e a altura total da janela foram parametrizadas convenientemente. O nome dado a estes parâmetros é um dos *inputs* definidos pelo programa, mas sugere-se também consistência na nomenclatura utilizada para todas as aberturas relevantes.
- Uma outra forma de modelar as aberturas no *Revit* é criando um *Void*, ou seja, definir uma parte de um segmento de parede como um vazio. Estes *Voids* não são na realidade elementos do

modelo, mas sim segmentos que são subtraídos a elementos, daí não serem reconhecidos pelo *Revit* como elementos e por isso devem ser evitados na modelação.

3.4 Funcionamento do Programa Desenvolvido

Na Figura 21 está representada a distribuição do grupo de nós no esquema global do programa. No *Dynamo* cada nó desempenha uma função ou um conjunto de funções semelhantes, pelo que é comum criar grupos, que são em seguida explorados, nos quais as operações são concentradas como conjuntos de nós. Todos os nós expostos encontram-se no programa base do *Dynamo* ou num dos *packages* mais comuns e disponíveis de forma gratuita.

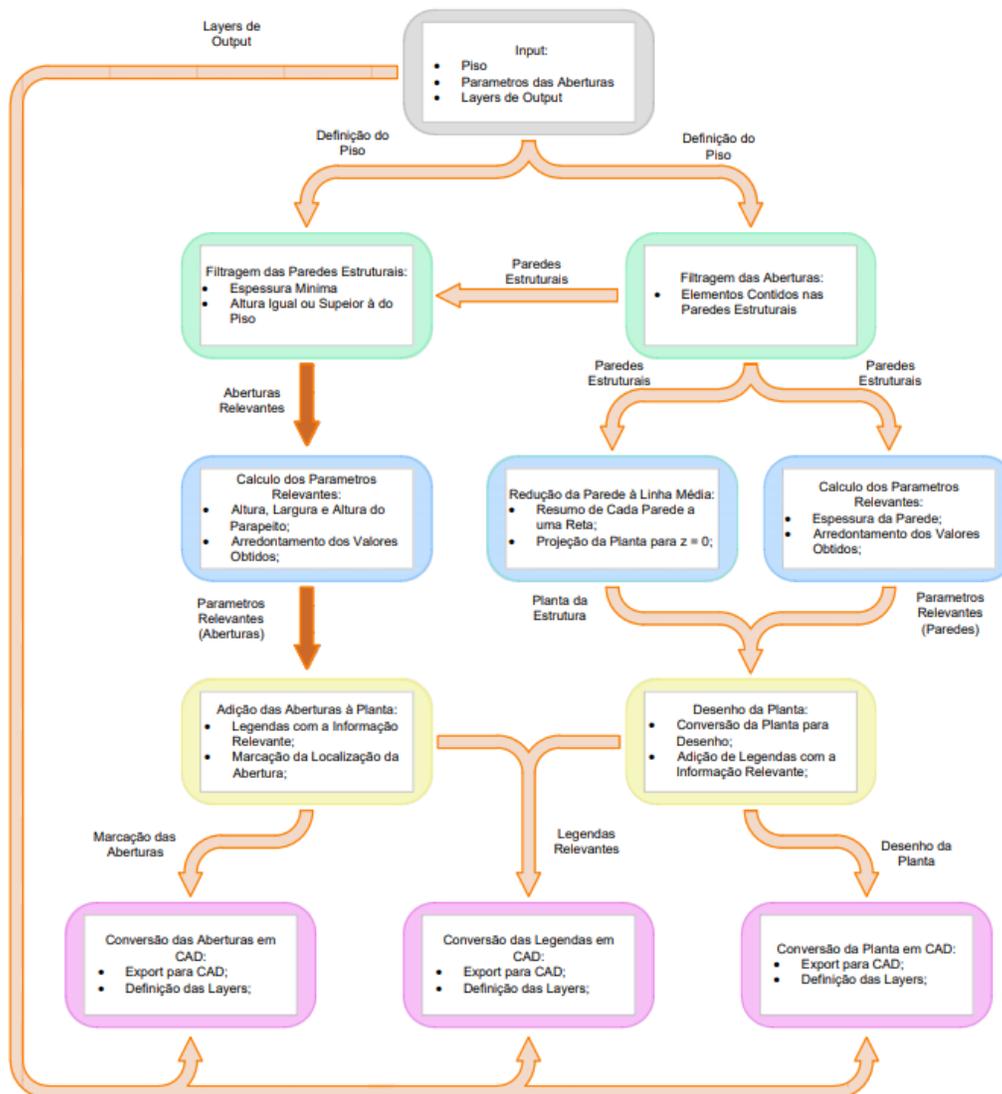


Figura 21 - Representação esquemática do funcionamento da ferramenta R3AD desenvolvida, dividida em grupos de funções

Na Figura 21 foi utilizado o seguinte código de cores:

- A verde é representado o grupo de filtragem de elementos (*Walls, Doors e Windows*);
- A azul é representado o grupo de determinação e calculo dos parâmetros relevantes;
- A amarelo é representado o grupo de desenho da planta com a informação relevante;
- A magenta é representado o grupo de extração da planta para formato *.dwg*;
- A laranja é representado o caminho percorrido pela informação entre cada grupo de funções.

3.4.1 Input

Neste grupo de *input* estão os nós em que o utilizador tem influência direta nos quais se define qual o piso que o programa vai analisar, as *layers* do documento *.dwg* para onde serão extraídos os elementos e quais os nomes dos parâmetros relevantes a extrair no caso das aberturas. Neste último caso considerou-se necessário exigir esta indicação da parte do utilizador devido à forma como são criados os *parameters* no *Revit*, inteiramente uma escolha do criador do modelo e nem sempre seguindo os mesmos moldes, pelo que esses parâmetros poderão apresentar qualquer nome à sua escolha. Considerou-se também essencial, devido à forma como o *3Muri* modela a estrutura um piso de cada vez, tratar cada piso em separado.

Para facilitar a utilização do programa adicionou-se um nó para regular o *output* do programa, nomeadamente para a seleção das *layers* do *.dwg* e para dar início à operação de extração. Esta operação é consideravelmente demorada, por isso é aconselhável utilizar o *background 3D preview* do *Dynamo* para identificar eventuais correções necessárias.

Por fim podem ser adicionados *inputs* para ajudar o programa a definir os elementos a filtrar (como a espessura das paredes a considerar estruturais, a dimensão mínima das aberturas a considerar, etc.). No exemplo ilustrado Figura 22 esses valores foram definidos *a priori*, estando por esse motivo apenas visíveis no programa em si.

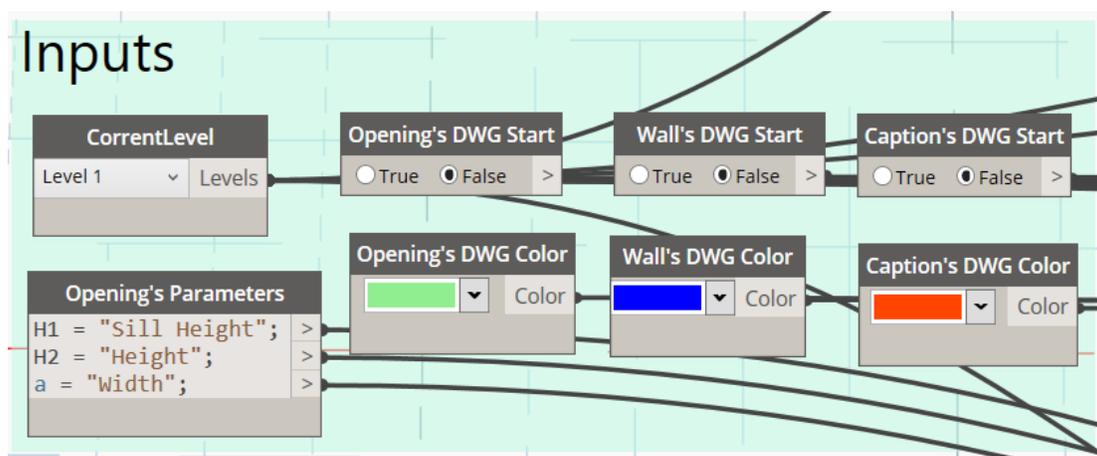


Figura 22 - Grupo de *input* para a ferramenta

3.4.2 Seleção dos Elementos Relevantes para a Modelação no 3Muri

A seleção dos elementos relevantes é feita com base nas *Categories*, sendo numa primeira fase selecionados todos os elementos e posteriormente filtrados segundo critérios pré-definidos. No *Revit* as paredes têm uma característica particular, são uma *System Family*, o que significa que não podem ser editadas como *Family* e que toda a informação particular sobre esse objeto no *Revit* está guardada no *Type*. Na *Category* das paredes (*Walls*) estão incluídos vários elementos que não contribuem para a resistência das paredes estruturais, como elementos decorativos ou, eventualmente paredes não estruturais como as paredes de tabique, que devem ser retirados da lista de elementos a transferir entre formatos.

O critério para filtrar elementos é baseado nas dimensões: espessura superior a 15 cm e altura igual ou superior ao pé-direito do piso. Isto porque no caso das paredes não é possível utilizar a hierarquia do *Revit* para filtrar unicamente as paredes resistentes. Seria possível adicionar um critério mais “sofisticado”, como o tipo de material que constitui a parede ou a definição do autor do projeto ao criar o modelo (os elementos podem ser identificados como estruturais), mas essa informação é definida no modelo *Revit* e nem sempre está presente, e por isso optou-se por utilizar um critério mais alargado. Na Figura 23 é ilustrado o funcionamento deste grupo com todas as variáveis definidas.

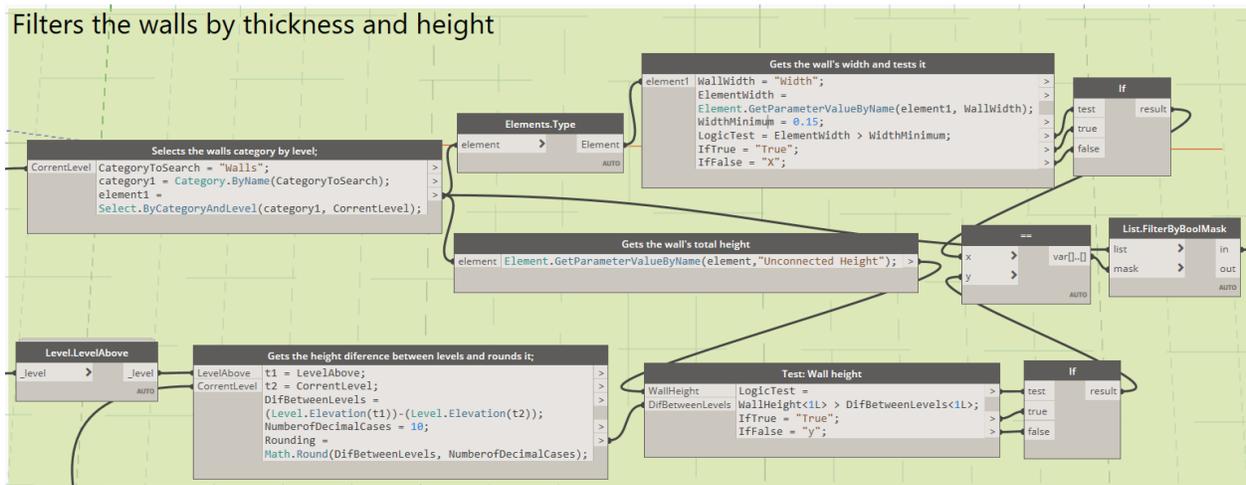


Figura 23 - Grupo de filtragem de elementos de parede

Para as aberturas (*Doors* ou *Windows*) a seleção é semelhante e encontra-se ilustrada na Figura 24, mas neste caso tem como critério de exclusão os elementos não *hosted* (incluídos) nas paredes estruturais. Caso existam elementos destas *Categories* com dimensões reduzidas que possam ser considerados desprezáveis também podem ser excluídos de uma forma semelhante ao ilustrado anteriormente.

O critério de seleção escolhido para ambos os casos, de começar no tipo da hierarquia e a partir daí filtrar os casos relevantes, tem como objetivo garantir que todos os elementos são selecionáveis e são testados. Infelizmente, em certos casos particulares, podem surgir ocorrências em que as aberturas são definidas

como vazios (*Void*) no *Revit*, algo que o programa não tem capacidade de procurar e seria, portanto, necessário reajustar o R3AD.

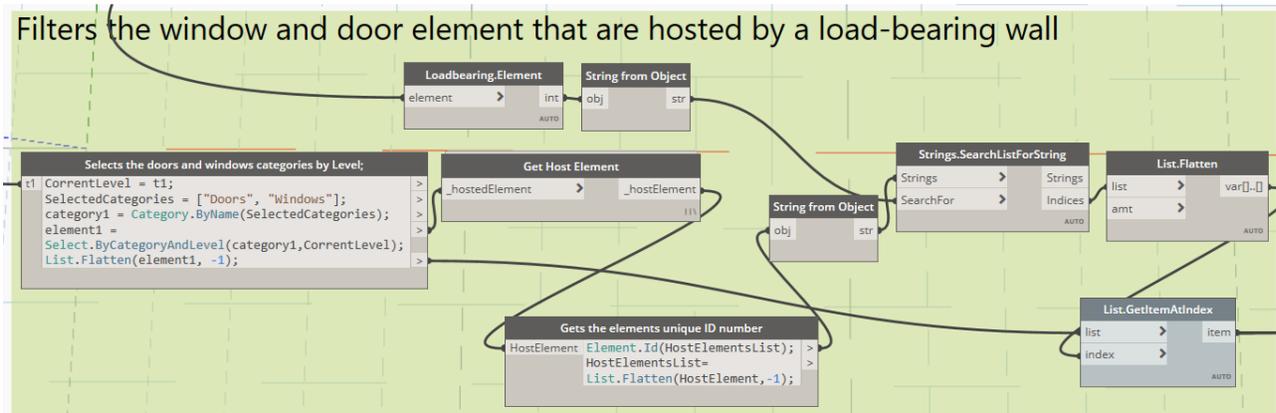


Figura 24 - Grupo de filtragem das aberturas

3.4.3 Compilação de Informação

Após filtrar os elementos a ser tratados, reduzindo-os aos estritamente necessários, é necessário compilar a informação e colocá-la no formato que o *3Muri* posteriormente irá utilizar, isto é, transformar as paredes resistentes do formato *element* no *Revit* para o formato de geometria no *Dynamo* e calcular os parâmetros relevantes das paredes e das aberturas.

Em primeiro lugar as paredes devem ser convertidas em geometrias (retas que acompanham a linha média da parede) e projetadas para o plano $z = 0$, isto porque as coordenadas aqui definidas serão as utilizadas pelo programa de CAD e, conseqüentemente, pelo *3Muri* (Figura 25).

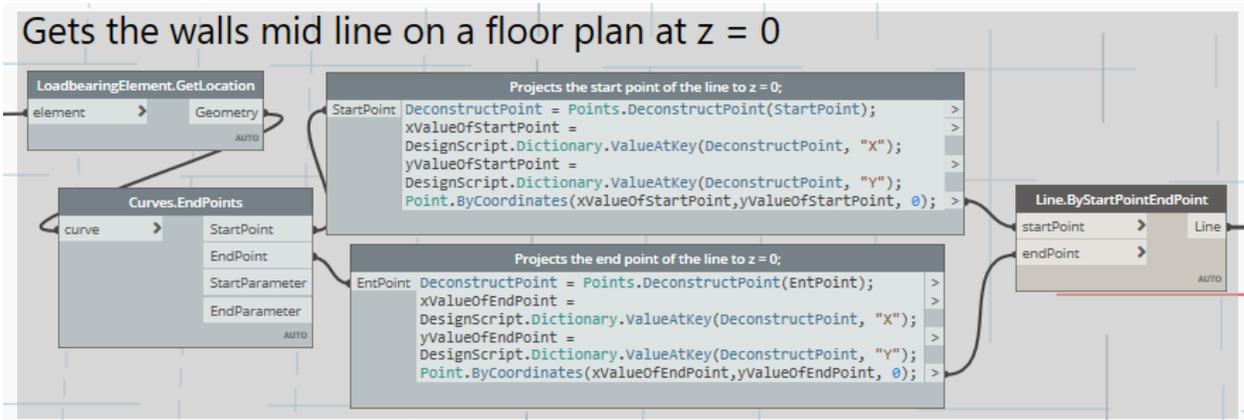


Figura 25 - Grupo de conversão dos elementos de parede em geometria (retas)

Para além da localização das paredes é também necessário saber a sua espessura. Para isso a cada *type* da categoria de parede é extraída a espessura e a identificação única do elemento no *Revit* e ordenados em forma de lista no *Dynamo* (Figura 26).

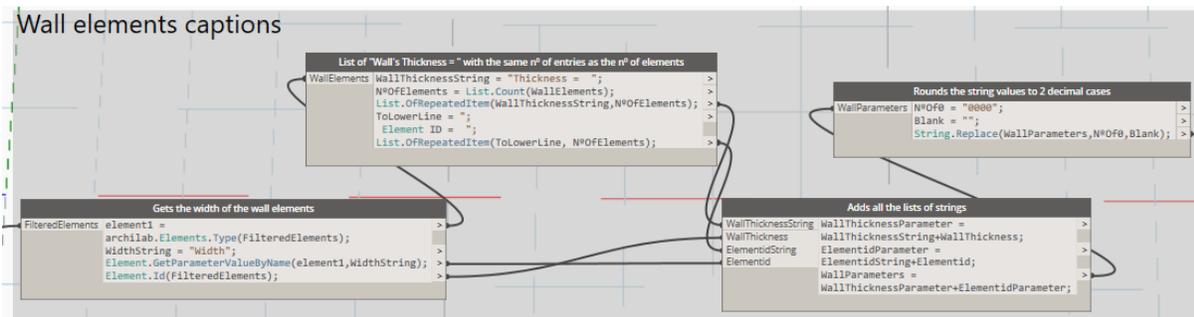


Figura 26 - Grupo de cálculo da espessura das paredes resistentes

Por fim, é necessário proceder de modo semelhante para as aberturas. Neste caso a diferença é que há três parâmetros a selecionar (Figura 27): altura e largura da abertura e ainda a altura do peitoril da janela, tornando o processo ligeiramente mais complexo.

À semelhança do que acontece nas paredes, a informação geométrica destes elementos está armazenada no *Type* como parâmetros, daí ser necessário o *input* do utilizador quanto ao nome utilizado para definir o parâmetro. Esse parâmetro é neste passo substituído pela terminologia utilizada no *3Muri* para as dimensões das aberturas de forma a facilitar o trabalho de transição. Por fim, é feito o arredondamento das dimensões ao centímetro pelas razões já expostas.

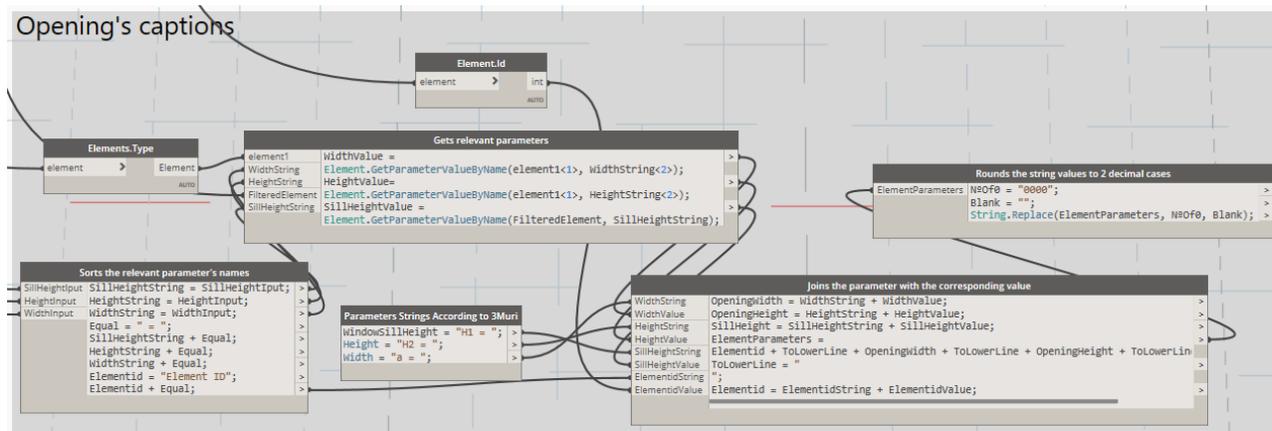


Figura 27 - Grupo de cálculo dos parâmetros relevantes para as aberturas

3.4.4 Resumo da Informação

A informação recolhida nos grupos anteriores poder ser apresentada em dois formatos distintos com diferentes vantagens e desvantagens: juntamente com a planta desenhada como anotação ou em ficheiro *Excel* com toda a informação sobre cada elemento.

A primeira opção implica a conversão de todos os elementos escritos em elementos geométricos (converter uma letra ou algarismo num conjunto de linhas). Isto acontece porque no *Dynamo* não existe a opção de simplesmente adicionar anotações, como no *Autocad* ou *Revit*, e nesse caso a única opção para criar uma

planta cotada é a adição de milhares de linhas geométricas ao desenho para formar as anotações, conforme se ilustra na Figura 28. Neste caso a letra “A” é convertida em 13 linhas geométricas no ambiente *Dynamo*. Esta conversão tem a desvantagem de consumir muito tempo quando é feita a exportação para *CAD* (exportação é feita elemento a elemento, ou seja, linha a linha), mas tem a vantagem de apresentar a informação resumida para o utilizador num formato muito mais fácil de trabalhar.

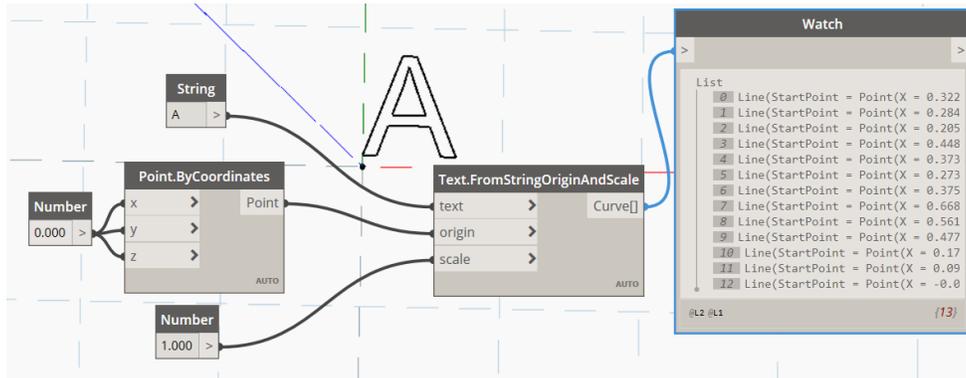


Figura 28 - Exemplo de conversão de elementos escritos em geometrias

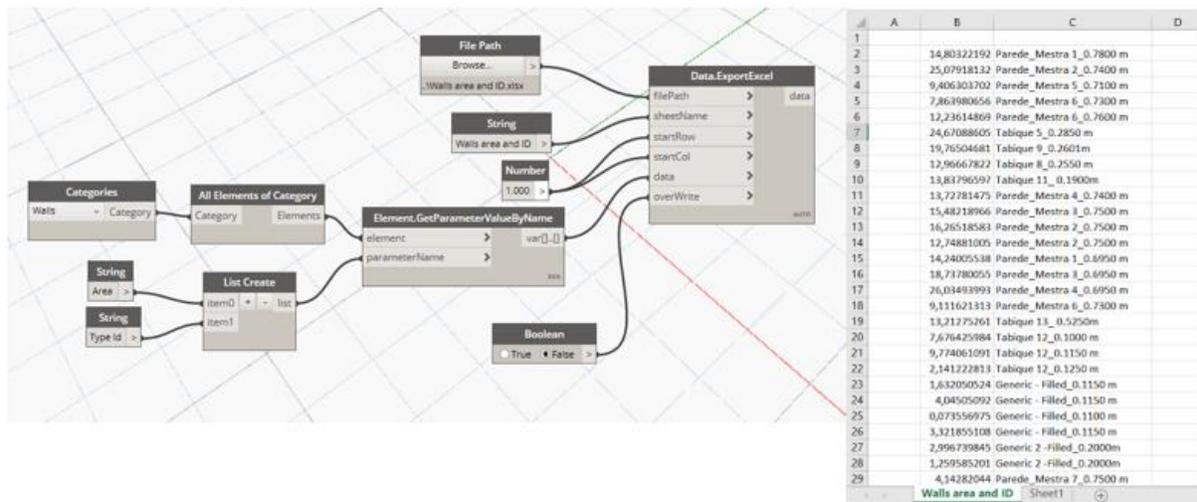


Figura 29 - Exemplo de algoritmo para extração de informação para *Excel* (à esquerda) e informação extraída do *Dynamo* em formato *Excel* (à direita)

A segunda opção consiste em criar listas com a informação pretendida e exportá-las para *Excel*, conforme o exemplo da Figura 29. Apesar de esta opção reduzir consideravelmente o tempo necessário para extrair a informação, tem a desvantagem de não ser tão intuitiva para o utilizador, já que este precisa de constantemente associar cada elemento no desenho a um outro elemento na tabela.

Optou-se por implementar no programa a primeira opção por se considerar mais conveniente para o utilizador. Para facilitar a identificação no desenho os elementos foram divididos em dois grupos: um que trata a geometria das paredes e outro que trata a localização das aberturas.

Writes the information about the walls on the mid plane line

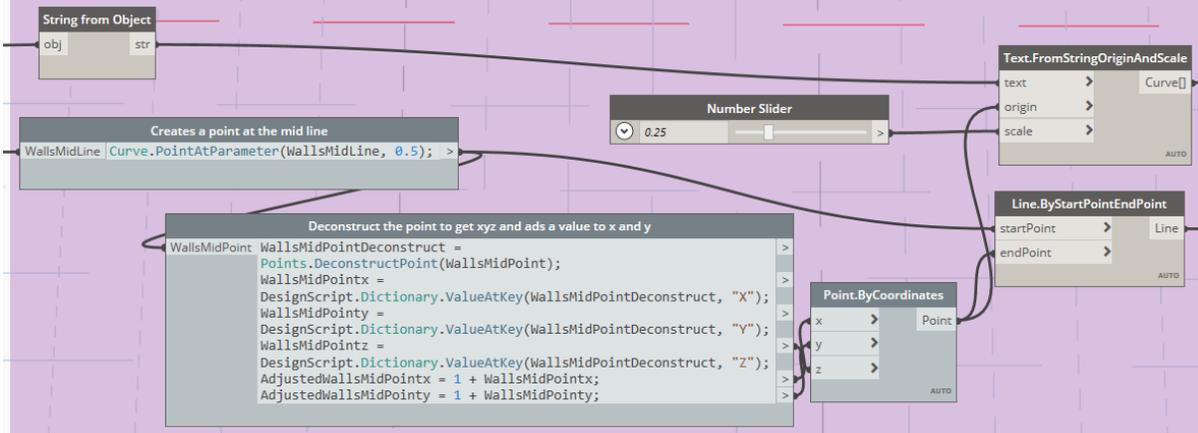


Figura 30 - Grupo de compilação da informação das paredes

No caso das paredes é feita a conversão da informação recolhida nos grupos anteriores (medidas e identificação) em geometrias, conforme ilustrado na Figura 30, e é colocada uma anotação.

Para as aberturas é assinalado na planta o local de implantação colocando um círculo que posteriormente servirá de local de implantação no *3Muri* (Figura 31).

Writes the information on the point of insertion of the opening

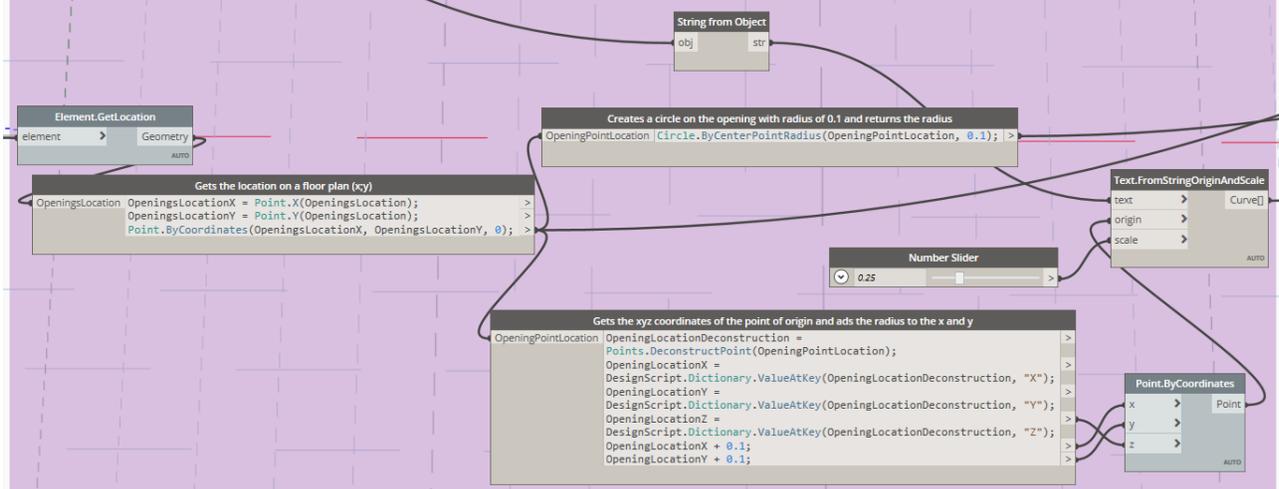


Figura 31 - Grupo de compilação da informação para as aberturas

3.4.5 Extração da Informação

A informação é extraída para um ficheiro CAD, optando-se por criar três *layers* diferentes, conforme ilustrado na Figura 32: uma para paredes, outra para aberturas e uma última para legendas. O programa de CAD deverá ter um separador de desenho aberto no *background* para receber a planta extraída do *Dynamo*. Aconselha-se dar início a este processo de transição de formato apenas após verificar se a planta está de acordo com o desejado no ambiente *Dynamo*, visto este ser o passo mais demorado do processo.

O processo terá que ser repetido para todos os pisos visto que a ferramenta desenvolvida trata um piso de cada vez e aconselha-se a que para cada piso seja criado um ficheiro CAD.

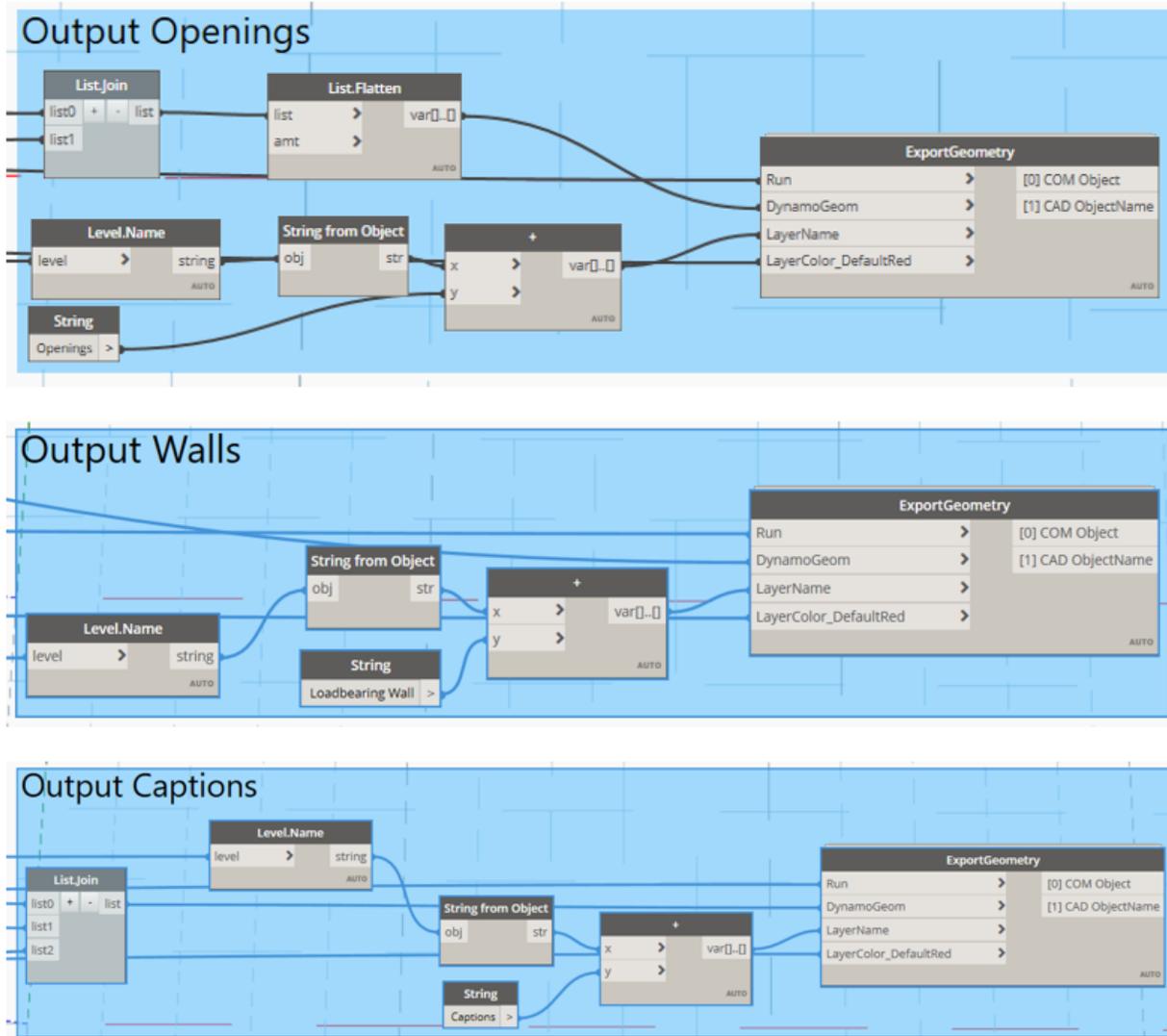


Figura 32 - Grupos de extração de informação para ficheiros CAD para aberturas, paredes e legendas

3.4.6 Pós-Processamento

Após o processo de conversão do modelo BIM na planta simplificada do edifício são ainda necessários alguns ajustes ao ficheiro CAD antes de transitar em definitivo para o *3Muri*. Esses passos, enunciados em seguida, estão essencialmente ligados à utilização da planta no *3Muri* devido às exigências de precisão do programa e à forma como a sobreposição dos elementos dos diferentes pisos funciona.

- Alinhamento das linhas médias das paredes, isto porque o *3Muri* exige que seja feita uma simplificação à posição das paredes para que estejam perfeitamente alinhadas na modelação, enquanto no modelo BIM se exige uma maior fidelidade à disposição arquitetónica dos elementos.

Esta disparidade na utilização dos programas é comum e estas simplificações para a avaliação com o *3Muri* têm de ser feitas de forma manual (ver exemplo ilustrado na Figura 33).

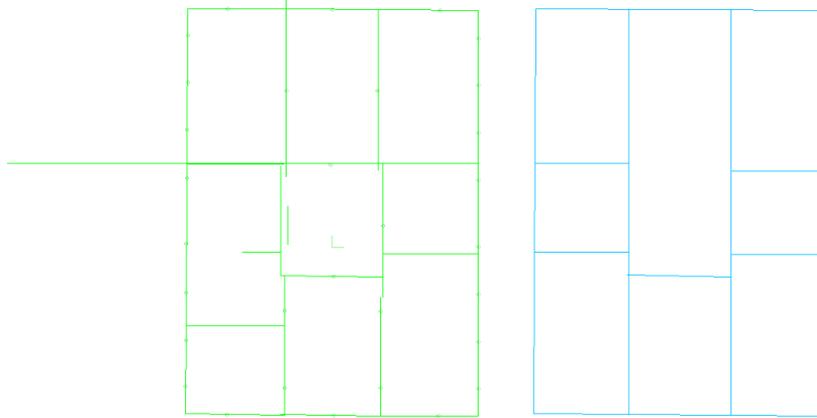


Figura 33 - Exemplo do alinhamento das paredes da planta do edifício para transição para o *3Muri*. À esquerda antes do alinhamento das paredes e à direita com a correção já efetuada

- Escolha do ponto de inserção no *3Muri* e alteração da posição da planta em *.dwg* para ter essa limitação em conta. Por omissão os referenciais do *Revit*, do *Dynamo* e do CAD são no mesmo ponto, não sendo necessário programar qualquer alteração na transição entre *softwares*. Apesar disso a inserção da planta no *3Muri* é feita num local à escolha do utilizador, em que o ponto (0,0,0) das coordenadas do CAD funciona como ponto de referência. Isto quer dizer que, para garantir o alinhamento das plantas aquando da inserção no *3Muri*, estas devem ter o ponto de origem do referencial no CAD numa interseção entre paredes que se mantenha a toda a altura do edifício.

3.4.7 Versão Final

O resultado final do programa R3AD é uma planta esquemática de cada um dos pisos da estrutura em que os elementos relevantes para a modelação em *3Muri* são destacados.

A ferramenta apresentada tem a intenção de automatizar a esquematização da planta para utilizar no *3Muri*, mas pode ser expandida para concentrar mais informação que a apresentada, como as dimensões do piso, as características mecânicas nas paredes, dimensões da cobertura, ou quaisquer outros dados armazenados em BIM. Para isso basta a adição de outros nós ou grupos de nós ao algoritmo já apresentado.

É conveniente chamar a atenção para o facto de a conversão ser feita à escala de 1:1 entre *Revit* e CAD, embora o *3Muri* funcione (por definição) com centímetros como unidade linear, e não metros (unidade em que o modelo *Revit* normalmente é desenvolvido). O presente programa não faz qualquer conversão de escala.

4 Aplicação do R3AD

Neste capítulo é descrita a aplicação da ferramenta desenvolvida, R3AD, a dois casos de estudo: o primeiro envolve um modelo simples em *Revit* e pretende ilustrar a utilização da ferramenta num exemplo de uma tipologia muito comum em Portugal; o segundo é um modelo, muito mais complexo, de um edifício histórico no Parque de Sintra, o *Chalet* da Condessa d'Edla, e tem como intenção ilustrar alguns dos problemas que podem existir quando a ferramenta é aplicada a um modelo BIM com esta complexidade.

Dados os problemas verificados na aplicação da metodologia desenvolvida ao *Chalet* considerou-se necessário indicar também as soluções encontradas. Estas soluções propostas vão desde pequenas correções à planta final obtida pelo R3AD a novos grupos de nós no *Dynamo* que têm como objetivo corrigir determinadas incompatibilidades encontradas.

Após a modelação do *Chalet* em *3Muri* utilizando a ferramenta R3AD, as curvas de capacidade serão calculadas no *software* de análise estrutural, e os resultados comparados com os obtidos para o mesmo edifício antes (presente trabalho) e após (Neves da Silva, 2020) o reforço estrutural que sofreu após o restauro levado a cabo em 2007.

4.1 Caso de Estudo 1: Modelo Simples

A estrutura modelo onde será numa primeira fase apresentada a metodologia é baseada num exemplo simplificado de um edifício de alvenaria com 2 pisos, ilustrado na Figura 34. No primeiro piso existem 3 portas na fachada principal e 2 janelas na fachada de tardoz. No segundo piso tem 3 janelas na fachada principal e 2 na fachada de tardoz. As empenas têm uma espessura de 15 cm e as fachadas 25 cm e o material é genérico. A altura total é de 7 metros. Trata-se de um exemplo muito simples que pretende demonstrar o tratamento de dados da ferramenta criada.

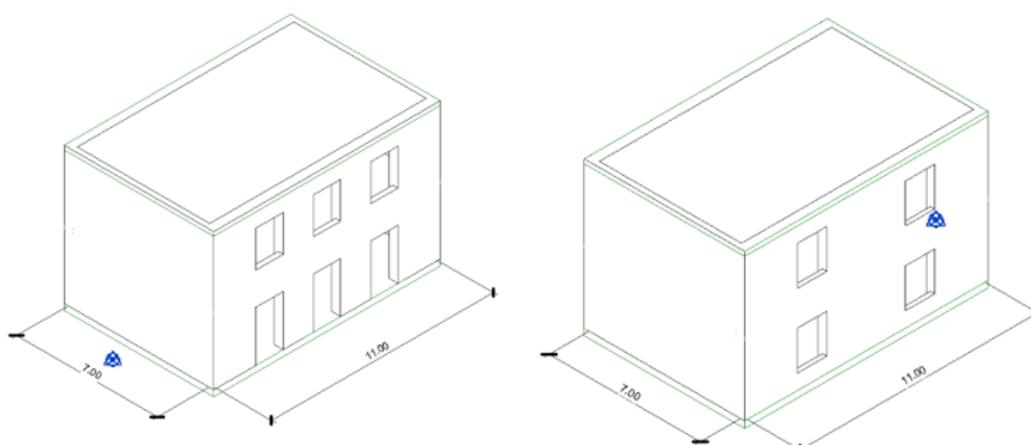


Figura 34 - Estrutura modelo para aplicação da metodologia

4.1.1 Utilização da Ferramenta Desenvolvida

O *Dynamo* encontra-se incluído no pacote base do *Revit* e pode ser aberto diretamente no *User Interface (UI)* do *Revit*, no separador *Manage*, ilustrado na Figura 35. O programa funciona exclusivamente no projeto aberto em *Revit*, por isso esta operação só deverá ser executada quando o modelo em que se pretende utilizar o *R3AD* está aberto em *background* no *Revit*.

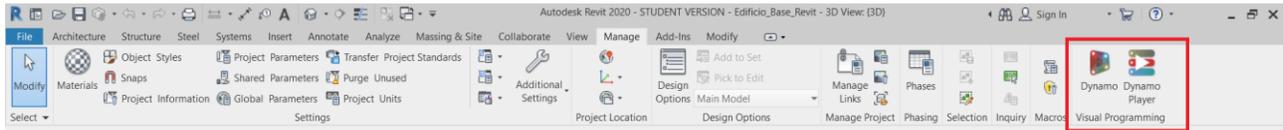


Figura 35 - *Dynamo Launcher* no UI do *Revit*

Após abrir a ferramenta o *Dynamo* entra no *workspace* do programa onde estão os nós e ligações que compõem o algoritmo. Na Figura 36 está ilustrado o *workspace* do *Dynamo*, com especial cuidado para a barra de execução no canto inferior esquerdo, e para o menu de *preview*, no canto superior direito.

O menu de *preview* permite alterar a visualização entre o algoritmo criado, possibilitando a edição, e a geometria criada, que pode ser vista por trás dos nós. Desta forma é possível ter uma pré-visualização do produto final antes de passar definitivamente para o formato CAD.

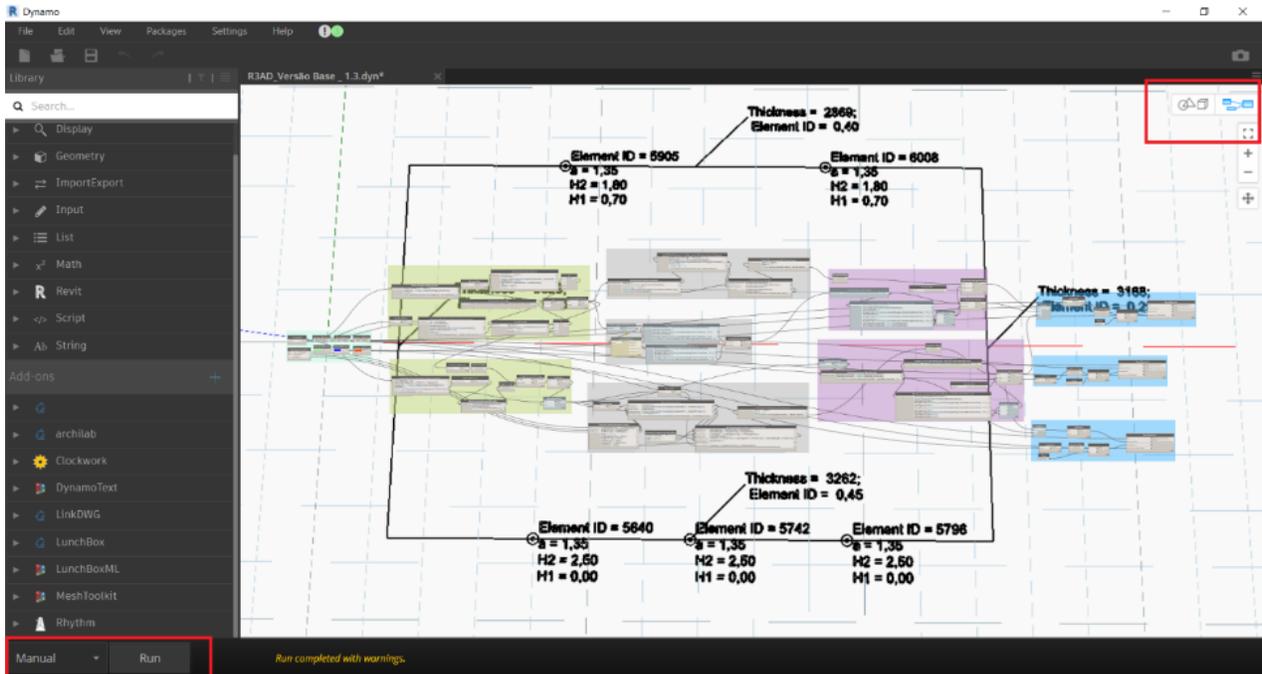


Figura 36 - *Workspace* do *Dynamo*

A barra de execução tem como função dar início às operações de criação da planta detalhada. Por omissão, a barra de execução encontra-se na opção automática, mas esta apenas deverá estar ativa quando se pretende fazer um estudo paramétrico do modelo, isto é, quando se pretende estudar os efeitos que uma

variação num dos parâmetros do modelo terá nos restantes (o *Dynamo* faz automaticamente as alterações necessárias e apresenta imediatamente os resultados). Por esse motivo sugere-se a utilização no modo manual para a generalidade dos casos (seja na utilização da ferramenta apresentada neste trabalho ou na criação de novos algoritmos).

Iniciando o programa deve obter-se uma planta completa, conforme pode ser visto na Figura 37. Esta planta deverá ser comparada com a planta em *Revit* de forma cuidadosa pelo utilizador para garantir que todos os elementos relevantes estão assinalados. Caso isso não aconteça estes podem ser adicionados manualmente no ficheiro de CAD ou podem ser adicionados nós no *Dynamo* que permitam corrigir eventuais erros, conforme será ilustrado mais à frente.

4.1.2 Exportação da Planta para Formato CAD

Criada a planta é agora necessário fazer a transição do *Dynamo* para o CAD. Para isso basta abrir o programa de CAD instalado (no caso apresentado é o *Autocad* criado pela *Autodesk*), alterar os campos assinalados no grupo de *Input* para dar início à operação e voltar então a correr o *Dynamo* na barra de execução. Neste passo todas as geometrias criadas pelo *Dynamo* são desenhadas, uma a uma e de forma automática no ficheiro CAD aberto em *background*, conforme estão no *workspace* do *Dynamo*.

Também neste passo deverão ser corrigidas quaisquer imperfeições na planta, conforme descrito anteriormente.

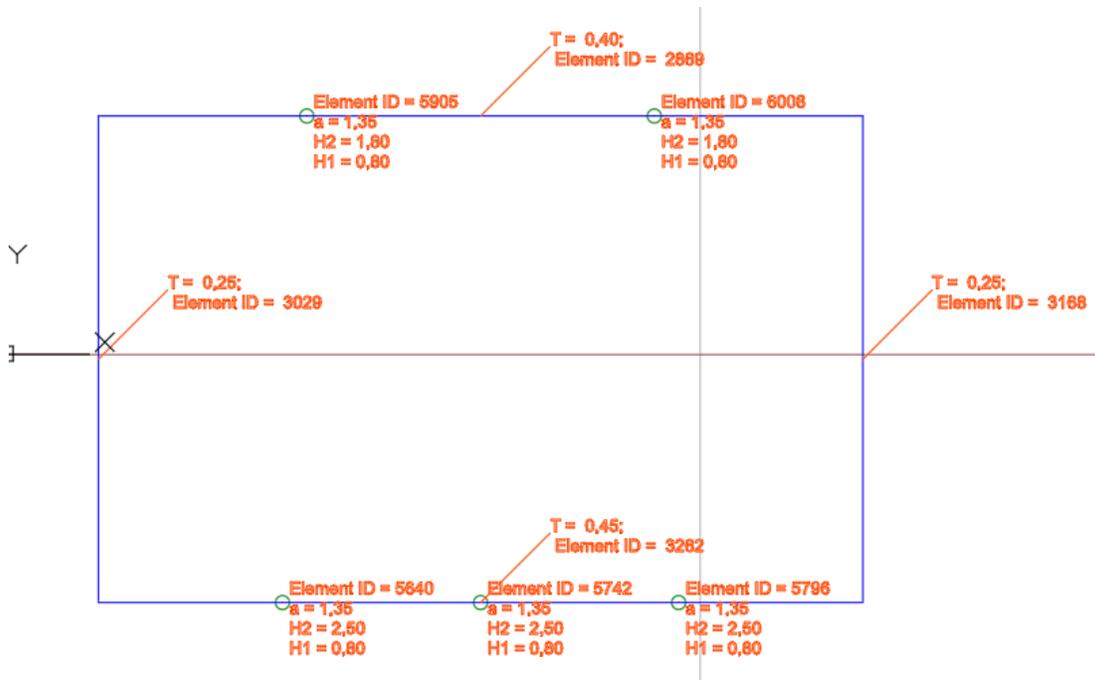


Figura 37 - Planta em formato .dwg

4.1.3 Utilização do *Dynamo Player*

É também possível, e mais simples, iniciar a processo diretamente na interface o *Revit*, sendo que para isso basta utilizar o *Dynamo Player*, ilustrado na Figura 38, carregando as funções *.dyn* (formato de ficheiro do *Dynamo*) no *player* antes de estarem disponíveis para utilização. À semelhança do que acontece quando é executada a função diretamente o *Dynamo* é necessário ter um ficheiro *CAD* em *background* para que seja criada a planta.

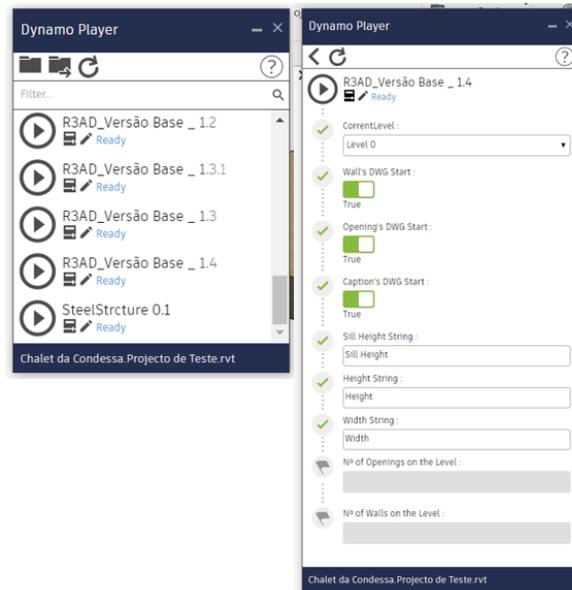


Figura 38 -Janelas do *Dynamo Player*. À esquerda com a lista das funções disponíveis. À direita os *inputs* e *outputs* do R3AD.

4.1.4 Conversão do ficheiro em *.dxf* e importação para o *3Muri*

O *3Muri* recebe os ficheiros de desenho no formato *.dxf*, por esse motivo a planta criada automaticamente dever ser guardada nesse formato (sugere-se a utilização do *.dxf 2000* segundo a S.T.A. DATA (2021)). Para a importação da planta para o *3Muri* basta então abrir um novo projeto e importar o ficheiro *.dxf* criado, utilizando a opção ilustrada na Figura 39. Chama-se a atenção para a escala da planta criada, que é 1:1 para a escala utilizada no modelo *Revit* e que, por norma, é feito à escala 1:1. As coordenadas utilizadas pelo programa são referentes ao *survey point* do modelo *Revit*. Por este motivo antes de importar o ficheiro *.dxf* é preciso alterar a escala do *3Muri*, que pode ser feito em “*Units and Formats*” no menu “*Settings*”.

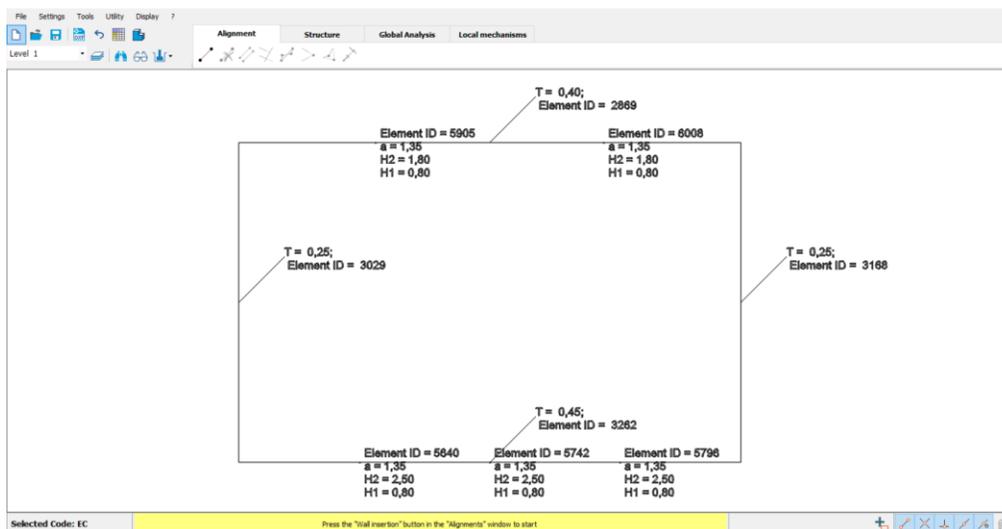


Figura 39 - *Workplace* do *3Muri* com a planta criada já importada

A partir desta planta é então possível fazer a modelação em *3Muri* tendo por base a informação disponibilizada na forma de legendas. Este processo terá que ser repetido em todos os pisos visto que no *3Muri* os pisos são modelados um de cada vez. Caso exista regularidade em altura da estrutura em análise o piso pode facilmente ser replicado no *3Muri* com as ferramentas já disponibilizadas.

4.2 Aplicação ao *Chalet* da Condessa d'Edla

O *Chalet* da Condessa d'Edla é um edifício em alvenaria de pedra, inserido no espaço de interesse cultural do parque de Sintra e que foi construído como refúgio para o rei consorte D. Fernando II (viúvo da rainha D. Maria II) e para a sua segunda esposa Elise Hensler (Condessa d'Edla) no século XIX. É inspirado nos *chalets* suíços da época, mas ao contrário destes que eram construídos em madeira, a estrutura é em alvenaria tornando-o um exemplo invulgar. A sua construção começou no ano 1869 e terminou em 1875, sendo propriedade do casal até 1889, ano em que através de um processo judicial o estado português o recuperou.

Em 1999 um incêndio danificou gravemente o edifício causando danos graves à estrutura e deixando pouco mais que as paredes de alvenaria exteriores. Em 2007, após anos de abandono, o edifício foi finalmente restaurado com recurso a materiais e técnicas da época pela Parques de Sintra – Monte da Lua, S.A. (PSML) com o auxílio de fundos comunitários. Aquando desse restauro a PSML decidiu, para facilitar futuros trabalhos de conservação, criar um modelo BIM detalhado do edifício (Machete et al., 2021; Neves da Silva, 2020).

Posteriormente, no sentido de desenvolver um modelo mais adequado para a gestão do *Chalet*, sem detalhes excessivos, recorreu-se a um processo de nuvem de pontos obtida por *laser scanning* (Machete et al., 2021; Neves da Silva, 2020), para a caracterização geométrica do edifício. Esta tecnologia consiste no levantamento de milhões de pontos com coordenadas (x,y,z) do edifício com um elevado grau de

precisão e, a partir dessa nuvem de pontos, recriar o edifício da forma mais realista possível (Barbosa, 2018).

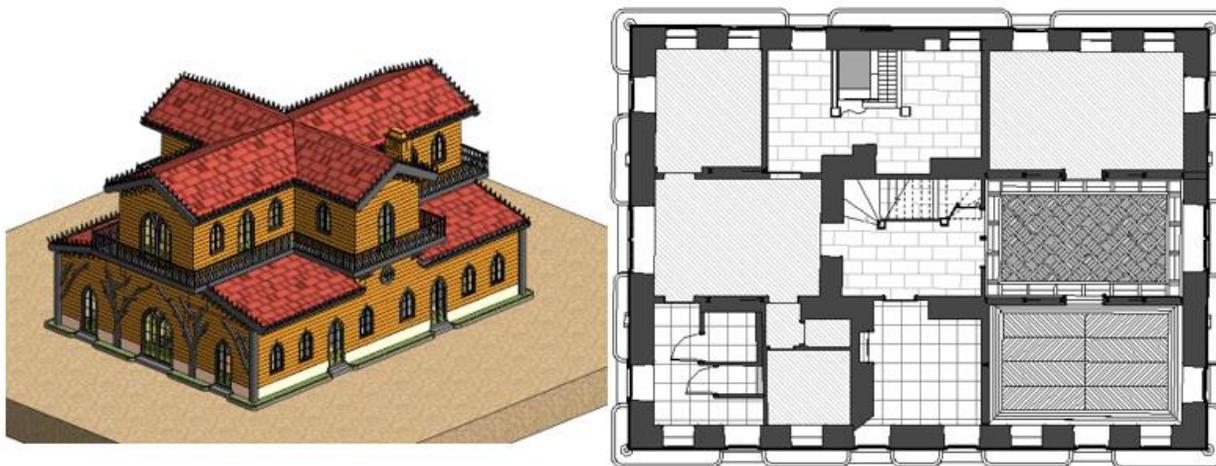


Figura 40 - Modelo do *Chalet* da Condessa d'Edla em *Revit*: elementos exteriores (esq.); planta do 1.º piso (dir.)

Esta nuvem de pontos permitiu o desenvolvimento do modelo BIM no *software Revit*, contendo apenas as informações relevantes para a gestão do património. Foi esse o modelo utilizado no presente trabalho. É importante referir que o modelo utilizado contém informação sobre a geometria do edifício (Figura 40), e sobre a localização dos diferentes elementos estruturais, não incluindo informação sobre as propriedades mecânicas dos materiais que constituem os elementos estruturais, nem sobre a sua capacidade de deformação.

A utilização da metodologia desenvolvida para a definição do modelo *3Muri* no caso do *Chalet* da Condessa d'Edla é semelhante à ilustrada para o caso apresentado em 4.1, embora a ferramenta e o modelo careçam de algumas alterações para otimizar o seu funcionamento para efeitos de gestão. Convém lembrar que o modelo *BIM* do *Chalet* (Machete et al., 2021; Neves da Silva, 2020) utilizado neste estudo não foi desenvolvido de acordo com as recomendações dadas anteriormente (em 3.3.).

É também importante ter em consideração o tempo necessário para executar a operação. No caso de estudo mais simples o tempo necessário para a aplicação da metodologia é de aproximadamente 10 minutos por piso. No caso do modelo do *Chalet* o tempo necessário por piso é de aproximadamente 30 minutos. Esta diferença deve-se à maior complexidade do modelo do *Chalet* (o modelo base apresentado anteriormente cria aproximadamente 250 elementos geométricos, enquanto o modelo do *Chalet* cria aproximadamente 20 000).

4.2.1 Descrição da Estrutura

Durante o processo de restauro foram utilizadas técnicas e materiais do século XIX para, tanto quanto possível, manter o edifício fiel ao original. Por esta razão alguns dos elementos foram mantidos (como por exemplo as paredes resistentes em alvenaria) embora tenham sido reforçados com técnicas modernas (a

injeção de cal em algumas paredes de alvenaria, por exemplo), a introdução de novos elementos estruturais (por exemplo, a introdução de pórticos metálicos por baixo dos arcos de alvenaria) e tenham sido consideradas outras alterações com vista a trazer o edifício para o século XXI e para as novas funções como bem de interesse público (instalação de canalização, rede elétrica, aquecimento, deteção de incêndios, etc.) (Machete et al., 2021). Neste trabalho esses reforços estruturais não serão tidos em conta, i.e. a avaliação sísmica terá em consideração o *Chalet* antes desta intervenção e os resultados da avaliação (curva de capacidade) serão comparados com os resultados da avaliação após o reforço da estrutura (Neves da Silva, 2020).

O edifício é composto por dois pisos: o piso térreo tem formato retangular com paredes resistentes na periferia e na caixa de escadas; o primeiro piso tem um formato cruciforme em que as paredes resistentes são apoiadas em arcos atirantados de alvenaria que por sua vez são apoiados nas paredes resistentes da periferia, tal como a cobertura (Figura 41 e Figura 42).

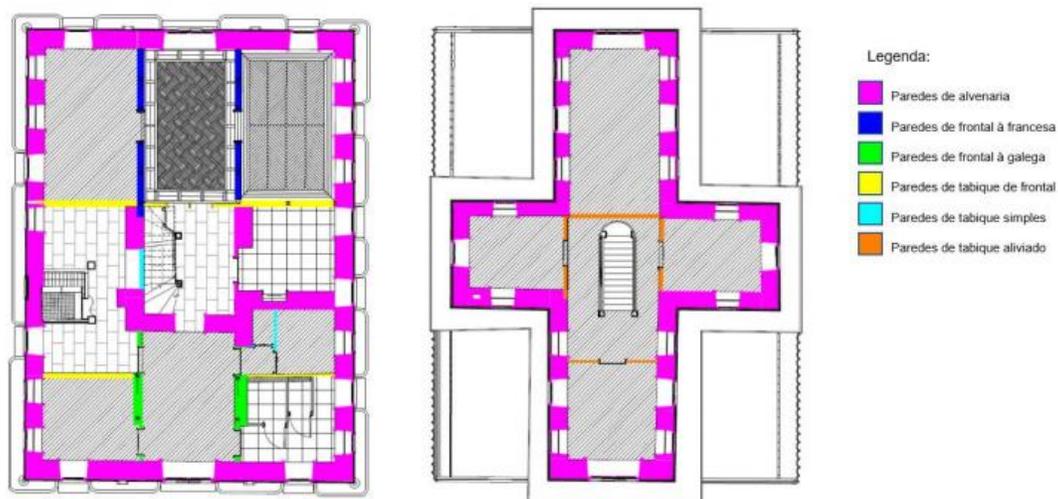


Figura 41 - Plantas dos pisos térreo (esq.) e primeiro piso (dir.) com a identificação do tipo de parede, imagem adaptada de Neves da Silva (2020)

As paredes resistentes são de alvenaria de pedra ordinária e cal, com espessura variável entre pisos. As paredes resistentes do segundo piso e a cobertura eram suportadas por arcos assentes nas paredes de contorno do primeiro piso ou em cachorros de pedra nessas mesmas paredes mestras, como se pode ver na Figura 42.

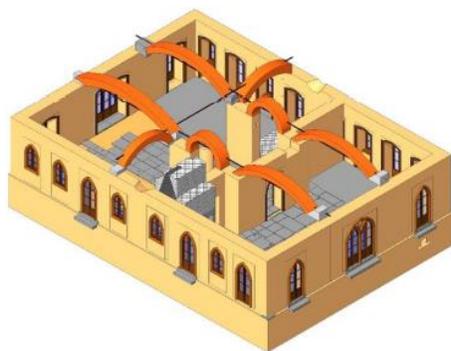


Figura 42 - Arcos em alvenaria do piso térreo (crédito: Parques de Sintra – Monte da Lua, S.A.)

Vários elementos como as paredes interiores, os pisos, a cobertura e outros elementos não estruturais foram completamente destruídos ou severamente danificados durante o incêndio, pelo que foi necessária uma intervenção mais cuidadosa, substituindo alguns e reforçando outros. As paredes interiores são em tabique (para as divisórias mais simples) ou em frontal (para as mais robustas), sendo que após o incêndio os prumos das paredes de frontal (anteriormente em madeira) foram substituídos por perfis de aço de forma a conferir uma maior resistência (Figura 43) uma vez que, devido ao incêndio, o tirante existente plastificou e os arcos em alvenaria sofreram deformações consideráveis e por isso considerou-se necessário reforçá-los.



Figura 43 - Reforço da estrutura sob os arcos em alvenaria (Imagens da PSML e CivilSer)

Como tal na modelação *3Muri* da estrutura original será necessário modelar os arcos existentes e, conseqüentemente, a resistência conferida pela estrutura metálica de reforço abaixo dos arcos não será considerada. Assim os únicos elementos de parede a modelar serão as paredes de alvenaria de pedra e os arcos, uma vez que a resistência conferida pelas paredes de tabique foi desprezada devido à fraca resistência estrutural que apresenta.

Para modelar esses elementos consideraram-se os valores apresentados na Tabela 2 retirados da norma italiana (MIT, 2019). Devido aos à falta de testes *in situ* ou laboratoriais que comprovem as propriedades

dos materiais das paredes resistentes de alvenaria, foram considerados os valores mínimos fornecidos pela norma. Como o modelo não linear das paredes no *3Muri* corresponde a um modelo elasto-plástico, para ter em conta o comportamento não linear da alvenaria até atingir a capacidade resistente os valores do módulo de elasticidade e módulo de distorção foram reduzidos em $\frac{1}{3}$ (Simões, 2018). De forma a ter em conta o estado mais danificado das paredes no edifício existente, considerou-se apenas 90% do módulo de elasticidade utilizado no modelo reforçado.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas consideradas para os materiais das paredes resistentes, adaptado de Neves da Silva (2020)

Material	Tensão de Compressão	Resistência ao Corte	Módulo de Elasticidade	Módulo de Distorção	Peso Volúmico
	f_k (MPa)	τ_0 (MPa)	E (GPa)	G (GPa)	Υ (kN/m ³)
Parede Resistente em Alvenaria (Reforçada)	1,00	0,018	0,69	0,23	19,00
Parede Resistente de Alvenaria de Pedra (não Reforçada)	1,00	0,018	0,62	0,21	19,00
Arcos de Alvenaria de Pedra Aparelhada	7,00	-	2,8	0,86	22

A modelação dos elementos em arco não é possível no *3Muri*. Esses elementos foram simulados simplifadamente utilizando a definição do programa para vigas de betão com propriedades semelhantes à alvenaria de pedra ordinária apresentadas na Tabela 2, retiradas de NTC (2008).

O coeficiente de confiança das propriedades médias consideradas foi de 1,35, segundo o valor proposto no EC8-3 para o nível de conhecimento limitado e as recomendações de Candeias et al. (2020). O coeficiente de segurança para materiais considerado foi de 2,0 (valor que pode varia entre 2,0 e 2,5 segundo o Eurocódigo 6 – parte 1 (European Committee for Standardization, 2005b)). Em relação aos valores de *drift* últimos a definir no *3Muri*, os valores admitidos são os fornecidos pelo EC8-3 e adaptados de Candeias et al. (2020), encontrando-se resumidos na Tabela 3. Na avaliação sísmica e para o comportamento condicionado pelo corte por fendilhação diagonal foi utilizada a lei de Turnšek-Čačovič. Com esta lei a alvenaria é assumida como um material isotrópico e homogéneo com a fendilhação a desenvolver-se na direção principal de tensão.

Tabela 3 – Relação entre estados limite e capacidades para a avaliação de paredes de alvenaria não armadas sujeitas a esforços no seu plano, adaptado de Candeias et al. (2020)

Parede de Alvenaria não Armada com Capacidade Controlada por:		
Estado Limite	Esforço Axial e de Flexão	Esforço Transverso
	$V_f(N,M) < V_f(V)$	$V_f(V) < V_f(N,M)$
Colapso Iminente (NC)	$V_f(N,M), \delta_{NC(N,M)} = \frac{4}{3} \delta_{SC(N,M)}$	$V_f(V), \delta_{NC(V)} = \frac{4}{3} \delta_{SC(V)}$
Danos Severos (SD)	$V_f(N,M), \delta_{SD(N,M)} = \begin{cases} 0,008 H_0/D \\ 0,012 H_0/D \end{cases}$	$V_f(V), \delta_{SD(V)} = \begin{cases} 0,004 \\ 0,006 \end{cases}$
Limitação de Danos (DL)	$V_f(N,M) = \frac{DN}{2H_0} (1 - 1,15v_d)$	$V_f(V) = f_{vd}D't$

Em que:

- $\delta_{NC(N,M)}$ representa o *drift* último por esforço axial e por flexão para o estado limite de colapso iminente;
- $\delta_{NC(V)}$ representa o *drift* último por esforço transverso para o estado limite de colapso iminente;
- $\delta_{SD(N,M)}$ representa o *drift* último por esforço axial e por flexão para o estado limite de danos severos;
- $\delta_{SD(V)}$ representa o *drift* último por esforço transverso para o estado limite de danos severos;
- $V_f(V)$ representa a capacidade resistente de uma parede de alvenaria não armada sujeita a esforço transverso;
- $V_f(N,M)$ representa a capacidade resistente de uma parede de alvenaria não armada sujeita a esforço normal ou flexão;
- D' representa o comprimento da zona de parede à compressão na direção considerada;
- H_0 representa a altura entre a secção mais desfavorável e o ponto de inflexão;
- f_{vd} representa a resistência ao esforço transverso da parede de alvenaria;
- v_d representa o esforço normal reduzido (igual a $v_d = \frac{N}{Dt f_d}$).

O pavimento do piso térreo, em pedra, foi mantido durante as intervenções. O restante pavimento em madeira foi destruído no incêndio de 1999 pelo que teve de ser substituído, bem como a estrutura em madeira que o suportava. Na reabilitação do piso após o incêndio, a ligação dos pisos à estrutura é constituída por cantoneiras metálicas fixas às paredes por varões roscados. Esta ligação tem a vantagem de impedir um comportamento para fora do plano nas paredes durante a ocorrência de um sismo.

As propriedades mecânicas dos elementos de madeira dos pisos foram retiradas da norma italiana (UNI 11035-2, 2003) com exceção do módulo de distorção que se considerou demasiado alto e correspondente a um piso rígido (Tabela 4). Por esse motivo o valor do módulo de distorção foi retirado da norma da Nova

Zelândia (NZSEE, 2017) usando como referência Giongo et al. (2014), em que são propostos valores de referência do módulo de distorção para pavimentos de diafragma flexível.

Tabela 4 – Propriedades mecânicas da madeira do pavimento, adaptado de Neves da Silva (2020)

Material	Tensão de Compressão	Resistência ao Corte	Módulo de Elasticidade	Módulo de Distorção	Peso Volúmico
	f_k (MPa)	E_0 (GPa)	E_0 (GPa)	G (GPa)	γ (kN/m ³)
Madeira de Castanho	22,00	11,00	0,73	0,021	5,40

A cobertura, que originalmente era em madeira coberta de telha de canudo, teve que ser substituída devido aos danos sofridos no incêndio. Esta é constituída por dois telhados entrecruzados de duas águas no piso superior e quatro telhados de uma água no piso inferior.

Para além dos elementos restaurados ou substituídos foram ainda adicionados outros com a intenção de reforçar a estrutura. Nas paredes resistentes do contorno foi adicionado um lintel de betão armado, unindo as paredes resistentes e contribuindo para um comportamento em conjunto, melhorando assim o comportamento a ações horizontais e diminuindo o risco de colapso das paredes fora do plano. Dado que estes reforços foram feitos após o restauro da estrutura não serão tidos em conta na avaliação sísmica deste estudo.

Por fim, a modelação das massas e cargas deve ser adicionada à estrutura. A cobertura, embora não tenha sido modelada, foi considerada como uma carga linear ao longo das paredes onde está apoiada visto não ser tida em conta a resistência conferida pela estrutura de madeira que a suporta por ter um valor desprezável (a estrutura em madeira da cobertura confere pouca resistência). Os valores do peso próprio de todos os materiais da cobertura foram obtidos de Reis e Farinha (1993), sendo o peso próprio para a cobertura superior de 1,53 kN/m² e para a cobertura inferior de 1,48 kN/m² (Figura 44).

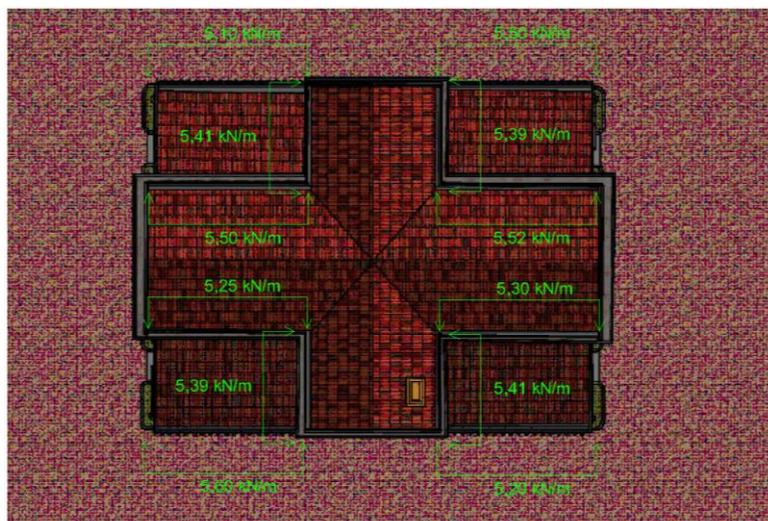


Figura 44 - Distribuição das cargas da cobertura nas paredes do edifício, adaptado de Neves da Silva (2020)

Segundo Reis e Farinha (1993), para um piso com uma disposição semelhante ao que se encontra no *Chalet* deverá considerar-se uma carga permanente de $0,50 \text{ kN/m}^2$. Por sua vez as sobrecargas, conforme definidas no (European Committee for Standardization, 2002), deverão ser de $2,00 \text{ kN/m}^2$ para pisos não acessíveis e $5,00 \text{ kN/m}^2$ para pisos acessíveis ao público. A utilização dos pisos encontra-se ilustrada na Figura 45.

Para além do peso próprio dos pisos é necessário ter em conta o peso próprio dos tetos decorativos que existem no edifício. No total existem 3 tipos de tetos decorativos: tetos fasquiados, tetos sanqueados e tetos sanqueados com esteira. Para os tetos sanqueados e fasquiados foi considerada uma carga permanente de $0,40 \text{ kN/m}^2$ enquanto para os tetos sanqueados com esteira foi considerada uma carga de $0,60 \text{ kN/m}^2$. A sua localização em planta está ilustrada na Figura 46.

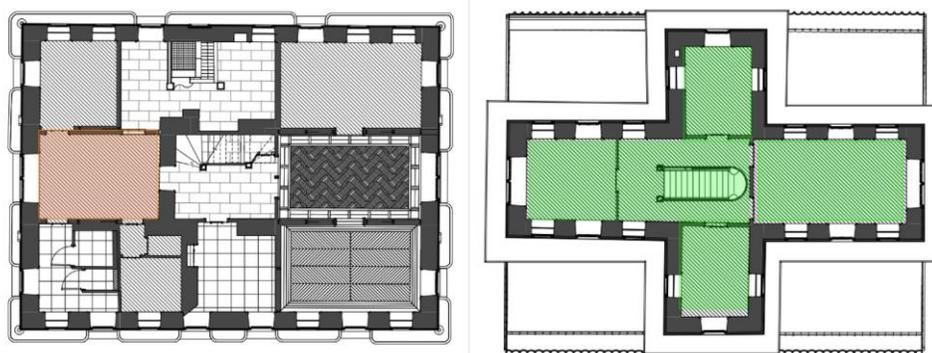


Figura 45 – Utilização dos pisos: a verde as divisões do segundo piso acessíveis ao público, a laranja a localização do piso intermédio (que não é acessível ao público) em relação ao primeiro piso.

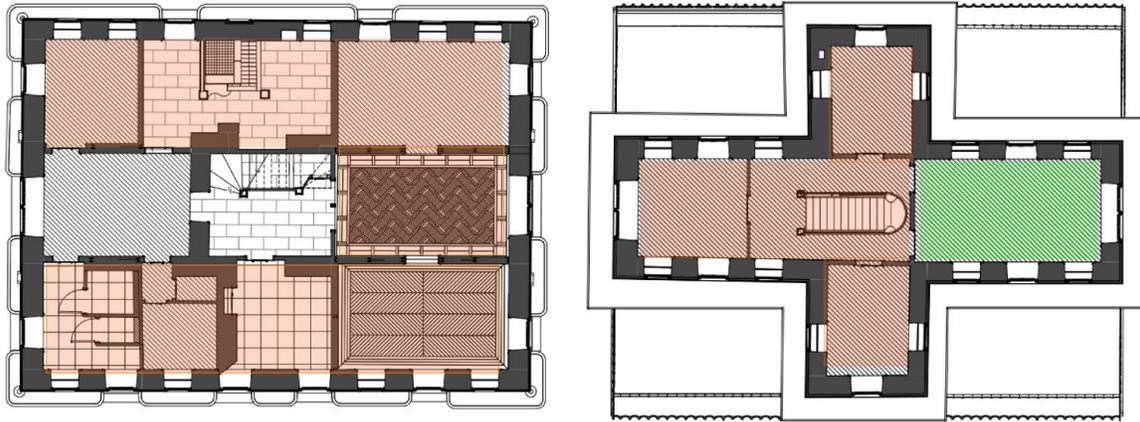


Figura 46 - Tetos decorativos por divisão: a verde o teto sanqueado com esteira e a laranja os tetos sanqueados ou fasquiados

As varandas que contornam o segundo piso do edifício foram modeladas diretamente no *3Muri* como um elemento existente, não como uma carga linear ao longo da parede (como foram modeladas as coberturas). As ações sobre as varandas foram quantificadas segundo a Memória Descritiva e Justificativa do Projeto de Recuperação (CivilSer).

Os valores considerados para as cargas descritas encontram-se resumidos na *Tabela 5*.

A combinação de ações utilizada foi a proposta pelo Eurocódigo 0 (European Committee for Standardization, 2005a) para situações de projetos de sísmica:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + A_{Ed} + \sum_{i \geq 1} (\Psi_{2,i} \times Q_{k,i}) \quad (2)$$

Em que:

- $G_{k,j}$ representa o valor de cálculo da ação sísmica;
- A_{Ed} representa o valor de cálculo de uma ação sísmica ($A_{Ed} = \gamma_1 \times A_{Ek}$);
- $Q_{k,i}$ representa o valor característico da ação variável;
- $\Psi_{2,i}$ representa o coeficiente para a determinação do valor quase-permanente da ação variável.

Tabela 5 – Resumo das cargas verticais aplicadas, adaptado de Neves da Silva (2020)

Elemento	Peso Próprio (kN/m^2)	Restantes Cargas Permanentes (kN/m^2)	Sobrecarga (kN/m^2)
Varandas	2,75	0,10	4,00
Coberturas	1,50	-	0,40
Pisos de Madeira	Salas acessíveis ao público	0,50	-
	Salas não acessíveis ao público	0,50	-
Tetos	Fasquiados / Sanqueados (sem esteira)	0,40	-
	Sanqueados com Esteira	0,60	-

4.2.2 Configuração do R3AD

Em seguida uma versão da ferramenta com algumas correções que se consideraram necessárias será aplicada ao caso de estudo do *Chalet* da Condessa d'Edla. Para este modelo BIM considerou-se necessário proceder a algumas correções no R3AD devido a algumas inconsistências na definição de determinados parâmetros dos elementos definidos. Estas inconsistências devem-se à enorme influência que as opções do autor do modelo BIM têm na definição dos parâmetros. A título de exemplo deixam-se três casos verificados no modelo do *Chalet* criado para a Parques de Sintra – Monte da Lua:

- Alguns elementos da categoria *Doors* no *Revit* foram inseridos no modelo, mas a sua localização no modelo não foi definida convenientemente. Por este motivo o programa coloca a sua localização na origem do referencial. Para corrigir este erro foi necessário alterar a localização destes elementos manualmente criando um algoritmo para selecionar esses elementos e proceder aos restantes cálculos (Figura 47).

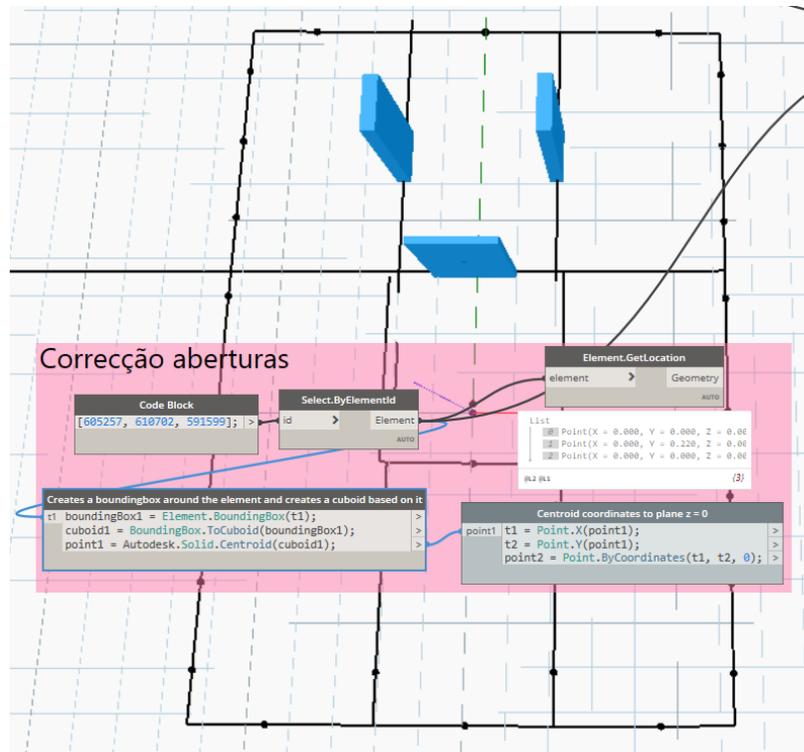


Figura 47 - Grupo para correção da localização das aberturas

- Outra incompatibilidade resulta do alinhamento (ou falta dele) nas paredes resistentes, conforme ilustra a Figura 48. No modelo *Revit* as paredes são modeladas no local exato em que estão sendo alinhadas pela face exterior. Há também que chamar a atenção para a forma como as paredes resistentes são identificadas, neste caso por espessura mínima. Alguns elementos da categoria *Walls* estão definidos sem continuidade, algo que resulta da forma como foram inseridos no modelo. Neste caso o utilizador deverá ter em atenção este pormenor ao introduzir a geometria no *3Muri* e proceder às alterações necessárias à planta final.

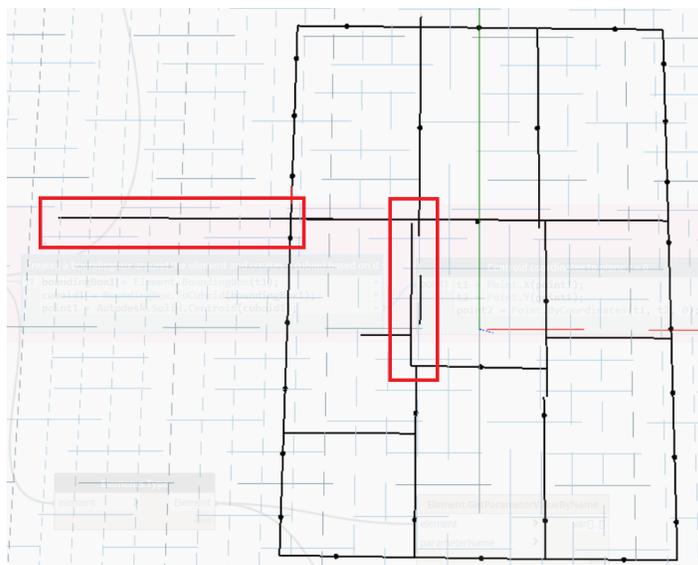


Figura 48 - Incompatibilidades encontradas na localização das paredes resistentes

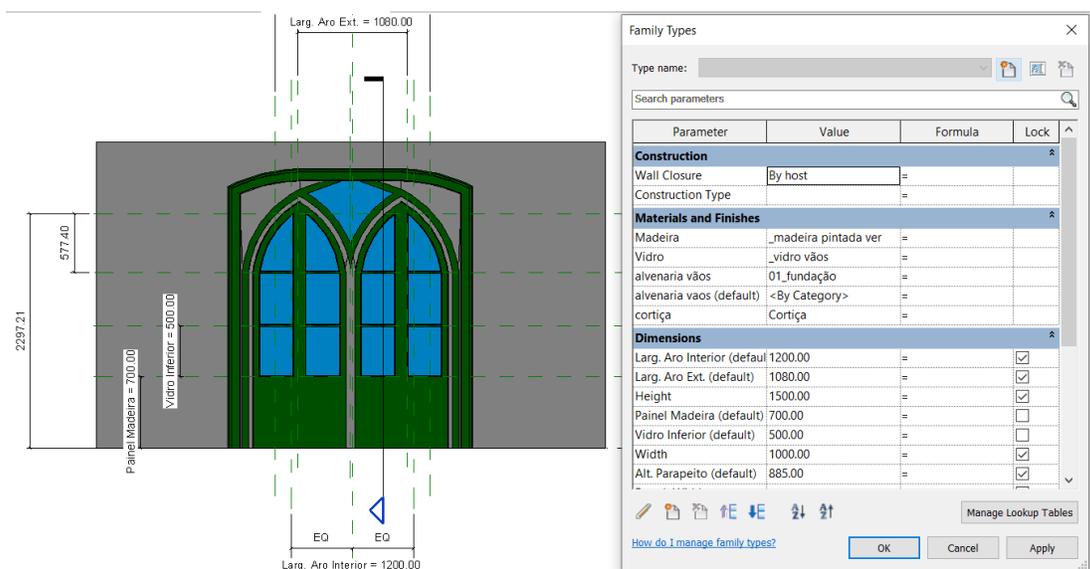


Figura 49 - Doors Family no Revit em que não estão parametrizadas as medidas da alturas e largura da abertura

- Considerou-se necessário alterar os parâmetros definidos para as aberturas definidos no modelo. Como é possível verificar na Figura 49 os parâmetros definidos não correspondem ao valor geométrico (a altura, definida como 1500 mm, não corresponde à altura total do elemento) pelo que foi necessário alterar as Families no Revit para corrigir este pormenor. Parametrizar o valor da altura diretamente na Family tem a vantagem de replicar automaticamente esse parâmetro para todos os elementos.

Estas incompatibilidades podem ser atribuídas à influência que o utilizador do BIM tem na criação do modelo e à forma como define os vários elementos. Na maioria dos casos o modelo Revit é apenas utilizado

como base de dados e meio de partilha de informação, não necessitando para isso da exatidão exigida a um modelo de análise estrutural, pelo que muitas vezes estes pormenores são ignorados. Ainda assim, e conforme se demonstra, com alguns cuidados na definição e correção destes elementos é possível criar um modelo de análise estrutural a partir do modelo BIM.

4.2.3 Definição da Ação Sísmica

Segundo as indicações do EC8 -1 o movimento sísmico numa dada superfície do terreno é modelado em função de um espectro de resposta elástico da aceleração da superfície. Esse espectro é calculado pelas expressões apresentadas abaixo para sismos próximos (sismos tipo 1, que apresentam frequências mais baixas) e sismos afastados (sismos tipo 2, que têm magnitudes mais baixas) (European Committee for Standardization, 2010):

$$0 \leq T \leq T_B : S_e(T) = a_g \times S \times \left[1 + \frac{T}{T_B} \times (\eta \times 2,5 - 1)\right] \quad (3)$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_e(T) = a_g \times S \times \eta \times 2,5 \quad (4)$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_e(T) = a_g \times S \times \eta \times 2,5 \times \frac{T_C}{T} \quad (5)$$

$$T_D \leq T \leq 4S : S_e(T) = a_g \times S \times \eta \times 2,5 \times \frac{T_C T_D}{T^2} \quad (6)$$

Em que:

$S_e(T)$ - Representa o espectro de resposta elástica;

T – Representa o período de vibração de um sistema com um grau de liberdade;

a_g - Representa o valor de cálculo da aceleração à superfície para um terreno do tipo A ($a_g = \gamma_I \times a_{gR}$);

T_B – Representa o limite inferior do período no patamar de aceleração espectral constante;

T_C – Representa o limite superior do período no patamar de aceleração espectral constante;

T_D – Representa o valor que define no espectro o início do ramo de deslocamento constante;

S – Representa o coeficiente do solo;

η – Representa o coeficiente de correção do amortecimento, com o valor de referência $\eta = 1$ para 5% de amortecimento viscoso;

Para a região de Sintra, onde está construído o *Chalet*, a aceleração de máxima de referência é de $1,5 \text{ m/s}^2$ e $1,7 \text{ m/s}^2$ para sismos do tipo 1 e sismos do tipo 2, respetivamente (European Committee for Standardization, 2010). Tratando-se de um “edifício cuja resistência sísmica é importante tendo em vista as consequências associadas ao colapso” este deverá ser classificado como classe III, com coeficiente de

importância (γ_I), dado pelo EC8 -1, de 1,45 e 1,25 para sismos do tipo I e sismos do tipo II, respetivamente. Analisando o mapa litológico e geológico de Sintra (Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas, 2014) é possível concluir que o edifício se encontra implantado num terreno do tipo A, segundo o quadro 3.1 do EC8 -1, sendo que os valores de S, T_B, T_C e T_D são definidos nos quadros 3.2 e 3.3 do mesmo documento para sismos tipo 1 e 2. Esses valores são resumidos na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores recomendados dos parâmetros descrevendo os espectros de resposta elástica para sismos do tipo 1 e 2 em terrenos do tipo A (European Committee for Standardization, 2010)

Tipo de Sismo	Sismo tipo1	Sismo Tipo 2
$a_{gR} (m/s^2)$	1,50	1,70
S	1,00	1,00
$T_B (s)$	0,10	0,10
$T_C (s)$	0,60	0,25
$T_D (s)$	2,00	2,00
γ_I	1,45	1,25

Para a classe de importância considerada o anexo nacional do EC8-3 estabelece os estados limite a serem verificados como: colapso iminente (NC), danos severos (SD) e limitação de danos (DL), tendo os valores de aceleração máxima apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Valores da aceleração máxima $a_g (m/s^2)$, adaptado de Neves da Silva (2020)

Estados Limite	$a_g (m/s^2)$	
	Sismo Tipo 1	Sismo Tipo 2
Colapso Iminente (NC)	3,52	2,83
Danos Severos (SD)	1,63	1,79
Limitação de Danos (DL)	0,63	1,00

4.3 Análise Comparativa do *Chalet*

4.3.1 Análise Modal e Espectros de Resposta

De forma a determinar os modos e os períodos de vibração da estrutura procedeu-se à análise modal da mesma. A Tabela 8 apresenta os valores de participação de massa e períodos dos cinco primeiros modos de vibração calculados pelo *3Muri*.

Tabela 8 - Modos de vibração e participação de massas para o modelo não reforçado

Modelo Não Reforçado			
Modo	Período (s)	Massa em x (%)	Massa em y (%)
1	1,21	32,43	0,00
2	0,43	7,07	0,00
3	0,42	6,39	0,02
4	0,40	0,11	64,78
5	0,39	24,13	0,12

O primeiro modo é de translação pura segundo x, sendo que o principal modo na direção y é o quarto modo de vibração, também com translação pura. Estes resultados estão dentro do esperado e, comparando com os resultados de análises anteriores ao edifício (Tabela 9) apresentam algumas semelhanças, nomeadamente na ordem dos modos e nas ordens de grandeza das massas e períodos.

Tabela 9 - Modos de vibração e participação das massas no modelo reforçado

Modelo Reforçado			
Modo	Período (s)	Massa em x (%)	Massa em y (%)
1	1,02	31,71	0,00
2	0,78	3,14	0,00
3	0,57	3,61	0,00
4	0,40	0,04	48,81
5	0,36	0,23	15,19

Na figura 50 estão ilustradas as translações associadas aos modos de vibração na estrutura reforçada e não reforçada.

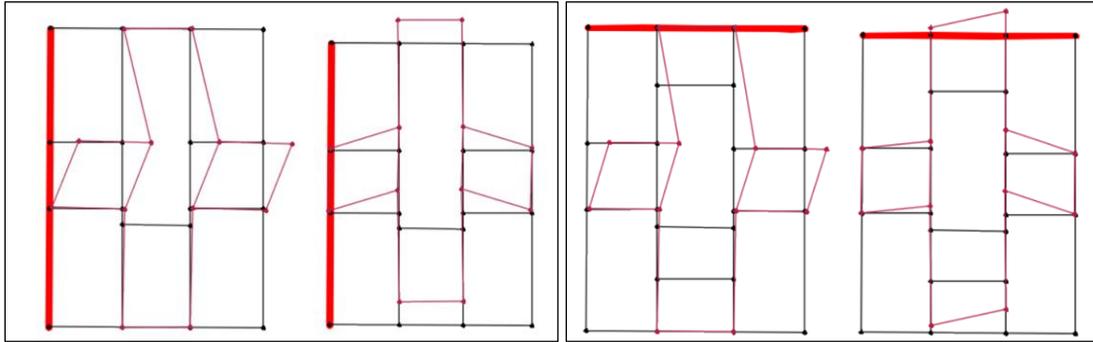


Figura 50 – Translações do primeiro e quarto modos de vibração para o modelo não reforçado (à esquerda) e para o modelo reforçado (à direita)

Tendo por base os valores apresentados nas tabelas 6 e 7 foi traçado do espectro de resposta elástico no qual se encontram os períodos principais da estrutura, ilustrado na Figura 51, correspondentes aos primeiros modos em cada direção. À semelhança do que tinha sido verificado para a estrutura reforçada os estados limite mais condicionantes para a direção y é o de colapso iminente para os sismos 1 e 2 e, para a direção x o de colapso iminente e danos severos para o sismo 1.

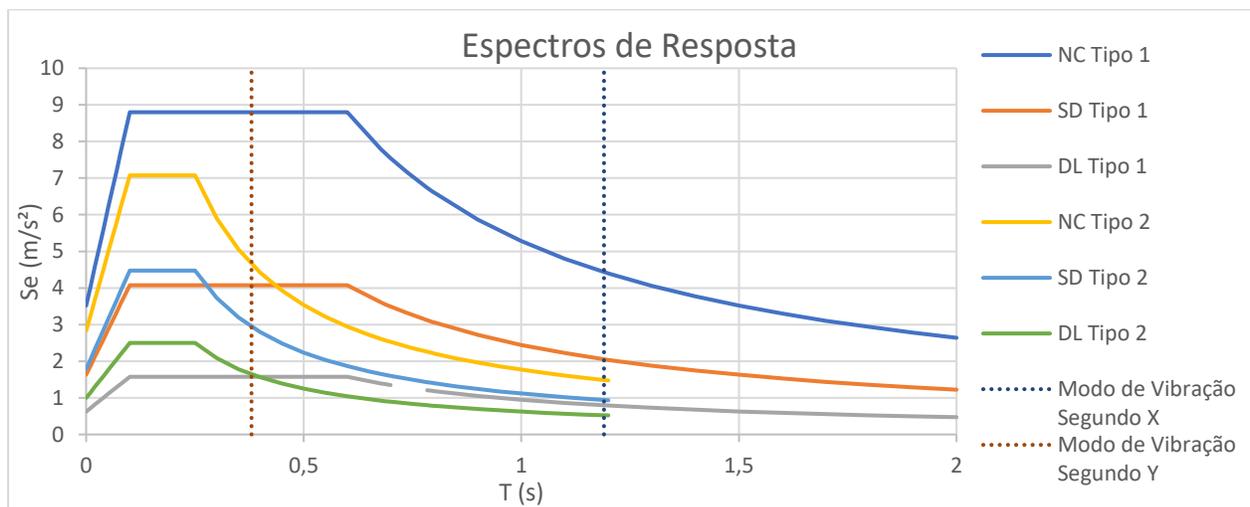


Figura 51 - Espectros de resposta e períodos principais para o modelo reforçado

4.3.2 Curvas de Capacidade Resistente

A definição do nó de controlo para o cálculo das curvas de capacidade resistente foi feita de acordo com as indicações de Lagomarsino et al. (2013) já apresentadas. Nesse sentido o nó de controlo nas direções x e y é o 50. A posição do nó de controlo no modelo encontra-se ilustrada na Figura 52.

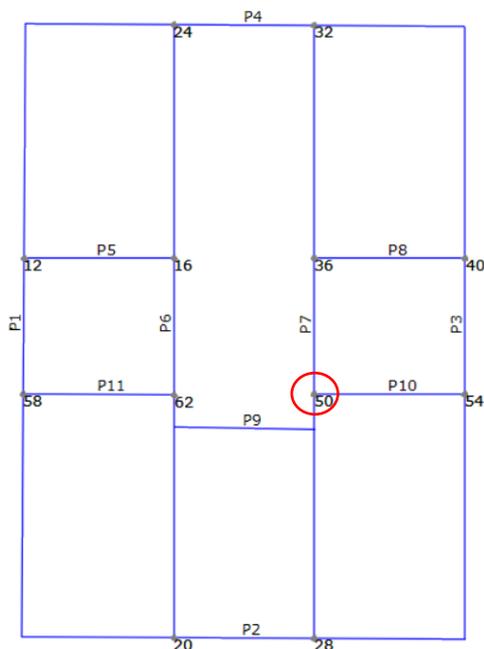


Figura 52 - Posição dos nós no modelo não reforçado

Para este nó de controlo foram obtidas as curvas de capacidade para a estrutura não reforçada (NR) ilustradas a tracejado na Figura 53. Estão também representadas as curvas de capacidade resistente para a estrutura reforçada (R).

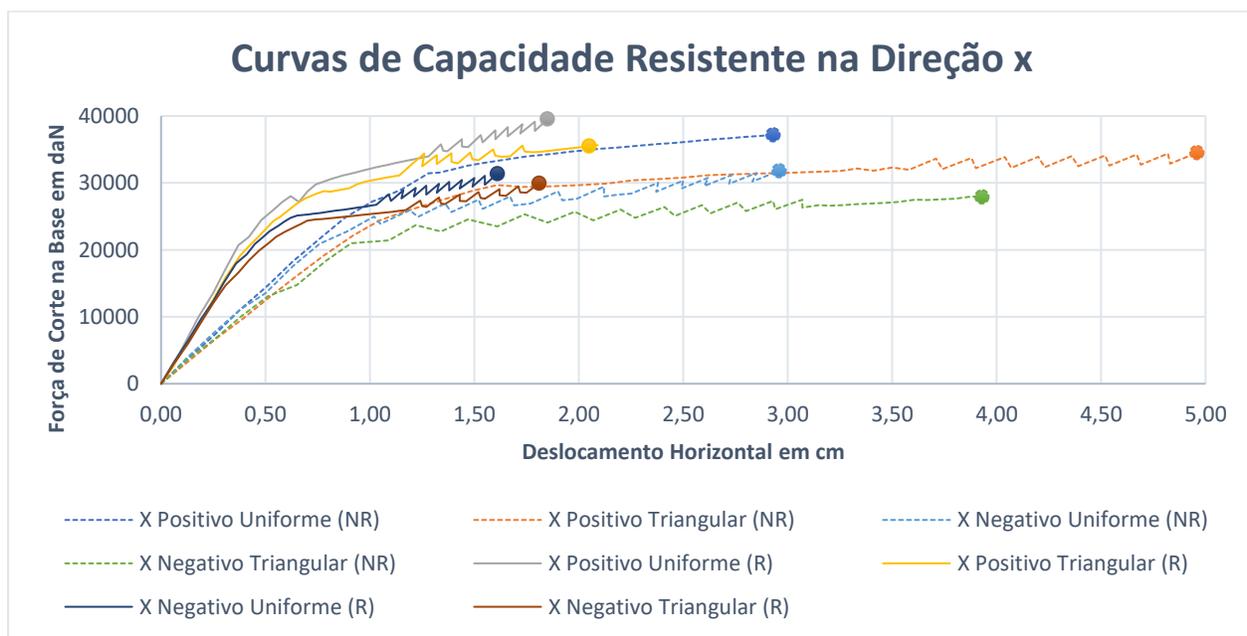


Figura 53 - Curvas de capacidade resistente na direção x

Pela análise da Figura 53 é possível concluir que para a direção x capacidade resistente máxima variou pouco, embora o reforço da estrutura a tenha tornado mais rígida e menor capacidade de deformação máxima.

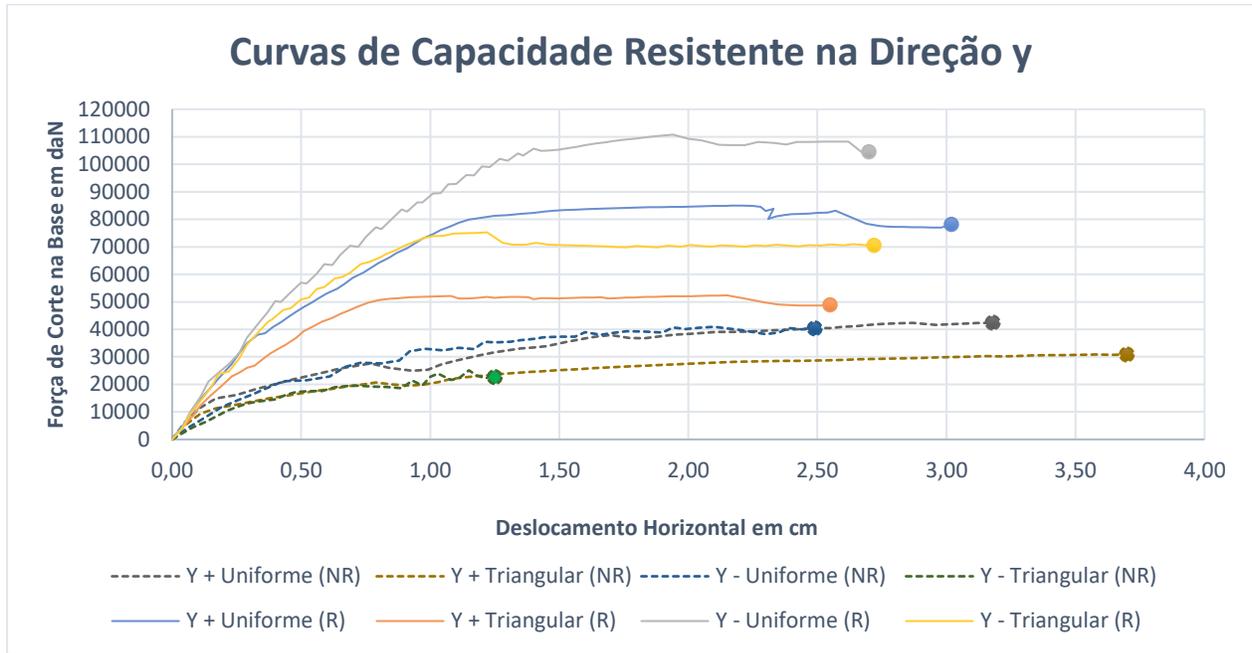


Figura 54 - Curvas de capacidade resistente na direção y

A Figura 54 representa as curvas de capacidade resistente da estrutura reforçada e não reforçada na direção y. Ao contrário do que acontece na direção x é possível observar uma menor ductilidade da estrutura para o carregamento uniforme, embora o contrário se verifique para o carregamento triangular. É ainda notória a menor resistência da estrutura não reforçada, que atinge o colapso para esforços significativamente mais baixos. A menor rigidez da estrutura verificada para a direção x também se mantém na direção y.

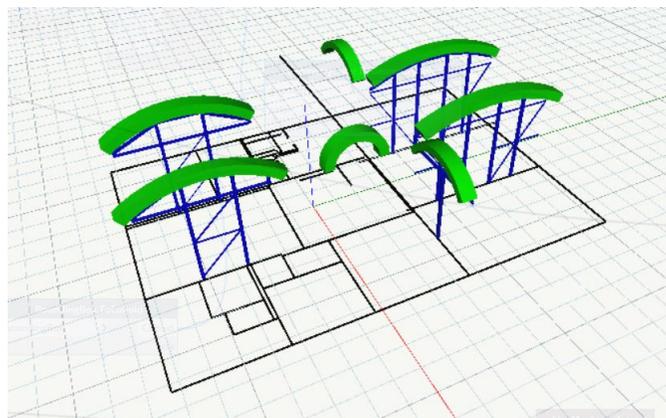


Figura 55 - Posição dos reforços metálicos em relação aos arcos de alvenaria e aos alinhamentos das paredes, retirado do modelo Revit (arcos a verde, estrutura metálica a azul)

Ainda assim é notória uma capacidade de deformação ligeiramente melhor para a estrutura não reforçada em ambas as direções e sentidos. Este facto pode ser explicado pela modelação dos arcos como elementos resistentes, que foram desprezados no modelo reforçado devido aos danos sofridos no incêndio de 1999 por se considerar que a sua resistência estava comprometida devido aos danos sofridos.

4.3.3 Curva Bilinear e Verificação da Segurança

Pela análise das Figuras 53 e 54 é possível concluir que os carregamentos mais condicionantes em cada direção para a estrutura não reforçada são o carregamento uniforme na direção x e o carregamento triangular na direção y, isto porque apresentam menor capacidade de deformação máxima para valores de capacidade resistente semelhantes. Sendo assim, para estes carregamentos, deverá ser verificada a segurança comparando o deslocamento máximo com o deslocamento objetivo obtido pelo método N2 proposto no EC8-1. Para isso foram traçadas as curvas de capacidade bilineares para um sistema de um grau de liberdade equivalente para a estrutura não reforçada e reforçada (Figuras 56 e 57, respetivamente).

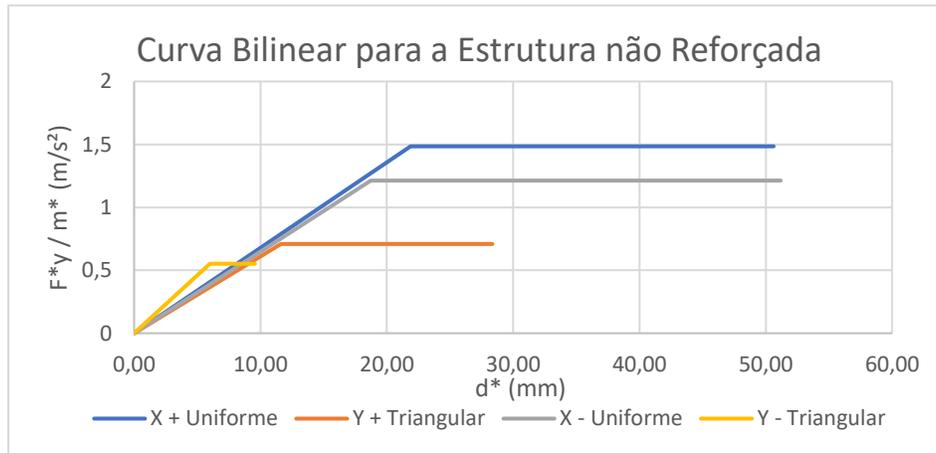


Figura 56 - Curvas de capacidade bilineares para um sistema de um grau de liberdade da estrutura não reforçada

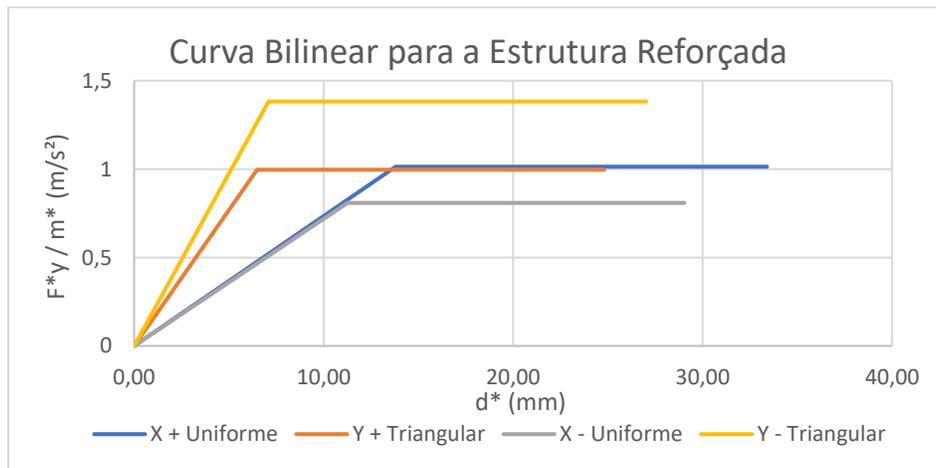


Figura 57 - Curvas de capacidade bilineares para um sistema de um grau de liberdade da estrutura reforçada

Em que:

d^* é o deslocamento do sistema de um grau de liberdade;

F^*_y é a força de corte do Sistema de um grau de Liberdade;

m^* é a massa do sistema de um grau de liberdade.

A partir da curva bilinear é possível calcular o valor do deslocamento objetivo para o sistema de múltiplos graus de liberdade, conforme proposto pelo EC8 – 1. Segundo as indicações o caso de estudo do *Chalet* da Condessa d'Edla enquadra-se na categoria de estruturas com períodos médios e longos ($T^* > T_C$). Assim o deslocamento objetivo é calculado pela equação (7).

$$d_t = \Gamma \times d_t^* = \Gamma \times d_{et}^* = \Gamma \times \left[S_e(T^*) \times \left[\frac{T^*}{2\pi} \right]^2 \right] \quad (7)$$

Em que:

d_t é o deslocamento alvo do sistema de múltiplos graus de liberdade;

Γ é o coeficiente de transformação;

d_t^* é o deslocamento alvo do sistema de um grau de liberdade;

d_{et}^* é o deslocamento objetivo do sistema equivalente, caso este tivesse um comportamento elástico;

$S_e(T^*)$ é a aceleração elástica espectral para o período do sistema idealizado com 1 grau de liberdade (T^*)

Nas tabelas 10 e 11 são apresentadas as propriedades das curvas bilineares obtidas a partir do *3Muri* para os modelos não reforçado e reforçado, respetivamente.

Tabela 10 - Propriedades da curva bilinear para o modelo não reforçado

Modelo Não Reforçado				
Sentido e Carregamento	X Positivo Uniforme	X Negativo Uniforme	Y Positivo Triangular	Y Negativo Triangular
T^* (s)	0,76	0,782	0,81	0,66
F_y^*/m^* (m/s ²)	1,49	1,213	0,71	0,55
d_y^* (mm)	21,87	18,74	11,62	6,00
d_t^* (mm)	50,62	51,18	28,36	9,57
Γ	0,56		1,30	
μ^*	2,31	2,73	2,44	1,60

Tabela 11 - Propriedades da curva bilinear para o modelo reforçado

Modelo Reforçado				
Sentido e Carregamento	X Positivo Uniforme	X Negativo Uniforme	Y Positivo Triangular	Y Negativo Triangular
T^* (s)	0,73	0,74	0,51	0,45
F_y^*/m^* (m/s ²)	1,01	0,81	0,997	1,38
d_y^* (mm)	13,80	11,26	6,49	7,10
d_t^* (mm)	33,40	29,04	24,81	27,03
Γ	0,55		1,03	
μ^*	2,42	2,58	3,82	3,81

Em que:

T^* é o período do sistema equivalente;

d_y^* é o deslocamento de cedência;

μ^* é a ductilidade.

Analisando os valores apresentados nas tabelas 10 e 11 é possível identificar a influência do reforço estrutural, ao comparar a ductilidade da estrutura na direção y para o carregamento triangular, como mencionado anteriormente.

A partir do *3Muri* é possível obter os valores do deslocamento objetivo do sistema de múltiplos graus de liberdade (d_t) para o estado limite de colapso iminente (NC) e para o estado limite de danos severos (SD). Esses deslocamentos devem ser comparados com o deslocamento máximo (d_u) da estrutura obtido pela curva de capacidade, verificando a segurança quando o deslocamento máximo é inferior ao deslocamento objetivo. Nas tabelas 12 e 13 são apresentados os deslocamentos máximo e objetivo para a estrutura reforçada e não reforçada, para diferentes estados limites.

Tabela 12 - Deslocamentos último e objetivo para a estrutura não reforçada com múltiplos graus de liberdade

		Estrutura não Reforçada			
		x Positivo Uniforme	x Negativo Uniforme	y Positivo Triangular	y Negativo Triangular
du (mm)	NC	29,30	29,62	37,03	12,49
	SD	21,97	22,22	27,77	9,37
dt (mm)	NC Sismo 1	53,18	54,49	126,79	103,43
	NC Sismo 2	17,81	19,38	42,47	34,65
	SD Sismo 1	16,42	16,82	39,14	31,93
	SD Sismo 2	18,03	19,62	42,98	35,07
du/dt	NC Sismo 1	0,55	0,54	0,29	0,12
	SD Sismo 1	1,34	1,32	0,71	0,29
	NC Sismo 2	1,65	1,53	0,87	0,36
	SD Sismo 2	1,22	1,13	0,65	0,27

Tabela 13 - Deslocamentos último e objetivo para a estrutura reforçada com múltiplos graus de liberdade

		Estrutura Reforçada			
		x Positivo Uniforme	x Negativo Uniforme	y Positivo Triangular	y Negativo Triangular
du (mm)	NC	18,50	16,08	25,47	27,75
	SD	13,87	12,06	19,1	20,81
dt (mm)	NC Sismo 1	48,84	49,4	61,43	53,24
	NC Sismo 2	16,36	16,55	20,99	18,65
	SD Sismo 1	15,08	15,25	19,34	17,18
	SD Sismo 2	16,56	16,75	21,24	18,87
du/dt	NC Sismo 1	0,38	0,33	0,41	0,52
	SD Sismo 1	0,92	0,79	0,99	1,21
	NC Sismo 2	1,13	0,97	1,21	1,49
	SD Sismo 2	0,84	0,72	0,90	1,10

Nas Figuras 58 e 59 estão ilustrados os resultados da verificação da segurança para ambas as situações. A partir desses resultados é possível concluir que na direção x a estrutura não reforçada apresentava um melhor comportamento devido à influência dos arcos resistentes. Ao contrário do que acontece para a estrutura reforçada, a segurança na direção x é verificada para o sismo 2 (para ambos os estados limite) e para o estado limite de danos severos do sismo 1. Por outro lado, a ausência de reforços estruturais na direção y faz com que não seja verificada a segurança na direção y por uma margem significativa.

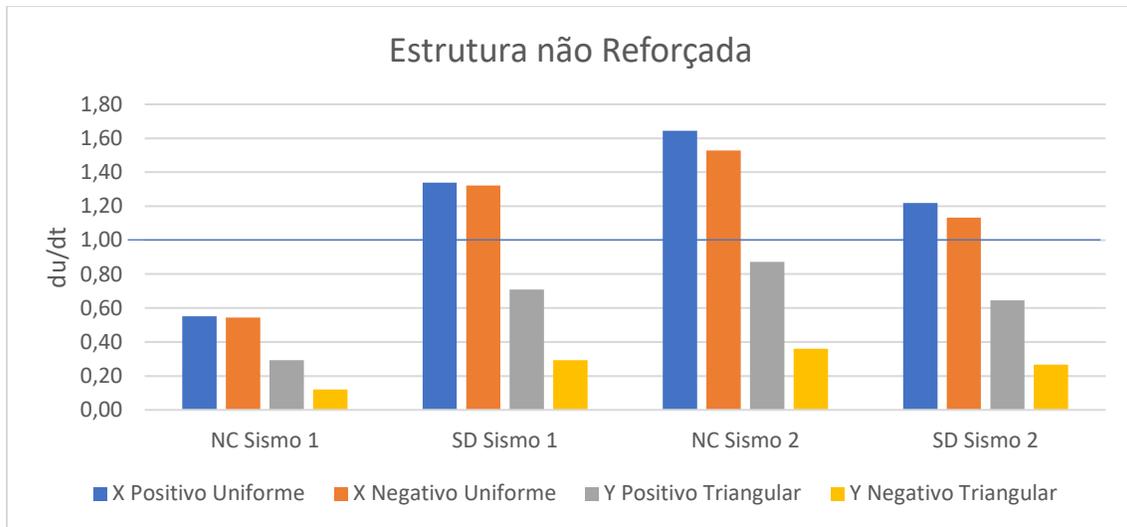


Figura 58 - Verificação da segurança para a estrutura não reforçada

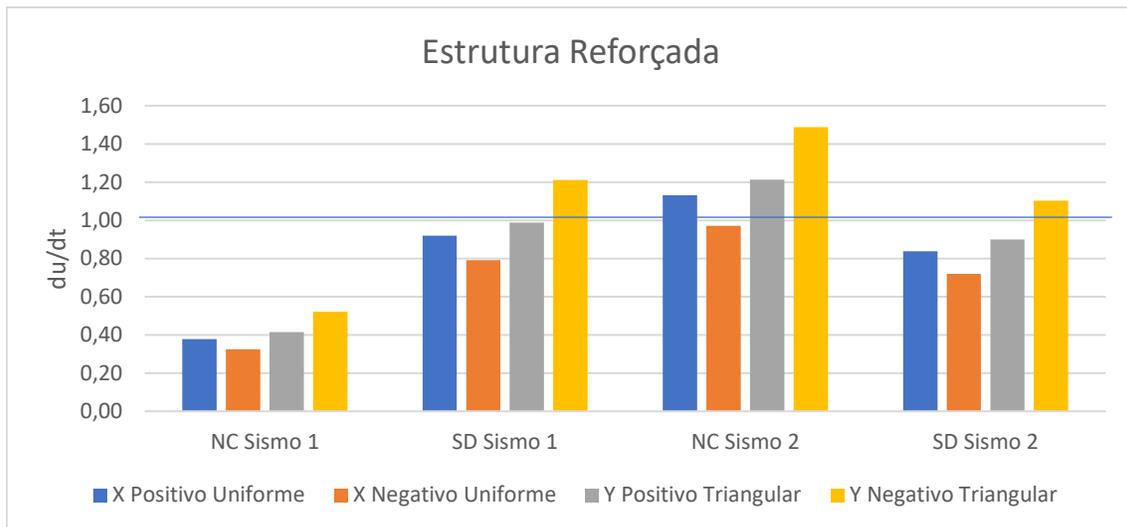


Figura 59 - Verificação da segurança para a estrutura reforçada

5 Conclusões

No âmbito do presente trabalho, que apresenta como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia que facilite a transição entre o ambiente BIM do programa *Revit* e o *3Muri*, foi feita uma análise da literatura disponibilizada pela *STAdata* e *Autodesk* numa tentativa de encontrar uma forma simplificada de fazer a transição mencionada. A única opção existente passava pela utilização do módulo *IFC – BIM* da *STAdata*, que se considerou insuficiente. Por esse motivo sentiu-se a necessidade de criar uma nova metodologia semelhante em função, mas mais abrangente em termos de informação sintetizada e ainda com a vantagem de ser de utilização livre.

Nesse sentido a estratégia adotada foi a de criar uma ferramenta que ajude a criar automaticamente uma planta em *.dxf* a partir de um modelo BIM contendo o máximo de informação relevante para a modelação em *3Muri*. Por norma essa planta é criada de forma manual, sendo por isso um desperdício de recursos humanos visto ser um processo repetitivo que pode ser automatizado. Tendo em conta a incapacidade do *3Muri* de receber informação noutra formato que não *.dxf*, a utilização do *Revit* e das ferramentas que este tem incluídas para criar automaticamente uma planta semelhante à criada pelo módulo *IFC – BIM* foi considerada uma solução viável para o problema da interoperabilidade entre estes dois programas, embora não seja a mais comum (as ferramentas de programação do *Revit* são mais utilizadas em processos de automação de tarefas).

O resultado foi o desenvolvimento do R3AD, um programa em *Dynamo* que converte o modelo *BIM* numa planta em *.dwg* com a informação relevante para a criação do modelo de análise em *3Muri*. Esta abordagem revelou-se extremamente flexível permitindo ser adaptada às necessidades do projeto, ser expandida com novos elementos e poder ser utilizada e partilhada por todos os utilizadores do *Revit*. Neste momento a metodologia desenvolvida consegue um resultado semelhante ao conseguido pelo módulo fornecido pela *STAdata* (ou mesmo um resultado mais detalhado).

No entanto, há que reconhecer que esta não é a transmissão integral de informação que inicialmente se procurava, sendo na verdade uma solução criativa para um problema existente utilizando os recursos disponíveis a qualquer utilizador destes sistemas. Na verdade, essa integração total entre os dois programas é impossível visto que o *3Muri* não tem neste momento capacidade para receber dados noutra formato sem ser o explorado, i.e., o problema de ligar ambos os softwares não é retirar e filtrar os dados do *Revit* mas sim colocá-los num formato que o *3Muri* consiga reconhecer.

Apesar disso, existe potencial em desenvolver metodologias semelhantes à apresentada na conceção de soluções automáticas para problemas no ambiente BIM, não só no caso da interoperabilidade. Nesse sentido utilização de ferramentas de programação como o *Dynamo* podem permitir o desenvolvimento de *add-ins* feitos à medida dos desafios que cada utilizador enfrenta.

5.1 Programação e Automatização no Ambiente BIM

Com o progresso tecnológico que se tem verificado em todas as áreas da engenharia nas últimas décadas é ingénuo pensar que a automatização não chegará à fase de conceção de projeto, a questão não é “se”, mas “como”. Num mundo cada vez mais digital a capacidade de programar tarefas é cada vez mais valiosa e com isso em mente têm surgido nos últimos anos várias iniciativas para colocar à disposição daqueles que não sabem programar plataformas de código de baixo nível que lhes permitam encontrar as suas próprias soluções, como é o exemplo da *Outsystems* no caso de aplicações móveis e *websites* ou o caso do *Dynamo* para a área da AEC.

Num futuro próximo o desenvolvimento de novos programas na área de engenharia civil não estará só a cargo de empresas de *software*, mas também dos engenheiros civis que saibam tirar partido destas plataformas para criar as suas próprias soluções. Por esta razão o *Dynamo* (ou outro dos sistemas semelhantes) é uma ferramenta com um potência imenso e é neste momento a melhor forma dos intervenientes da área de AEC se envolver no desenvolvimento de soluções informáticas para o seu projeto ou simplesmente automatizar os pequenos trabalhos repetitivos que tem que desempenhar.

Há que mencionar uma das maiores desvantagens em trabalhar com a programação visual, em especial o *Dynamo*: a eficiência com que os dados são tratados. Conforme referido um dos problemas encontrados na criação da ferramenta de passagem de informação do *Revit* para o *3Muri* foi a demora no processamento dos comandos. Isto deve-se ao facto de as ferramentas de programação visual não serem tão eficientes a tratar dados como as linguagens de programação tradicionais. Uma possível forma de contornar esse problema seria utilizar “nós” de *Dynamo* criado em *Python* propositadamente para cada função a desempenhar no programa, tornando-os assim mais eficientes e eliminando algumas das ambiguidades existentes.

5.2 Integração Total do BIM

À semelhança do que aconteceu com o CAD, a utilização do BIM promete revolucionar a forma como o projeto de engenharia civil se desenvolve porque, ao contrário do primeiro, o BIM permite integrar totalmente e num único meio todas as especialidades envolvidas no projeto. Mas para cumprir esta promessa existem ainda alguma barreiras que é preciso ultrapassar, nomeadamente:

- I. A necessidade de um processo de modelação e interoperabilidade que facilite a partilha de informação entre os vários intervenientes;
- II. A criação de guias de utilização do BIM que possibilitem a standardização da modelação;
- III. A complicada curva de aprendizagem dos programas que dissuadem muitos dos utilizadores que tentam aprender;
- IV. A dificuldade na criação de novas ferramentas no ambiente BIM que permitam expandir o repertório dos diferentes programas;

O primeiro ponto é abordado neste trabalho e, embora não exista ainda uma solução, a criatividade e engenho dos intervenientes da área permitirão o desenvolvimento de soluções para o problema. O terceiro ponto mencionado será solucionado em breve devido à competição entre empresas, que procuram sempre meios que lhes confira vantagem no mercado, e à gradual transição para um mundo mais digital, que se traduz numa maior literacia tecnológica dos intervenientes. O quarto ponto também é abordado no presente trabalho sob o argumento de que, com os meios e conhecimentos à disposição dos engenheiros civis do presente, é possível que sejam os próprios a desenvolver as suas soluções para os seus problemas. Contudo a falta de standardização da utilização do BIM é e continuará a ser um problema, especialmente quando se pretende desenvolver ferramentas semelhantes à apresentada que dependem da parametrização de elementos segundo regras definidas.

Apesar de o objetivo deste trabalho não ser investigar as opções de programação no *Revit* é provavelmente esse o ponto de maior interesse do estudo e não a ferramenta desenvolvida. A utilização de ferramentas e programas criados pelos intervenientes da área de construção e conceção com o objetivo específico de melhorar a indústria da AEC será, num futuro próximo, uma das grandes inovações na forma como os vários projetos da área se desenvolvem. O desafio que está associado a esta inovação será o de educar os futuros engenheiros e incentivá-los a tirar o máximo partido das possibilidades que estas novas abordagens trazem e é no papel de incentivo à inovação e à automatização que o *Dynamo* se pode destacar pela sua simplicidade de utilização e partilha.

A utilização destes meios também permitirá tirar maior partido do BIM aumentando as possibilidades no que diz respeito a design paramétrico de elementos e na interoperabilidade com outros sistemas. A capacidade do *Dynamo* se ligar a programas fora da família da *Autodesk* ainda é limitada, mas mesmo nesse sentido pode ser útil como mencionado. A capacidade de ligar o *Revit* diretamente ao *Excel*, um dos *softwares* mais amplamente utilizados na área da AEC, é também um aspeto interessante que pode ser explorado.

5.3 Avaliação Sísmica Global do *Chalet* da Condessa d'Edla - Efeitos dos Reforços Estruturais

A ferramenta desenvolvida (programa R3AD) foi aplicada a um caso de estudo, o *Chalet* da Condessa d'Edla em Sintra na sua conceção original. Os resultados obtidos da avaliação sísmica foram comparados com os um estudo anterior desenvolvido para o edifício no seu estado atual, ou seja, incluindo alguns dos elementos de reforço estrutural acrescentados (reforço com perfis metálicos) em 2009 na reconstrução após ter sofrido danos significativos após o incêndio de 1999.

Analisando o efeito do reforço da estrutura é possível concluir que, de uma forma muito conservativa, a segurança não estava verificada antes da intervenção e não está verificada após esse reforço. Para além disso pode-se concluir que o reforço estrutural aumentou significativamente a capacidade resistente da

estrutura na direção y. No entanto, a estrutura acabou por perder capacidade dúctil, especialmente na direção x com os danos significativos verificados nos arcos de alvenaria.

Convém lembrar que se assumiu um comportamento de conjunto da estrutura, pelo que não se procedeu à avaliação das paredes fora do plano. Esta verificação é essencial para a avaliação completa da estrutura uma vez que é esperado que as ligações entre paredes perpendiculares e entre as paredes e os pisos não fosse adequada. Ainda assim, no contexto do presente trabalho que se concentra essencialmente nas estratégias de modelação do *3Muri*, não se considerou relevante para a abordagem que se pretendia desenvolver.

É também importante realçar que os arcos de alvenaria de pedra que suportam o segundo piso foram simulados como vigas de betão com propriedades mecânicas tão próximas quanto possível da alvenaria de pedra. Nesse sentido esta trata-se da aproximação possível dentro daquilo que são as limitações do *3Muri* visto não ser possível modelar este tipo de elemento estrutural.

5.4 Desenvolvimentos Futuros

Em seguida apresentam-se algumas sugestões de desenvolvimentos futuros no âmbito da programação visual aplicada à área de estruturas de engenharia civil utilizando o par *Revit – Dynamo*:

- Utilização do *Dynamo* para, a partir do ficheiro *.txt* criado pelo *3Muri* que contem toda a informação geométrica e todos as propriedades mecânicas dos materiais, recriar a estrutura em BIM. Para isso seria necessário introduzir esses dados no *Dynamo* (possivelmente utilizando as ferramentas de *input* em *Excel*) e a partir dessa informação criar cada elemento estrutural utilizado no modelo *3Muri* no ambiente *Revit*. Na prática acaba por ser o trabalho “contrário” ao apresentado, automatizando a modelação de estruturas já analisadas com o *3Muri*.
- Desenvolvimento de uma ferramenta em *Dynamo* capaz de fazer os cálculos dos métodos expeditos para a avaliação sísmica de edifícios de alvenaria com pavimento rígido propostos por Bernardo et al. (2020). Os métodos expeditos propostos são baseados em métodos de análise não linear, mas utilizam essencialmente características geométricas ou facilmente parametrizáveis das paredes resistentes, pelo que seria possível criar uma ferramenta capaz de fazer esses cálculos no ambiente *Revit* de forma automática.
- Desenvolvimento de uma ferramenta em *Dynamo* capaz de verificar a regularidade estrutural de um edifício para a aplicação dos métodos propostos no EC8-1, já que o *Dynamo* é a ferramenta ideal para desenvolver ferramentas simples capazes e auxiliar em trabalhos repetitivos.
- Exploração, graças à sua fácil ligação ao *MS Excel*, das capacidades do *Dynamo* para ser utilizado como complemento para outros programas de cálculo que têm o *Excel* por base, como

é o caso do programa desenvolvido por Brandão (2018) para o cálculo de vigas mistas. Para este caso as condições de apoios, as dimensões e as propriedades das vigas podem ser extraídas do *Revit* utilizando o *Dynamo* e introduzidas no *Excel* para serem executados os cálculos de verificação da segurança.

Para além das ideias apresentadas há ainda a possibilidade de expandir as funcionalidades da ferramenta desenvolvida no presente trabalho para melhor se ajustarem às necessidades do projeto, como por exemplo:

- Fazer correções que o projetista considere relevantes, como considerar apenas uma fração da altura de uma abertura caso seja um arco ogivado;
- Alinhar as paredes para simplificar ainda mais a representação em planta;
- Definir, identificar e extrair informação relativa aos materiais das paredes, caso essa informação esteja disponível;
- Extrair toda a informação necessária para criar um novo modelo em *Revit*, mas este apenas com a informação relevante para a análise sísmica (dimensões das paredes e aberturas relevantes, localização das paredes e aberturas relevantes, materiais da construção, etc.);
- Criar elementos paramétricos em que as características de um dependam de um valor comum definido pelo utilizador e que este possa alterar automaticamente.

Estas funções não foram para já implementadas por: essa informação não estar presente nos casos de estudo; essa função ser irrelevante nos casos de estudo; ou por essa função requerer conhecimentos de programação no API para ser implementada (o API e o *Dynamo* podem trabalhar em conjunto), algo que saia fora do âmbito do trabalho. A implementação destas outras funções dependerá sempre da qualidade do modelo e da forma como as normas de utilização do *Revit* forem implementadas. Este problema da falta de normas na utilização do BIM é um problema recorrente na utilização destas ferramentas, isto devido à forte influência que o projetista tem na definição dos parâmetros de cada objeto no ambiente *Revit*.

Referências

- Achinate (n/d). Package para o Dynamo “LunchBox for Dynamo”, versão 2018.7.7
- Ajouz, R. (2021). Parametric Design of steel: Fundamentals of parametric design using Grasshopper. *Steel Construction*, 14(3), 185-195. doi: 10.1002/stco.202100011
- Andydandy (n/d). Package para o Dynamo “Clockwork for Dynamo 1X”, versão 1.34.0
- Aubin, P.F. (2016). Revit Families: A Step-by-Step Introduction. Disponível online em: www.lynda.com/paulaubin
- Autodesk Inc. (2018). Revit IFC Manual Detailed instructions for handling IFC files. Disponível online em: www.buildingsmart.org/compliance/certified- (acesso em 9 de agosto de 2021)
- Autodesk Knowledge Network (n/d). Overview | Revit | Autodesk Knowledge Network. Disponível online em: <https://knowledge.autodesk.com/support/revit-products> (acesso em 1 de julho de 2021)
- Autodesk University (n/d). Autodesk University. Disponível online em: <https://www.autodesk.com/autodesk-university/> (acesso em 9 de agosto de 2021)
- Azhar, S., Asce, A.M. (2011). Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry. *Leadership and Management in Engineering*, 11(3), 241–252. doi: 10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127
- Barbosa, M. (2018). As-built building information modeling (BIM) workflows: from point cloud data to BIM. Dissertação de doutoramento em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura, Universidade de Lisboa
- Bernardo, V., Campos, A., Costa, A., Costa, J., Catarino, M., Candeias, P. (2020). Métodos expeditos para avaliação sísmica de edifícios de alvenaria com pavimentos rígidos. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*, III(14), 111–128
- Brandão, J. (2018). Desenvolvimento de um toolkit em Excel para a verificação de segurança de vigas mistas aço-betão contínuas
- Čačovič, F., Turnšek, V. (1970). Some experimental results on the strength of brick masonry walls”. *2nd International Brick Masonry Conference*, Stoke-onTrent, 149–156
- Candeias, P., Correia, A., Costa, A., Catarino, M., Pipa, M., Cruz, H., Carvalho, E., Costa, A. (2020) Aspectos gerais da aplicação em Portugal do Eurocódigo 8 – Parte 3 – Anexo C (Informativo) – Edifícios de alvenaria. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*, III(12), 99–120
- DynamoBIM.org (2021). *About | The Dynamo Primer* (2021). Disponível online em: <https://primer.dynamobim.org/> (acesso em 1 de julho de 2021)

DynamoTeam (n/d). Package para o Dynamo “MeshToolkit”, versão 3.0.0

Sacks, R., Eastman, C.M., Lee, G., Teicholz, P. (2008). BIM handbook: a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors. Wiley. ISBN: 978-1-119-28753-7

European Committee for Standardization (2002) EN 1991-1-1: Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-1: General actions - Densities, self-weight, imposed loads for buildings.

European Committee for Standardization (2005a) EN 1990: Eurocode - Basis of structural design.

European Committee for Standardization (2005b) EN 1996-1-1: Eurocode 6: Design of masonry structures - Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures

European Committee for Standardization (2005c) EN 1998-3: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 3: Assessment and retrofitting of buildings

European Committee for Standardization (2010) EN 1998-1: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. Disponível online em: www.ipq.pt

Extending BIM Design Value Using the Revit Api | AUGI (n/d). Disponível online em: <https://www.augi.com/articles/detail/extending-bim-design-value-using-the-revit-api> (acesso em 1 de julho de 2021)

Fajfar, P., Fischinger, M. (1988). N2 Method for Non-Linear Seismic Analysis of Regular Buildings. 9th World Conference on Earthquake Engineering, 111–116

Galasco, A., Lagomarsino, S., Penna, A. (2006). On the use of pushover analysis for existing masonry buildings. First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Genebra, 3–8. Disponível online em: <https://www.researchgate.net/publication/229010794>

3Muri (n/d). General description - 3Muri. Disponível online em: <https://www.3muri.com/en/3muri-descrizione-generale/> (acesso em 1 de julho de 2021)

Giongo, I., Wilson, A., Dizhur, Y., Derakhshan, H., Tomasi, R., Griffith, M., Quenneville, P., Ingham, J. (2014). Detailed seismic assessment and improvement procedure for vintage flexible timber diaphragms. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 47(2), 97–118. doi: 10.5459/bnzsee.47.2.97-118

Grilo, A., Jardim-Gonçalves, R. (2010). Value proposition on interoperability of BIM and collaborative working environments. Automation in Construction, 19(5), 522–530. doi: 10.1016/j.autcon.2009.11.003

Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (2014). Geologia, hidrologia e clima do Parque Natural de Sintra-Cascais, ICNF. Disponível online em: <http://www2.icnf.pt/portal/ap/p-nat/pnsc/geo> (acesso em 4 de outubro de 2021)

Instituto Nacional de Estatística (2012). Censos 2011. XV Recenseamento Geral da População : V Recenseamento Geral da Habitação. Resultados definitivos. Lisboa

Katsigarakis, K.I., Giannakis, G., Lilis, G., Rovas, D. (2019). An IFC data preparation workflow for building energy performance simulation. 2019 European Conference on Computing in Construction. University College Dublin, Irlanda, 164–171. doi: 10.35490/ec3.2019.188

Keough, I. (n/d). Package para o Dynamo “DynamoText”, versão 2.0.1

kozmos (n/d). Package para o Dynamo “LinkDWG”, versão 0.3.82

Kensek, K. (2015). Visual programming for building information modeling: energy and shading analysis case studies,” *Industry Corner*, 10(4), 28–43

Lagomarsino, S., Penna, A., Galasco, A., Cattari, S. (2008) TREMURI Program-Seismic Analysis Program for 3D Masonry Buildings TREMURI user guide

Lagomarsino, S, Penna, A., Galasco, A., Cattari, S. (2013). TREMURI program: An equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings. *Engineering Structures*, 56, 1787–1799. doi: 10.1016/j.engstruct.2013.08.002

Lourenço, P. B. (2002). Concepção e Projecto para Alvenaria. Seminário Sobre Paredes de Alvenaria.

Machete, R., Silva, J., Bento, R., Falcão, A.P., Gonçalves, A.B., Lobo de Carvalho, J., Silva, D. (2021) Information transfer between two heritage BIMs for reconstruction support and facility management: the case study of the Chalet of the Countess of Edla, Sintra, Portugal. *Journal of Cultural Heritage*, 49, 94–105. doi: 10.1016/j.culher.2021.02.010

Magenes, G., Calvi, G.M., Kingsley, G. (1995). Seismic Testing of a Full-Scale, Two-Story Masonry Building: Test Procedure and Measured Experimental Response. Relatório técnico em “Experimental and Numerical Investigation on a brick Masonry Building Prototype – Numerical Prediction of the Experiment”, Universidade de Pavia, Itália. doi: 10.13140/RG.2.1.4590.2962

Magenes, G., Penna, A. (2009). Existing masonry buildings: general code issues and methods of analysis and assessment. *Doppiavoce*, 185–198. Disponível online em: <https://www.researchgate.net/publication/228897558>

Marques, R. (2014). Masonry Box Behavior. *Encyclopedia of Earthquake Engineering*. Springer Berlin Heidelberg, 1–18. doi: 10.1007/978-3-642-36197-5_155-1

- Marques, R., Lourenço, P.B. (2014). Unreinforced and confined masonry buildings in seismic regions: Validation of macro-element models and cost analysis. *Engineering Structures*, 64, 52–67. doi: 10.1016/j.engstruct.2014.01.014
- Menzies, T. (2002). Evaluation Issues for Visual Programming Languages. *Handbook of Software Engineering and Knowledge Engineering*, 93–101. doi: 10.1142/9789812389701_0005
- Miller, N. (2014). Automation Prototyping: A Side-by-side Comparison of Dynamo and Revit API. Disponível online em: www.nodelete.org
- MIT. (2009). Circolare n. 617 del 2 febbraio 2009. Istruzioni per l'Applicazione Nuove Norme Tecniche Costruzioni di cui al Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008. (em Italiano)
- Myers, B.A. (1986). Visual programming, programming by example, and program visualization: a taxonomy. *ACM SIGCHI Bulletin*, 17(4), 59–66. doi: 10.1145/22339.22349
- Neves da Silva, J. (2020). Avaliação da Qualidade Posicional do Modelo BIM e Avaliação Sísmica Global do Chalet da Condessa d'Edla. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa
- NZSEE (2017). The Seismic Assessment of Existing Buildings. Technical Guidelines for Engineering Assessments. Part C - Detailed Seismic Assessment. Part C8 - Unreinforced Masonry Buildings. New Zealand Society for Earthquake Engineering. Wellington. Disponível online em: www.building.govt.nz
- Ostrowska-Wawryniuk, K., Nazar, K. (2018). Generative BIM Automation Strategies for Prefabricated Multi-Family Housing Design Prefabrication for Affordable Housing. *eCAADe 2018: Computing for a Better Tomorrow*, Lodz, Polónia. Disponível online em: <https://www.researchgate.net/publication/330779812>
- Pazlar, T., Turk, Ž. (2008). Interoperability in practice: geometric data exchange using the IFC standard. *Electronic Journal of Information Technology in Construction*, 13, 362-380
- Penna, A., Lagomarsino, S., Galasco, A. (2014). A nonlinear macroelement model for the seismic analysis of masonry buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 43(2), 159–179. doi: 10.1002/eqe.2335
- Pinho, S.M.F. (2013). O modelo IFC como agente de interoperabilidade: Aplicação ao domínio das estruturas. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
- Ramaji, I.J., Messner, J.I., Mostavi, E. (2020). IFC-Based BIM-to-BEM Model Transformation. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 34(3), p. 04020005. doi: 10.1061/(ASCE)cp.1943-5487.0000880
- Reis, C., Farinha, B. (1993). Tabelas Técnicas. P.O.B., Setúbal

Salamak, M., Jasinski, M., Plaszcyk, T., Zarski, M. (2019). Analytical Modelling in Dynamo. Transactions of the VŠB – Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series, 18(2). doi:10.31490/tces-2018-0014

Simões, A. (2018). Evaluation of the seismic vulnerability of the unreinforced masonry buildings constructed in the transition between the 19th and 20th centuries in Lisbon, Portugal. Dissertação de doutoramento em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa

Sobon, K.K. (n/d). Sobon, Package para o Dynamo “Archi-lab.net”, versão 2020.23.3

Soto Ogueta, C.M. (2012). User Innovation in Digital Design and Construction: Dialectical Relations between Standard BIM Tools and Specific User Requirements. Dissertação de mestrado em Estudos de Arquitetura, Massachusetts Institute of Technology

S.T.A. DATA (2021). User Manual. Torino

Thein, V. (2011). Industry Foundation Classes (IFC) BIM Interoperability Through a Vendor-Independent File Format. Bentley White Paper. Disponível online em: <http://www.bfrl.nist.gov/oaepublications/gcrs/04867.pdf>

TreMuri (n/d). Disponível online em: <http://www.tremuri.com/> (acesso em 1 de julho de 2021)

UNI 11035-2 (2003). Legno strutturale - Regole per la classificazione a vista secondo la resistenza e i valori caratteristici per tipi di legname strutturale italiani (em italiano)

Vogt, T.M. (2016). Current application of graphical programming in the design phase of a BIM project: Development opportunities and future scenarios with “Dynamo”

Anexos – Alçados e Plantas do Modelo BIM do Chalet da Condessa d'Edla, retirados de (Neves da Silva, 2020)

Anexo A1 – Fachadas Norte e Sul

Anexo A2 – Fachadas Este e Oeste Anexo

A3 – Planta do piso térreo Anexo

A4 – Planta do piso superior Anexo

A5 – Estrutura do vigeamento do piso superior Anexo

A6 – Corte A

Anexo A7 – Corte B

Anexo A8 – Corte C

Anexo A9 – Corte D

Anexo A10 – Corte E

Anexo A11 – Corte F

(Unidades em metros)

