

## **Edifício Pombalino 3D:**

Modelos didáticos

**Ana Margarida Pires Fernandes**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

**Arquitetura**

Orientadores:

Prof. Doutora Ana Paula Filipe Tomé

Prof. Doutor Carlos Alberto Ferreira de Sousa Oliveira

**Júri:**

Presidente: Prof. Doutor Miguel José Das Neves Pires Amado

Orientador: Prof. Doutora Ana Paula Filipe Tomé

Vogal: Doutor José Maria da Cunha Rego Lobo de Carvalho

**dezembro de 2020**



## **Agradecimentos**

À minha mãe e ao Patxi, por desde sempre me ensinarem que com esforço e dedicação, tudo é possível. Por me apoiarem incondicionalmente e, sempre que necessário, me colocarem “os pés na Terra”.

À minha irmã, por ser o maior exemplo de vida para mim, por me dar a mão em todos os momentos, bons e maus. Por acreditar em mim e ter partilhado a sua casa comigo nestes meses tão complicados.

Ao meu pai e à Sandra, que, embora longe, sempre souberam o que dizer e me ajudaram a perceber que, independentemente do momento da vida em que te encontras, as coisas boas chegam sempre no tempo certo.

À minha avó Adília, por todos os abraços e palavras de carinho. Também por todas as rezas diárias realizadas em meu nome, para que tudo corresse bem.

A todos os restantes membros da família, por serem incansáveis e estarem sempre dispostos a ajudar-me, ainda que à distância.

A todos os meus amigos, dentro e fora da faculdade, que, de algum modo, me ajudaram a chegar a onde estou hoje.

Por último, agradeço à Professora Ana Tomé e ao Professor Carlos de Sousa Oliveira, por todo o trabalho e tempo dedicado na elaboração desta dissertação. Por todo o conhecimento que me transmitiram ao longo destes largos meses. Por todo o apoio e disponibilidade. Sem eles, este trabalho não seria possível.

**Declaração**

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

## **ABSTRACT**

The “Pombaline Cage” is an anti-seismic wooden structure, thought and applied massively in buildings during the reconstruction of Lisbon, after the 1755 earthquake. Despite being a system that has been extensively studied in its structural and constructive essence, it appears that there is no global and accessible representation, as a whole, that facilitates its study and understanding. The existing representations of the “Pombaline Cage” are, essentially, based on drawings and physical models of parts of the Cage. They are unique specimens, some integrating museum collections. The known virtual representations are scarce, difficult to access and consult.

This study explores the potential of 3D printing technology FFF (fused filament fabrication) to recreate physical models, at scale, with didactic purposes, of a pombaline building archetype: a typical building composed by three aerial floors, ground floor and roof. The requirements of the models were essentially based on educational and training objectives. They are intended to support the classes of the students from the DECivil, Instituto Superior Técnico. They can also be used in training and awareness activities among younger people, whether in their schools, or during Técnico summer courses.

The scales of the models considered the general description of the structure (1:50) and the representation of details that allowed to deep its understanding such as the “Saint Andrew” cross (1:10). The workflow developed considered: a virtual recreation of the pombaline building in a CAD environment; study of the building’s components; planning of the models; execution of preliminary printing tests; 3d printing of the final elements; and assembly of the final models.

The option for low-cost 3D printing processes aimed to enhance the dissemination of models and thus contribute to the study and understanding of this innovative and heritage anti-seismic system. The results obtained demonstrated the ability to describe the “Pombaline Cage” as a whole.

**Keywords:** Pombaline Cage 3D, Physical models, 3D printing, Teaching, Didactic models.

## RESUMO

A “Gaiola Pombalina” é uma estrutura anti-sísmica em madeira, pensada e aplicada massivamente nos edifícios aquando da reconstrução de Lisboa, após o terramoto de 1755. Sendo uma estrutura muito estudada na sua essência estrutural e construtiva, verificou-se não existir uma representação global e acessível do seu todo, que facilitasse o seu estudo e compreensão. As representações da “Gaiola Pombalina” recorrem, essencialmente, ao desenho e a modelos físicos de partes, exemplares únicos, alguns integrando acervos de museus. As representações virtuais conhecidas são escassas, de difícil acesso e consulta.

Este estudo explora o potencial da tecnologia de impressão 3D FFF (fused filament fabrication) para recriar modelos físicos, à escala, com fins didáticos, de um arquétipo de edifício pombalino. Estes representam um edifício típico de três pisos aéreos, piso térreo e cobertura. Os requisitos dos modelos visam essencialmente objetivos formativos e de ensino. Destinam-se a permitir o suporte às aulas de estudantes do Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos do Instituto Superior Técnico (IST), mas também podem ser utilizados em ações formativas e de sensibilização junto de camadas mais jovens, quer nas suas escolas, quer durante os cursos de verão organizados pelo IST.

As escalas desenvolvidas consideraram a descrição geral da estrutura (1:50) e a representação de detalhes que permitissem aprofundar a sua compreensão como, por exemplo, a cruz de Santo André (1:5). O fluxo de trabalho desenvolvido considerou a recriação virtual prévia num ambiente CAD, o estudo dos componentes do edifício, o planeamento dos modelos, a execução de testes de impressão preliminares, a impressão 3D dos componentes e montagem dos modelos finais.

A opção por processos de impressão 3D low-cost visou potencializar a disseminação dos modelos e assim contribuir para o estudo e compreensão deste sistema anti-sísmico inovador e patrimonial. Os resultados obtidos demonstraram capacidade de descrever a “Gaiola Pombalina” no seu todo.

**Palavras-chave:** Gaiola Pombalina 3D, modelos físicos, impressão 3D, ensino, modelos didáticos.

## ÍNDICE GERAL

<b>Agradecimentos</b> .....	<b>iii</b>
<b>Declaração</b> .....	<b>iv</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>v</b>
<b>Resumo</b> .....	<b>vi</b>
<b>Índice Geral</b> .....	<b>vii</b>
<b>Índice de Figuras</b> .....	<b>ix</b>
<b>Índice de Tabelas</b> .....	<b>xv</b>
<b>Índice de Figuras (em anexo)</b> .....	<b>xv</b>
<b>Introdução</b> .....	<b>1</b>
i. Enquadramento .....	1
ii. Objetivos e Metodologia do trabalho .....	2
iii. Organização .....	3
<b>Capítulo 1. História e representações da gaiola pombalina e os seus antecedentes</b> .....	<b>5</b>
1.1 Lisboa do século XV até ao terramoto .....	5
1.2 Lisboa após o terramoto .....	7
1.3 Antecedentes da gaiola pombalina .....	8
1.4 Representações existentes .....	10
<b>Capítulo 2. Para uma descrição construtiva e estrutural detalhada da gaiola pombalina</b> .....	<b>13</b>
2.1 Fundações .....	13
2.2 Piso Térreo .....	16
2.3 Gaiola Pombalina .....	17
2.3.1 Paredes Mestras .....	20
2.3.2 Paredes de Frontal .....	22
2.3.3 Paredes de Tabique .....	25
2.3.4 Pavimentos e tetos .....	27
2.3.5 Escadas .....	31
2.3.6 Cobertura .....	33
<b>Capítulo 3. Modelos didáticos, impressão 3D, ensino e património - para uma síntese</b> .....	<b>37</b>
3.1 Tecnologia digital e Arquitetura .....	37
3.2 Impressão 3D e ensino .....	38
3.2.1 Impressão 3D .....	39
3.2.2 Impressão 3D aplicada ao ensino .....	40
3.3 Modelos didáticos 3D. Aplicações .....	41
3.3.1 As maquetas e o ensino da Arquitetura .....	42

<b>3.3.2</b> Modelos didáticos 3D e o ensino do património construído .....	42
<b>Capítulo 4.</b> Desenvolvimento de modelos físicos da gaiola pombalina .....	<b>45</b>
<b>4.1</b> Definição de requisitos .....	45
<b>4.2</b> Desenvolvimento dos modelos digitais .....	47
<b>4.2.1</b> Modelo à escala 1:50 .....	47
<b>4.2.2</b> Modelos à escala 1:10 .....	53
<b>4.3</b> Planeamento da impressão dos modelos físicos.....	54
<b>4.4</b> Produção de modelos .....	61
<b>4.4.1</b> Montagem de modelos.....	70
<b>Capítulo 5.</b> Discussão de resultados e desenvolvimentos futuros .....	<b>75</b>
<b>Conclusões</b> .....	<b>79</b>
<b>Referências</b> .....	<b>81</b>
<b>Anexos</b>	

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Lisboa antes do terramoto de 1755. Gravura de Mateus Sautter, século XVIII (Nogueira, 2015).	<b>5</b>
<b>Figura 2.</b> Vista de Lisboa durante o terramoto de 1755. Desenho de Johan Christian Leopoldo. (Mascarenhas, 2009, página 23).	<b>6</b>
<b>Figura 3.</b> Orientação dos quarteirões (Mascarenhas, 2009).	<b>7</b>
<b>Figura 4.</b> Elevação do terreno da cidade (Mascarenhas, 2009).	<b>7</b>
<b>Figura 5.</b> Sistema de drenagem das águas (Mascarenhas, 2009).	<b>8</b>
<b>Figura 6.</b> Organização rigorosa dos novos quarteirões (Mascarenhas, 2009).	<b>8</b>
<b>Figura 7.</b> Estrutura “himis” de edifícios em diferentes locais da Turquia. Fotografias de Randolph Langenbach (Langenbach, 2007, página 6).	<b>9</b>
<b>Figura 8.</b> Ilustração de Giovanni Vivenzio do sistema anti-sísmico da casa “Baraccata”, 1783 (Langenbach, 2003).	<b>10</b>
<b>Figura 9.</b> Fotografia do modelo da gaiola pombalina do Museu de Engenharia Civil do IST. Fonte: Wikimedia, 2008.	<b>11</b>
<b>Figura 10.</b> Modelo de edifício pombalino no Regimento Sapadores Bombeiros de Lisboa. Créditos: Manuel Levita, 2015. In: Facebook CML	<b>11</b>
<b>Figura 11.</b> Modelo virtual de um edifício pombalino elaborado por Vitor Córias (2007).	<b>11</b>
<b>Figura 12.</b> Alçado tipo de um edifício pombalino. Fonte: Catálogo 1758, Lisboa o plano da baixa hoje, imagem 143.	<b>13</b>
<b>Figura 13.</b> Planta tipo de um edifício pombalino (apud Glória, 2015).	<b>13</b>
<b>Figura 14.</b> Conjunto de estacas (Fonte: Museu do Dinheiro) (Créditos: Carlos Sousa de Oliveira).	<b>14</b>
<b>Figura 15.</b> Fases de execução- fundações pombalinas (Ramos e Lourenço, 2000).	<b>14</b>

<b>Figura 16.</b> Esquema de fundações isoladas de edifício pombalino. 1- Parede de alvenaria de pedra; 2- Pavimento de pedra; 3- Arco feito por tijolos; 4- Toro de madeira; 5- Toro de madeira; 6- Estaca de madeira; 7- Solo; 8- Coluna composta por grandes blocos de pedra; 9- Grande pedra de fundação da coluna. Adaptado por (Nunes, 2017).	<b>15</b>
<b>Figura 17.</b> Esquema de fundação de laje maciça de edifício pombalino. 1- Solo; 2- Parede de alvenaria de pedra; 3- Pavimento de pedra; 4- Laje de fundação em alvenaria de pedra; 5- Toro de madeira; 6- Toro de madeira; 7- Estaca de madeira. Adaptado por (Nunes, 2017).	<b>15</b>
<b>Figura 18.</b> Piso térreo com paredes mestras ligadas por arcos (Mascarenhas, 2009).	<b>17</b>
<b>Figura 19.</b> Piso térreo com paredes mestras e pilares ligadas por abóbadas e arcos (Mascarenhas, 2009).	<b>17</b>
<b>Figura 20.</b> Estrutura de uma parede de frontal (Appleton, 2011).	<b>19</b>
<b>Figura 21.</b> Tipos de conexão entre peças. Encaixes cauda de andorinha, meia-madeira e de ângulo, respetivamente (Nunes, 2017).	<b>20</b>
<b>Figura 22.</b> Representação esquemática da estrutura das paredes de fachada, com identificação dos tipos de encaixe entre as peças (Nunes, 2017).	<b>21</b>
<b>Figura 23.</b> Desenho explicativo relativamente à fixação das cantarias à estrutura (Mascarenhas, 2009).	<b>22</b>
<b>Figura 24.</b> Representação esquemática da estrutura de uma parede de frontal e respetivas conexões entre peças. A- Viga de pavimento; B- Verga; C- Travessanho; E- Prumo; F- Frechal; G- Pendural; H- Escora; I- Chincharel (Nunes, 2017).	<b>23</b>
<b>Figura 25.</b> Conexão vertical entre prumos, através da aplicação de um chincharel, ou por uma samblagem, respetivamente (Mascarenhas, 2009).	<b>24</b>
<b>Figura 26.</b> Diferentes tipos de conexão entre painéis (Mascarenhas, 2009).	<b>25</b>
<b>Figura 27.</b> Representação esquemática da estrutura de uma parede de tabique. J- Aspa; K- Calha; L- Pavimento de madeira; M- Gola; N- Verga; O- Costaneiras; P- Fasquiado; Q- Réguas (Nunes, 2017).	<b>26</b>
<b>Figura 28.</b> Representação esquemática dos ferros que permitem a conexão entre vigas de pavimento e as paredes de alvenaria. a) Ferrolho de esquadro; b) Ferrolho de chaveta (Nunes, 2017).	<b>28</b>

<b>Figura 29.</b> Travamento entre as vigas de pavimento com tarugos, ligados às vigas por um entalho do tipo “orelha derrabada” (Appleton, 2011).	<b>29</b>
<b>Figura 30.</b> Diferentes formas de associação entre duas vigas de pavimentos contínuas (Nunes, 2017).	<b>29</b>
<b>Figura 31.</b> 1- Soalho à portuguesa; 2- Solho de junta; 3- Soalho à inglesa (Miranda, 2011).	<b>30</b>
<b>Figura 32.</b> Representação do teto com reboco e estuque sobre o fasquiado pregado às vigas (Appleton, 2011).	<b>31</b>
<b>Figura 33.</b> Corte perspectivado de um troço da coluna de acessos (Santos, 1994).	<b>32</b>
<b>Figura 34.</b> Escada com perna lisa e escada com perna rebaixada, respetivamente (Santos, 1994).	<b>32</b>
<b>Figura 35.</b> Estrutura de um telhado em mansarda (Mascarenhas, 2009).	<b>33</b>
<b>Figura 36.</b> Estrutura de um telhado triangular (Mascarenhas, 2009).	<b>34</b>
<b>Figura 37.</b> Estrutura de um telhado de mansarda (Costa, 1971).	<b>35</b>
<b>Figura 38.</b> Telhado: a) zona de cumeeira; b) zona do beirado (Appleton, 2011).	<b>35</b>
<b>Figura 39.</b> Remate da cimalha: A – cimalha de alvenaria de tijolo; B – cimalha de cantaria (Mascarenhas, 2009).	<b>36</b>
<b>Figura 40.</b> Miguel Angelo, Giacommodella Porta e Luigi Vantivelli – modelo de parte do tambor da cúpula de S. Pedro de Roma (1558-1561), madeira, 500x400x200 cm, Museu do Vaticano, Vaticano (Hellmann, 1999).	<b>37</b>
<b>Figura 41.</b> Esquema simplificado do processo dos métodos aditivos (Jamie, 2018).	<b>39</b>
<b>Figura 42.</b> Processo de impressão 3D por modelação de fusão e deposição. Fonte: Boa Impressão 3D (2017).	<b>39</b>

<b>Figura 43.</b> Experiência de modelação de moléculas e sua impressão, realizada por alunos do ensino secundário (Aguiar, 2016).	<b>41</b>
<b>Figura 44.</b> Sítios online dos quais se podem adquirir modelos didáticos focados em várias áreas da educação. MyMiniFactory.com (esq.) e yeggi.com (dir.).	<b>42</b>
<b>Figura 45.</b> Modelos de testes para a construção da Sagrada Família (Goldapple, 2017).	<b>43</b>
<b>Figura 46.</b> Ruínas da Cryptoporticus de Urbs Salvia (esq) (Tintillini, 2020) e modelo 3D da sua reconstrução (dir) (Ribechi, 2015).	<b>44</b>
<b>Figura 47.</b> Parede de frontal elaborada com os encaixes entre as suas peças.	<b>47</b>
<b>Figura 48.</b> Estrutura de parede de frontal sem os encaixes, peça única.	<b>48</b>
<b>Figura 49.</b> Planta do modelo desenvolvido.	<b>49</b>
<b>Figura 50.</b> Perspetiva do desenvolvimentos das paredes.	<b>49</b>
<b>Figura 51.</b> Integração da caixa de escadas no modelo.	<b>49</b>
<b>Figura 52.</b> Modelação completa do primeiro piso.	<b>50</b>
<b>Figura 53.</b> Modelação completa dos três pisos aéreos.	<b>50</b>
<b>Figura 54.</b> Modelação de uma abóbada de berço quadripartida.	<b>51</b>
<b>Figura 55.</b> Modelação do piso térreo completo.	<b>51</b>
<b>Figura 56.</b> Modelação completa do piso térreo e pisos aéreos.	<b>51</b>
<b>Figura 57.</b> Estrutura completa da cobertura.	<b>52</b>
<b>Figura 58.</b> Modelação do piso de cobertura completo.	<b>52</b>
<b>Figura 59.</b> Modelação completa do edifício pombalino correspondente ao modelo à escala 1:50.	<b>52</b>
<b>Figura 60.</b> Modelação completa do detalhe de frontal.	<b>53</b>
<b>Figura 61.</b> Modelação completa do detalhe da caixa de escadas.	<b>53</b>
<b>Figura 62.</b> Modelação completa do detalhe da cobertura.	<b>54</b>

<b>Figura 63.</b> Modelação completa do detalhe das estacas de fundação.	<b>54</b>
<b>Figura 64.</b> Planeamento dos elementos representativos do edifício.	<b>55</b>
<b>Figura 65.</b> Simulação da impressão dos três pisos aéreos como um todo (4dias, 19horas e 32minutos) (esq.) vs Simulação da impressão do primeiro piso aéreo como uma peça (1dia, 15horas e 44minutos) (dir.).	<b>55</b>
<b>Figura 66.</b> Planeamento da impressão dos painéis da estrutura da gaiola pombalina.	<b>56</b>
<b>Figura 67.</b> Simulação da impressão de uma peça da estrutura na vertical (22horas e 49minutos) (esq.) vs Simulação da impressão da mesma peça na horizontal (7horas e 14minutos) (dir.).	<b>56</b>
<b>Figura 68.</b> Planeamento dos elementos do telhado.	<b>57</b>
<b>Figura 69.</b> Planeamento das peças do piso térreo.	<b>57</b>
<b>Figura 70.</b> Simulação da impressão de parte da superfície abobadada na sua posição original, necessitando de suportes (a azul ciano),(4dias, 02horas e 49minutos) (esq.) vs Simulação da impressão da mesma peça como previsto no planeamento, sem necessidade de suportes (1dia, 09horas e 53minutos) (dir.).	<b>58</b>
<b>Figura 71.</b> Planeamento da impressão das escadas e peça como elemento único.	<b>58</b>
<b>Figura 72.</b> Planeamento das cantarias e cornijas.	<b>58</b>
<b>Figura 73.</b> Comparação da impressão das escadas como um todo (esq.) com a impressão das mesmas divididas (dir.).	<b>59</b>
<b>Figura 74.</b> Planeamento das peças que compõem o detalhe da parede de frontal.	<b>59</b>
<b>Figura 75.</b> Planeamento das peças que compõem o detalhe da caixa de escadas.	<b>59</b>
<b>Figura 76.</b> Planeamento das peças que compõem o detalhe da cobertura.	<b>60</b>
<b>Figura 77.</b> Planeamento das peças que compõem o detalhe das estacas de fundação.	<b>60</b>
<b>Figura 78.</b> Efeito ponte a ser evitado devido à necessidade de suportes (representados a azul ciano) (cima) vs posição preferível da peça, sem necessidade de suportes (baixo).	<b>60</b>
<b>Figura 79.</b> Exemplo de suportes inevitáveis (a azul ciano).	<b>60</b>

<b>Figura 80.</b> Articulação entre a estrutura da gaiola e o edifício, no modelo à escala 1:50. Estrutura não encaixada na parte do edifício (dir.); estrutura encaixada na parte do edifício (esq.).	<b>61</b>
<b>Figura 81.</b> Peça deformada por falta de aderência à base da impressora.	<b>62</b>
<b>Figura 82.</b> Peça inacabada por falta de material.	<b>62</b>
<b>Figura 83.</b> Fotografias de alguns momentos ocorridos durante a impressão de peças.	<b>63</b>
<b>Figura 84.</b> Imagens de diferentes peças impressas – modelos à escala 1:50 e 1:10.	<b>63</b>
<b>Figura 85.</b> Sequência de fotografias ilustrativas da montagem do modelo à escala 1:50.	<b>71</b>
<b>Figura 86.</b> Sequência de montagem do modelo de detalhe do frontal.	<b>72</b>
<b>Figura 87.</b> Sequência de montagem do modelo de detalhe da caixa de escadas.	<b>73</b>
<b>Figura 88.</b> Sequência de montagem do detalhe da cobertura.	<b>73</b>
<b>Figura 89.</b> Sequência de montagem do detalhe das estacas de fundação.	<b>74</b>
<b>Figura 90.</b> Resultado final do modelo à escala 1:50.	<b>77</b>
<b>Figura 91.</b> Resultado final do modelo de detalhe de frontal (escala 1:10).	<b>77</b>
<b>Figura 92.</b> Resultado final do modelo de detalhe da caixa de escadas. (escala 1:10).	<b>77</b>
<b>Figura 93.</b> Resultado final do modelo de detalhe da cobertura (escala 1:10).	<b>78</b>
<b>Figura 94.</b> Resultado final do modelo de detalhe das estacas de fundação (escala 1:10).	<b>78</b>

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Dimensionamentos da gaiola pombalina (Mascarenhas 2009).	<b>20</b>
<b>Tabela 2.</b> Tempo e material gasto nas impressões das peças do modelo à escala 1:50.	<b>65</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS (em anexo)

<b>Figura 1.</b> Planta do modelo desenvolvido.	<b>3</b>
<b>Figura 2.</b> Perspetiva do desenvolvimento das paredes.	<b>3</b>
<b>Figura 3.</b> Integração da caixa de escadas no modelo.	<b>3</b>
<b>Figura 4.</b> Modelação completa do primeiro piso.	<b>3</b>
<b>Figura 5.</b> Modelação completa dos três pisos aéreos.	<b>4</b>
<b>Figura 6.</b> Modelação de uma abóbada de berço quadripartida.	<b>4</b>
<b>Figura 7.</b> Modelação do piso térreo completo.	<b>4</b>
<b>Figura 8.</b> Modelação completa do piso térreo e pisos aéreos.	<b>4</b>
<b>Figura 9.</b> Estrutura completa da cobertura.	<b>5</b>
<b>Figura 10.</b> Modelação do piso de cobertura completo.	<b>5</b>
<b>Figura 11.</b> Modelação completa do edifício pombalino.	<b>5</b>
<b>Figura 12.</b> Modelação do modelo de detalhe de frontal (1:10)	<b>6</b>
<b>Figura 13.</b> Modelação do modelo de detalhe da caixa de escadas (1:10).	<b>6</b>
<b>Figura 14.</b> Modelação do modelo de detalhe da cobertura (1:10).	<b>6</b>
<b>Figura 15.</b> Modelação do modelo detalhe das estacas de fundação (1:10).	<b>6</b>
<b>Figura 16.</b> Planeamento dos elementos representativos do edifício.	<b>8</b>
<b>Figura 17.</b> Simulação da impressão do primeiro piso aéreo como uma peça.	<b>8</b>

<b>Figura 18.</b> Planeamento da impressão dos painéis da estrutura da gaiola pombalina.	<b>8</b>
<b>Figura 19.</b> Simulação da impressão de uma peça da estrutura na horizontal.	<b>8</b>
<b>Figura 20.</b> Planeamento dos elementos do telhado.	<b>9</b>
<b>Figura 21.</b> Planeamento das peças do piso térreo.	<b>9</b>
<b>Figura 22.</b> Simulação da impressão da superfície abobadada na sua posição original.	<b>9</b>
<b>Figura 23.</b> Simulação da impressão da mesma peça como previsto no planeamento.	<b>9</b>
<b>Figura 24.</b> Planeamento da impressão das escadas e peça como elemento único.	<b>10</b>
<b>Figura 25.</b> Planeamento das cantarias e cornijas.	<b>10</b>
<b>Figura 26.</b> Planeamento da impressão das escadas como um todo.	<b>10</b>
<b>Figura 27.</b> Simulação da impressão das escadas divididas.	<b>10</b>
<b>Figura 28.</b> Planeamento das peças que compõem o detalhe da parede de frontal.	<b>11</b>
<b>Figura 29.</b> Planeamento das peças que compõem o detalhe da caixa de escadas.	<b>11</b>
<b>Figura 30.</b> Planeamento das peças que compõem o detalhe da cobertura.	<b>11</b>
<b>Figura 31.</b> Planeamento das peças que compõem o detalhe das estacas de fundação.	<b>11</b>
<b>Figura 32.</b> Exemplo de suportes inevitáveis (a azul ciano).	<b>12</b>
<b>Figura 33.</b> Articulação entre a estrutura da gaiola e o edifício (não encaixada).	<b>12</b>
<b>Figura 34.</b> Articulação entre a estrutura da gaiola e o edifício (encaixada).	<b>12</b>
<b>Figura 35.</b> Peça deformada por falta de aderência à base da impressora.	<b>14</b>
<b>Figura 36.</b> Peça inacabada por falta de material.	<b>14</b>
<b>Figura 37.</b> Impressão de estacas de fundação (1:10).	<b>14</b>
<b>Figura 38.</b> Impressão de frechal (1:10).	<b>14</b>
<b>Figura 39.</b> Frontais (1:50).	<b>15</b>

<b>Figura 40.</b> Asnas (1:50).	<b>15</b>
<b>Figura 41.</b> Fundações (1:10).	<b>15</b>
<b>Figura 42.</b> Telhado (1:50).	<b>15</b>
<b>Figura 43.</b> Sequência de fotografias ilustrativas da montagem do modelo à escala 1:50.	<b>16</b>
<b>Figura 44.</b> Sequência de fotografias ilustrativas da montagem do modelo de detalhe do frontal.	<b>17</b>
<b>Figura 45.</b> Sequência de fotografias ilustrativas da montagem do modelo de detalhe da caixa de escadas.	<b>18</b>
<b>Figura 46.</b> Sequência de fotografias ilustrativas da montagem do detalhe da cobertura.	<b>19</b>
<b>Figura 47.</b> Sequência de fotografias ilustrativas da montagem do detalhe das estacas de fundação.	<b>20</b>

### i. Enquadramento

O sismo de 1 de novembro de 1755 é um dos acontecimentos catastróficos naturais mais relevantes na história de Portugal. Marca a evolução e construção da cidade de Lisboa. Neste contexto, o desenvolvimento e inclusão de uma estrutura anti-sísmica como é a “Gaiola Pombalina”, na reabilitação da capital, constituiu um momento fulcral de mudança e progresso na área da engenharia civil e arquitetura.

O estudo desta estrutura patrimonial é de grande importância, uma vez que existem vários edifícios, principalmente na baixa de Lisboa, constituídos por esta. A remodelação de edifícios pombalinos é frequente, mas muitas vezes a estrutura não é devidamente considerada (Teixeira, 2010). Na maioria dos casos a gaiola pombalina é tratada como elemento decorativo, totalmente desconstruída, apenas com o seu esqueleto exposto. Isso revela que não há um entendimento profundo desta estrutura. Para o seu correto funcionamento a gaiola pombalina deve ser devidamente preenchida e rebocada. O conjunto das peças de madeira, por si só, não é suficiente para garantir o correto funcionamento anti-sísmico (Nunes, 2017).

Existem inúmeros trabalhos sobre a construção pombalina nos seus múltiplos ângulos, como o estudo do seu valor arquitetónico e cultural, ensaios experimentais aprofundados sobre o comportamento desta estrutura quando submetida a diferentes cargas atuantes, diversos artigos sobre a influência da inovadora estrutura para a evolução da construção (França, 1998; Lopes, 2012; Teixeira, 2010; Cardoso, 2002; Appleton, 2005; Appleton, 2011).

No que diz respeito à representação desta estrutura, existem várias abordagens baseadas em desenhos, diagramas e fotografias (Langenbach, 2007; Nunes, 2017; Leitão, 1896). Para o presente trabalho tornou-se de elevada importância o estudo desenvolvido por Mascarenhas (2009), tratando-se de um levantamento exaustivo dos componentes da gaiola pombalina e edifícios pombalinos, através de desenhos à mão livre. Outro exemplo é Appleton (2011), que apresenta diversos esquemas e registos fotográficos de casos reais.

Por outro lado, relativamente à representação física desta estrutura, pode afirmar-se que é escassa, sendo a disponível bastante incompleta. As maquetes existentes focam-se, essencialmente, em componentes específicos, sendo raras as que demonstram os detalhes de ligação, ou as conexões com os restantes elementos do edifício, não tendo sido encontrada uma que permita entender o seu funcionamento e aspeto global. Foram encontrados apenas dois modelos físicos: do Museu de Engenharia Civil do IST e o modelo do Museu do Regimento de Sapadores de Bombeiros, também em Lisboa, que irão ser detalhados posteriormente. Para além das maquetes referidas, existe também um modelo virtual muito completo, desenvolvido pelo professor e engenheiro Vítor Córias (2007).

Embora as representações tridimensionais atualmente existentes da Gaiola Pombalina não sejam as mais completas, toda a informação fornecida por estes modelos disponíveis é de elevada

importância, pois contribui, de modo muito direto, para a compreensão dos detalhes da construção. Essa compreensão será complementada pelo estudo de desenhos existentes (incluindo cortes e vistas isométricas) especialmente relevantes quanto à descrição da gaiola pombalina, principalmente no que respeita aos seus detalhes construtivos.

Neste sentido, torna-se necessário destacar que a presente dissertação tem como objetivo a compreensão total da estrutura da gaiola pombalina, já que os modelos físicos existentes não garantem a compreensão global desta estrutura na sua relação com todos os elementos do edifício. O facto do presente estudo ter como principal objetivo desenvolver e disponibilizar modelos didáticos da estrutura está diretamente relacionado com a inexistência de modelos destinados a esse fim. Os modelos desenvolvidos visam associar conhecimentos essenciais e relevantes sobre a gaiola pombalina resultando numa representação integradora.

Optou-se pela apresentação de vários modelos físicos e não virtuais porque este tipo de representação permite uma leitura muito mais direta do objeto em estudo e uma partilha de conhecimento mais imediata e interativa. A utilização da impressão 3D, segundo o método FFF (Fused Filament Fabrication), utiliza a fusão e deposição de um material termoplástico permitindo a criação de peças com formatos diversos, regulares ou orgânicos, por camadas sucessivas que se vão depositando sobre uma plataforma. Os modelos impressos possuem bons acabamentos e suportam qualquer tipo de detalhe. Os baixos custos associados ao processo facilitam a experimentação e a reprodução do modelo.

## **ii. Objetivos e metodologia**

Esta dissertação, tem como tema principal o desenvolvimento de modelos físicos da Gaiola Pombalina, principalmente destinado ao ensino nas áreas de Engenharia Civil e Arquitetura.

Inserindo-se no tema da Tecnologias da Arquitetura, a abordagem a esta estrutura não se prende somente à sua história mas debruça-se, também, sobre o seu desempenho estrutural e construtivo, e ainda sobre métodos digitais de realização de um modelo físico. O avanço tecnológico permitiu aos arquitetos desenvolver projetos com formas menos regulares e mais orgânicas, não só a nível virtual como também a nível de modelos físicos. Métodos como as tecnologias CNC (Computer Numerical Control) e de prototipagem rápida, com foco na impressão 3D, são exemplos de novas formas de criação de maquetes, cada vez mais utilizadas em diversas áreas, inclusive a arquitetura. Estes métodos serão abordados no terceiro capítulo, uma vez que os modelos propostos são modelos produzidos numa impressora 3D, ou seja, através do uso de prototipagem rápida. Assim sendo, a dissertação proposta apresenta um marcado cunho experimental, já que daqui resultam modelos físicos que são pensados, elaborados, impressos e montados. A reflexão sobre o valor didático destes modelos será, também, objeto de reflexão no âmbito deste trabalho dado ser este o cunho que guia a sua génese. Existem essencialmente três objetivos a considerar: 1) o entendimento completo da construção pombalina, 2) as vantagens dos modelos físicos para o estudo e compreensão dos objetos representados, i.e., o valor didático dos modelos e, ainda, 3) o potencial da tecnologia de prototipagem

rápida, especificamente da impressão 3D, aplicada ao desenvolvimento de modelos físicos à escala. Nesta perspetiva, tornou-se essencial selecionar previamente os métodos de modelação digital e de impressão 3D mais adequados aos requisitos do(s) modelo(s) físico(s).

Inicialmente, pretende-se fazer um levantamento arquitetónico o mais completo possível (fase 1). Sendo o objetivo final da apresentação de vários modelos físico, para além da recolha bibliográfica e documental, é de igual importância a recolha de documentação gráfica e o estudo dos modelos existentes da gaiola pombalina.

De seguida será necessário estabelecer os requisitos do modelo a produzir, i.e., que tipo de modelo se irá realizar tendo em consideração a sua utilidade (fase 2). Nesta dissertação propõe-se a elaboração de um modelo não desmontável, mas facilmente amovível, complementado por diversos modelos de detalhe desmontáveis, e amovíveis, às escalas adequadas, visando utilizações didáticas, ou seja, com potencial de utilização na explicação desta estrutura em contextos de ensino.

Prevê-se sintetizar as conclusões da fase anterior através da produção virtual da estrutura, recorrendo a ferramentas de modelação 3D (fase 3).

O planeamento e desenvolvimento dos modelos físicos da gaiola pombalina (fase 4) observará: a definição das escalas de representação; a seleção dos materiais e tecnologias mais adequadas; o estudo da decomposição dos modelos e montagem das suas várias componentes, a planificação destas, o desenvolvimento de ficheiros para produção, o desenvolvimento de testes preliminares e avaliação das soluções; e a sua produção e montagem finais.

Por fim, após a produção dos modelos físicos, na última fase (5) será feita a análise dos resultados obtidos em função dos objetivos pretendidos.

### **iii. Organização**

A presente dissertação está organizada em sete partes, onde se inclui a Introdução, o desenvolvimento de cinco capítulos e a conclusão.

Na introdução faz-se o enquadramento e apresentação do tema, cujo foco é o estudo e análise de um edifício pombalino visando o desenvolvimento de vários modelos físicos, levando à compreensão do edifício pombalino no seu todo. Além dos principais objetivos e metodologia adotados é apresentada a organização da presente dissertação.

No primeiro capítulo (1. História e representações da gaiola pombalina e os seus antecedentes) faz-se um breve resumo histórico, de modo a contextualizar o surgimento da gaiola pombalina, ajudando a entender o seu impacto no tempo e na história da construção. São ainda apresentados os antecedentes desta estrutura, para além dos modelos físicos e digitais da gaiola pombalina, que existem atualmente.

O segundo capítulo (2. Para uma descrição construtiva e estrutural detalhada da gaiola pombalina) recai sobre a análise e explicação detalhada do funcionamento estrutural e construtivo da

gaiola pombalina, tal como o reconhecimento de todos os elementos constituintes e relações entre eles e com o restante edifício pombalino.

No terceiro capítulo (3. Modelos didáticos, impressão 3D, ensino e património - para uma síntese) enquadra-se o papel das tecnologias digitais, com foco na impressão 3D nos processos de trabalho em arquitetura; reflete-se sobre o potencial didático dos modelos físicos, criados por impressão 3D, aplicados ao ensino do património construído.

O quarto capítulo (4. Desenvolvimento de modelos físicos da gaiola pombalina) enuncia o processo de desenvolvimento dos modelos físicos elaborados, especificando todos os requisitos adotados, tal como a descrição detalhada de todo o processo de planeamento e produção dos modelos.

A discussão sobre os resultados obtidos é realizada no capítulo seguinte (5. Discussão de resultados).

Finalmente, apresenta-se a conclusão, ou seja, uma reflexão e considerações finais sobre o trabalho elaborado e os resultados obtidos.

## História e representações da gaiola pombalina e os seus antecedentes

## 1.1. Lisboa do século XV até o terramoto

A cidade de Lisboa, com localização privilegiada, junto ao estuário do Rio Tejo e com posição estratégica, com abundância de solos férteis, e cuja planície é naturalmente protegida por duas grandes colinas, hoje conhecidas como colina de S. Francisco e colina do Castelo, apresenta, para além das mencionadas, diversas características vantajosas que permitiram o desenvolvimento de um dos portos mais movimentados e relevantes da Europa no século XV.

Com um vasto empório comercial, verificou-se um drástico aumento demográfico, que se resumiu numa possibilidade e necessidade urgente de construção de novos e variados edifícios, tanto de cariz habitacional como de infraestruturas básicas. Assim, nasceu um centro desordenado, sobre terrenos instáveis de aluvião, com graves problemas de circulação, de saneamento e com significativos defeitos a nível das construções, criando um ambiente pouco seguro para a sua população em crescimento.

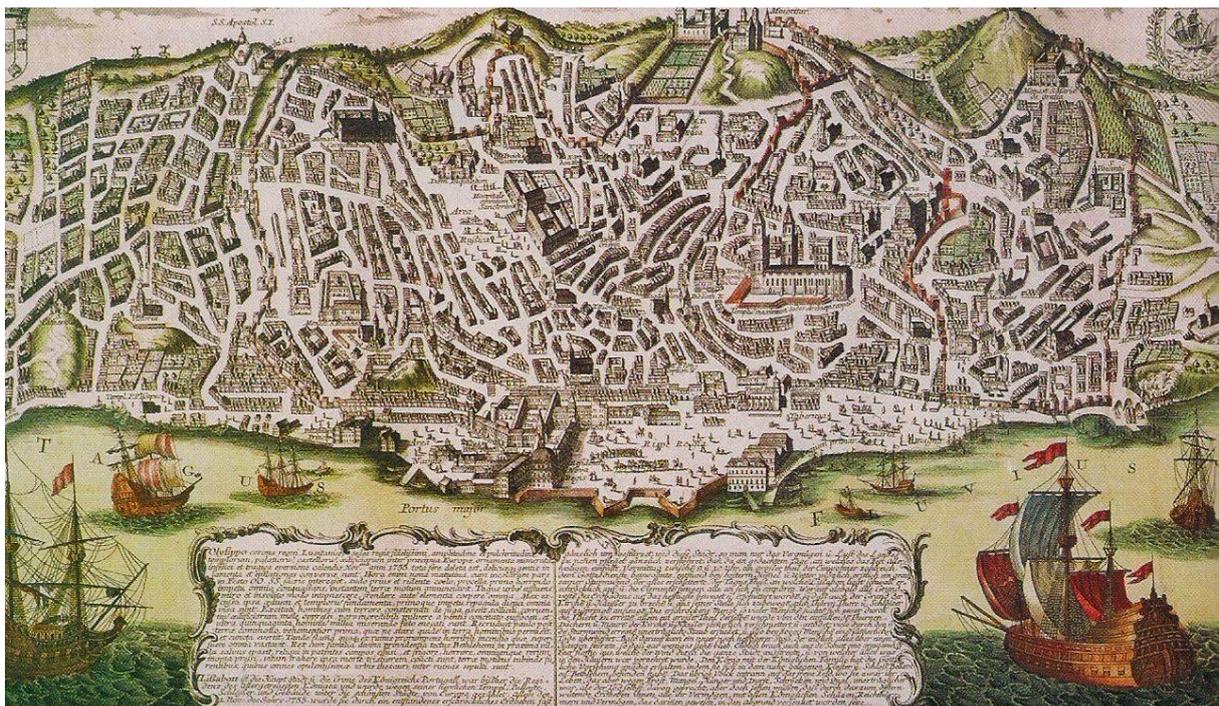


Figura 1. Lisboa antes do terramoto de 1755. Gravura de Mateus Sautter, século XVIII (Nogueira, 2015)

De entre várias deficiências notórias, as que se revelaram mais problemáticas aquando do sismo de 1755 foram:

- Existência de grande irregularidade entre os diversos edifícios, quer no seu alinhamento, quer na sua altura, levando a uma exposição desnecessária de cunhais e à existência de empenas desamparadas, que poderiam vir a desmoronar.
- Presença de elementos estruturalmente fracos, tais como varandas e chaminés, que, tal como se verificou, apresentavam grande probabilidade de serem projetados, caindo em cima das pessoas e dificultando a sua fuga, tornando-se obstáculos desnecessários e altamente letais nas ruas.
- Utilização exclusiva de estrutura em madeira nos edifícios, que se revelou um problema no momento em que se iniciaram os incêndios, grande ajuda na propagação rápida dos mesmos.
- Ausência de um sistema de saneamento apropriado, sendo uma prática popular o despejo dos detritos corporais na rua, levando à infiltração dos líquidos no solo, o que resultava na sua saturação e consequente aumento de instabilidade (Mascarenhas, 2009).

O marco que alterou o percurso da história da construção da cidade de Lisboa decorreu a 1 de novembro de 1755. Pelas nove horas e quarenta minutos da manhã registou-se um forte sismo na capital, que chegou ao grau IX da escala de Mercalli (Ferreira, 2013). Sendo, até então, uma cidade sem qualquer tipo de plano de ordenamento territorial e, como descrito, com edifícios que careciam da estrutura necessária para suportarem o tipo de forças decorrentes dum sismo, a cidade foi completamente destruída. Contudo, não foi apenas o terramoto a afetar as infraestruturas existentes, mas, também, os efeitos do maremoto sequente. A formação de ondas gigantes provenientes do rio e os incêndios que se lhe seguiram abalaram, em conjunto, toda a cidade. Foram destruídos 10% dos edifícios, danificados 60% e poupados os restantes 30%, dos quais, os edifícios com maior altura foram os que mais danos sofreram (Ramos e Lourenço, 2000).



Figura 2. Vista de Lisboa durante o terramoto de 1755. Desenho de Johan Christian Leopoldo (Mascarenhas, 2009, página 23).

## 1.2. Lisboa após o terramoto

Assumindo o comando da reconstrução da Baixa de Lisboa, Sebastião José de Carvalho e Melo, primeiro-ministro, posteriormente nomeado de Marquês de Pombal (1769), juntou um grupo de profissionais, dos quais fazia parte o engenheiro responsável, Manuel da Maia e ainda os arquitetos militares Eugénio dos Santos e Carlos Mardel. Em conjunto tomaram as primeiras medidas para estabilizar e garantir a segurança da população, que se encontrava aterrorizada, não só com o sucedido, mas com o panorama futuro a enfrentar. De forma a evitar a desertificação da cidade, começou por livrar a cidade de alguns dos corpos, atirando-os ao rio de modo a evitar epidemias. Aplicou leis imediatas e distribuiu juizes por toda a cidade, com o intuito de fazer julgamentos imediatos, para assim tentar controlar os furtos que se seguiram ao sismo. Impediu a qualquer habitante a saída da cidade, e incentivou aqueles que estavam fora a regressar.

Tentou restabelecer o funcionamento urbano, drenando as águas estagnadas, registando os edifícios em ruínas e removendo os escombros com o trabalho de prisioneiros (Mascarenhas, 2009).

Entre estas e outras medidas, criou-se uma situação de mínima estabilidade que permitiu começar a ponderar os passos para a futura reconstrução da cidade.

Seguiu-se então uma série de planos de reconstrução da cidade, tendo sido escolhido aquele que obedeceu às seguintes condições:

- Uma vez que a orientação dos abalos de maior intensidade do sismo foi Norte-Sul, os quarteirões eram projetados expondo as fachadas mais curtas segundo esta direção (Figura 3).
- O entulho das demolições eliminou praticamente as inundações na cidade, criando uma plataforma sobre a qual se desenvolveram as novas construções. Permitiu também o avanço sobre o rio e posterior projeção de uma grande praça (Figura 4).

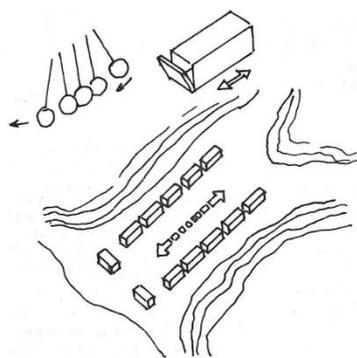


Figura 3. Orientação dos quarteirões (Mascarenhas, 2009).

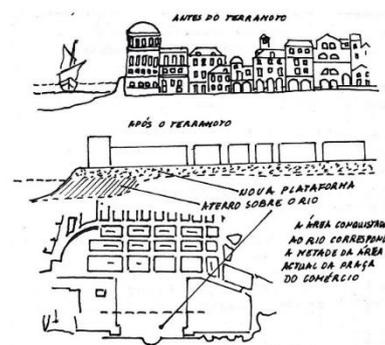


Figura 4. Elevação do terreno da cidade (Mascarenhas, 2009).

- Para ajudar a drenar a água dos antigos esteiros do rio Tejo e para conduzir os esgotos domésticos, foi criado um sistema de esgotos. Este garantia menor saturação dos terrenos circundantes

do esteiro, prevenindo o agravamento das consequências de um novo sismo, devido ao efeito de liquidação (Figura 5).

- As fachadas projetaram-se rigorosamente alinhadas de forma a facilitar a fuga dos habitantes em caso de sismo ou incêndio e facilitando o acesso dos mesmos às duas grandes praças (Figura 6) (Mascarenhas, 2009).

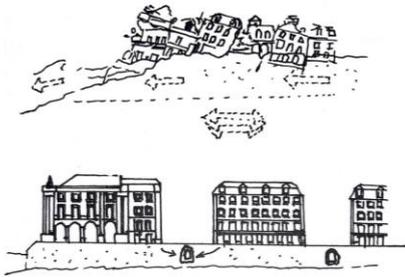


Figura 5. Sistema de drenagem das águas (Mascarenhas, 2009).

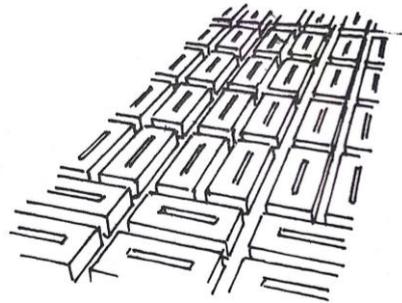


Figura 6. Organização rigorosa dos novos quarteirões (Mascarenhas, 2009).

Considerando a possibilidade de ocorrência de um novo sismo, o Marquês de Pombal exigiu que os edifícios a construir integrassem uma estrutura resistente a sismos, de modo a evitar uma nova destruição quase total e descontrolada da cidade. Em resposta foi criada a gaiola pombalina. Uma estrutura treliçada, em madeira, que iria resistir às diferentes direções das ondas sísmicas, ou, não resistindo, o seu grau de dano seria tal que permitia a fuga dos habitantes antes do colapso do edifício. Pela primeira vez na história da humanidade, uma cidade terá sido (re)construída com ideais antissísmicos (Lopes, 2012). Em conclusão, a nova base para reconstrução desta cidade é uma estrutura que tem por finalidade ser resistente a tremores de terra e cuja aplicação será imperativa em todos os edifícios construídos aproximadamente durante o século seguinte.

### 1.3. Antecedentes da gaiola pombalina

A ocorrência de terremotos e a evolução da construção estão intimamente ligados. Ao longo do tempo foi-se tentando diminuir a ação negativa destas catástrofes, através de vários estudos e implementação de estruturas mais resistentes nos edifícios. Os sismos, considerados como ações de punição por parte de Deus até ao século XVII, estão associados à destruição do tecido construído e da economia, principalmente se afetarem grandes centros comerciais, como era o caso de Lisboa (Nunes, 2017).

As consequências na sociedade também são muito negativas, uma vez que a população, durante e após um sismo está inevitavelmente assustada. Assim, de modo a que as ações destas catástrofes se tornassem mais limitadas e controladas, iniciou-se todo um processo de procura de respostas para o aumento da segurança nos edifícios. O objetivo era tornar o edifício o mais resistente possível aquando de um sismo. Havendo consciência de que era necessária uma maior capacidade de

resistência às forças horizontais de um sismo, as civilizações mais antigas iniciaram uma série de experiências para perceber como é que essa resistência se poderia obter.

Percebendo que a alvenaria se desmoronava facilmente, principalmente devido ao seu baixo ponto de rotura, chegou-se à conclusão que a aplicação de madeira como reforço oferecia uma maior capacidade de suporte de cargas (Lourenço, 2014; Vieux Champagne, 2014).

No entanto, representa um maior risco aquando de um incêndio, pois facilita a rápida propagação das chamas e conseqüente colapso dos edifícios.

A gaiola pombalina surge na seqüência do desenvolvimento de todo um leque de diversos tipos de estruturas resistentes a terremotos ao longo do tempo. O primeiro exemplo que se conhece foi descoberto durante as escavações a Herculano, Itália, uma casa de dois andares em enxaimel, nomeada por Vitruvius<sup>14</sup> como Opus Craticium (Langenbach, 2007).

Muitas outras amostras se encontram por todo o mundo, sendo conhecidas em cada país por um nome específico, como por exemplo, “colombage” em França, “fachwerk” na Alemanha, “himis” na Turquia (Figura 7), “half-timber” em Inglaterra e “Dhajji Dewari” na Índia (Langenbach, 2007).



Figura 7. - Estrutura “himis” de edifícios em diferentes locais da Turquia. Fotografias de Randolph Langenbach (Langenbach, 2007, página 6).

A estrutura mais comparável com a gaiola pombalina é, até hoje, a chamada casa Baraccata (Figura 8). Após um sismo arrasador da cidade italiana de Calábria, em 1783, a sua reconstrução foi baseada na aplicação desta estrutura a qual se tornou quase regra. Trata-se então de um edifício com um ou dois pisos de altura, regular e simétrico. Os pórticos de madeira com travessas, preenchidos com argila ou alvenaria de pedra, eram os responsáveis pela resistência aos sismos. De modo a proteger a madeira dos agentes naturais exteriores, aplicava-se-lhe uma camada de gesso ou

argamassa. Quando não se fazia isso, as hastes entrelaçadas eram fixadas e cobertas com gesso de terra (Nunes, 2017).

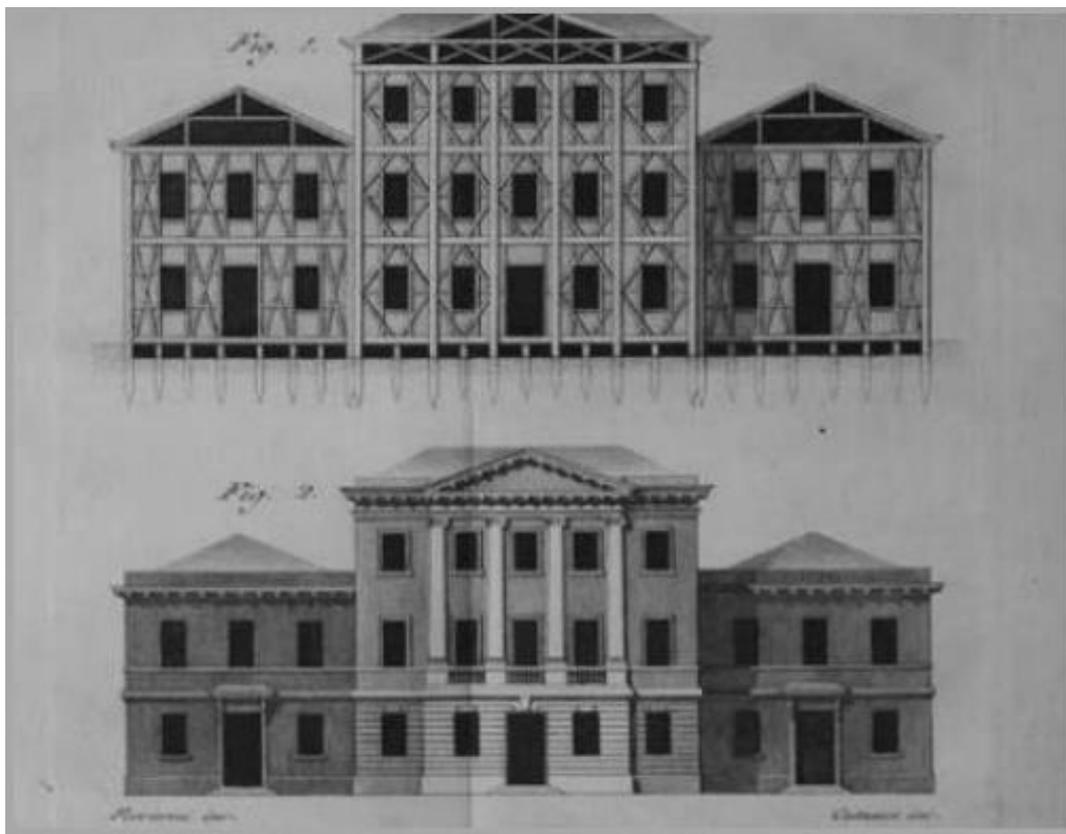


Figura 8. - Ilustração de Giovanni Vivencio- sistema antissísmico da casa “Baraccata”, 1783 (Langenbach, 2003).

#### 1.4. Representações existentes

São múltiplos os estudos teóricos sobre o tema da gaiola pombalina, desde a sua importância patrimonial, à sua função como estrutura antissísmica. Porém, a existência de modelos de representação deste tipo de construção são muito escassos. Como forma de acompanhamento dos diversos estudos, existem desenhos, fotografias e esquemas de explicação do funcionamento da gaiola, principalmente das suas partes, mas poucos demonstram o funcionamento da estrutura em conjunto com o edifício pombalino na sua globalidade.

Relativamente a modelos físicos, apenas há o conhecimento de dois casos. O modelo existente no Museu do Pavilhão de Civil do Instituto Superior Técnico (IST) de Lisboa retrata apenas a estrutura em madeira, desde as cruzes de Santo André, à forma como as escadas se desenvolvem. Trata-se de uma reprodução simplificada que não oferece informação detalhada e/ou global para o seu entendimento completo (Figura 9).

Existe também o modelo do Regimento Sapadores Bombeiros de Lisboa. Trata-se de um modelo simplificado de dois pisos, também em madeira, que mostra parte da estrutura pombalina, não completa, já que não apresenta cruces de Santo André, para que esta pudesse ser estudada pelos bombeiros (Figura 10).



Figura 9. Fotografia do modelo da gaiola pombalina do Museu de Engenharia Civil do IST. Fonte: Wikimedia, 2008.



Figura 10. Modelo de edifício pombalino no Regimento Sapadores Bombeiros de Lisboa. Créditos: Manuel Levita, 2015. In: Facebook CML.

Existe ainda um modelo virtual, completo e com um entendimento absoluto do edifício pombalino e a sua estrutura (Figura 11). Este modelo produzido pelo engenheiro e professor Vítor Cóias, em 2007,



embora seja o mais complexo que se encontrou até hoje, não se encontra acessível, não tendo sido possível a sua consulta no todo.

Figura 11. Modelo virtual de um edifício pombalino elaborado por Vitor Cóias (2007).

Existem ainda várias representações gráficas, como desenhos à mão de Jorge Mascarenhas (Mascarenhas, 2009) e Augusto Leitão (Leitão, 1896) e desenhos tridimensionais de partes da gaiola, para se entenderem essencialmente os seus encaixes, realizados por Ricardo Nunes (Nunes, 2017) para a sua dissertação de mestrado em Engenharia Civil, na Universidade Nova de Lisboa.

No âmbito da presente dissertação pretende-se disponibilizar um conjunto de modelos físicos que remetem para o edifício pombalino tipo, o mais completo possível, visando em entendimento global da estrutura em gaiola pombalina, com fins essencialmente de ensino.

**Para uma descrição construtiva e estrutural detalhada da gaiola pombalina**

Os edifícios pombalinos apresentam características variadas, dependendo da sua localização no quarteirão. A altura mantém-se regular, sendo a mesma para todos os edifícios, em que cada um apresenta um piso térreo, três pisos aéreos e o piso de cobertura. Já o comprimento é variável, podendo o número de vãos variar entre dois e seis, sendo o mais comum a apresentação de três ou quatro vãos. A configuração das plantas foi evoluindo e está diretamente relacionada com a posição das escadas no edifício. O mais comum é as escadas se encontrarem centradas e garantirem acesso a um piso com dois fogos, direito e esquerdo (Mascarenhas, 2009). As Figuras 12 e 13 mostram um alçado e uma planta típicos de edifícios pombalinos.

Neste capítulo apresentam-se as técnicas tipo que eram utilizadas na construção destes edifícios.

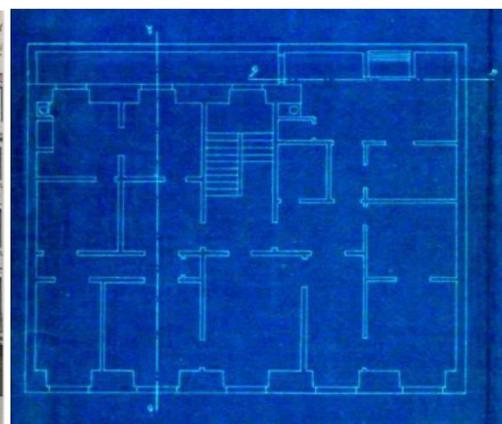


Figura 12. Alçado tipo de um edifício pombalino. Fonte: Catálogo 1758, Lisboa o plano da baixa hoje, imagem 143.

Figura 13. Planta tipo de um edifício pombalino (apud Glória, 2015).

**2.1 Fundações**

Não se pode iniciar a descrição detalhada da estrutura de um edifício pombalino sem, mais uma vez, destacar o desenvolvimento da baixa pombalina sobre solo aluvionar, no aterro de um antigo esteiro. Tal exigiu um tipo de fundação própria para os edifícios a construir, uma vez que o solo aluvionar apresenta um material muito desintegrado e solto, como areia e cascalho, razão que justifica o impacto devastador do sismo em especial nesta zona (Mascarenhas, 2009). No pós-sismo surgiram vários tipos de fundações, porém, destaca-se o uso de duas delas.

O primeiro tipo de fundação é constituído por um conjunto de estacas que se encontram em contacto direto com o solo. Estas suportam arcos de alvenaria localizados estrategicamente sob o intervalo entre as paredes e os pilares do piso térreo.

As estacas apresentam entre 1,5 a 5 metros de comprimento, com um diâmetro de 15 a 20 centímetros. Segundo Mascarenhas (2009), estas estacas dispõem-se em duas filas paralelas, no sentido das paredes mestras, afastadas cerca de 40 centímetros entre si e unidas, duas a duas, por

toros posicionados transversalmente. A sua fixação é feita por grossas cavilhas metálicas com cerca de 30 centímetros de comprimento. Reforça-se esta estrutura através da ligação dos toros transversais por outros três longos toros, mas estes posicionados longitudinalmente (Figura 14). Sobre o conjunto desenvolve-se um muro de alvenaria com cerca de 80 centímetros de espessura, que funciona como suporte dos diversos arcos anteriormente mencionados (Figura 15).



Figura 14. Conjunto de estacas. Museu do Dinheiro (Créditos: Carlos Sousa de Oliveira).

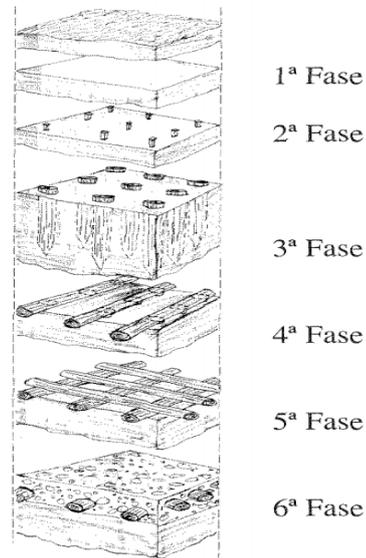


Figura 15. Fases de execução – fundações pombalinas (Ramos e Lourenço, 2000).

Toda a madeira destas fundações é de pinho verde, uma vez que o seu estado de conservação se mantém ao longo de vários anos por se encontrar num ambiente húmido e enterrado, ou seja, preservada da luz e do ar (Miranda, 2011).

A grande vantagem deste tipo de fundação está diretamente relacionada com a escavação, ou seja, não só a presença dos arcos de alvenaria ajuda a uma transmissão mais equilibrada das forças aquando de um sismo, como também reduz a necessidade de escavação no terreno, uma vez que o solo entre as fundações diretas não tem de ser totalmente removido (Appleton, 2011).

Existe também uma diferença entre o desenvolvimento da fundação nas paredes mestras e nos pilares. Enquanto que nas paredes mestras se utilizam várias pedras, com cortes específicos, posicionadas com um distanciamento regular entre elas, nos pilares utilizam-se pedras de grandes dimensões, que são posicionadas umas em cima das outras, através de uma confeção macho-fêmea, assentando diretamente na grelha de madeira, como se pode observar na Figura 16 (Nunes, 2017).

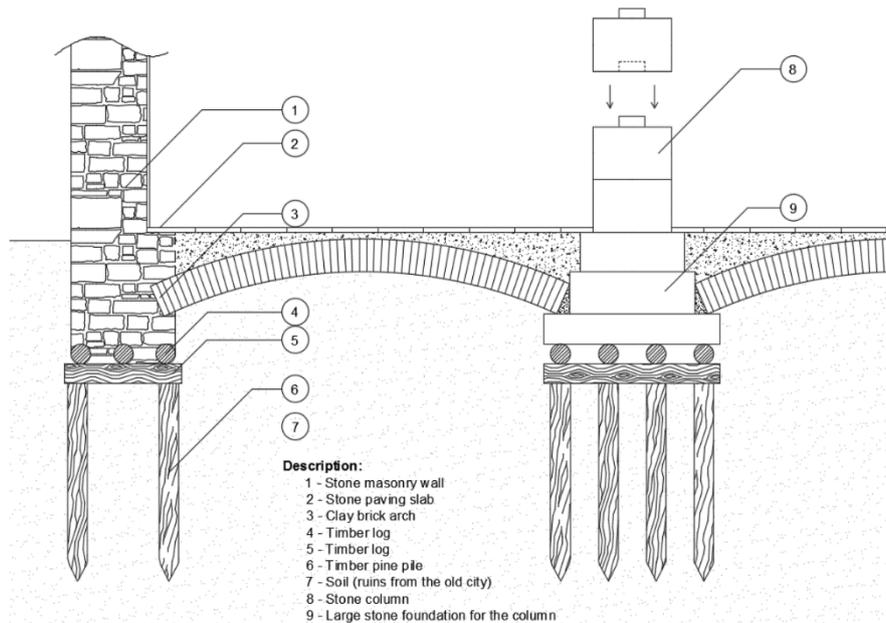


Figura 16. Esquema de fundações isoladas de edifício pombalino. 1- Parede de alvenaria de pedra; 2- Pavimento de pedra; 3- Arco feito por tijolos; 4- Toro de madeira; 5- Toro de madeira; 6- Estaca de madeira; 7- Solo; 8- Coluna composta por grandes blocos de pedra; 9- Grande pedra de fundação da coluna. Adaptado por (Nunes, 2017).

O segundo tipo de fundação difere do primeiro por não apresentar arcos, mas sim uma laje em alvenaria que assenta diretamente no gradeamento de madeira. Aqui, em toda a área de implantação do edifício existe uma estrutura de estacas e toros, fazendo com o que as paredes mestras e os pilares partilhem da mesma fundação, ao contrário do que acontece no sistema anterior.

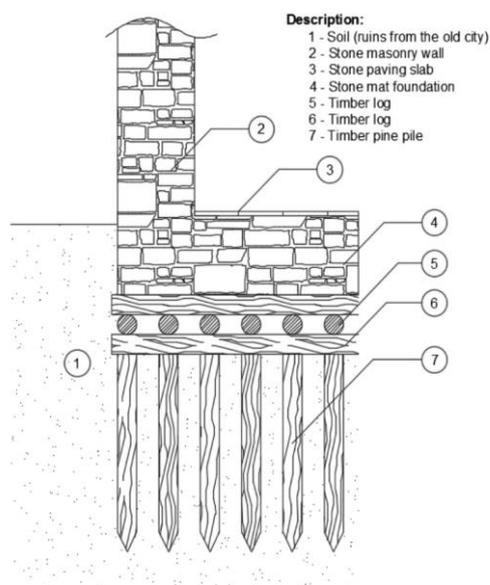


Figura 17. Esquema de fundação de laje maciça de edifício pombalino. 1- Solo; 2- Parede de alvenaria de pedra; 3- Pavimento de pedra; 4- Laje de fundação em alvenaria de pedra; 5- Toro de madeira; 6- Toro de madeira; 7- Estaca de madeira. Adaptado por (Nunes, 2017).

Entenda-se que em muitos dos edifícios da baixa pombalina, as estacas não chegam a atingir o substrato rochoso, portanto a forma com funciona este tipo de fundações é alvo de teorias muito contraditórias, havendo estudos que defendem que a compactação e consolidação do solo bastam para garantir a estabilidade do edifício. Portanto, o nível de degradação das estacas não apresentaria qualquer influência a este nível (Pires, 2011).

## **2.2 Piso térreo**

O piso térreo era utilizado essencialmente para fins comerciais nas ruas principais ou como estaleiros nas ruas secundárias. Desenvolve-se essencialmente sobre pilares e paredes mestras correspondentes às paredes exteriores, criando um espaço livre utilizado de forma polivalente. Estes pilares são construídos através do aparelhamento de grandes pedras, cuidadosamente cortadas. Já as paredes são formadas com grandes pedras irregulares aparelhadas guarnecidas com pedras de menores dimensões.

Sendo um espaço amplo e de fácil acesso ao exterior, a saída é facilitada em caso de acidente ou catástrofe, como um sismo.

Relativamente aos pisos aéreos, o piso térreo revela uma estrutura completamente distinta, assegurada de duas formas distintas: a primeira através de pilares de alvenaria, como descrito anteriormente, rematados por arcos em tijolo; a segunda, através de pilares ligados por arcos e abóbadas também de tijolo, não havendo, portanto, reforço de estrutura em madeira, como acontece nos andares superiores e cobertura.

Estes dois tipos de solução são vantajosos uma vez que, para além de conferirem bastante resistência em caso de sismo, isolam os elementos em madeira de contacto com a água, como poderia acontecer na ocorrência de cheias, já que estes se encontram apenas a partir do primeiro piso, aumentando assim a sua longevidade.

A primeira solução, cujo suporte estrutural é garantido por pilares e arcos é utilizada nas ruas principais (Figura 18). Aqui o teto apresenta uma estrutura de vigamentos em madeira, de igual espaçamento entre si, apoiada nos arcos, assegurando a estrutura dos pisos superiores. Esta estrutura, em termos de resistência sísmica, não é a mais adequada já que apenas as vigas de madeira e os arcos servem de suporte para os pisos superiores, para os pilares e para a fachada, não sendo possível uma distribuição uniforme de cargas (Nunes, 2017).

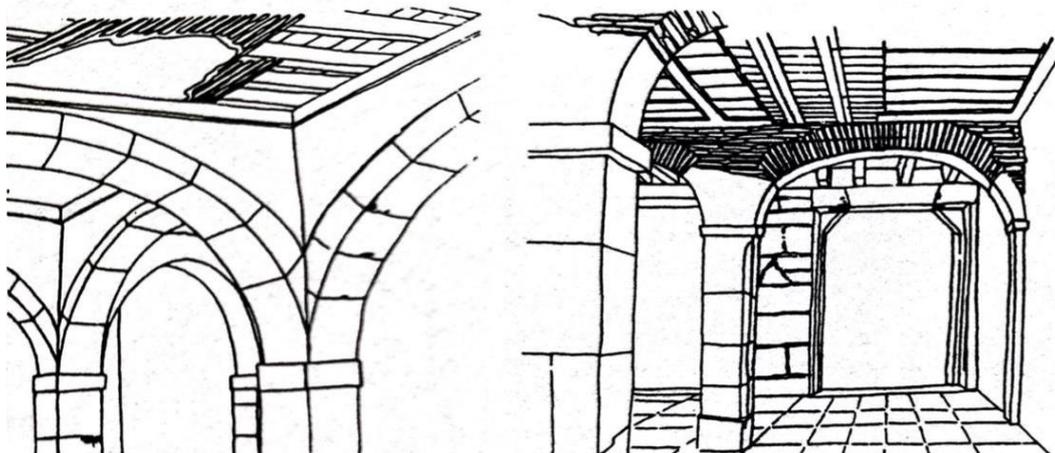


Figura 18. Piso térreo com paredes mestras ligadas por arcos (Mascarenhas, 2009).

A segunda solução, apesar de predominantemente utilizada nas ruas secundárias, apresenta uma estrutura mais complexa e resistente, com abóbadas que rematam o teto e funcionam como um sistema estrutural capaz de transmitir as cargas aos arcos, pilares e paredes próximas de modo muito eficiente. Estas abóbadas são quadripartidas e normalmente de berço. Os tijolos dispõem-se segundo linhas quase circulares e, nos cantos, dispõem-se perpendicularmente à curva do arco, de modo a receberem melhor as cargas (Mascarenhas, 2009). A parte superior das abóbadas é totalmente preenchida de forma a obter um plano de suporte aos pisos superiores. Este sistema não é só mais vantajoso a nível estrutural como, por apresentar apenas alvenaria, em caso de incêndio, não atingiria os pisos superiores, podendo ser mais facilmente contido neste piso e conseqüentemente salvar toda a estrutura de madeira localizada nos andares acima.

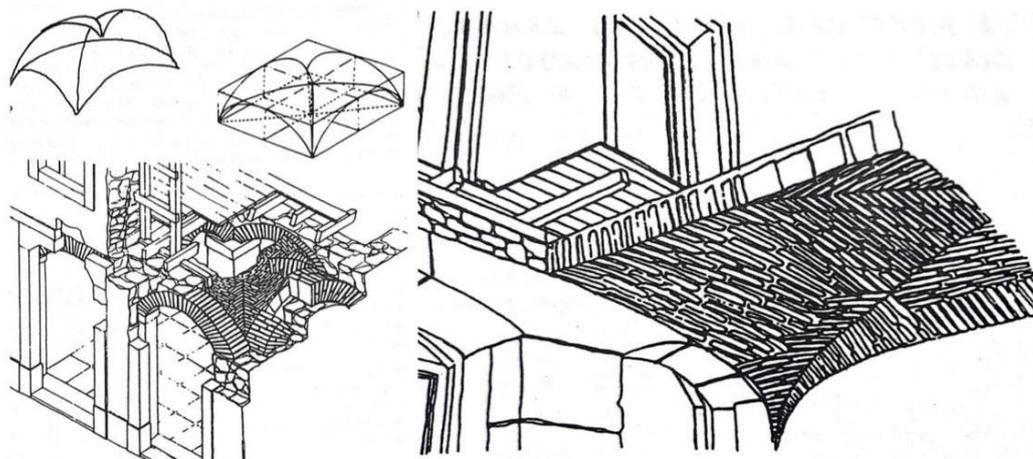


Figura 19. Piso térreo com paredes mestras e pilares ligados por abóbadas e arcos (Mascarenhas, 2009).

### 2.3 Gaiola pombalina

A gaiola pombalina, como explicado anteriormente, é uma evolução das estruturas antissísmicas pré-existentes à data. A sua importância histórica decorre de ter sido a primeira vez que, na reconstrução de uma cidade, se aplicou como regra a utilização deste tipo estrutural. Deste modo,

foi possível a construção de paredes mais leves e com maior flexibilidade, fator essencial em caso de um novo sismo, ao contrário do que acontecia com as paredes totalmente feitas de alvenaria de pedra ou tijolo, com uma rigidez muito maior. Esta leveza permitiu a construção de mais um piso, relativamente ao plano inicialmente previsto, sem comprometer a estabilidade do edifício, mantendo o seu nível de segurança em momentos de risco.

Adiante serão abordadas as técnicas mais utilizadas na aplicação da gaiola pombalina e, conseqüentemente, as estudadas aquando do desenvolvimento dos modelos físicos desenvolvidos como objetivo principal desta dissertação. Note-se que estas técnicas foram evoluindo ao longo do tempo, tendo em conta que a reconstrução da cidade se prolongou por vários anos (Nunes, 2017).

Compreenda-se que os elementos horizontais e verticais são muito longos, pois o objetivo é serem contínuos ao longo da altura e comprimento da parede, enquanto que as peças diagonais são curtas, equivalentes apenas à diagonal de um quadrado da malha (Mascarenhas, 2009).

Apesar de estes serem os principais elementos que constituem a chamada gaiola pombalina, a estrutura não apresenta apenas estas peças, tornando-se muito mais complexa, havendo variantes nas peças e nas conexões, tendo em conta a sua posição na estrutura.

É importante entender que os diferentes elementos apresentam dimensões de secção distintas, ou seja, há variantes entre cada elemento e de construção para construção. Apesar de não apresentarem medidas exatas, as consideradas para o estudo dos modelos físicos foram as referidas por Mascarenhas (2009) (Tabela 1).

A gaiola pombalina consiste numa espécie de matriz, na qual o encaixe entre diversas peças se faz de forma estratégica e assegurada através do uso de cavilhas metálicas. Os elementos verticais, denominados de prumos, contínuos ao longo do seu comprimento, equivalente à dimensão do pé direito do piso, distribuem-se de forma igualitária, cujo terminal encaixa em elementos horizontais, denominados de frechais. Estas peças estão presentes apenas no perímetro horizontal de cada parede. Outros elementos horizontais, os travessanhos, encaixam nos prumos e impedem os seus movimentos laterais. Desta forma é criada uma grelha, na qual os movimentos laterais das peças são travados, mas é necessário introduzir elementos diagonais para resistir às forças horizontais, as mais típicas durante um sismo. Introduzem-se então, por dentro dos quadrados formados entre os prumos e

os travessanhos, as escoras, elementos diagonais que ao se cruzarem entre si formam as cruces de Santo André (Figura 20).

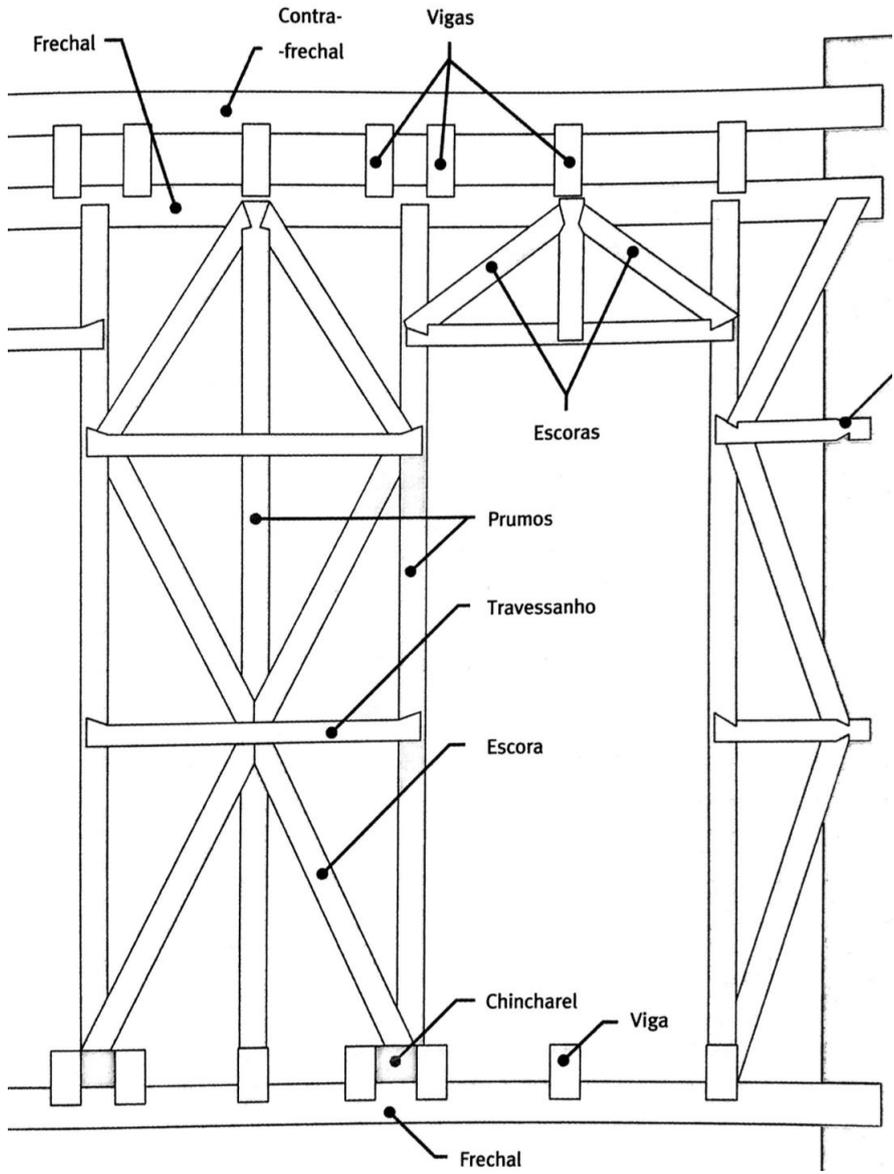


Figura 20. Estrutura de uma parede de frontal (Appleton, 2011).

	Elementos	Dimensões
	Prumos	12 x 10 cm <sup>2</sup>
	Travessanhos	12x10 cm <sup>2</sup> (pisos superiores) 15x12 cm <sup>2</sup> (pisos inferiores)
	Escoras	7x10 cm <sup>2</sup> (pisos superiores) 10x10 cm <sup>2</sup> (pisos inferiores)
	Frechais	15x10 cm <sup>2</sup>

Tabela 1. Dimensionamentos da gaiola pombalina (Mascarenhas 2009).

As peças podem ser de diferentes tipos de madeira, mas os mais comuns são o carvalho, o castanheiro, a nogueira e o azinho (Mascarenhas, 2009).

Os tipos de conexão entre estas peças também são variáveis, como se observa na Figura 21, e estão dependentes do tipo de madeira utilizada. As conexões mais comuns são a meia-madeira, podendo variar entre meia-madeira de cruzeta, de encontro, cauda de andorinha ou de ângulo. A primeira aplica-se, por exemplo, na ligação prumos-travessanhos; a segunda e terceira, na ligação prumos-frechais; e a última na ligação escoras-prumos.

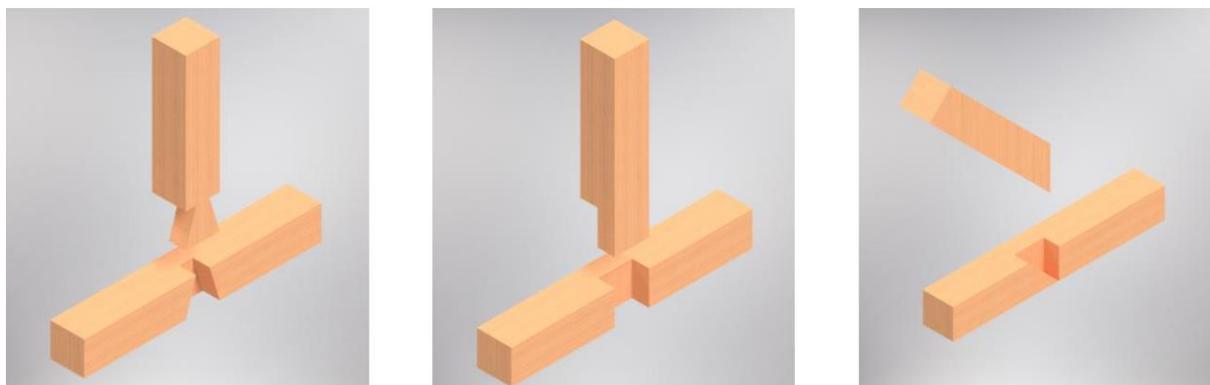


Figura 21. Tipos de conexão entre peças. Encaixes cauda de andorinha, meia-madeira e de ângulo, respetivamente (Nunes, 2017).

Podem destacar-se diferentes tipos de parede – paredes mestras, paredes estruturais e paredes não estruturais – e, ainda, a estrutura do pavimento pertencente ao edifício pombalino. Em cada caso, a gaiola funciona de forma diferente e as suas peças estão distribuídas de maneira distinta.

### 2.3.1 Paredes Mestras

As paredes principais, ou “mestras” encontram-se nas fachadas, tanto principal como tardo, nas empenas, e por vezes nos saguões. Estas paredes apresentam entre 80 centímetros a 1 metro de espessura, a nível das fachadas, e cerca de 50 centímetros nas empenas. Nas fachadas a espessura

vai diminuindo à medida que se sobe de piso, já que (obviamente) os pisos inferiores têm de suportar mais cargas que os superiores.

A estrutura de madeira apresenta-se apenas do primeiro andar para cima. No rés-do-chão, ao nível da rua, estas paredes são exclusivamente de alvenaria de pedra. O material usado é essencialmente uma argamassa de cal aérea na qual se aplicam pedras e alguns materiais cerâmicos de forma cuidadosa. A elevada espessura destas paredes pode dever-se ao facto de apresentarem boa compressão. Em caso de sismo é preferível apresentar uma parede com elevado peso e compressão, mais estabilizadora perante as forças horizontais do que uma mais fina. Uma outra razão para a apresentação de paredes tão espessas poderá ser a proteção que estas oferecem ao interior do edifício, perante agentes exteriores (Appleton, 2011).

A partir do primeiro piso, as paredes tornam-se mistas, ou seja, são constituídas por uma estrutura simplificada em madeira, preenchida e revestida por alvenaria de pedra. Diz-se uma estrutura simplificada (Figura 22) pois não apresenta as escoras, elementos diagonais que formam a cruz de Santo André. São constituídas apenas por prumos (E), travessanhos (C), frechais (F) e vigas de pavimento (A). Para além destas peças, na zona superior destinada aos vãos apresenta-se uma peça horizontal denominada de verga (B) que apresenta o comprimento do vão, e uma peça vertical que faz o encaixe entre a verga e o frechal imediatamente acima desta, o pendural (G).

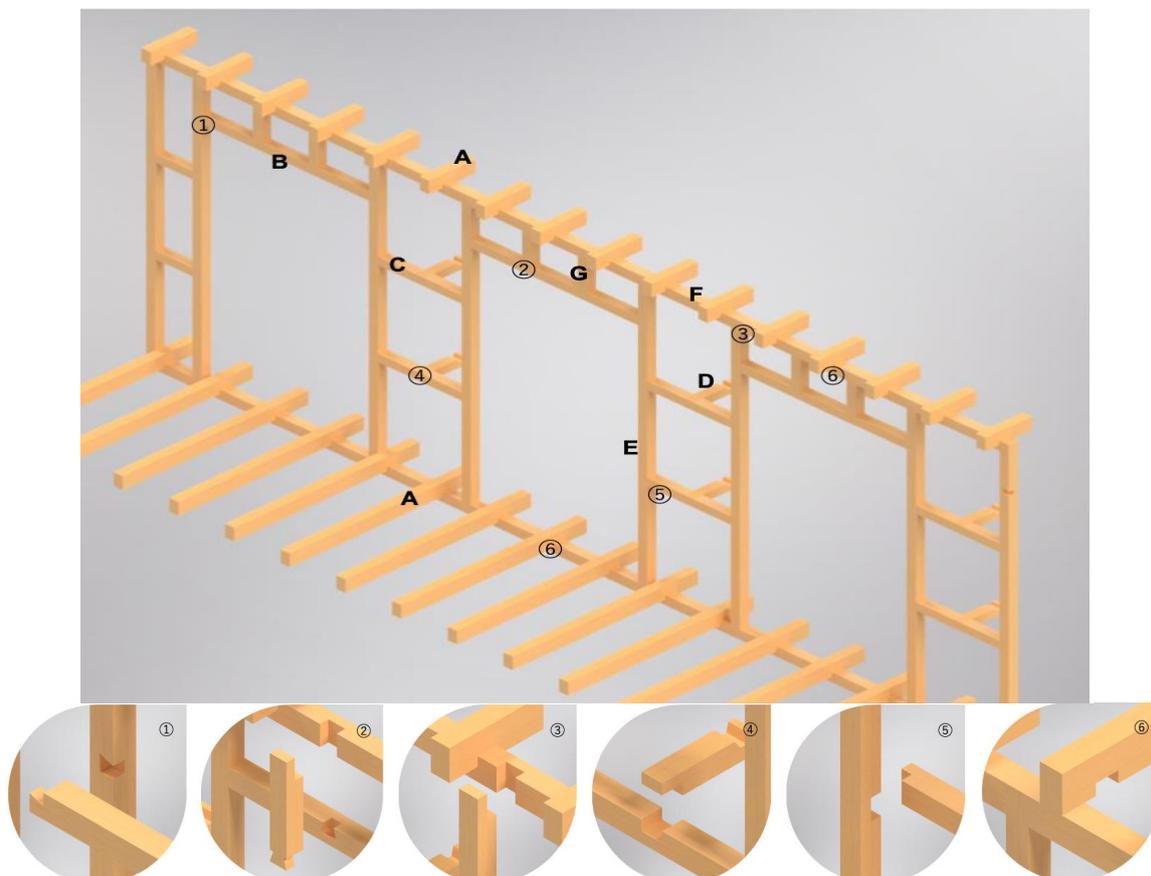


Figura 22. Representação esquemática da estrutura das paredes de fachada, com identificação dos tipos de encaixe entre as peças (Nunes, 2017).

A garantia de que a estrutura de madeira está bem fixada à alvenaria faz-se através do uso de peças denominadas de “mãos” (D) colocadas perpendicularmente ao plano da fachada. Estes elementos conectam-se aos elementos horizontais da estrutura através de juntas do tipo meia-madeira de encontro ou cauda de andorinha e avançam até  $\frac{1}{3}$  da espessura da parede de alvenaria, garantindo a sua fixação através de vários pontos deste tipo. As cantarias dos vãos fixam-se à estrutura de madeira através de gatos metálicos, impedindo a sua projeção aquando da ocorrência de um sismo (Figura 23) (Mascarenhas, 2009).

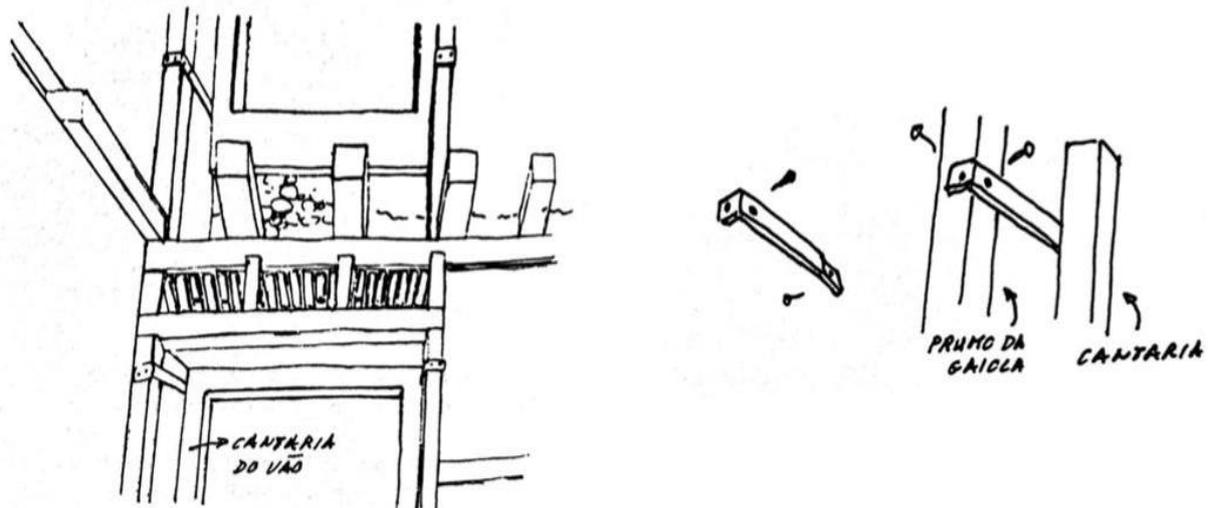


Figura 23. Desenho explicativo relativamente à fixação das cantarias à estrutura (Mascarenhas, 2009).

Nas empenas a espessura é constante em toda a sua altura e, uma vez que não apresentam vãos, a estrutura de madeira apresenta exclusivamente frechais, travessanhos e prumos. Estas paredes não só são a divisão entre lotes, mas têm também a função de corta-fogo entre os mesmos, dificultando a propagação de um eventual incêndio entre edifícios (Santos, 1989; Mira, 2007).

### 2.3.2 Paredes de Frontal

As paredes de frontal, representadas na Figura 24, são formadas pela estrutura mais reconhecida da gaiola pombalina, uma vez que apresentam não só elementos verticais e horizontais, mas também diagonais, formando as cruzes de St. André. Estas são paredes estruturais interiores, colocadas paralela e perpendicularmente ao plano da fachada, sempre com um encontro perpendicular entre elas. Para além de suporte têm também a função de divisão de espaços interiores, a par com as paredes de tabique.

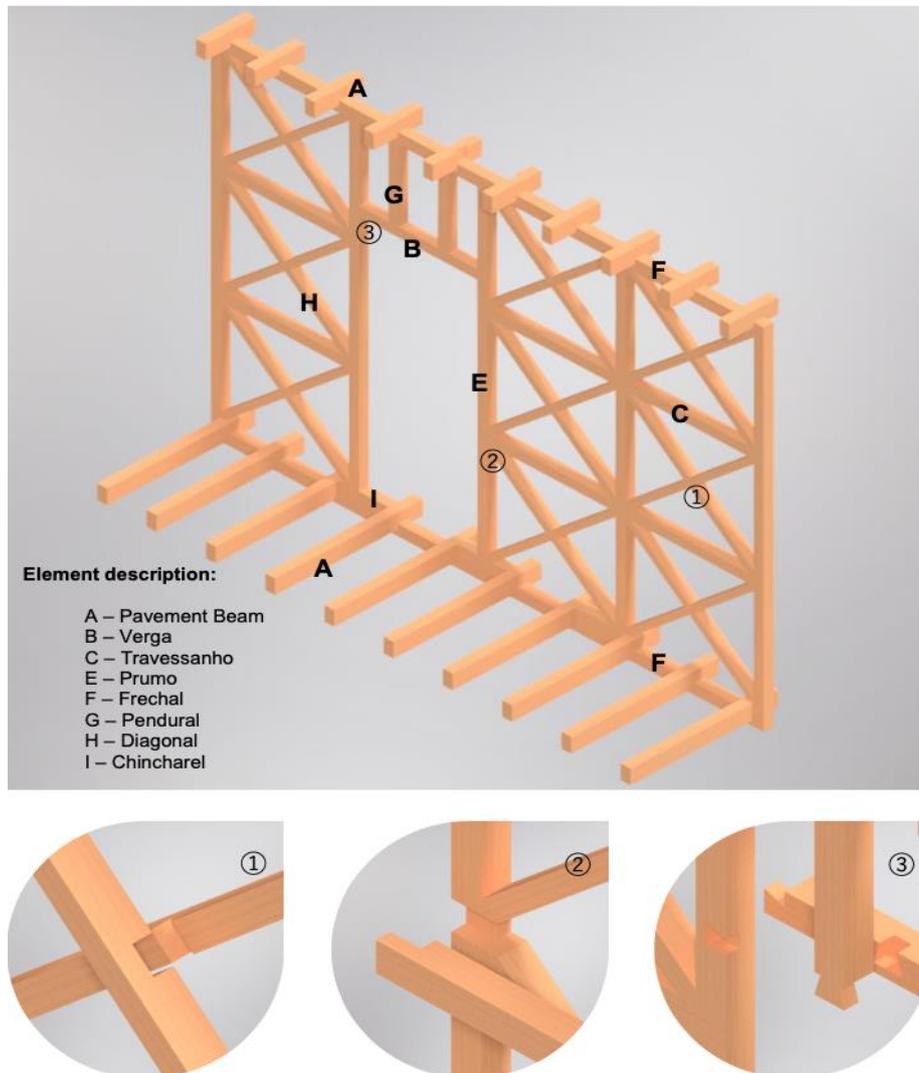


Figura 24. Representação esquemática da estrutura de uma parede de frente e respetivas conexões entre peças. A- Viga de pavimento; B- Verga; C- Travessanho; E- Prumo; F- Frechal; G- Pendural; H- Escora; I- Chincharel (Nunes, 2017).

Devido às bem conseguidas interconexões das peças, garante-se não só a resistência às forças horizontais, mas também se permite uma melhor distribuição de cargas na vertical, facilitando uma repartição uniforme das mesmas até às fundações, e conseqüente libertação para o solo (Nunes, 2017). Isto pode ser explicado pelo alinhamento das peças verticais ao longo de toda a altura do edifício e pelos elementos verticais estarem embutidos nas paredes de alvenaria do piso térreo. A garantia da continuidade dos elementos verticais (prumos), desde o primeiro até ao último piso do edifício, é feita de duas formas: através do uso de “uma pequena viga de madeira - chincharel - como apoio da ligação ou através de uma samblagem tipo “topo de gazepe” reforçada com uma cavilha de metal” (Figura 25) (Mascarenhas, 2009; pág.92).

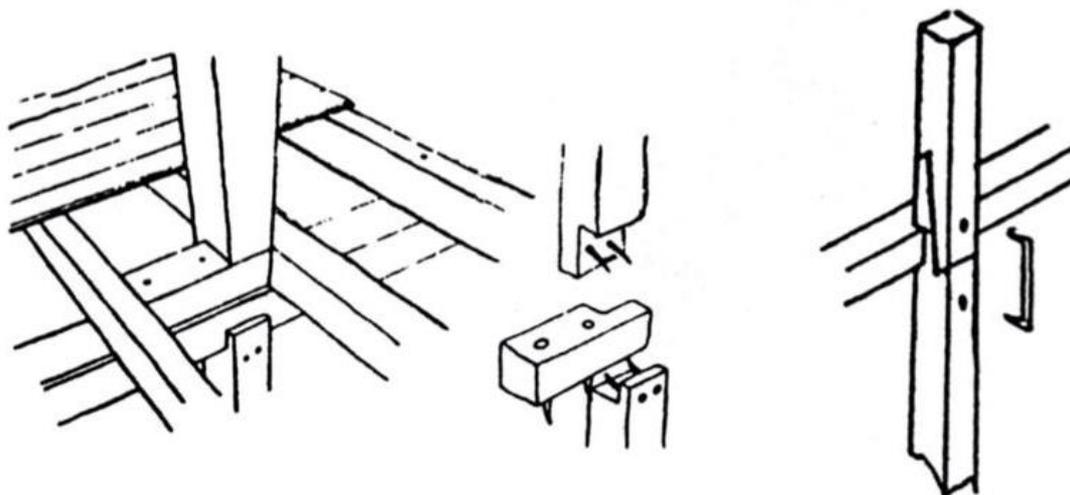


Figura 25. Conexão vertical entre prumos, através da aplicação de um chincharel, ou por uma samblagem, respetivamente (Mascarenhas, 2009).

O preenchimento dos espaços existentes entre as peças faz-se com alvenaria, utilizando, tal como nas paredes do rés-do-chão, cal aérea como argamassa, pedras e cerâmica. Posteriormente, toda a parede era rebocada e estucada.

As conexões entre os painéis (Figura 26) também assumem elevada importância para o comportamento da estrutura, já que o objetivo principal da sua construção era garantir uma boa conexão entre todos os elementos do edifício. Segundo Mascarenhas (2009), há quatro formas de executar a conexão entre painéis, e esta depende de construção para construção, e até num mesmo edifício podem existir tipos de interligação distintos. O ideal seria que os painéis partilhassem um elemento, mas por vezes a arquitetura do espaço não permite que isto aconteça. Assim sendo, as soluções apresentadas são: a primeira e mais ideal forma de conexão é entre prumos de paredes perpendiculares, ou seja, estas paredes partilham um prumo; a segunda opção é introduzir um prumo na zona de interseção entre painéis, em sintonia com a modelação de um destes; a terceira e mais fraca conexão consiste na não existência de um elemento vertical, ou seja, a ligação entre os painéis é feita diretamente com os travessanhos e as escoras; a última possibilidade é a interligação de dois prumos, cada prumo pertencente a cada painel (Mascarenhas, 2009).

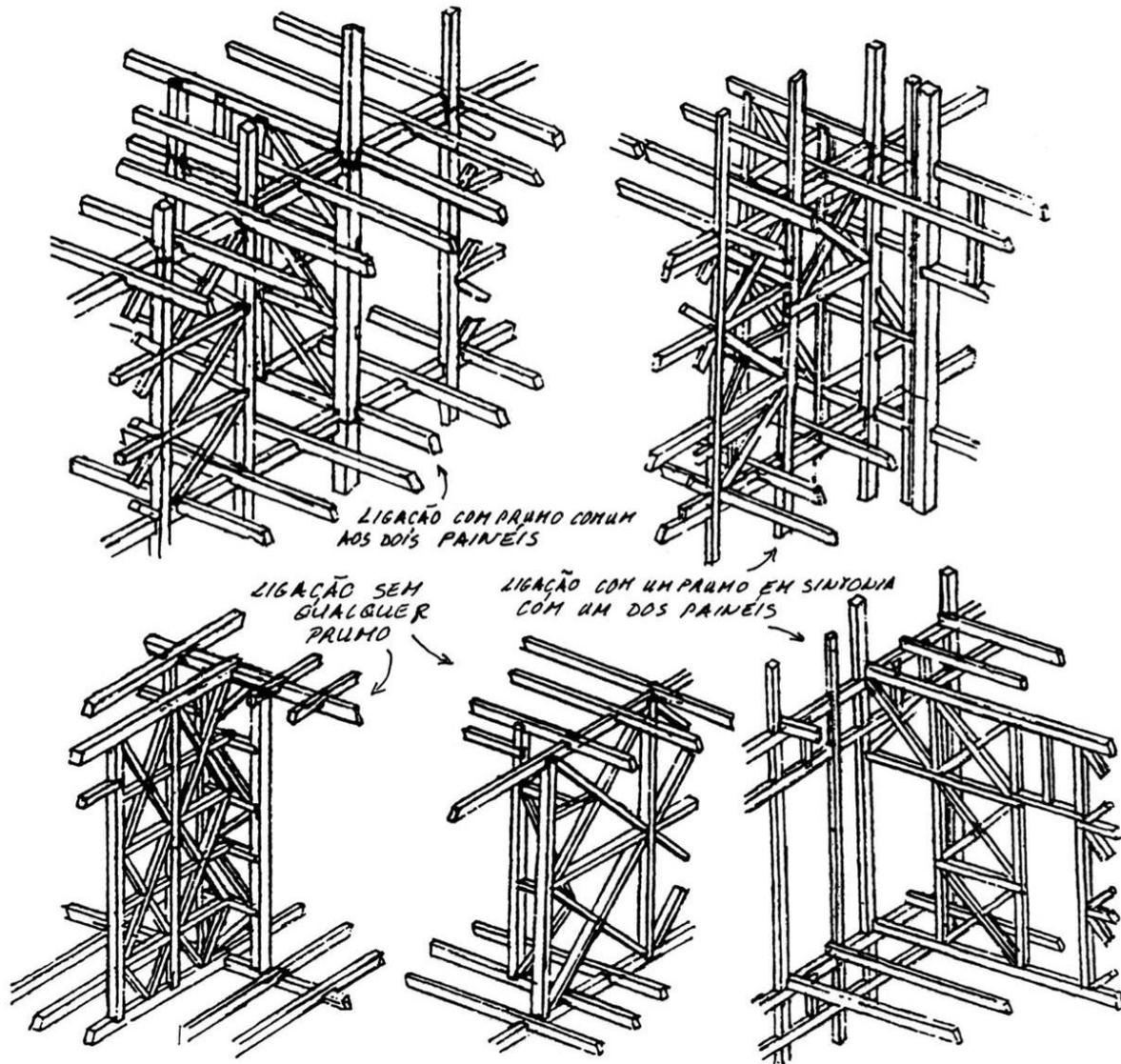


Figura 26. Diferentes tipos de conexão entre painéis (Mascarenhas, 2009).

### 2.3.3 Paredes de Tabique

As paredes de tabique, ou paredes interiores não estruturais, são essencialmente destinadas à divisão de espaços. São paredes com cerca de 10 centímetros de espessura, ligeiras, e sem qualquer tipo de continuidade entre pisos.

O seu posicionamento em planta poderia ser livre. No entanto, por comodidade, estas paredes eram colocadas na prumada umas das outras, evitando o reforço estrutural do pavimento, através de tarugamentos ou do aumento de secção das vigas. A colocação dos tabiques por cima do tabuado do solho não é comum neste sistema. Normalmente o tabique é agarrado ao vigamento do pavimento ainda em tosco, através de um frechal de reduzidas dimensões, travando-o lateralmente à restante estrutura da gaiola (Santos, 1989).

Apesar de serem meramente divisórias, estas paredes ajudam a suportar alguma carga vertical e também a distribuir as cargas horizontais para a estrutura do edifício em caso de sismo. A sua utilidade na construção não pode ser desprezada (Figura 27).

Eram constituídas por peças de madeira colocadas na vertical, denominadas costaneiras (O), afastadas um centímetro entre si, pregadas a dois elementos horizontais, as régua (Q), uma localizada no sobrado e outra no teto. Por cima das costaneiras aplicava-se um elemento diagonal, as aspás (J), que garantiam a verticalidade dos elementos. Por último, pregava-se na horizontal um fasquiado com secção trapezoidal (P), com intervalo de cerca de 3 centímetros e paralelos entre si. A parede era rebocada e estucada da mesma forma que as outras paredes. Como revestimento adicional eram utilizados azulejos, forros de pedra, madeira ou acabamento a pintura, para realçar a beleza dos interiores.

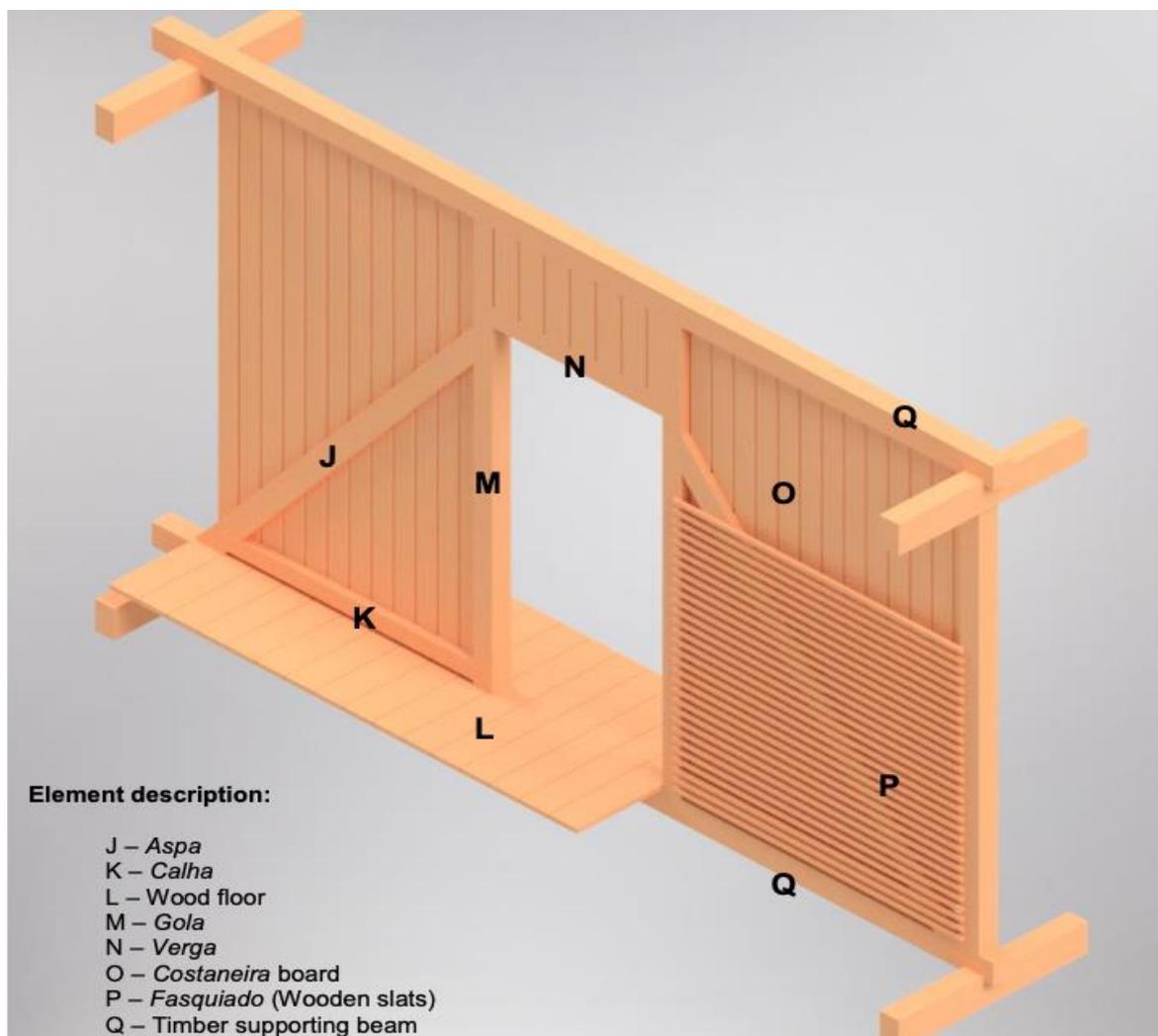


Figura 27. Representação esquemática da estrutura de uma parede de tabique. J- Aspa; K- Calha; L- Pavimento de madeira; M- Gola; N- Verga; O- Costaneiras; P- Fasquiado; Q- Régua (Nunes, 2017).

Apesar da existência de outros tipos de parede de tabique, esta era a mais simples e a aplicada na maioria das construções (tabique simples). Independentemente do tipo de tabique aplicado, os vãos apresentavam sempre prumos e vergas, seguradas por pendurais.

#### **2.3.4 Pavimentos e tetos**

Os pavimentos e tetos apresentam variações de andar para andar. Como já referido anteriormente, o tipo de piso do rés-do-chão, varia consoante a utilização deste espaço. Se fosse destinado a comércio, o piso era composto por uma laje de pedras irregulares e de grandes dimensões. Caso tivesse a finalidade de cavalaria, como acontecia na maioria dos edifícios de ruas secundárias, o piso era revestido por calçada grada ou mesmo terra (Santos, 1989).

Os tetos do rés-do-chão também são muito distintos dos tetos dos pisos superiores. Neste caso, os tetos são em alvenaria de pedra ou tijolo, compostos por arcos ou abóbadas, revestidos por um reboco de areia e cal. Sabe-se que esta solução foi adotada não só por garantir maior segurança e melhor distribuição das cargas, mas também, porque permitia que os elementos de madeira existissem apenas a partir do primeiro piso, ou seja, em caso de subida das águas, a estrutura de madeira não se deteriorava.

A partir do primeiro piso, em perfeita harmonia com a restante estrutura da gaiola pombalina, desenvolvem-se pavimentos em madeira, o elemento que interconecta todos os restantes elementos da estrutura, e é responsável pela transmissão das cargas laterais para a restante estrutura. São constituídos por vigamentos revestidos na sua parte inferior e superior. Estes elementos apresentam uma secção de 13x18cm, afastadas entre 40 a 60 cm entre si, posicionando-se na horizontal e sempre perpendiculares ao plano das fachadas. A sua extensão depende não só do vão a vencer mas, também, do tipo de madeira utilizada. Para estas peças é aplicado, normalmente, o uso de casquinha de sequeiro ou de carvalho (Appleton, 2011).

As vigas assentam nos frechais, através de uma samblagem de meia-madeira, com um pregamento de cima para baixo. Para garantir a horizontalidade dos pavimentos, era necessário que as vigas e os frechais estivessem perfeitamente nivelados entre si. O que torna esta horizontalidade mais difícil de alcançar é o facto das vigas terminarem dentro das paredes de alvenaria, de materiais irregulares, comprometendo por vezes, o nivelamento das vigas. Para inverter este efeito, muitas vezes as vigas são calçadas com palmetas ou fragmentos de alvenaria, garantindo deste modo a sua horizontalidade. A forma como estes elementos garantem uma boa conexão com as paredes de alvenaria é através da utilização de dois tipos de peças metálicas. Um deles é denominado ferrolho de esquadro e o outro ferrolho de chaveta. Ambos são pregados a uma das laterais das vigas. Apresentam-se avançados a estas para garantir um correto embebimento na parede. Note-se que este tipo de conexão não se faz apenas nas paredes de fachada mas também nas empenas (Figura 28). Esta entrega, juntamente com a boa ligação dos elementos do pavimento às paredes circundantes,

confere aos pisos um bom contraventamento e contribui para o bom funcionamento sísmico da gaiola pombalina (Teixeira, 2010).

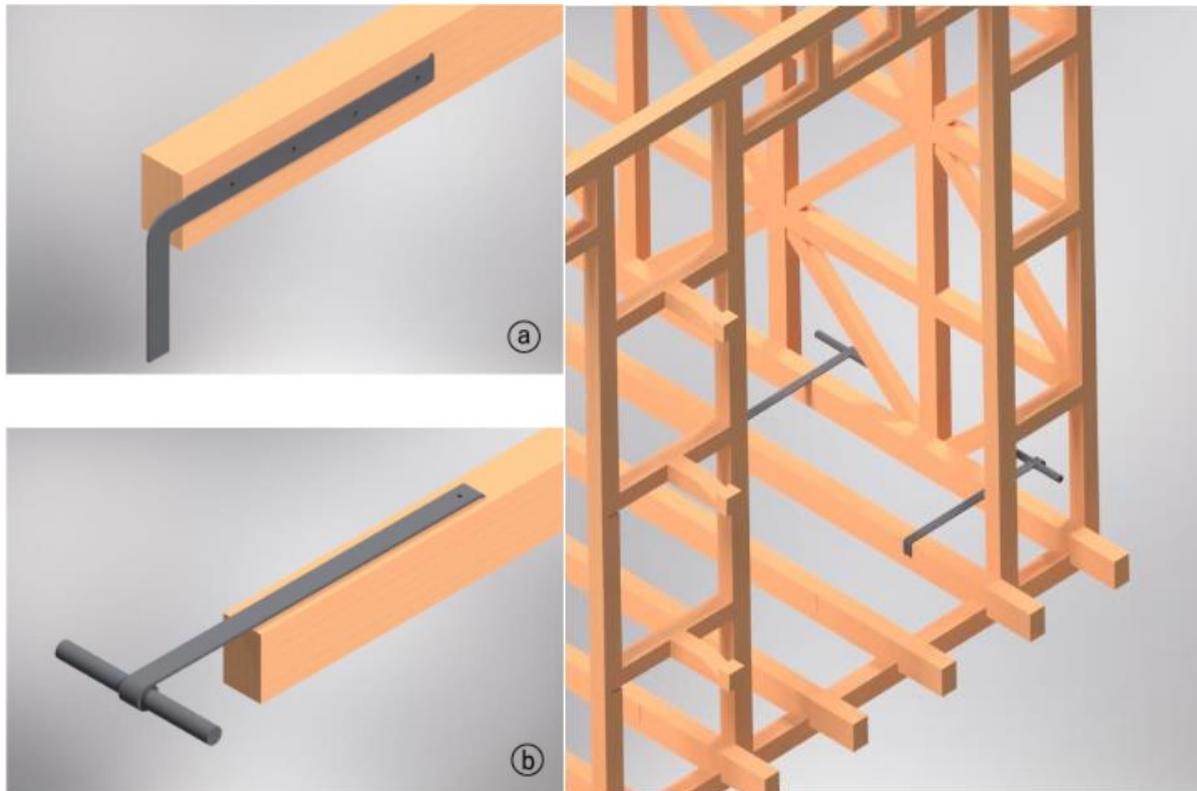


Figura 28. Representação esquemática dos ferros que permitem a conexão entre as vigas de pavimento e as paredes de alvenaria. a) Ferrolho de esquadro; b) ferrolho de chaveta; aplicação do ferrolho de chaveta na estrutura pombalina (dir.) (Nunes, 2017).

Para além do assentamento nos frechais das fachadas e entrega nas paredes de alvenaria, estas também assentavam nos frechais das paredes de frontal, o que assegurava a ligação do piso a todas as paredes e ainda ajudava a manter a viga completamente reta, com menos probabilidade de curvar verticalmente.

Para garantir o paralelismo das vigas aplicam-se, em certos pontos, peças de madeira denominadas tarugos. Estes apresentam um comprimento igual ao espaçamento entre as vigas e são aplicados transversalmente a estas, impedindo os esforços de torção. A sua fixação é feita por pressão, de cima para baixo, e assegurada por um entalhe do tipo orelha derrabada.

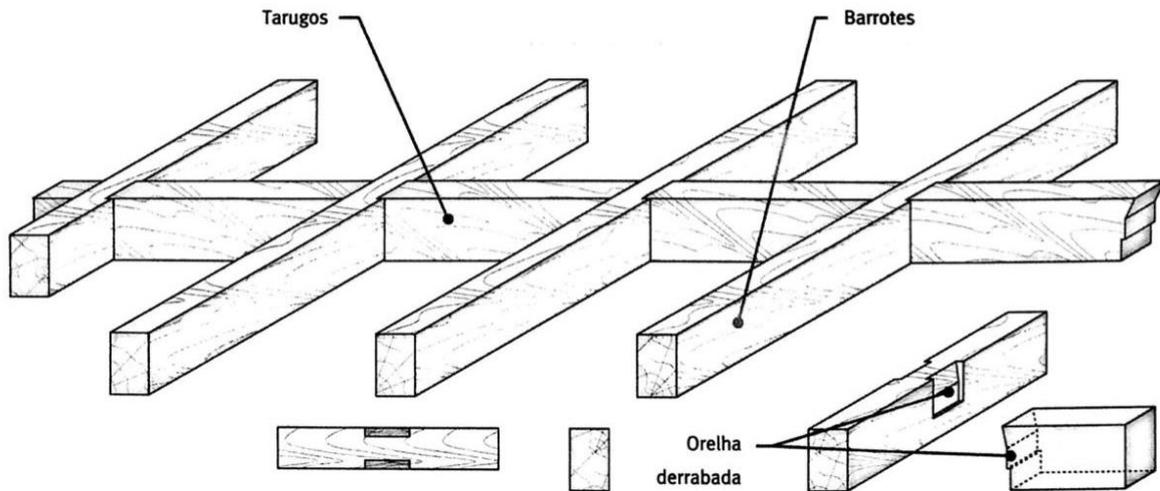


Figura 29. Travamento entre as vigas de pavimento com tarugos, ligados às vigas por um entalho do tipo “orelha derrabada” (Appleton, 2011).

Nos edifícios mais antigos, com maior qualidade, muitas vezes encontravam-se certos aspetos distintos relativamente aos restantes edifícios. Para além das vigas terem um espaçamento entre si igual à sua largura, também eram encontrados vigamentos contínuos, com o seu comprimento igual à profundidade do edifício. Apesar destas condições serem ideais, pois as vigas corridas garantem o efeito tirante e escora (Appleton, 2011), nem sempre era garantido o comprimento infinito destas peças. Acontecia, frequentemente, ser necessário um remendo entre duas vigas, de forma a que estas dessem continuidade uma à outra sem pôr em causa o bom funcionamento geral da gaiola pombalina, como se percebe na Figura 30.

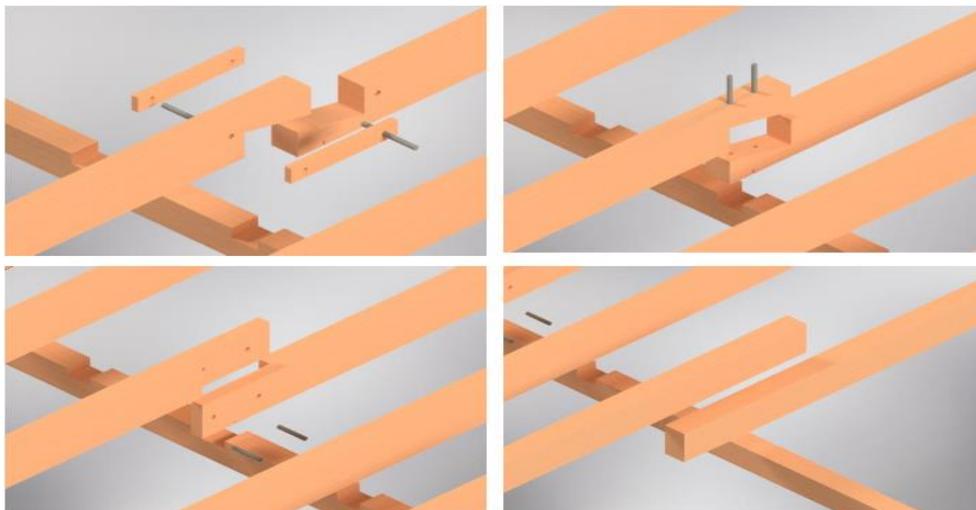


Figura 30. Diferentes formas de associação entre duas vigas de pavimentos contínuas (Nunes, 2017).

Algumas técnicas eram utilizadas para assegurar a boa ligação entre as vigas, como entalhes de madeira ou cortes especiais garantindo um encaixe perfeito entre as peças. Para assegurar uma

forte ligação dos elementos, eram aplicados pregos forjados de ferro, garantindo a correta montagem das vigas.

O revestimento na parte superior das vigas era normalmente em madeira, com tábuas de solho, cuja espessura pode variar entre os 20 e 30 milímetros, com comprimentos, geralmente até aos 22 centímetros. Estas tábuas eram pregadas perpendicularmente ao vigamento, de cima para baixo, com pregos “meio telhado”. As conexões entre tábuas variam, sendo as mais eficazes e mais utilizadas o tipo meia-madeira, conhecido também por soalho à portuguesa (Figura 31), ou o tipo macho-fêmea (soalho à inglesa). Para além destes, também se encontrava, principalmente em espaços de arrumos, uma ligação mais fraca, onde não havia sobreposição das tábuas, eram apenas encostadas topo a topo (Appleton, 2011).

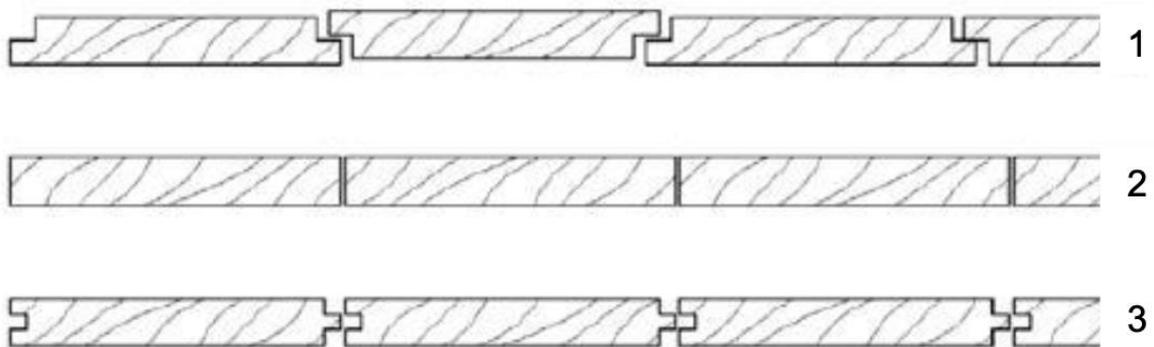


Figura 31. 1- Soalho à portuguesa; 2- Soalho de junta; 3- Soalho à inglesa (Miranda, 2011).

Relativamente aos revestimentos da parte inferior das vigas, ou seja, o equivalente ao teto do piso imediatamente abaixo, (à exceção do piso térreo), poderiam aplicar-se diferentes técnicas. Uma das mais utilizadas era a técnica semelhante à pavimentação do piso, onde, na parte inferior do vigamento e perpendicularmente a este, se pregavam pranchas de madeira com espessura entre os 10 e 20 milímetros, sobrepostas umas às outras, criando um forro do tipo “saia e camisa”. Uma outra técnica frequentemente utilizada era a aplicação de um fasquiado de madeira pregado perpendicularmente ao vigamento, cujos elementos eram afastados cerca de 1 centímetro entre si, onde posteriormente se aplicava o reboco e estuque (camada denominada de “pardo” por se tratar de uma argamassa fraca de cal e areia), dando um acabamento semelhante ao das paredes, como representado na Figura 32 (Appleton, 2011). Nas casas mais nobres, os tetos em estuque poderiam ser trabalhados, de forma a criar relevos e figuras que tornassem o teto esteticamente mais rico.

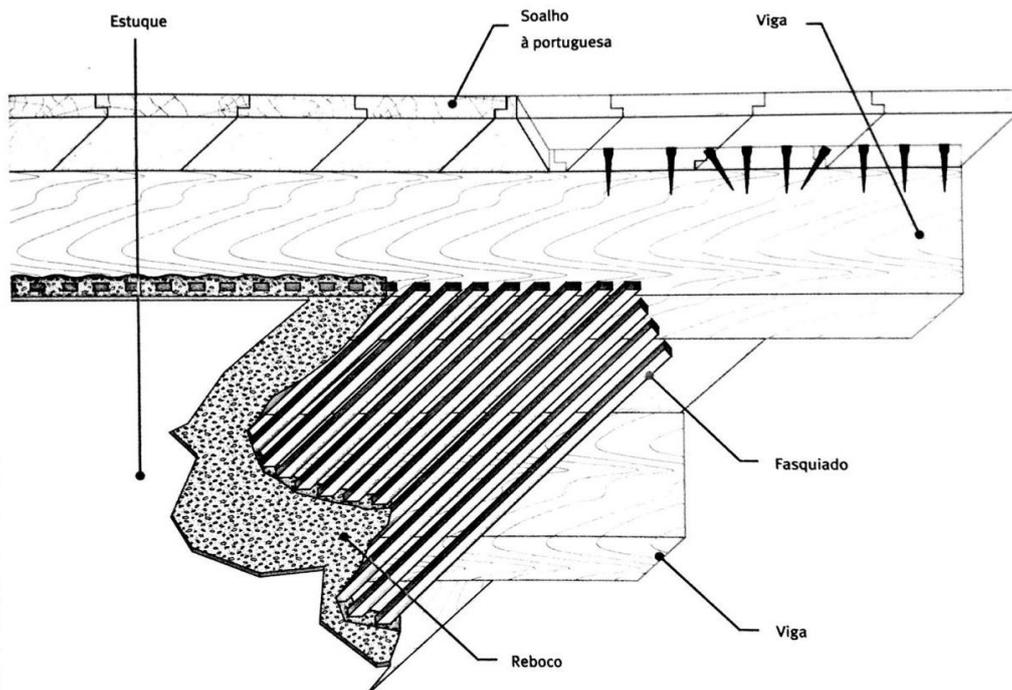


Figura 32. Representação do teto com reboco e estuque sobre o fasquiado pregado às vigas (Appleton, 2011).

### 2.3.5. Escadas

As escadas dos edifícios são geralmente interiores, mas, por uma questão de iluminação, nos edifícios pombalinos, estas constroem-se perto da fachada principal, ou da fachada de tardoz. Tal como os restantes elementos do edifício, também a escadaria se desenvolvia de forma diferente no rés-do-chão. Neste piso, o primeiro e/ou segundo lanço de escadas é feito por alvenaria de pedra e os degraus são, também eles, em pedra, limitados por paredes resistentes de alvenaria. Esta separação entre o tipo de material do piso térreo e os restantes pisos superiores faz-se por uma questão de segurança (Mascarenhas, 2007).

A partir do primeiro piso, o desenvolvimento das escadas faz-se em madeira. A caixa de escadas é composta por três paredes, em que uma delas divide os dois lances de escadas existentes entre andares. Estas paredes apresentam a mesma constituição e elementos das paredes de frontal, nas quais, os espaçamentos entre a estrutura de madeira era também preenchido por alvenaria de pedra ou tijolo. As pernas, elementos diagonais onde assentavam os degraus, eram travadas a um bloco de pedra, que servia não só de lance de arranque mas, também, como garantia do travamento das mesmas.

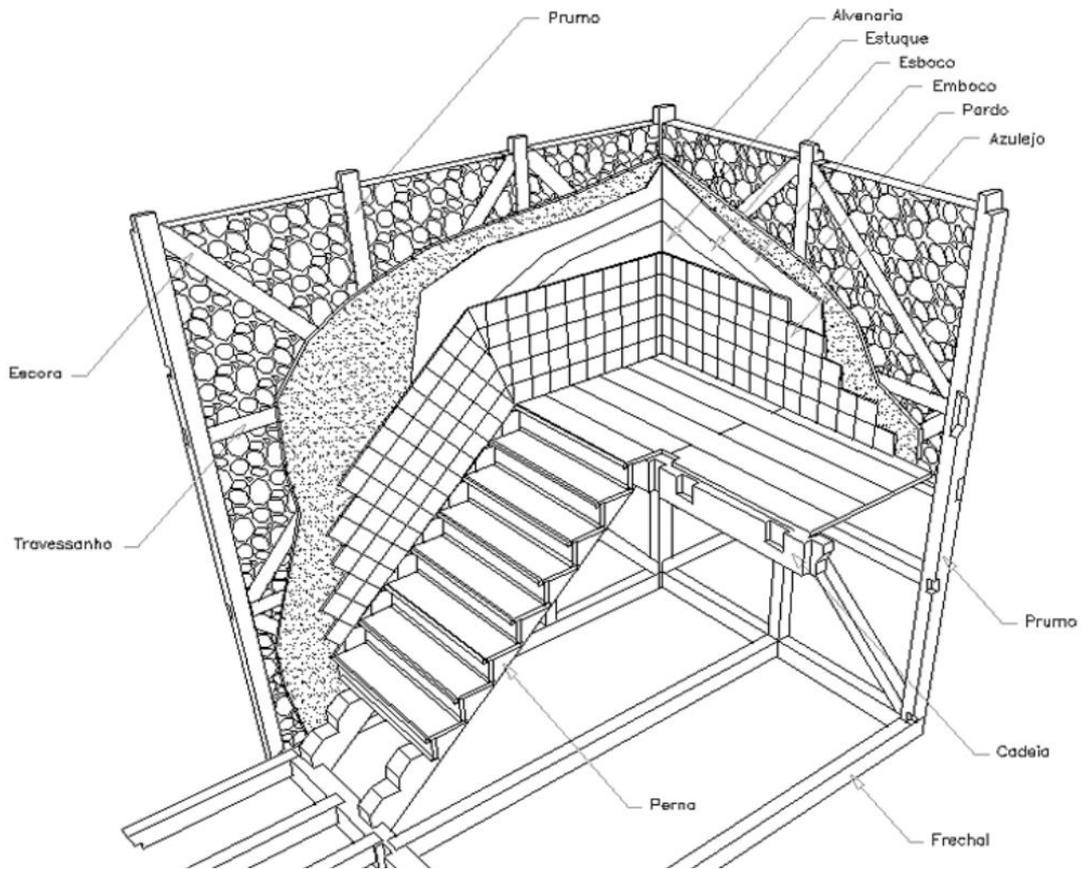


Figura 33. Corte perspectivado de um troço da coluna de acessos (Santos, 1994).

Por cada tramo de escadas, existem normalmente duas pernas. Estas pernas podem ser completamente lisas, nas quais são pregados esquadros onde assentam os cobertores e espelhos, ou podem ser pernas entaladas, permitindo o encaixe direto das peças dos degraus nas mesmas. Os espelhos e cobertores são feitos em madeira maciça.

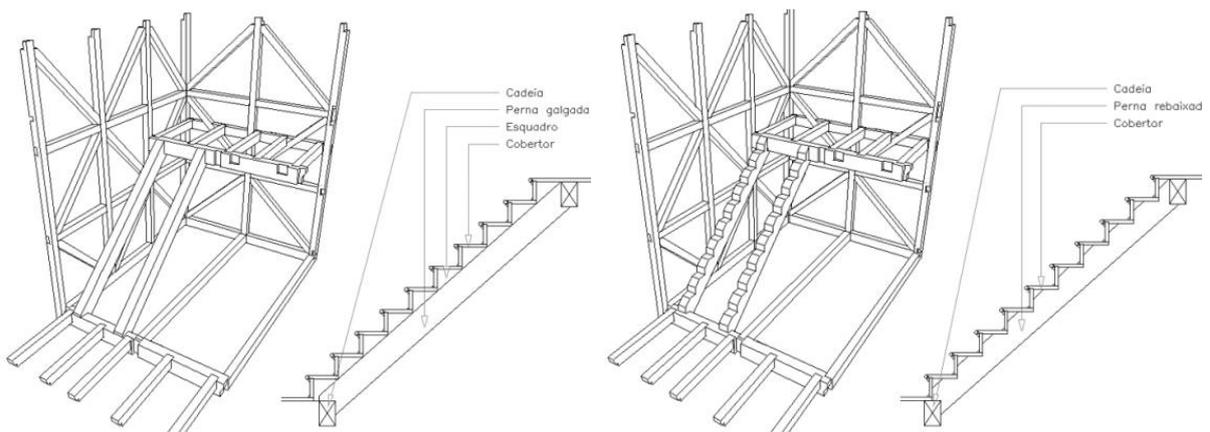


Figura 34. Escada com perna lisa e escada com perna rebaixada, respetivamente (Santos, 1994).

### 2.3.6 Cobertura

O telhado completa a descrição da estrutura da gaiola pombalina. A sua estrutura apresenta uma forma simples, com asnas, madres, varas, fileiras e contrafrechal, que dão apoio às telhas de canudo. Esta estrutura de duas águas apoia-se na estrutura das paredes da fachada principal e tardoz. Apesar dos telhados serem muito semelhantes de edifício para edifício, no sistema pombalino existem dois tipos de cobertura: em mansarda e triangular.

A cobertura em mansarda (Figura 35) permite que este piso do edifício seja completamente habitável, com um pé direito que permite a circulação livre e bom acesso aos vãos, embora tenha uma composição mais complexa que o de estrutura triangular. Mascarenhas (2009) afirma: “Pelo lado da rua o telhado de mansarda permite de uma forma elegante conseguir altura para mais um piso habitável. Do lado do logradouro procurava-se manter esta altura através de uma água com uma pequena inclinação.”

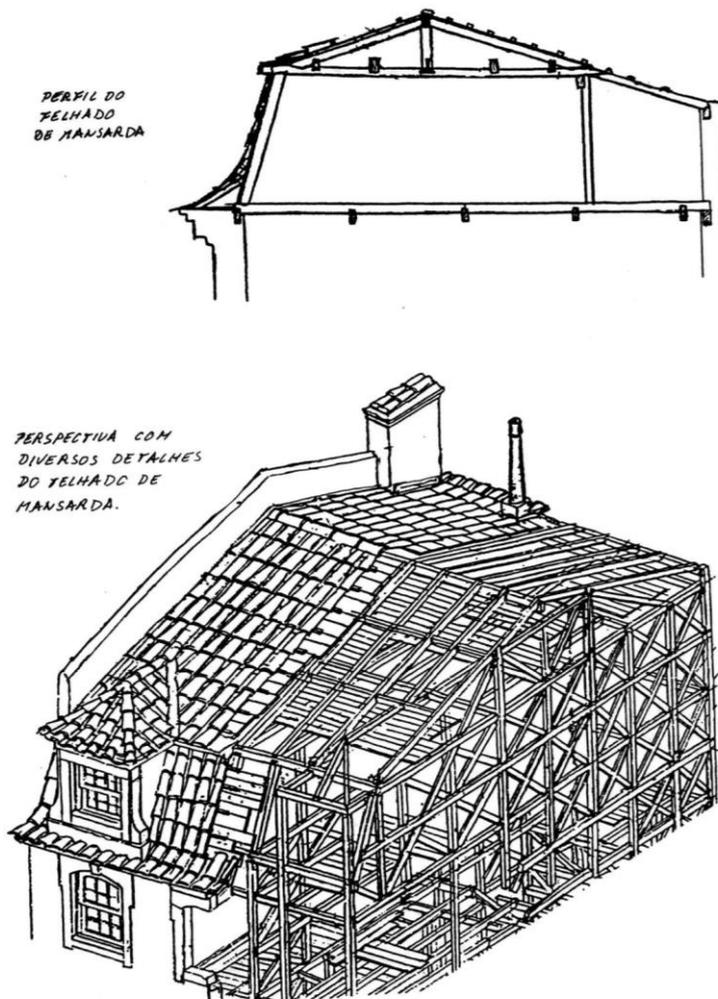


Figura 35. Estrutura de um telhado em mansarda (Mascarenhas, 2009).

A cobertura triangular (Figura 36) é constituída por uma estrutura simples em triângulo, da qual normalmente surgem duas águas simétricas. Os seus constituintes são descritos por Costa (1971) da seguinte forma: “A linha fica sempre em posição horizontal, as pernas assentam-se sobre a linha em posição inclinada para a boa formação das vertentes do telhado, o pendural fica apertado verticalmente no vértice do telhado pelas pernas e as escoras ficam inclinadas, ligando as pernas ao pendural.”

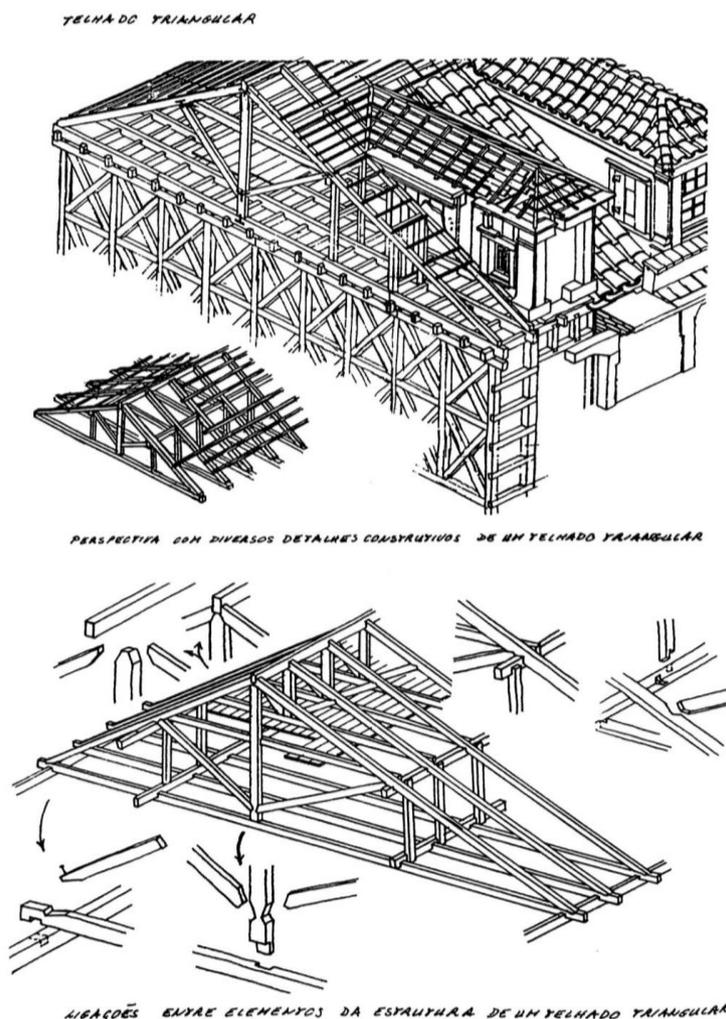


Figura 36. Estrutura de um telhado triangular (Mascarenhas, 2009).

Para além dos elementos das asnas simples mencionados, o telhado em mansarda apresenta elementos denominados pernas de força, responsáveis por conferir a altura a este tipo de cobertura. Estas peças assentam numa linha inferior e na sua parte superior são encaixadas as asnas. As peças são encaixadas por meio de samblagens e reforçadas por elementos metálicos no local dos nós. As samblagens mais utilizadas são as do tipo respiga e mecha (Costa, 1971).

As madres, frechais e fileira são diferentes tipos de viga colocadas em locais específicos das asnas, garantindo a sua estabilidade e conexão. As madres são colocadas a meio das vertentes dos telhados e apoiam sobre as pernas das asnas por meio de calços ou cunhos de madeira pregados à perna. Os frechais são pregados às linhas das asnas em todo o comprimento, ligando as asnas entre

si. A fileira assenta sobre o topo dos pendurais, formando o espigão do telhado e percorrendo também todas as asnas. Há duas formas distintas de realizar o assentamento da fileira: através do seu encaixe sobre uma caixa aberta no pendural ou assentando no topo deste, onde é amparada por abas fixas aos dois elementos.

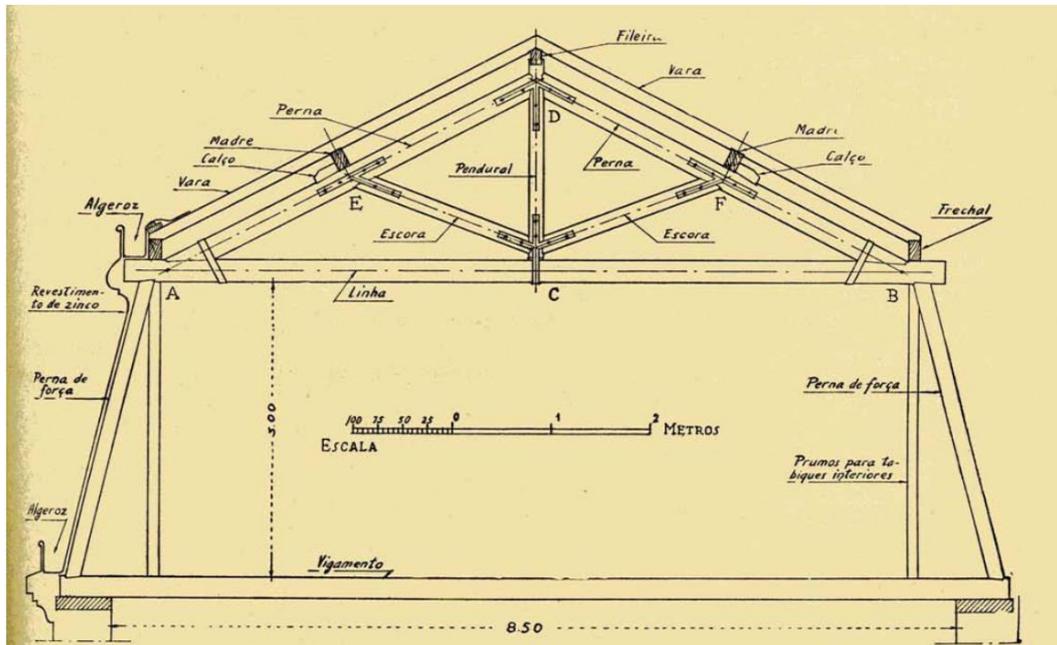


Figura 37. Estrutura de um telhado de mansarda (Costa, 1971).

As telhas de canudo eram colocadas de baixo para cima, isto é, desde o beirado até rematar à cumeeira, sendo o tipo de telhado mais usual o mouriscado. No caso das coberturas amansardadas, devido ao elevado declive do telhado, as telhas eram pregadas às ripas.

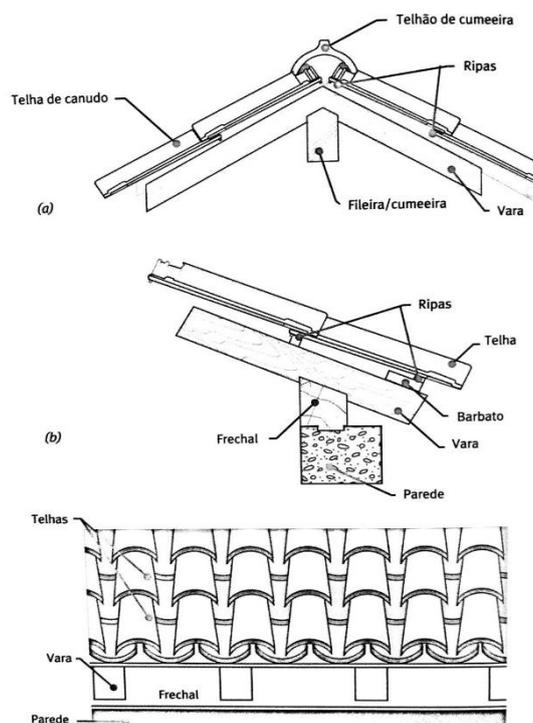


Figura 38. Telhado: a) zona de cumeeira; b) zona do beirado (Appleton, 2011).

Os edifícios pombalinos apresentam dois tipos de cimalha diferente (Figura 39), podendo esta ser de alvenaria de tijolo ou de cantaria. As telhas eram assentes com argamassa na zona do beirado para impedir a sua projeção (Mascarenhas, 2009).

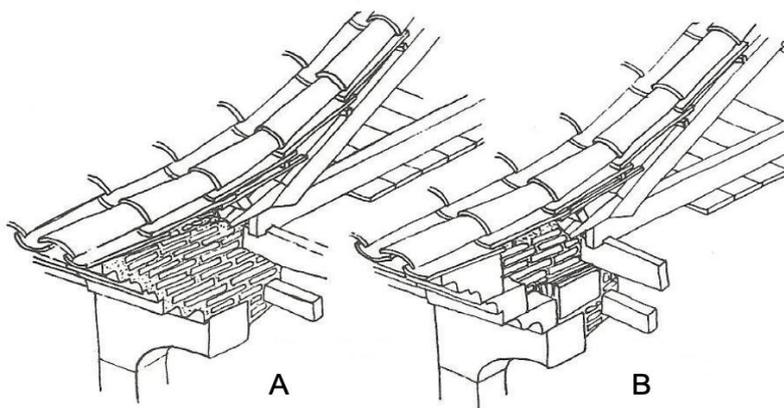


Figura 39. Remate da cimalha: A – cimalha de alvenaria de tijolo; B – cimalha de cantaria (Mascarenhas, 2009).

Em ambos tipos de cobertura é muito comum a existência de trapeiras, visando garantir melhor luminosidade e ventilação a este piso. Estas são rigorosamente alinhadas com as asnas de modo a que as suas paredes laterais fiquem completamente apoiadas nas suas pernas.

### 3.1 Tecnologia digital e Arquitetura

A forma de pensar Arquitetura foi até há pouco tempo diretamente relacionada com a produção de desenhos à mão, fossem estes à mão-livre ou técnicos. As representações bi-dimensionais eram o meio de comunicação corrente entre arquiteto, engenheiro e cliente, por vezes complementada por modelos físicos, produzidos nos mais diversos materiais (e.g., madeiras, balsa, cartões, gesso, barro, etc.), quando a complexidade do projeto assim o exigia. A este propósito será interessante referir o protagonismo de certos modelos físicos da época do Renascimento os quais, podem ser apontados como exemplos de representações técnicas 3D, autênticos “projetos de execução” para a obra, pelo detalhe que comportam. É o caso da maquete da cúpula da Basílica de S. Pedro em Roma (Figura 40) desenvolvida após os desenhos de Antonio Sangallo e, após sua morte, obra retomada por Miguel Ângelo. O modelo com cerca de 5 m de altura permitia aos operários entrar dentro deste para observar o quê e como deveria ser executado.

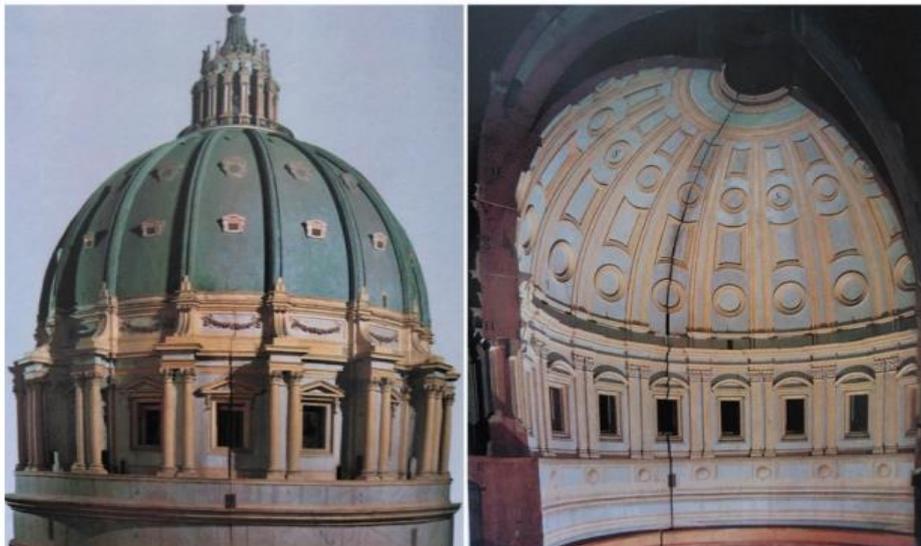


Figura 40. Miguel Ângelo, Giacommodella Porta e Luigi Vantivelli – modelo de parte do tambor da cúpula de S. Pedro de Roma (1558-1561), madeira, 500x400x200 cm, Museu do Vaticano, Vaticano (Hellmann, 1999).

Este modelo em madeira da cúpula de S. Pedro de Roma é um bom exemplo do caráter fortemente comunicativo que estes modelos podiam assumir pela evidência espacial e construtiva que conseguiam transmitir. A fenda explicitamente observada no interior do modelo do tambor (Figura 40, imagem direita) manifestou-se, surpreendentemente, na realidade (Hellmann, 1999). No entanto, estes modelos demoravam anos a ser construídos. A tecnologia digital veio revolucionar a forma como o arquiteto realiza a sua prática ao facilitar o desenvolvimento de representações 2D e 3D dos objetos arquitetónicos. Por outro lado, a possibilidade de criação de projetos formalmente complexos e orgânicos nunca foi tão praticável como atualmente, assim como a possibilidade de garantir uma melhor

compreensão espacial do projeto, seja esta concretizada através de desenhos tridimensionais digitais, seja pela produção cada vez mais eficaz de modelos físicos.

A representação tridimensional, digital e física, permite comunicar de uma forma mais eficaz as proporções, perspectivas e funcionalidades inerentes ao projeto. Esta comunicação é de extrema importância em arquitetura, pois dela depende o sucesso do projeto, isto é, uma eficaz percepção do mesmo permite uma melhor qualidade do produto final, muitas vezes reduzindo tempo de execução e custos (Pupo, 2009).

O processo de desenvolvimento de projeto tem-se vindo a potencializar com novas ferramentas e técnicas, que surgem como complemento às tradicionais. A tecnologia digital tem servido como catalisador de novas ideias (Klinger, 2007). Os novos métodos de trabalho desenvolvidos pelos arquitetos são utilizados não só na produção dos produtos finais, mas, também, no desenvolvimento de maquetes. A prototipagem digital faz parte de uma das novas técnicas de trabalho diretamente relacionadas com preparação e criação dos modelos físicos, da qual faz parte a modelação 3D.

A modelação 3D trata da representação tridimensional digital de um objeto, utilizando um software. Os softwares tornaram-se mais acessíveis a nível prático, ou seja, mais interativos e fáceis de utilizar, conseqüentemente facilitando a modelação tridimensional. A partir do momento em que se elabora um modelo virtual tridimensional, a utilização de tecnologias de prototipagem rápida e CNC (computer numerical control) para a produção de modelos físicos torna-se uma possibilidade. Em suma, é possível a utilização de modelos geométricos digitais diretamente na produção de artefatos físicos, desde maquetes à escala e protótipos em tamanho real até peças finais (Pupo, 2009).

### **3.2 Impressão 3D e ensino**

O método de produção de protótipos por sistemas aditivos (i.e., o modelo é criado por adição de material) designa-se por Prototipagem Rápida (Buswell, 2007). A manufatura aditiva ou impressão 3D é a tecnologia utilizada para o desenvolvimento dos modelos realizados no âmbito desta dissertação. Este método é normalmente apresentado paralelamente às tecnologias CNC, porque ambos representam os novos métodos de produção de modelos tridimensionais.

A tecnologia CNC trata-se de um processo de manufatura subtrativo, onde, através de utilização de controles computarizados, uma máquina realiza a remoção de camadas de um certo material, resultando na peça previamente desenhada com ferramentas CAD (computer-aided design).

Sendo as máquinas CNC de natureza automática, permitem a produção de peças simples com alta precisão e bastante detalhe, apresentam uma boa relação custo-benefício ao cumprir séries de produção de volume médio ou único, porém o grau de complexidade das peças projetadas é limitado e o desperdício de material é variável, mas muito superior ao da prototipagem rápida, uma vez que, quanto maior o desgaste do bloco de material para a obtenção da peça final, maior quantidade de desperdício existe no final (Asato, Kato, Porto, and Inamasu, 2002)

As máquinas CNC que produzem peças tridimensionais funcionam por desbastamento de um bloco de material. Este desbastamento é feito por fresas que se movem de forma automática em diversas direções. A máquina pode ainda apresentar um eixo que movimenta o bloco de material, diminuindo o deslocamento da fresa. Estas fresas podem apresentar de um a seis eixos. Quanto maior o número de eixos que possuem, mais complexa pode ser a peça que é extraída do bloco (Pupo, 2009).

### 3.2.1 Impressão 3D

A prototipagem rápida, ou fabrico aditivo, surgiu como resposta oposta ao já descrito fabrico subtrativo, ou tecnologias CNC. Sinteticamente, trata-se de um método onde, numa base horizontal, se vão depositando camadas de um certo material. A sobreposição das diversas camadas vai-se fazendo até se obter a peça final pretendida.

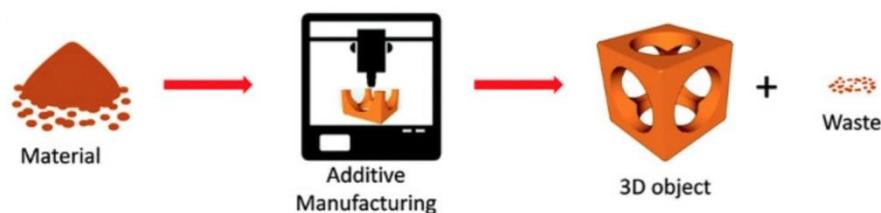


Figura 41. Esquema simplificado do processo dos métodos aditivos (Jamie, 2018).

Existem diversas técnicas e materiais de impressão 3D, mas aqui vai-se explorar uma técnica específica, fused filament fabrication (FFF), a adotada na produção dos modelos de gaiola pombalina desenvolvidos. As impressoras FFF são as mais comuns e as impressoras low-cost podem ser adquiridas facilmente tendo em conta os seus preços acessíveis e boa qualidade de acabamentos.

A tecnologia FFF funciona por fusão e deposição de um material termoplástico, como os polímeros ABS (acrylonitrile butadiene styrene) ou PLA (poliácido láctico), para a criação de peças de design específico. O material apresenta-se em forma de filamento que, ao passar por um bico extrusor quente, é derretido e depositado, por camadas no prato da impressora. A sobreposição de camadas deste material resulta na peça final. O bico de extrusão movimenta-se nos três eixos, X, Y e Z. À medida que o material chega a este bico, derrete e rapidamente solidifica, aderindo assim à base da impressora ou à camada previamente impressa (Santos, 2018).

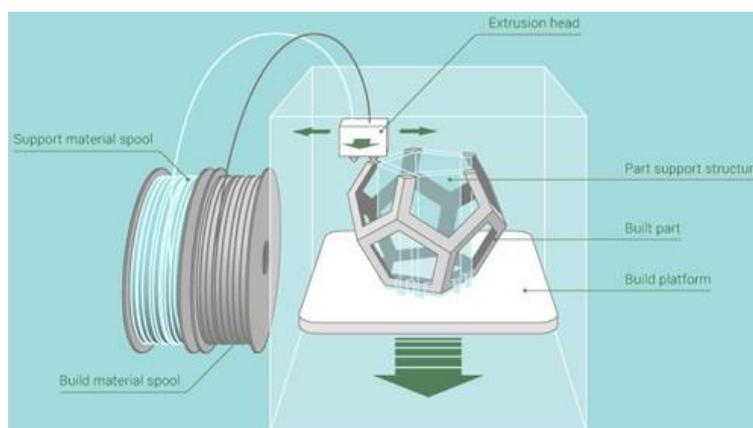


Figura 42. Processo de impressão 3D por modelação de fusão e deposição. Fonte: Boa Impressão 3D (2017).

O processo de passagem do digital para a impressora inicia-se com a conversão do ficheiro CAD para um ficheiro .STL ("Standard Triangle Language" ou "Standard Tessellation Language"). Os ficheiros STL descrevem sómente a geometria da superfície de um objeto tridimensional sem representação de cor, textura ou outros atributos comuns do modelo CAD. Ou seja, transforma os modelos CAD em superfícies definidas por malhas trianguladas. Por sua vez, o STL é lido por um programa que o transforma num formato próprio para ser lido pela impressora. Basicamente, o ficheiro STL é interpretado por camadas sendo transformado em código de máquina. O programa de fatiamento utilizado para este efeito, no caso dos modelos realizados para o presente trabalho, foi o CURA, programa livre da Ultimaker. A leitura dos .STL's neste programa permitiu a sua transformação em ficheiros .gcode, posteriormente enviados para a impressora através de um cartão de memória, podendo esta iniciar a sua leitura e impressão da peça. Por vezes, dependendo da complexidade da peça, esta pode necessitar de suportes para a sua impressão. Nestes casos, o programa CURA, com programação prévia, adiciona automaticamente suportes à peça, também eles impressos, que auxiliam ao correto posicionamento da peça.

De entre as diversas vantagens que a prototipagem rápida oferece estão a alta precisão e detalhe das peças, mesmo sendo elas de pequena escala, produção ilimitada de peças com o mesmo formato e tamanho, bons acabamentos e pouco desperdício de material (Celani e Bertho, 2007). O facto de apresentarem bons acabamentos permite a que a finalização pós-impressão seja menor, i.e., reduzindo a necessidade de mão-de-obra, quer durante a impressão, quer após, pois a peça apresenta-se normalmente em perfeitas condições tal como foi finalizada na impressora 3D.

Por vezes, as peças têm de ser desconstruídas de modo a acomodarem-se na base da impressora e posteriormente montadas. Para além da desconstrução das peças, deve-se encontrar também a posição na qual a peça é mais facilmente impressa, diminuindo o tempo de impressão e gasto de material em suportes.

### **3.2.2 Impressão 3D aplicada ao ensino**

Com a evolução da tecnologia e a sua aplicação cada vez mais frequente em diversas áreas como a indústria e a construção, tornou-se uma preocupação a falta de preparação nesta área dos futuros profissionais. A introdução do ensino de temáticas relacionadas com a impressão 3D tem-se verificado, principalmente a nível internacional, em escolas, universidades e bibliotecas (Ford e Minshall, 2018).

Nas escolas, tem-se vindo a concluir que o desenvolvimento e uso de protótipos físicos criados através da impressão 3D podem ajudar a melhorar a compreensão da ciência e matemática. Por exemplo, escolas secundárias japonesas introduziram o estudo às frequências de áudio através da utilização de apitos impressos em 3D. Também o uso de jogos, como o Minecraft e Kidville, combinados com a impressão tridimensional, introduziu a jovens estudantes conceitos de engenharia e arquitetura, como planeamento de uma cidade (Mahil, 2016).

Já nas universidades a aplicação da impressão 3D é muito mais ampla, podendo ser introduzida em praticamente todos os cursos existentes. Surge através da sua utilização na criação de sistemas, modelos científicos e modelos de teste. A impressão 3D é também utilizada durante a aprendizagem baseada em projetos e introduzidos os métodos para o seu desenvolvimento em disciplinas já existentes ou em novas disciplinas.

A sua aplicação tem-se tornado crescente nos currículos dos cursos de engenharia e ciências, onde se utilizam modelos didáticos criados para complementar o ensino em laboratórios e salas de aula. É cada vez mais utilizada também em cursos relacionados com robótica, representando um método low-cost de produção de robots educacionais. Pode ser facilmente utilizada em cursos que apresentam disciplinas à base do desenvolvimento de projetos, como engenharia mecânica, design industrial, design de produtos, engenharia informática, arquitetura, entre outros (Ford e Minshall, 2018).

### 3.3 Modelos didáticos 3D. Aplicações

Os modelos didáticos são modelos físicos que têm por objetivo auxiliar a prática do ensino. O termo "didático" tem a sua origem na palavra grega "διδάσκειν" (didáskein) a qual significa ensino (Arnold, 2012). Muitas vezes, tanto os alunos como professores, são mais estimulados e mais facilmente motivados quando se apela ao lado prático, em vez de ao teórico. Assim sendo, estes modelos surgem como um complemento, tanto em disciplinas mais práticas, como em disciplinas teóricas, oferecendo uma transmissão de informação mais direta, através do tato e da observação de várias perspetivas. Podem ser aplicados a várias áreas e podem ser modelados e produzidos pelos próprios docentes e alunos (Figura 43), ou podem ser utilizados protótipos de modelos didáticos disponíveis em diversos sítios online (Figura 44).

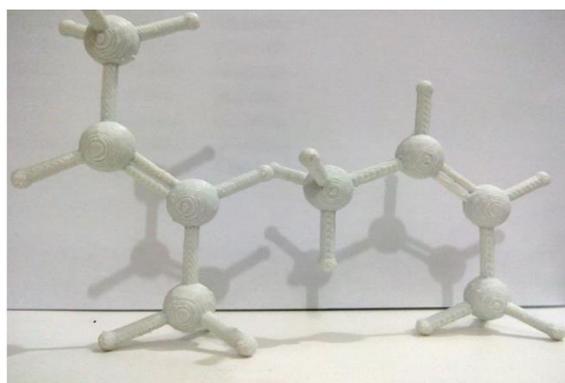
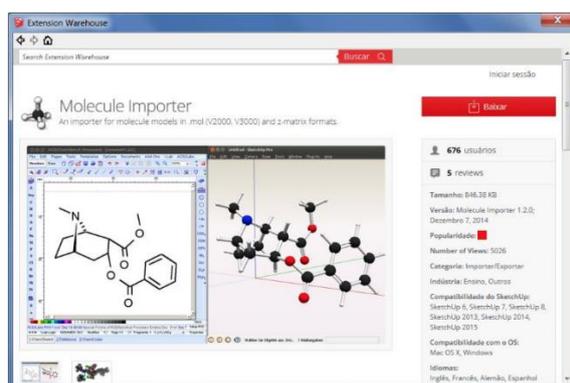


Figura 43. Experiência de modelação de moléculas e sua impressão, realizada por alunos do ensino secundário (Aguiar, 2016).

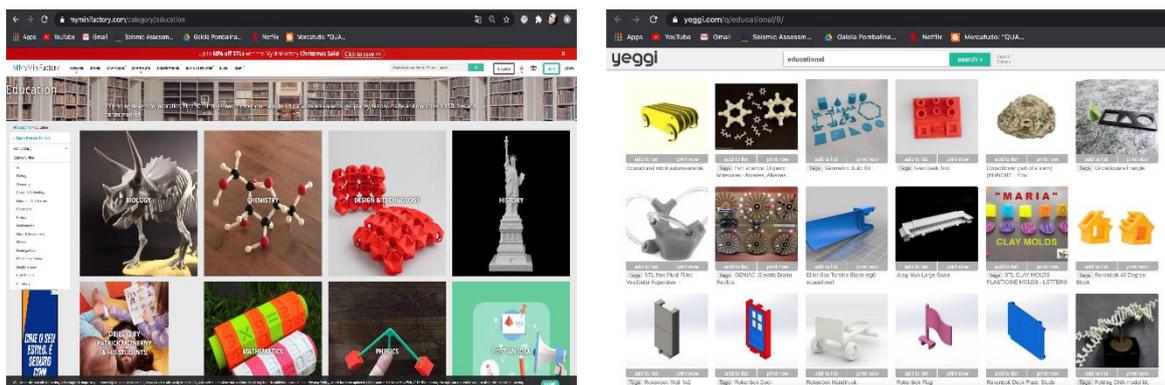


Figura 44. Sítios online dos quais se podem adquirir modelos didáticos focados em várias áreas da educação. MyMiniFactory.com (esq.) e yeggi.com (dir.).

### 3.3.1 As maquetas e o ensino da arquitetura

O modelo físico apresenta um papel de mediador entre o intelecto e o físico, tornando-se a ferramenta de expressão das representações mentais. Hoje em dia, mais do que nunca, o produto final de uma pesquisa arquitetónica pode ir mais além da informação bidimensional.

No ensino da arquitetura, é corrente a utilização de modelos, ou maquetes, associados à disciplina de projeto. Estas maquetes são utilizadas para expor ideias e traduzir o pensamento e desenho do projeto de forma mais direta e compreensível, uma vez que um modelo físico de projeto revela várias vantagens principalmente na transmissão de conceitos como o espaço, os volumes e a luz (Kristiánová, Joklová and Mečiar, 2018). É uma forma de expressão do aluno, a par com os desenhos bidimensionais. Por outro lado, apesar das maquetes serem tão importantes a nível da disciplina de projeto, como método de ensino-aprendizagem, tal não se verifica em outras disciplinas. História, estruturas, reabilitação de edifícios, entre outras, que apresentam uma base mais teórica, não recorrem, por norma, ao uso de modelos didáticos que permitissem demonstrar, de modo mais evidente, conceitos e noções fundamentais a essas disciplinas.

Uma vez que em arquitetura é tão importante ter noção das dimensões e dos espaços, seria importante, na opinião do autor, introduzir modelos didáticos que suscitassem uma transmissão de informação mais direta. É exatamente no sentido de incentivar esta prática nas escolas de arquitetura, que neste trabalho se elaboram modelos didáticos que podem servir de apoio a disciplinas teóricas, como por exemplo em História da Arquitetura ou Estruturas.

### 3.3.2 Modelos didáticos 3D e o ensino do património construído

Como já explicado anteriormente, as novas tecnologias de produção de modelos permitiram à arquitetura criar, mais facilmente, formas menos regulares e mais orgânicas, sendo o processo de transformação do digital para o físico bastante rápido, com menor necessidade de intervenção humana e ainda com bons acabamentos do modelo, que por vezes, nas maquetes feitas à mão, não se verificam.

Devido à existência de edifícios com valor histórico e cultural, é uma prática comum o armazenamento e partilha de informação sobre o passado, presente e possível futuro que o edificado poderá ter. Para isso, e com a evolução da tecnologia, os métodos de aquisição massiva de dados tornaram-se cada vez mais completos e precisos (Centofanti, Brusaporci e Lucchese, 2014). Devido à necessidade de preservação e, por vezes de restauro, do património, informações sobre o seu design, representação, construção, gestão e manutenção tornaram-se imprescindíveis (Attenni, 2019).

Neste contexto, a modelação tridimensional e exploração dos métodos de produção de modelos, não são usados apenas para perceber a intenção e complexidade dos projetos já existentes, mas também para entender quais as evoluções que se podem dar nos casos em estudo (Almerbati, 2016). Um exemplo da evolução que um edifício pode sofrer ao longo do tempo é a Sagrada Família de Antoni Gaudí, localizada em Barcelona. A constante evolução na construção desta catedral foi acompanhando a evolução tecnológica, e hoje em dia os arquitetos responsáveis pela obra recorrem à impressão 3D na criação de modelos os quais lhes permitem permanecer fiéis aos desenhos complexos e originais de Gaudí, fazendo testes de construção rápidos, que diminuem os erros aquando da construção no local rápidos, que diminuem os erros aquando da construção no local (Figura 45) (Goldapple, 2017).



Figura 45. Modelos de testes para a construção da Sagrada Família (Goldapple, 2017).

A representação física pode passar pela apresentação fiel de um edifício específico no seu estado atual, pode também mostrar o edifício original e pode ainda ser a representação do edifício após intervenções de restauro.

A sua natureza material permite a transmissão de informações de uma forma muito mais direta, e, uma vez que se podem fazer modelos do edifício na sua totalidade até modelos de detalhes, o estudo do património torna-se muito mais completo. Toda esta informação permite uma aprendizagem sobre o estado atual do edifício e quais as precauções a ter para a sua conservação, e caso necessário, fazer intervenções de uma forma correta, sem prejudicar a estrutura do mesmo, que é o que muitas vezes não acontece no caso de edifícios pombalinos, como já explicado anteriormente. Assim sendo, a documentação, pesquisa, restauração e reabilitação através do uso de modelos tridimensionais representa uma ajuda eficaz quando se trata da preservação e cuidados a ter aquando das

intervenções no património imóvel. Este método pode ser considerado então uma forma de garantir a sobrevivência da herança cultural, permitindo que esta seja transmitida a gerações futuras (Almerbati, 2016).

Infelizmente, na área da arquitetura não se encontram muitos exemplos de modelos didáticos dedicados ao estudo do património construído. Porém, em áreas como a arqueologia, os modelos por impressão 3D são cada vez mais frequentes, havendo estudos de várias ruínas e de como eram os edifícios correspondentes às mesmas (Figura 46).



Figura 46. Ruínas da Cryptoporticus de Urbs Salvia (esq) (Tintillini, 2020) e modelo 3D da sua reconstrução (dir) (Ribechi, 2015).

**Desenvolvimento de modelos físicos da gaiola pombalina****4.1 Definição de requisitos**

A realização e produção dos modelos físicos apresentados neste capítulo foi uma tarefa faseada, definindo-se, primeiramente, os critérios aos quais os modelos teriam de responder tendo em conta a sua utilidade e objetivo final, e posteriormente realizando-se a modelação tridimensional dos modelos, o planeamento e preparação dos mesmos para impressão, e finalmente a sua impressão e montagem.

Uma vez que os modelos foram pensados para fins didáticos, teve-se em consideração toda a logística necessária para este objetivo, sendo os requisitos principais o tamanho, o seu peso, a transportabilidade e o nível de detalhe dos modelos.

Iniciou-se então o processo de determinação da escala dos modelos, que, direta ou indiretamente, se tornou o fator chave na resposta a todos os requisitos.

A determinação da escala passou principalmente pela consideração do tamanho que o modelo representativo do edifício teria. Havendo imensas variantes relativamente ao comprimento dos edifícios pombalinos, decidiu-se desenvolver um edifício que apresentasse cinco vãos, permitindo assim fazer um modelo da representação tanto da estrutura como do aspeto exterior (simplificado) deste.

Visando a reprodução de um modelo fiel às características originais deste tipo de edifício, apesar da sua variação em comprimento, a altura apresenta-se regular em todos os exemplares originais, apresentando um piso térreo, três pisos aéreos e ainda o piso da cobertura. Assim sendo, o modelo à escala real apresenta cerca de 15 metros de comprimento, 12 de largura e 16 metros de altura. Uma vez definidas e estabilizadas estas medidas, tornou-se possível a concentração no estudo e escolha da escala mais adequada e compatível com o objetivo principal do modelo.

A escala 1:50 foi a considerada mais apropriada. O modelo apresenta cerca de 30 centímetros de comprimento, 24 centímetros de largura e 32 centímetros de altura, tornando-se um modelo que possibilita a sua fácil deslocação e manuseamento. É uma escala que possibilita observar a generalidade da estrutura e compreensão da mesma. Não admite detalhes de encaixes, mas permite que as peças apresentem uma dimensão que motiva a leitura geral da estrutura, bem como a interação entre a mesma e o restante edifício.

A escala 1:100 foi descartada porque o modelo tomaria dimensões demasiado reduzidas e a sua leitura tornar-se-ia confusa, já que as peças que compõem a estrutura têm muita informação que seria perdida nesta escala, uma vez que se tornaria necessária a sua simplificação máxima.

A escala 1:25 descartou-se também de imediato, porque, apesar de poder apresentar uma complexidade maior no que toca à estrutura, as suas dimensões seriam demasiado grandes para se tornar um modelo facilmente transportável.

Tornou-se então preferível criar um modelo completo do edifício, à escala 1:50, complementado por modelos de detalhe específicos, mostrando certos pontos do desenvolvimento da estrutura de forma pormenorizada.

A escala dos modelos de detalhe também foi ponderada e decidida tendo em conta, principalmente, o tamanho que estes tomariam. A escala 1:10 foi a adotada para este efeito porque proporciona a compreensão dos encaixes, essenciais numa estrutura semelhante à apresentada, permitindo a criação de modelos desmontáveis. Permite ainda mostrar detalhadamente como são resolvidos certos aspetos da conexão entre a estrutura e os outros elementos do edifício.

Os modelos de detalhe desenvolvidos foram: 1) um detalhe de parede de frontal, que permite compreender as diferentes conexões entre as peças que o formam; 2) um detalhe que mostra o desenvolvimento das escadas e como estas se interligam com os frontais que as rodeiam; 3) um detalhe de como se resolve o encaixe do telhado e as suas peças com a parede de fachada; 4) e ainda um detalhe das estacas de fundação, que não estão, de todo, representadas no modelo 1:50.

Assim, o conjunto dos diversos modelos às diferentes escalas e a sua leitura como um todo é o que permite a compreensão total e global da estrutura.

Um outro aspeto tido em conta foi o material com que os modelos foram produzidos. A impressão 3D dispõe de uma variedade de materiais cada vez mais ampla. No entanto, decidiu-se utilizar um dos materiais de impressão mais correntes, o PLA (poliácido láctico). É um material bastante leve e resistente, de custo acessível, garantindo uma leveza associada aos modelos, muito importante tendo em conta a sua finalidade. Em modo de exemplo, o modelo completo, de maiores dimensões, à escala 1:50, pesa apenas cerca de 2 quilogramas.

Também se teve em consideração a cor com que os modelos foram desenvolvidos uma vez que a sua expressão final é relevante para uma boa comunicação. Uma vez que o seu objetivo é destacar a estrutura da gaiola pombalina, sentiu-se a necessidade de adotar diferentes cores para dar destaque à estrutura da gaiola pombalina, principalmente no modelo 1:50, já que este representa numa metade a estrutura e na outra metade o aspeto final do edifício. Assim sendo, a cor utilizada na generalidade dos modelos foi o branco, mas no modelo 1:50, todos os elementos correspondentes à estrutura foram feitos em cor castanha, cor escolhida por estar associada à cor da madeira e por ser harmoniosa com o branco. As diferentes cores que foram experimentadas e adotadas permitiram um resultado mais expressivo, dando destaque à estrutura principal.

Assim sendo, a escala e o tipo de material adotados nos modelos tornaram-se essenciais para que estes respondessem da forma mais correta possível aos requisitos. A sua leveza e escala relacionam-se diretamente com o peso e tamanho do modelo, dos quais depende o seu transporte. O nível de detalhe de cada modelo depende, obviamente, também da escala. O estabelecimento destes requisitos e especificidades permitiram o avanço para a seguinte fase, a modelação.

## 4.2 Desenvolvimento dos modelos digitais

Posteriormente ao estudo aprofundado das partes pertencentes à gaiola pombalina, descritas no capítulo 2, iniciou-se a construção virtual dos modelos. Todo o desenvolvimento virtual foi realizado em ambiente AutoCAD® da Autodesk. A fase inicial passou pela exploração das estratégias de modelação mais adequadas aos objetivos do trabalho.

Todas as peças desenvolvidas resultam de um processo de desenho semelhante. No geral, o perfil das peças foi desenhado a duas dimensões e posteriormente extrudido, resultando num sólido. Os encaixes e vazios presentes em cada elemento resultaram da aplicação de operações booleanas, como a subtração, união e interseção entre os diferentes volumes.

### 4.2.1 Modelo à escala 1:50

O primeiro objeto desenhado foi uma parede de frontal. A elaboração deste elemento permitiu o entendimento de como toda a gaiola pombalina se conecta. Apesar de se ter chegado à conclusão que as peças para este modelo não apresentariam os encaixes entre si porque isso não teria leitura no mesmo, esta parede de frontal foi originalmente pensada com todos os seus encaixes (Figura 47) e só à posteriori é que estes foram suprimidos para efeitos de impressão (Figura 48).

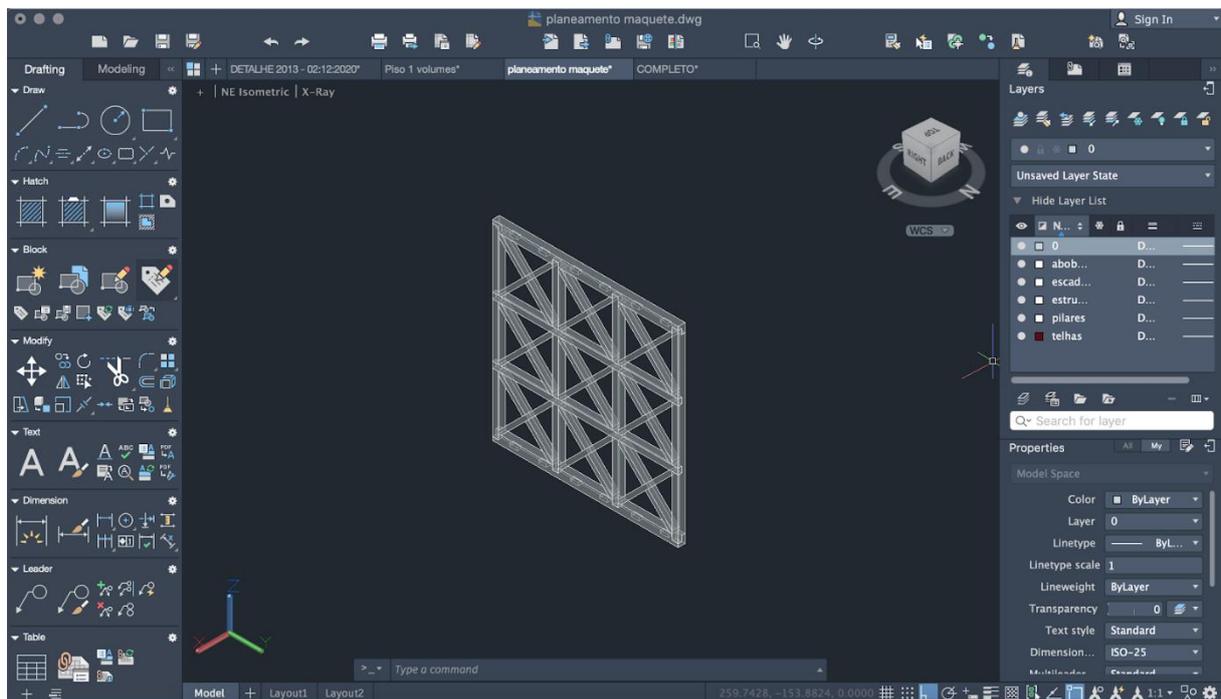


Figura 47. Parede de frontal elaborada com os encaixes entre as suas peças.

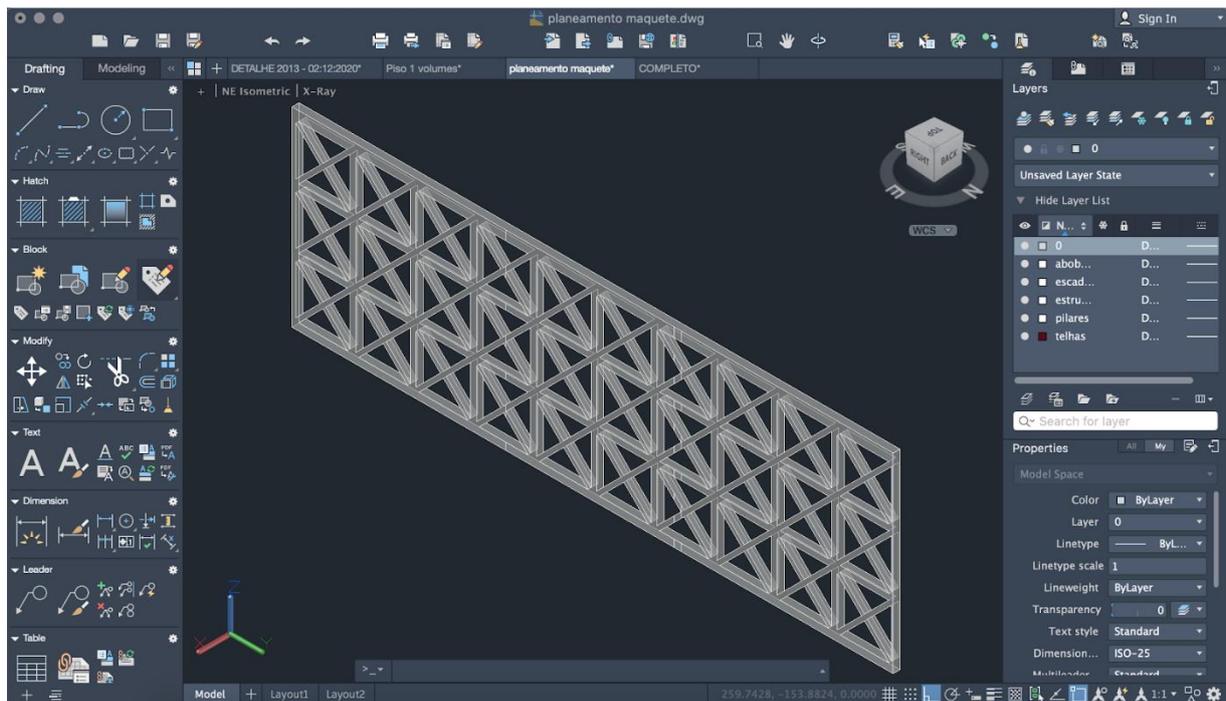


Figura 48. Estrutura de parede de frontal sem os encaixes, peça única.

A elaboração da peça de frontal iniciou o pensamento sobre a estrutura completa do primeiro piso, e dos restantes pisos aéreos (réplicas do primeiro). Assim sendo, o desenvolvimento da planta destes pisos e onde seriam colocadas as suas paredes interiores foi feita com base no estudo de edifícios pombalinos tipo, não representando um edifício em específico.

Criou-se uma planta cujas escadas de acesso se encontram ao centro, encostadas à fachada tardoz, onde cada piso se divide em dois fogos, simétricos entre si. Enquanto que, de um lado do modelo foram criadas as paredes apenas com os elementos estruturais, do outro lado foram representadas as paredes “acabadas”, dando o aspeto de metade do modelo totalmente construído e a outra metade mostrando apenas o esqueleto.

Como se apresenta na Figura 50, o lado direito mostra uma estrutura na qual se realiza a interligação entre as diversas paredes, e o lado esquerdo corresponde à simplificação do aspeto das paredes já rebocadas e estucadas. Em ambos os lados, a presença de vãos é notória, quer nas fachadas (janelas), quer nas paredes interiores (portas).

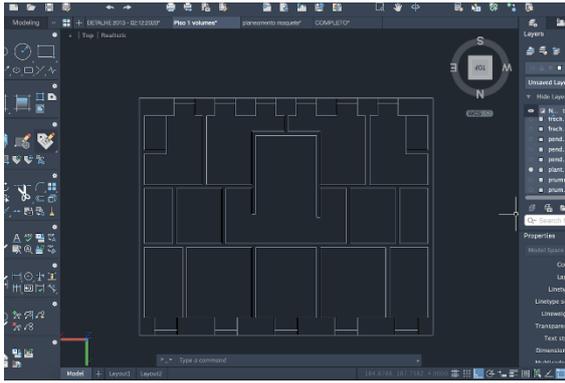


Figura 49. Planta do modelo desenvolvido.

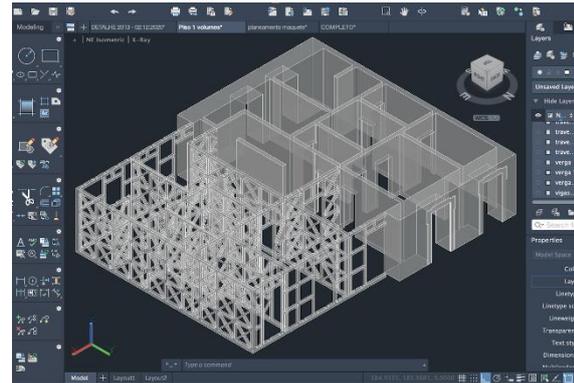


Figura 50. Perspetiva do desenvolvimento das paredes.

De seguida, integraram-se as vigas de pavimento, que assentam e atravessam os painéis de frontal, e o soalho, faltando apenas o desenvolvimento das escadas para completar o desenho do primeiro piso. A estrutura das escadas, devido à escala do modelo, foi muito simplificada. Daí, ter sido necessária a criação de um modelo de escala aproximada que permitisse entender como as escadas se desenvolviam, explicado no seguinte subcapítulo. No presente modelo a caixa de escadas é composta apenas pelos degraus e patamar de descanso, que se desenvolvem em redor de uma parede com aspeto finalizado, como se pode observar na Figura 51.

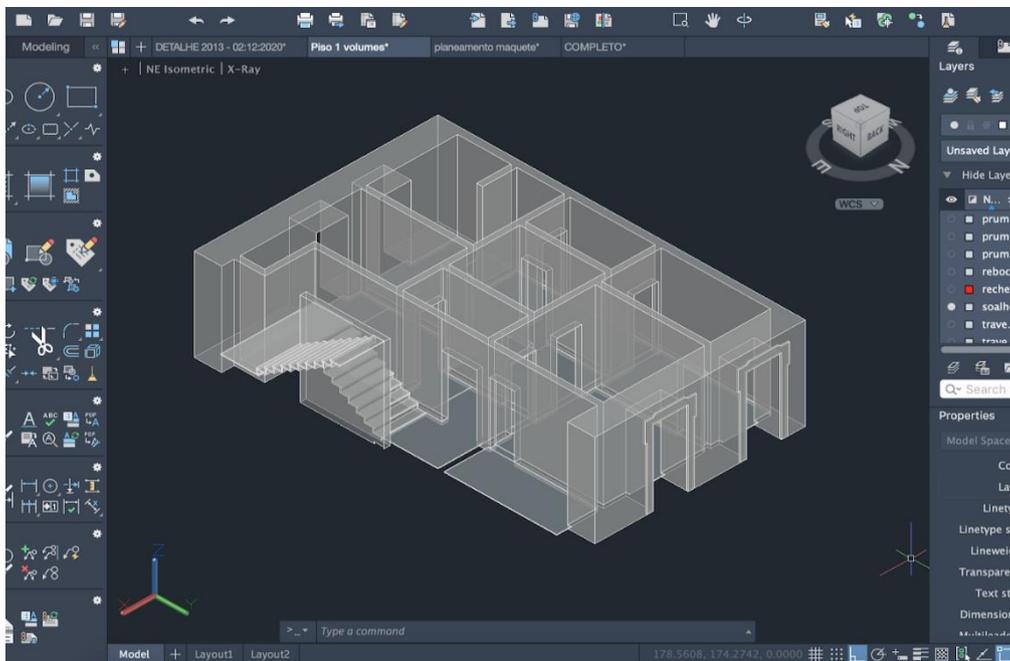


Figura 51. Integração da caixa de escadas no modelo.

Com a modelação do primeiro piso terminada, e sendo os dois pisos acima uma réplica do já criado, bastava copiar todos os elementos e colocá-los imediatamente por cima do já elaborado, resultando assim num modelo já com os três pisos aéreos completos. A única diferença notória e

importante de ser representada neste modelo respeita aos vãos: no primeiro piso, a fachada principal apresenta vãos de sacada, enquanto os outros apresentam vãos de peito.

O processo de modelação tridimensional destes pisos foi relativamente demorado, porque, e como já mencionado anteriormente, apesar de apresentarem muitos elementos repetidos e vários volumes regulares de carácter relativamente simples, dada a complexidade geral do modelo, foi necessário planear a sua modelação em função do processo de impressão. Com a aquisição de capacidades e processo de aprendizagem associados à elaboração destes pisos, surgiu também uma maior capacidade para a resolução de questões associadas à irregularidade de certos elementos do piso térreo e do piso de cobertura.

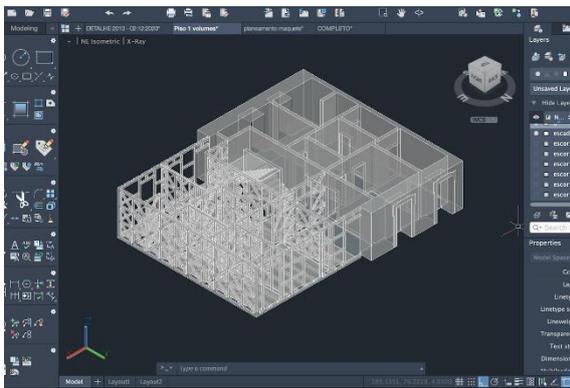


Figura 52. Modelação completa do primeiro piso.

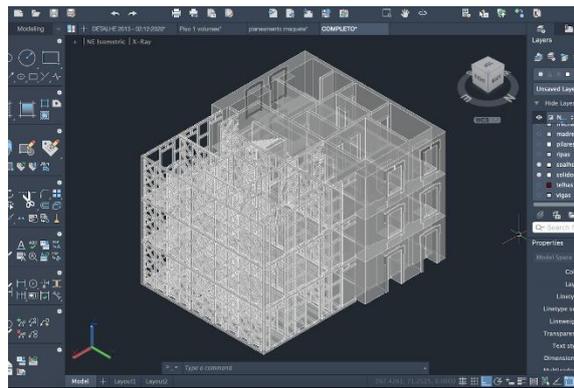


Figura 53. Modelação completa dos três pisos aéreos.

Uma vez terminados os pisos aéreos, seguiu-se a modelação do piso térreo. Este piso é composto por um conjunto de abóbadas de berço quadripartidas e por pilares, sendo o seu interior um espaço amplo. As paredes que completam este piso são apenas as paredes das fachadas e empenas e as paredes de acesso à caixa de escadas.

A modelação das abóbadas, tendo elas um formato muito mais complexo comparativamente com todas as peças desenvolvidas até ao momento, foi estudada e ponderada previamente, para além de terem sido necessárias várias tentativas até conseguir produzir as abóbadas de uma forma correta.

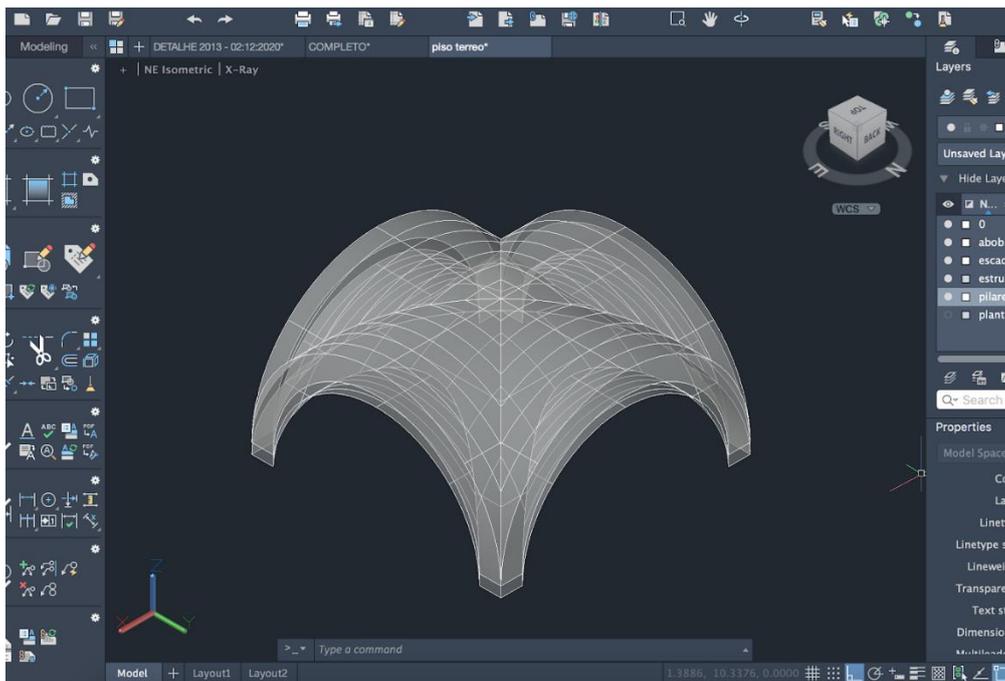


Figura 54. Modelação de uma abóbada de berço quadripartida.

Após chegar ao formato final das abóbadas, prosseguiu-se a modelação dos pilares que suportam a superfície abobadada, bem como as paredes de apoio à caixa de escadas e as respetivas escadas. Tal como nos pisos desenvolvidos anteriormente, também neste há a separação entre a parte do modelo que mostra a estrutura e a parte que mostra o edifício finalizado. Esta separação permite a observação de como a estrutura pombalina apoia na estrutura abobadada. Uma laje é modelada sobre a parte superior das abóbadas, criando uma superfície regular na qual apoia a estrutura. O piso térreo fica assim pronto para suportar os pisos já descritos anteriormente, faltando apenas a cobertura.

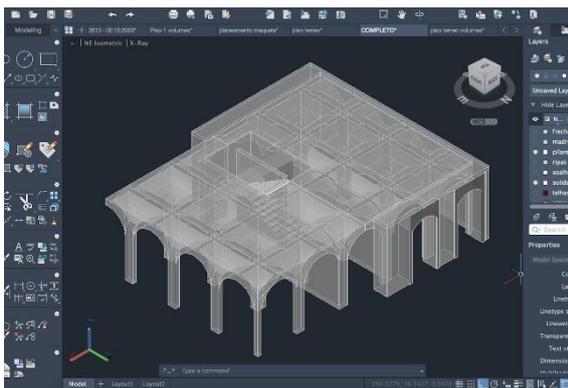


Figura 55. Modelação do piso térreo completo.

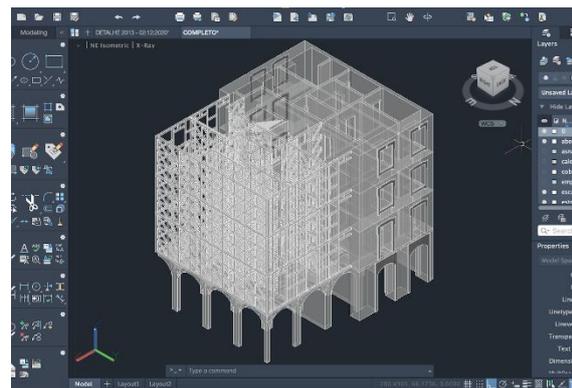


Figura 56. Modelação completa do piso térreo e pisos aéreos.

O processo de modelação do telhado foi também complexo, não por ter elementos de modelação complicada, mas por ter muitas peças das quais a estabilidade do mesmo depende. As

asnas foram o primeiro elemento modelado, tendo-se seguido o vigamento que estabelece a conexão entre estas, bem como as madres e fileiras.

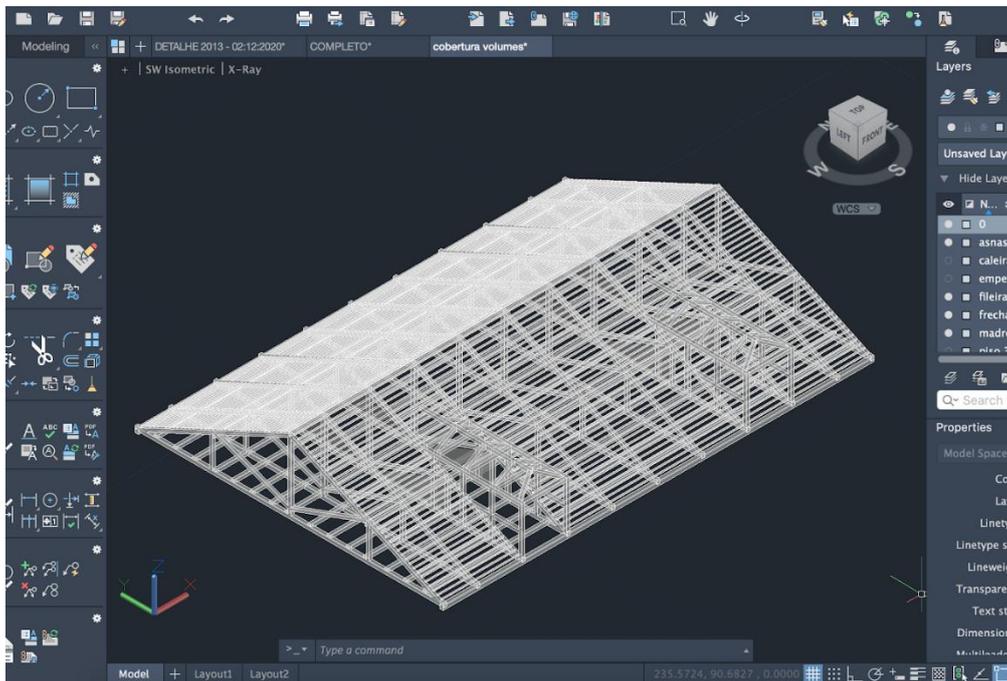


Figura 57. Estrutura completa da cobertura.

Seguidamente deu-se início ao desenvolvimento das mansardas, elementos característicos dos edifícios pombalinos. A cornija e as telhas desenharam-se por último. As telhas apresentam um aspeto simplificado, não tendo sido elaboradas uma a uma, mas como uma superfície texturada, simulando um telhado. A conclusão da modelação deste piso termina a fase de desenho tridimensional do modelo à escala 1:50. Uma vez completo, o planeamento da impressão do modelo físico pôde ser elaborado.

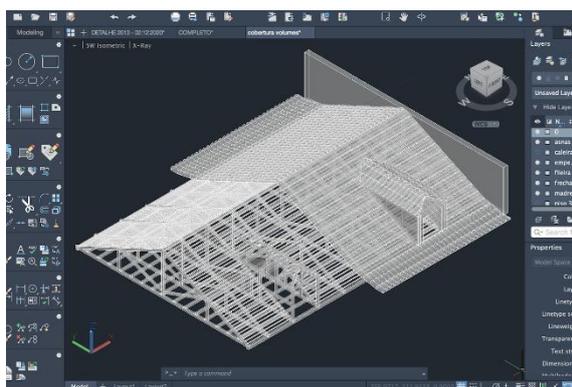


Figura 58. Modelação do piso de cobertura completo.

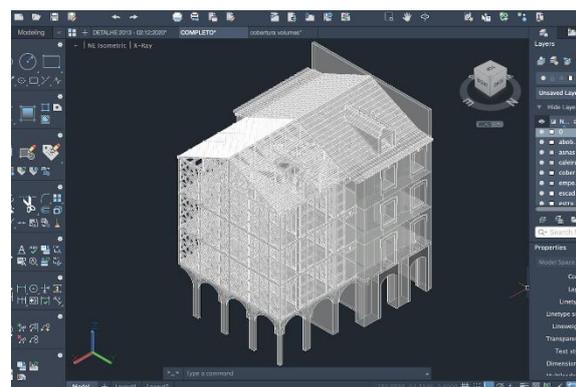


Figura 59. Modelação completa do edifício pombalino correspondente ao modelo à escala 1:50.

#### 4.2.2 Modelos à escala 1:10

Os modelos à escala 1:10 foram criados como complemento ao modelo à escala 1:50, i.e., são modelos de detalhes considerados importantes cuja representação não é viável no modelo de maior redução. A análise deste conjunto de modelos é que permite a compreensão global e completa da estrutura da gaiola pombalina e da sua relação com os restantes elementos de um edifício pombalino.

Assim sendo, os detalhes destacados, como já dito anteriormente, são:

- Detalhe da estrutura de uma parede de frontal;
- Detalhe do desenvolvimento da caixa de escadas;
- Detalhe da estrutura do telhado e sua relação com o beirado;
- Detalhe das estacas de fundação.

Para o desenvolvimento das peças adotou-se, também, o método de desenho da peça em perfil e, posteriormente, a sua extrusão. A diferença é que para estes modelos, cada elemento tinha de ser pensado como elemento único, ao contrário do já descrito, em que as peças eram simplificadas e pensadas como um todo.

Neste sentido, a parede de frontal apresenta os elementos típicos, e cada um foi desenhado individualmente, com os encaixes entre as peças presentes. Não se modelou uma estrutura simplificada mas sim os vários elementos que levam à criação dessa estrutura. Neste detalhe são apresentados os prumos, os frechais, os travessanhos e as escoras, bem como as vigas de pavimento. São representados também os enchimentos do interior da estrutura, para conferir um aspeto mais realista ao modelo. Os restantes detalhes apresentam a mesma lógica de modelação, ou seja, todos os elementos foram desenhados individualmente para se poder simular a sua montagem após a impressão.

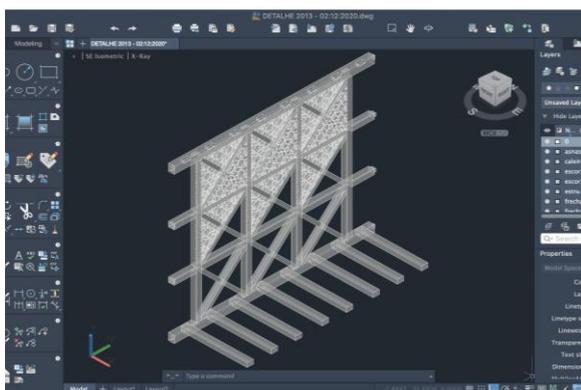


Figura 60. Modelação completa do detalhe de frontal.

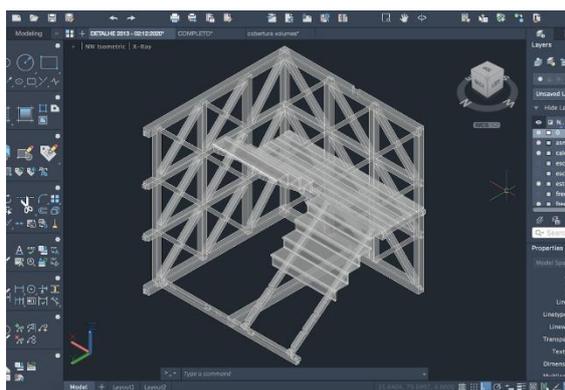


Figura 61. Modelação completa do detalhe da caixa de escadas.

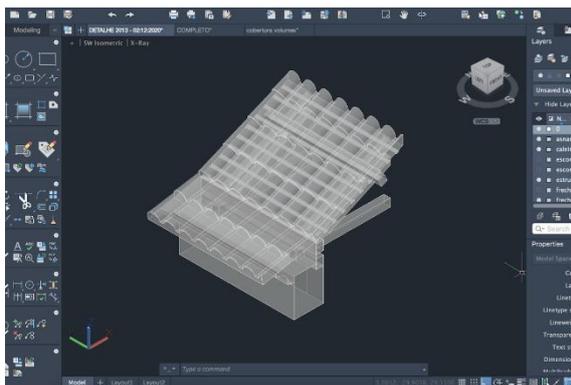


Figura 62. Modelação completa do detalhe da cobertura.

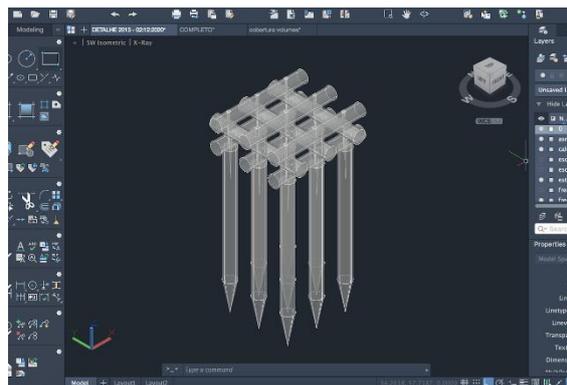


Figura 63. Modelação completa do detalhe das estacas de fundação.

### 4.3 Planeamento da impressão dos modelos físicos

O planeamento dos modelos físicos foi pensado durante a modelação tridimensional dos modelos e realizado imediatamente após o final da modelação, para que se tornasse possível passar para a fase final, a impressão. Este processo é muito importante porque dele depende se a impressão das peças é bem ou mal sucedida. Um planeamento pouco pensado pode levar a dificuldades na impressão, que levam a erros e conseqüentemente gasto desnecessário de tempo.

Para a concretização do planeamento de todas as peças foi necessário entender como é a impressora funcionava e quais os melhores métodos para que as peças demorassem o menor tempo possível a serem impressas.

A primeira decisão tomada no planeamento do modelo físico foi a divisão do mesmo em duas partes, a parte da estrutura e a parte do edifício finalizado, bem como a impressão separada dos pisos.

No modelo à escala 1:50, as grandes peças sólidas, que representam o edifício pombalino, poderiam ser impressas tal como foram modeladas, piso a piso, com suportes mínimos (criados pela própria impressora) nos vazios dos vãos. Como são sólidos de grandes dimensões, com bastante altura (cerca de 6 centímetros), decidiu-se imprimir cada piso individualmente, quer o piso térreo, quer os pisos aéreos (Figura 64). Esta decisão não passa apenas pela consideração das dimensões das peças, mas também, caso se decidisse imprimir os quatro pisos como uma peça única, a impressão seria demasiado longa, e caso ocorressem erros perder-se-ia muito mais tempo, comparativamente à impressão de pisos individuais (Figura 65).

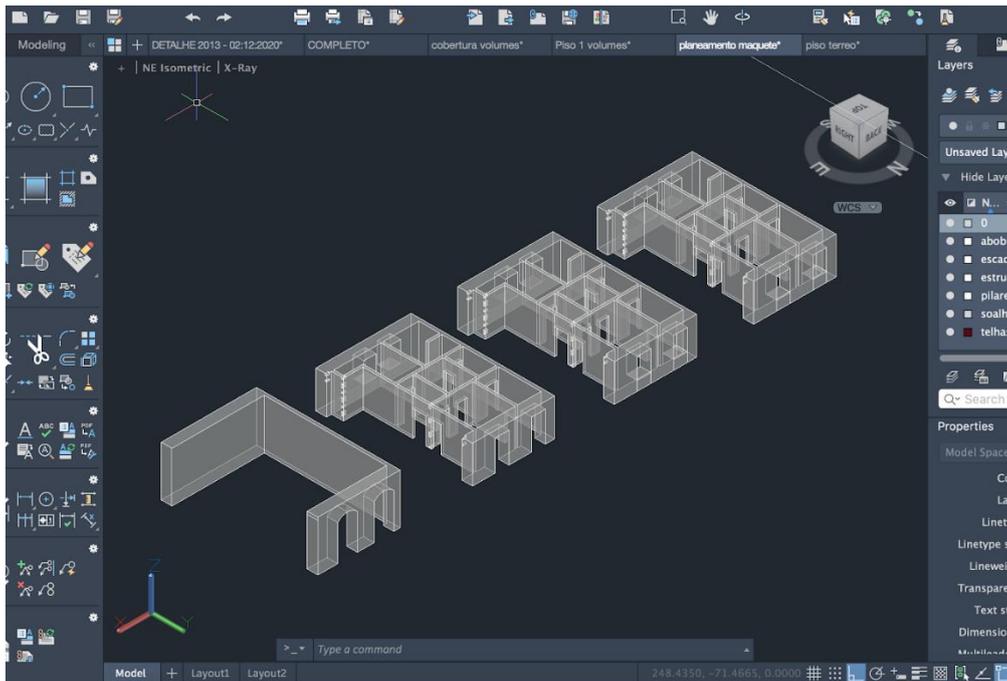


Figura 64. Planejamento dos elementos representativos do edifício.

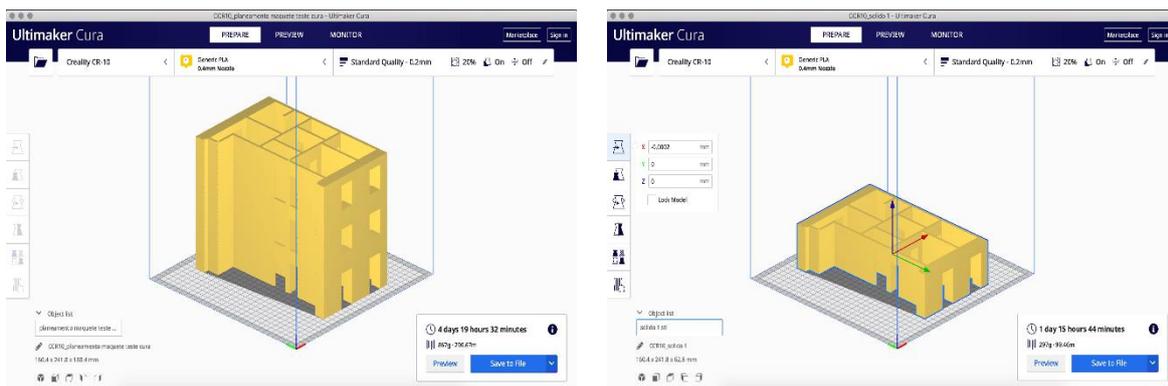


Figura 65. Simulação da impressão dos três pisos aéreos como um todo (4dias, 19horas e 32minutos) (esq.) vs Simulação da impressão do primeiro piso aéreo como uma peça (1dia, 15horas e 44minutos) (dir.).

Já os elementos representativos da estrutura em gaiola pombalina tiveram de ser desconstruídos, i.e., para uma mais eficaz impressão, separaram-se os painéis e colocaram-se no plano xy (como demonstra a Figura 66), para que não fossem necessários quaisquer tipos de apoio aquando da sua impressão, diminuindo significativamente o tempo que demorariam a ser impressos (Figura 67).

A cada painel foi atribuído um número, para tornar o processo de montagem mais facilitado. Ainda, no sentido de tornar as peças o mais resistente possível, tomou-se a decisão de unir as peças verticalmente, ou seja, em vez de se imprimir cada painel correspondente a um piso, uniram-se os mesmos painéis na vertical, fazendo com que a peça apresentasse os três pisos, observação que também se faz notar na imagem imediatamente abaixo. Esta união é possível porque o volume de

trabalho da impressora (30(L)x30(C)x40(Alt)cm) é suficiente para que a peça constituída pelos três pisos seja impressa como uma só. Esta união de pisos numa peça única torna-se uma vantagem para a consolidação do modelo, uma vez que, com esta solução, apenas se tem de utilizar cola entre os diferentes painéis, e não entre os mesmos painéis dos diferentes pisos.

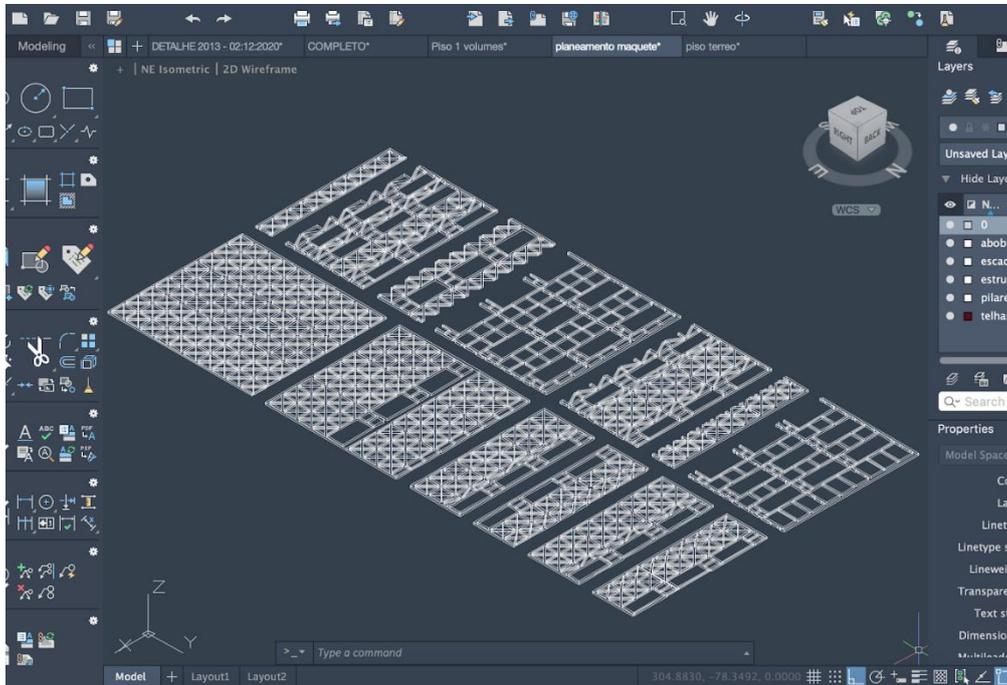


Figura 66. Planeamento da impressão dos painéis da estrutura da gaiola pombalina.

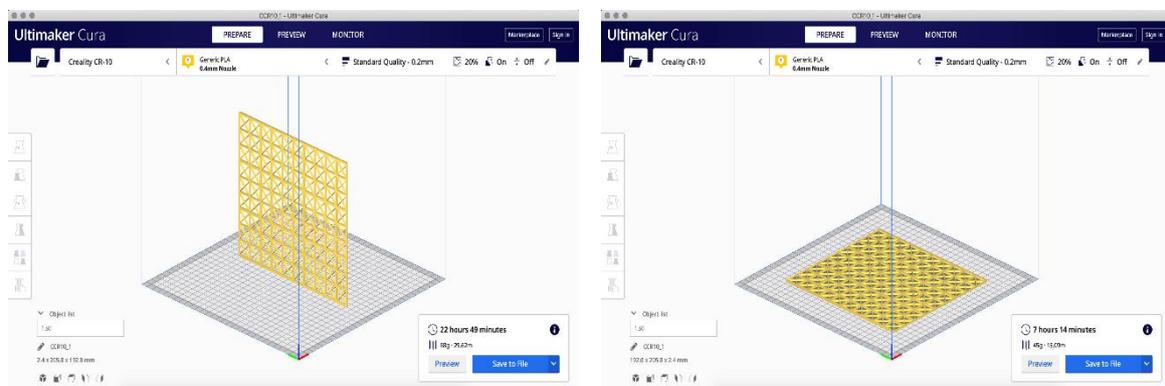


Figura 67. Simulação da impressão de uma peça da estrutura na vertical (22horas e 49minutos) (esq.) vs Simulação da impressão da mesma peça na horizontal (7horas e 14minutos) (dir.).

O mesmo processo foi feito para as peças do telhado. Foram todas separadas e preparadas no plano “xy” para mais facilmente serem impressas, como representado na Figura 68. Estes elementos, após a impressão, seriam montados e colados uns aos outros e aos elementos da estrutura e do edifício do piso imediatamente abaixo.

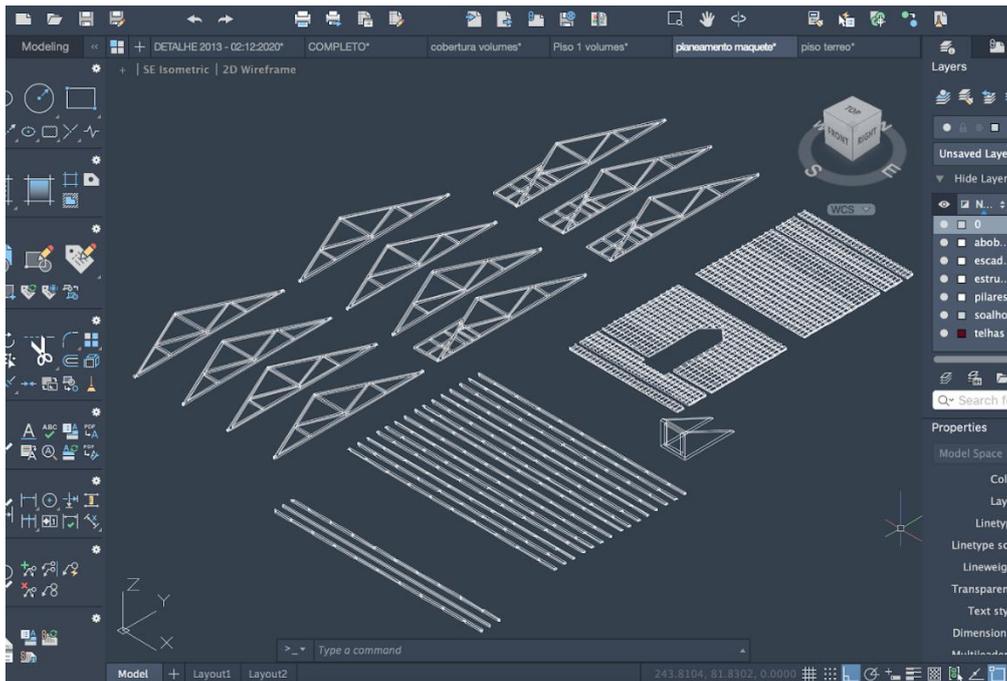


Figura 68. Planeamento dos elementos do telhado.

Relativamente à estrutura abobadada do piso térreo, tendo em conta a sua complexidade, o método que facilitaria a sua impressão seria inverter a peça, ficando a laje regular virada para baixo, e os pilares para cima como se observa na Figura 69. Deste modo evitam-se suportes, bem como um tempo maior de impressão (Figura 70). Como esta superfície se desenvolve em toda a extensão do piso térreo, teve de ser dividida em dois pois a sua dimensão supera o volume de trabalho da impressora.

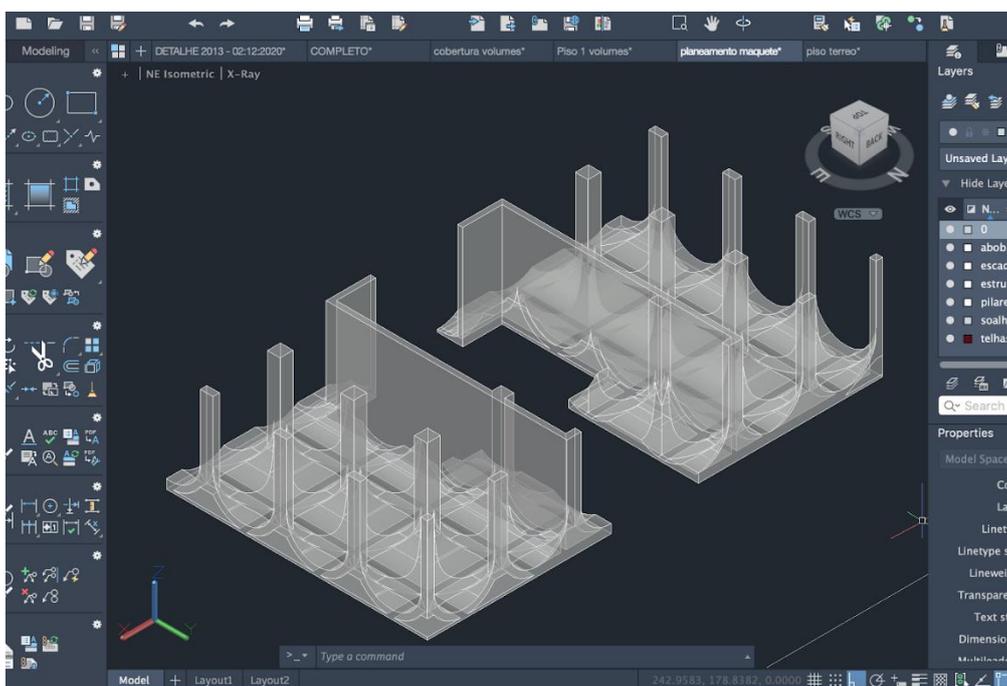


Figura 69. Planeamento das peças do piso térreo.

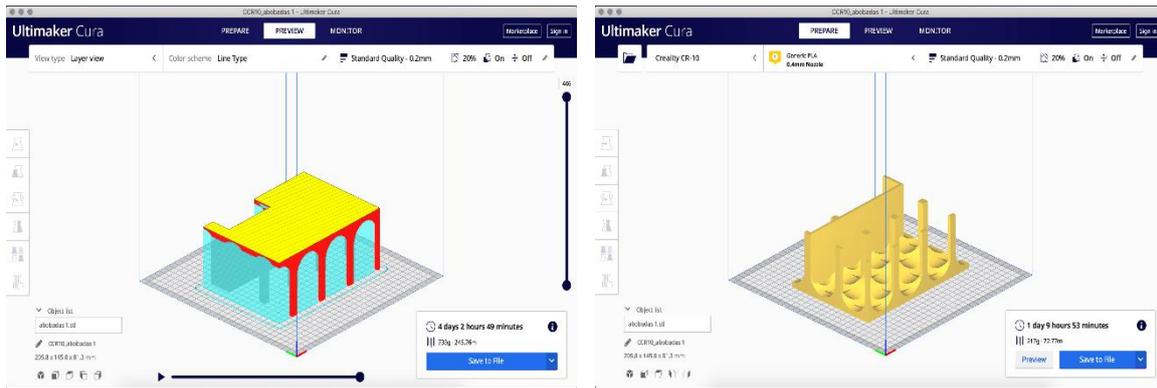


Figura 70. Simulação da impressão de parte da superfície abobadada na sua posição original, necessitando de suportes (a azul ciano),(4dias, 02horas e 49minutos) (esq.) vs Simulação da impressão da mesma peça como previsto no planeamento, sem necessidade de suportes (1dia, 09horas e 53minutos) (dir.).

Para completar o planeamento do modelo à escala 1:50, faltam apenas as escadas e detalhes como as cantarias dos vãos e a cornija do beiral. As escadas formam uma peça única, incluindo todos os pisos, mas para aumentar a facilidade da sua impressão, a parede em cujo redor as escadas se desenvolvem dividiu-se a meio de forma a ser utilizada como base para a impressão das escadas, sendo a colagem das duas metades da parede feita após a impressão, para resultarem como peça única (Figura 71). Mais uma vez, esta opção decorre da necessidade de facilitar o processo de impressão (Figura 73). As cantarias dos vãos e as cornijas apresentam a mesma lógica de planeamento que a maioria dos elementos, ou seja, foram rodadas de modo a assentarem no plano xy com a maior superfície possível (Figura 72).

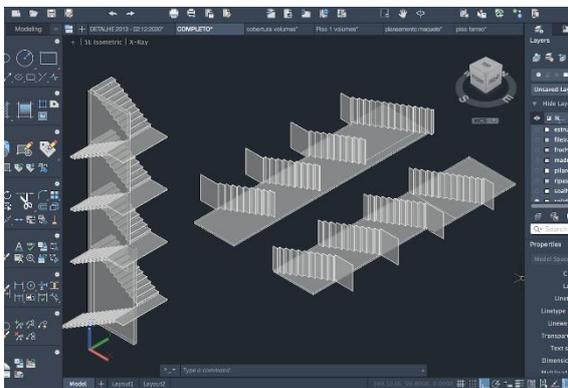


Figura 71. Planeamento da impressão das escadas e peça como elemento único.

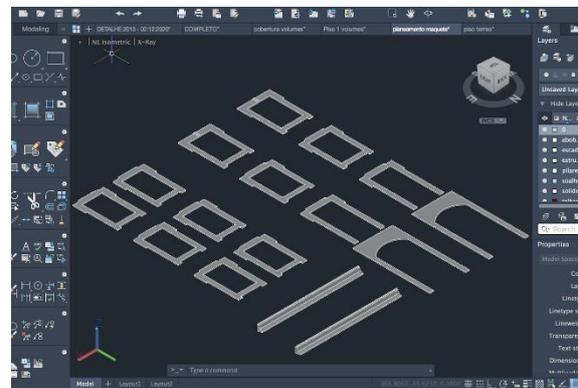


Figura 72. Planeamento das cantarias e cornijas.

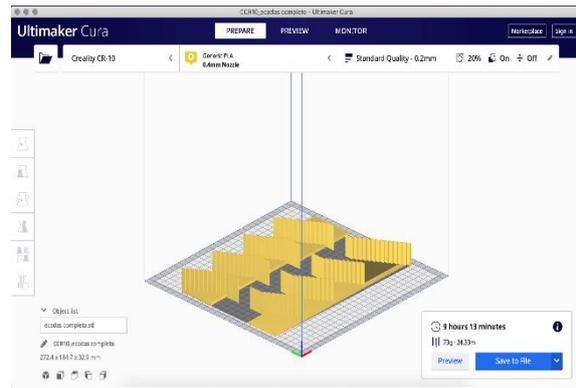
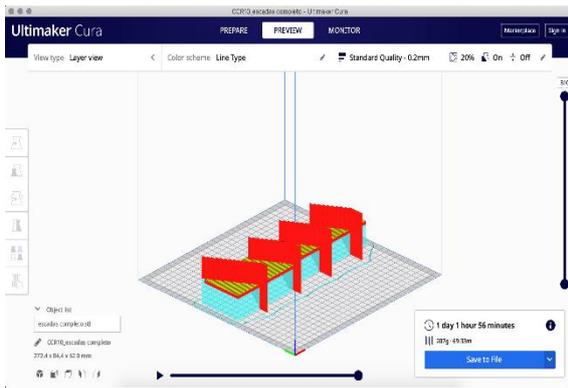


Figura 73. Comparação da impressão das escadas como um todo (esq.) com a impressão das mesmas divididas (dir.).

O planeamento das peças dos modelos à escala 1:10 seguiram a mesma lógica. Neste caso, como as peças são todas individuais, foram todas colocadas no plano xy, de modo que as faces com vazios correspondentes aos encaixes, sempre que possível, não assentavam na plataforma. Assim, evitaram-se situações tipo “ponte” que exigiriam suportes para que a peça não se deformasse durante o processo de impressão (Figura 78) Em suma, é de extrema importância posicionar as peças de forma a necessitarem o menos suporte possível, evitando perda de tempo e gasto desnecessário de material. No caso do detalhe das estacas de fundação, como todos os elementos são cilíndricos, à exceção dos pregos, a criação de suportes por parte da impressora é inevitável, porque a superfície de contacto destas peças com a base da impressora é mínima caso não existam suportes (Figura 79).

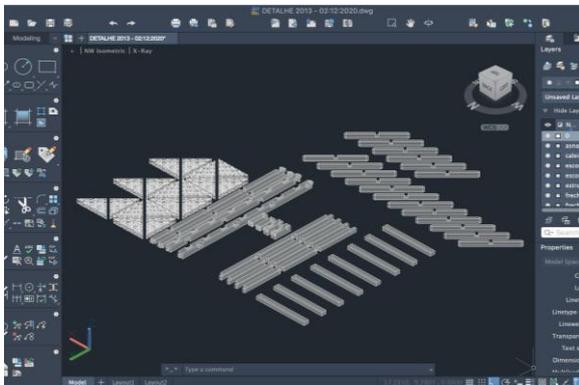


Figura 74. Planeamento das peças que compõem o detalhe da parede de frontal.

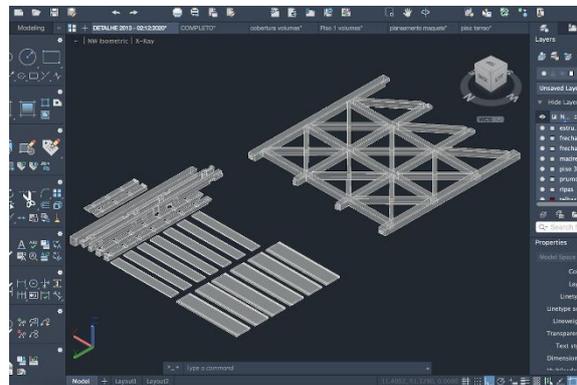


Figura 75. Planeamento das peças que compõem o detalhe da caixa de escadas.

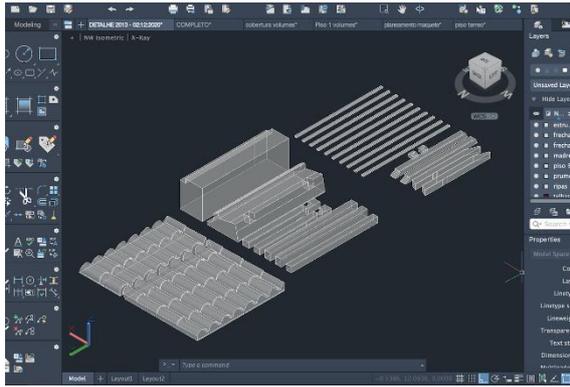


Figura 76. Planeamento das peças que compõem o detalhe da cobertura.

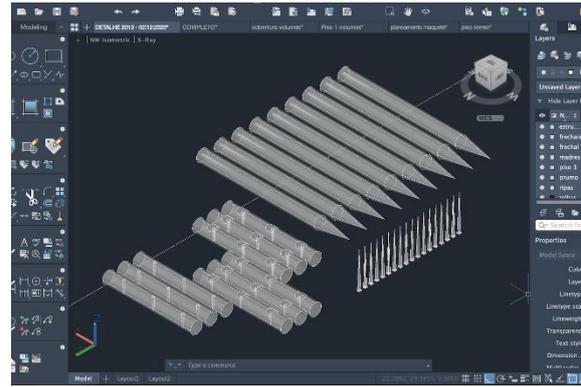


Figura 77. Planeamento das peças que compõem o detalhe das estacas de fundação.

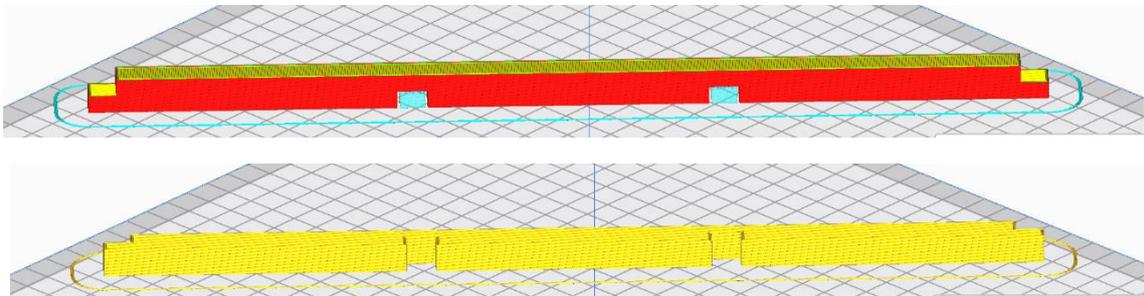


Figura 78. Efeito ponte a ser evitado devido à necessidade de suportes (representados a azul ciano) (cima) vs posição preferível da peça, sem necessidade de suportes (baixo).

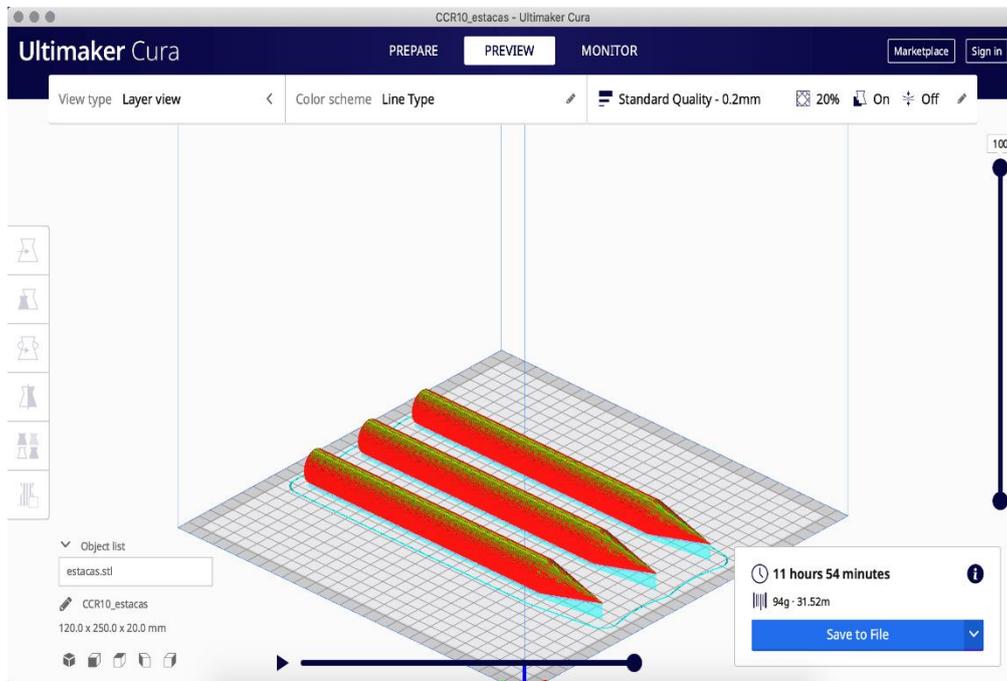


Figura 79. Exemplo de suportes inevitáveis (a azul ciano).

Embora as peças representem fidedignamente o seu aspeto real, tanto no modelo de escala 1:50 como nos modelos à escala 1:10, foi necessário, já pensando na montagem dos modelos, introduzir certos encaixes que não existem na estrutura, apenas para efeito de construção de maquete, permitindo uma melhor conexão entre certos elementos. Um exemplo de um destes momentos é o encaixe da estrutura da gaiola pombalina com os elementos sólidos que representam o edifício finalizado. Como a superfície de contacto entre as peças era muito pequena, para que o modelo se tornasse um conjunto sólido e uno, modelaram-se pequenos vazios nos sólidos, nos quais encaixavam os elementos horizontais das peças da gaiola, como se pode observar na seguinte Figura.

Tanto para os encaixes criados apenas para efeitos de montagem do modelo, como nos encaixes que representam as conexões entre as diversas peças, foram criadas folgas de modo a que se assegurasse o encaixe apropriado entre os elementos. Isto foi necessário porque na fase de impressão, estes vazios acabam por ficar ligeiramente mais pequenos devido à contração do material durante o arrefecimento do modelo. Estas folgas foram criadas durante a modelação, tendo-se retirado ao perímetro de cada vazio cerca de 0,1mm, garantindo o encaixe perfeito entre todas as peças. Foram efetuados testes de impressão para definir o intervalo mais adequado à criação de folgas.

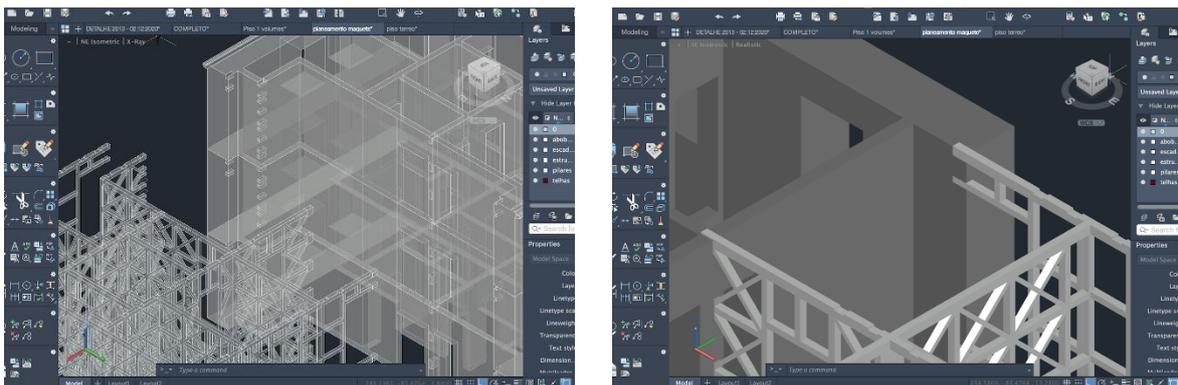


Figura 80. Articulação entre a estrutura da gaiola e o edifício, no modelo à escala 1:50. Estrutura não encaixada na parte do edifício (dir.); estrutura encaixada na parte do edifício (esq.).

#### 4.4 Produção dos modelos

A produção dos modelos físicos apresenta duas fases: a impressão das peças e a montagem dos modelos.

Antes da impressão, todas as peças foram exportadas como ficheiros .stl, individualmente, do ambiente AutoCAD e lidas pelo programa de fatiamento já mencionado no terceiro capítulo, o CURA. Neste software faz-se a previsão do tempo que cada peça demora a ser impressa, bem como a quantidade de material gasto na mesma. Após a leitura neste programa, a exportação do ficheiro faz-se em formato .gcode, permitindo a leitura do mesmo pela impressora. Cada ficheiro é passado para a impressora através de um cartão de memória e após a escolha do ficheiro que se quer imprimir, o processo de impressão inicia-se. Este processo pouco precisa da mão humana. A única coisa que depende do(a) operador(a) é a calibragem da base da impressora e a substituição do material.

A impressão das peças faz-se, normalmente, sem qualquer percalço, porém, por vezes, a impressão falha. Estas falhas podem ter vários motivos:

- A falta de aderência do material à base da impressora, fazendo com que a peça resulte deformada ou até mesmo se tenha de interromper a impressão porque o material fica preso ao extrusor e deixa de imprimir corretamente a peça, é o caso do que aconteceu à peça presente na Figura 81. Neste caso, o que é necessário fazer, para que se evite este tipo de situações, é assegurar que o extrusor se encontra à distância ideal da base da impressora, para que o material adira bem à mesma.
- O corte instantâneo da eletricidade, ou picos de corrente, fazendo com que a impressora pare de trabalhar. Há a hipótese de retomar a impressão, mas a maioria das vezes, a peça sai com defeito. Uma UPS (uninterruptible power supply) pode evitar este tipo de problemas.
- O material acabar antes da impressão terminar, sendo necessária a sua troca e reinício da impressão, tendo isso acontecido à peça apresentada na Figura 82. Sempre que se comece a imprimir é vital garantir que o material é suficiente para completar a peça.
- O rolo do material pode criar nós, fazendo com que o fio fique preso e a impressão continue sem extrusão de material.

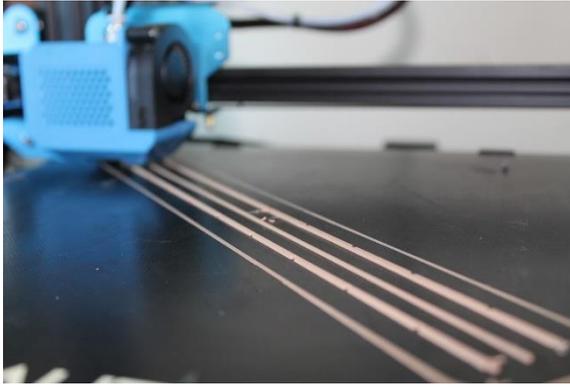


Figura 81. Peça deformada por falta de aderência à base da impressora.

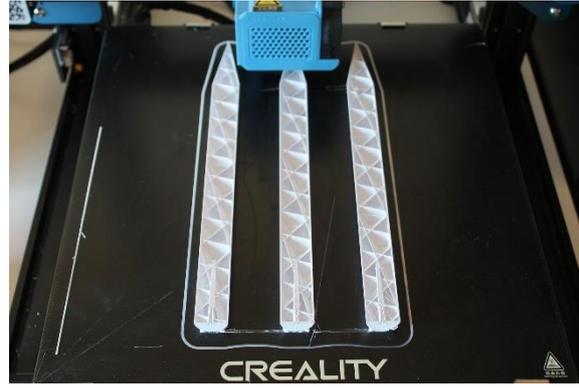


Figura 82. Peça inacabada por falta de material.

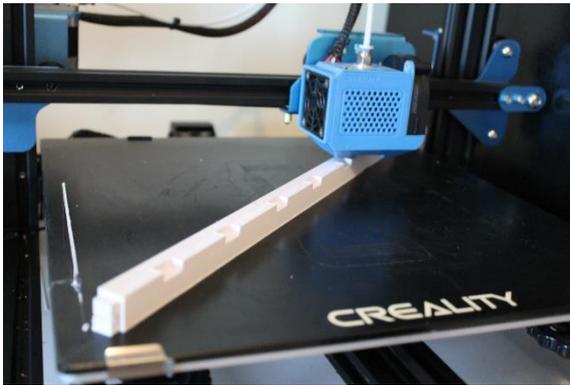
Quando estes erros não acontecem, a peça é normalmente impressa sem imperfeições e com um acabamento excelente. A plataforma metálica da impressora é revestida com um tapete adesivo facilitando a aderência das peças durante a impressão. Após esfriarem, estas são facilmente amovíveis com a ajuda de uma espátula. O processo de impressão de todas as peças durou meses, tendo-se realizado o registo fotográfico de alguns momentos durante a impressão e das peças já impressas, apresentadas nas Figuras imediatamente abaixo.



Impressão de vigas de pavimento (1:50)



Impressão de estacas de fundação (1:10)



Impressão de frechal (1:10)

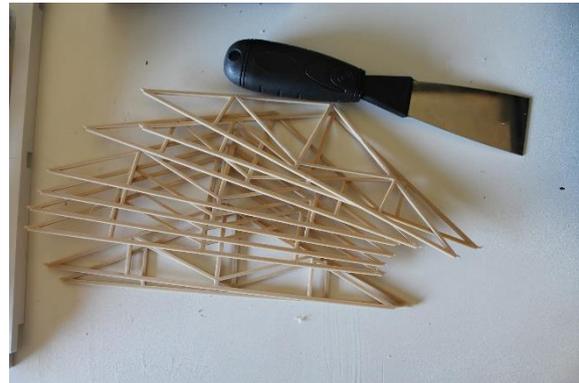


Impressão de travessanhos (1:10)

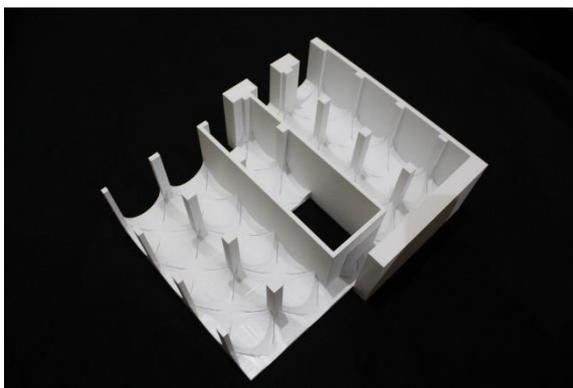
Figura 83. Fotografias de alguns momentos ocorridos durante a impressão de peças.



Frontais (1:50)



Asnas (1:50)



Piso térreo (1:50)



Telhado (1:50)



Fundações (1:10)



Mansarda (1:50)



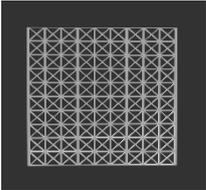
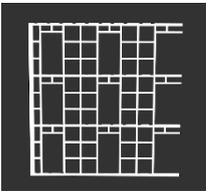
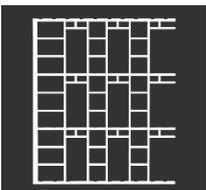
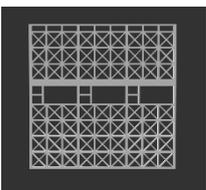
Remate da cobertura e beirado (1:10)

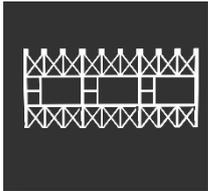
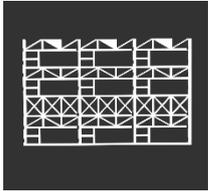
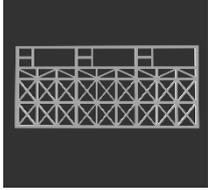
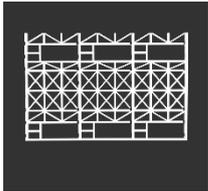
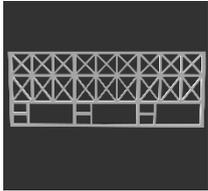
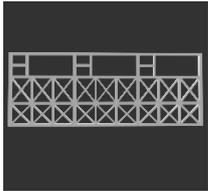
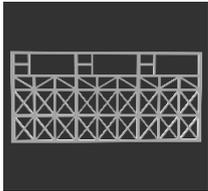


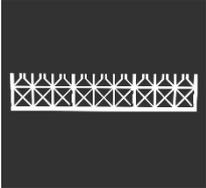
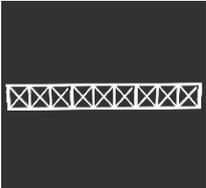
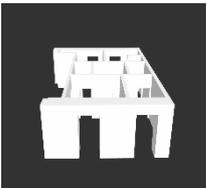
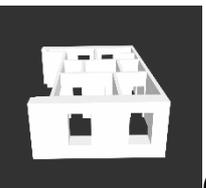
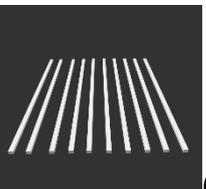
Frontal (1:10)

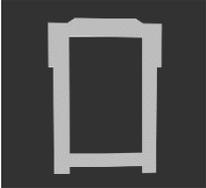
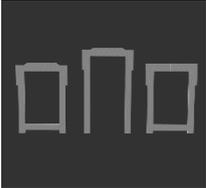
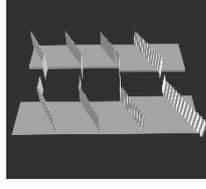
Figura 84. Imagens de diferentes peças impressas – modelos à escala 1:50 e 1:10.

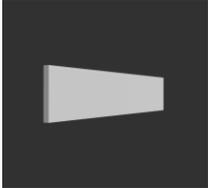
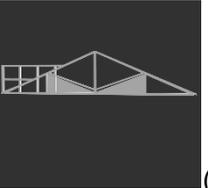
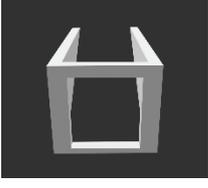
Ainda que se denomine de prototipagem rápida, o tempo de impressão das peças não é imediato, podendo demorar diversas horas, dependendo do seu tamanho e das definições de impressão adotadas. Na tabela 2, a título de exemplo, apresentam-se os tempos de impressão das peças do modelo à escala 1:50, função da qualidade de impressão escolhida e das principais definições de impressão. Os modelos foram impressos em qualidade Standard (média) por esta opção apresentar ótimos acabamentos. Uma qualidade de impressão mais elevada implicaria menor altura das camadas de impressão e, conseqüentemente, maiores tempos de impressão.

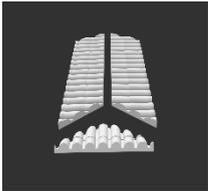
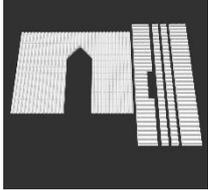
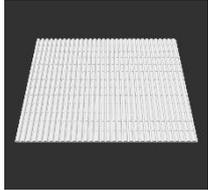
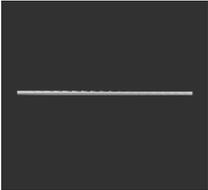
Principais definições de impressão utilizadas – qualidade de impressão Standard		
Diâmetro do extrusor	0.4 mm	
Altura da camada de impressão	0.2 mm	
Preenchimento interior das peças	20%	
Velocidade de impressão	50.0 mm/s	
Peças	Quantidade de material	Tempo de impressão
<b>Pisos aéreos</b>		
	45gr	07h 10min
	21gr	03h 18min
	17gr	02h 39min
	40gr	06h 23min

	<p>11gr</p>	<p>02h 02min</p>
	<p>20gr</p>	<p>03h 30min</p>
	<p>15gr</p>	<p>02h 27min</p>
	<p>22gr</p>	<p>03h 37min</p>
	<p>12gr</p>	<p>01h 59min</p>
	<p>12gr</p>	<p>01h 58min</p>
	<p>16gr</p>	<p>02h 29min</p>

	<p>9gr</p>	<p>01h 32min</p>
	<p>6gr</p>	<p>00h58min</p>
	<p>251gr</p>	<p>32h 30min</p>
 <p>(x2)</p>	<p>256gr (x2)</p>	<p>32h 57min (x2)</p>
 <p>(x3)</p>	<p>21gr (x3)</p>	<p>03h 21min (x3)</p>
	<p>12gr</p>	<p>01h 46min</p>
	<p>13gr</p>	<p>01h 50min</p>

 (x6)	1gr (x6)	00h 08min (x6)
 (x2)	4gr (x2)	00h 32min (x2)
<b>Piso térreo</b>		
	217 gr	33h 47min
	217 gr	33h 49min
	195 gr	21h 37min
	3 gr	00h 28min
	73 gr	09h 13min
<b>Piso de cobertura</b>		

	36 gr	03h 51min
 (x9)	4gr (x9)	00h 39min (x9)
 (x2)	5gr (x2)	00h 50min (x2)
	2gr	00h 22min
 (x3)	5gr (x3)	00h 49min (x3)
	2gr	00h 20min
	9gr	01h 30min

	7gr	01h 19min
	55gr	09h 57min
	39gr	06h 52min
	1gr	00h 14min
	1gr	00h 09min
TOTAL	2kg 29gr	287 horas 23 minutos (11 dias e 23horas 25 minutos)
Tabela 2. Tempo e material gasto nas impressões das peças do modelo à escala 1:50.		

#### 4.4.1 Montagem dos modelos

A montagem dos modelos fez-se de forma bastante rápida, uma vez que as peças no final da sua impressão, estão prontas para serem apresentadas.

O modelo à escala 1:50 foi o primeiro a ter as peças todas impressas, já que a sua montagem demoraria um pouco mais, visto ser um modelo inteiro, não desmontável, exigindo uma maior quantidade de trabalho, essencialmente colagens, após a impressão, ao contrário dos modelos à escala 1:10.

Iniciou-se a montagem através da colagem de todas as peças da estrutura pombalina. Seguidamente foi feita a colagem dos sólidos de todos os pisos, bem como a colagem da superfície abobadada ao sólido do piso térreo. Encaixou-se e foi colada a estrutura pombalina aos elementos sólidos. Realizou-se a colagem das escadas às paredes da caixa de escadas pertencentes aos sólidos. De seguida fez-se a colagem de todos os elementos da estrutura da cobertura, terminando a montagem do modelo com a colagem da cobertura aos elementos do edifício. A sequência de certos momentos da montagem é mostrada nas Figuras seguintes.

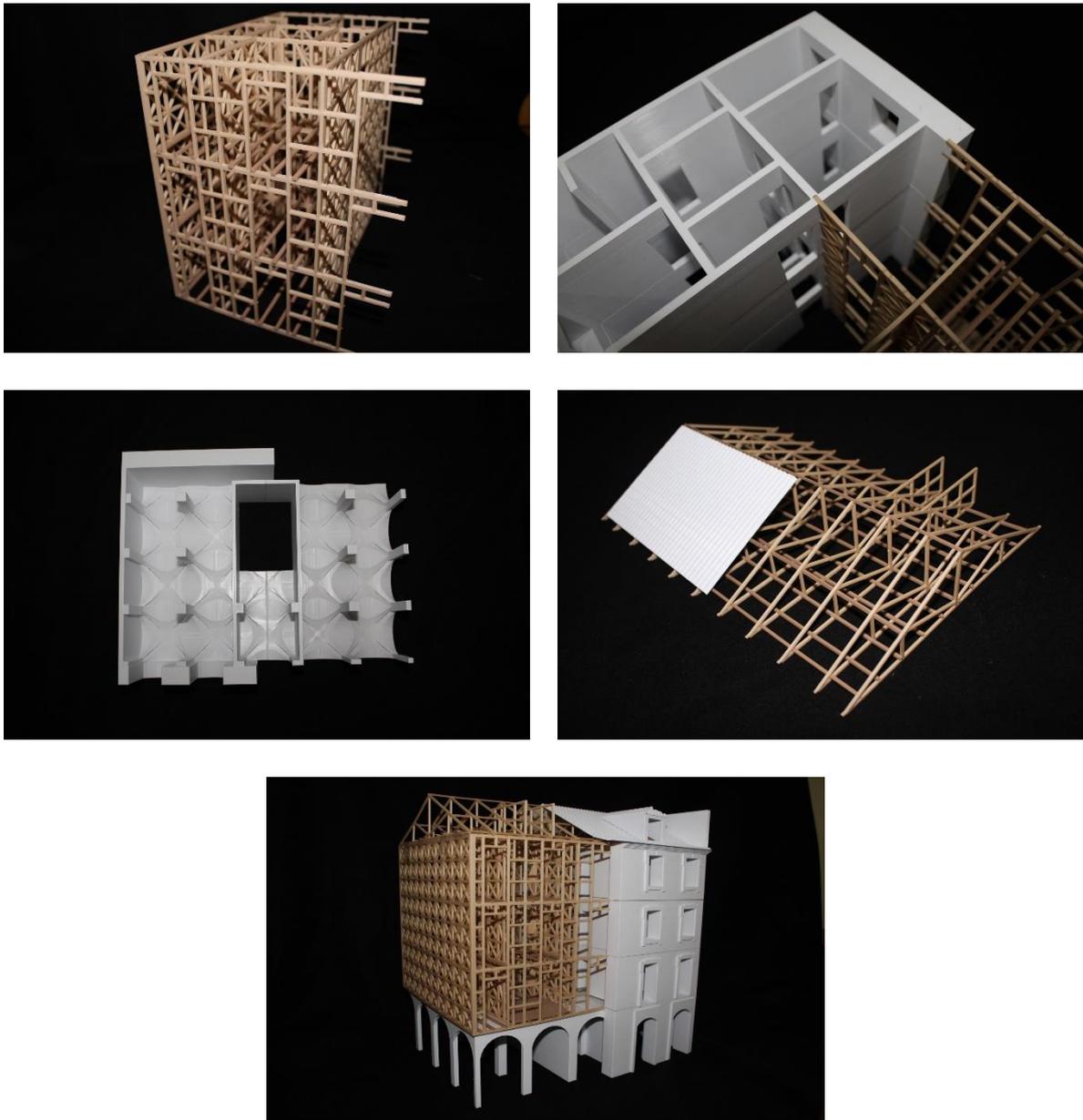


Figura 85. Sequência de fotografias ilustrativas da montagem do modelo de escala 1:50.

Os modelos à escala 1:10, apesar de desmontáveis, algumas das suas peças necessitaram de colagem, de modo a assegurar a sua integridade. Apesar das peças que os completam serem

apresentadas individualmente, a montagem foi feita para garantir que asseguravam o seu objetivo de serem utilizadas como um puzzle ou kit para montar / desmontar.

A montagem do modelo do detalhe de frontal apresenta todas as peças livres, mostrando-se a sua montagem na seguinte Figura. Neste modelo, é de salientar que a aplicação dos enchimentos da estrutura conferem ao modelo mais estabilidade, ajudando à fixação das escoras. Pela experimentação da montagem do modelo torna claro que a estrutura por si só não apresenta resistência suficiente, sendo vital o enchimento dos seus vazios para consolidar o conjunto.

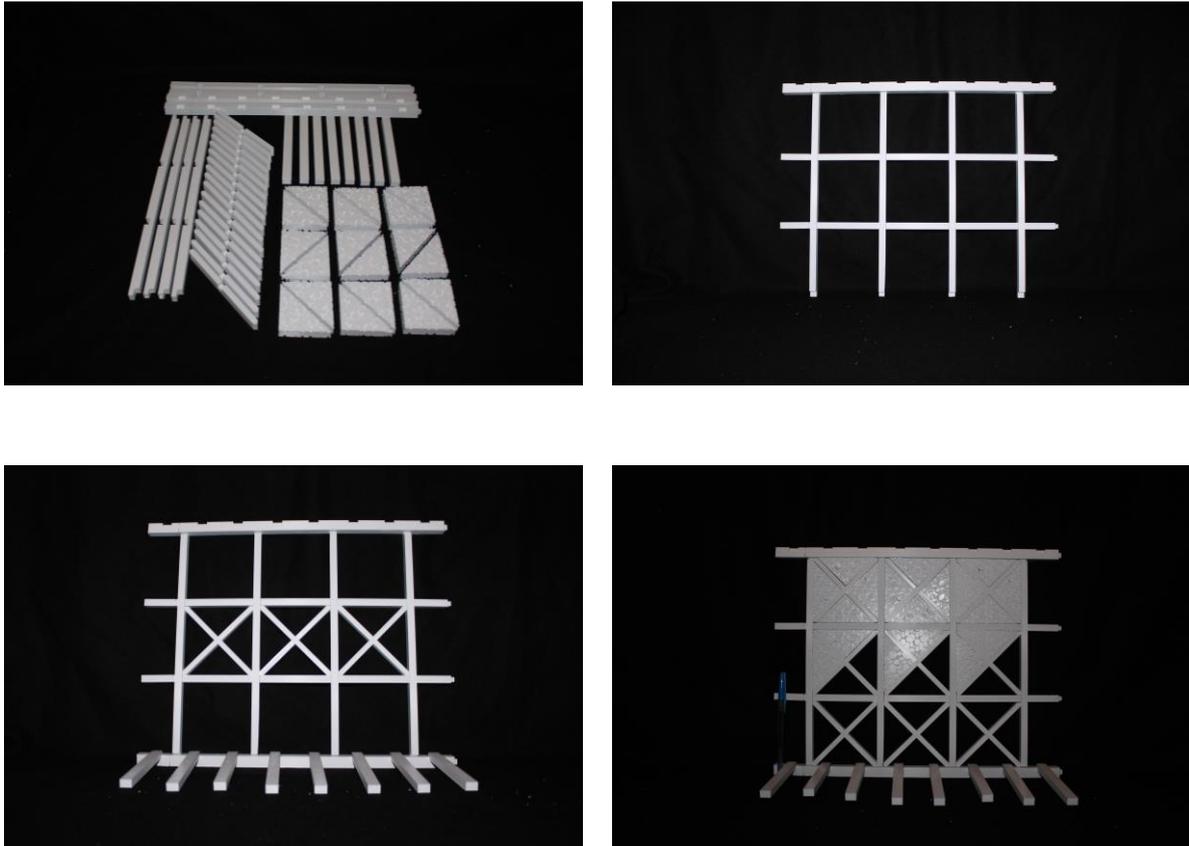


Figura 86. Sequência de montagem do modelo de detalhe do frontal.

O modelo de detalhe das escadas apresenta dois frontais tratados (cada um) como peça única. Com apoio nestes, são montados os elementos das escadas, sendo as restantes peças todas individuais.

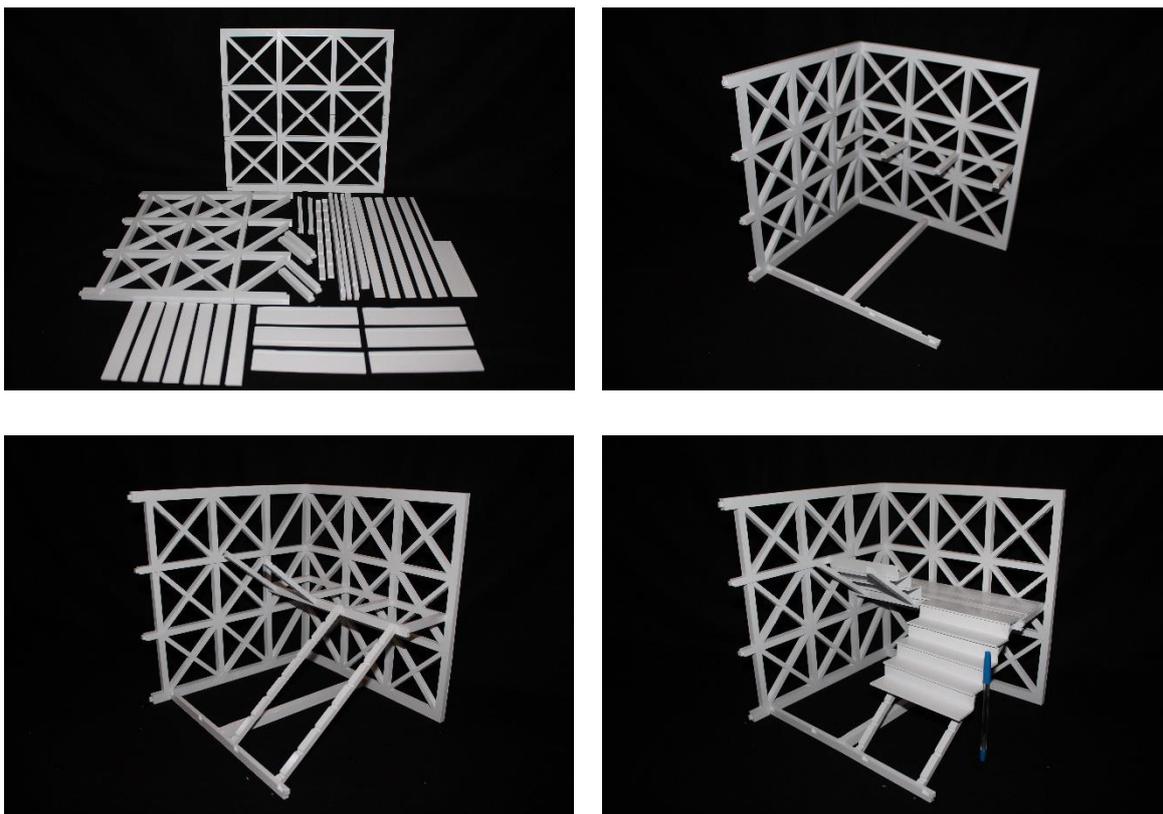


Figura 87. Sequência de montagem do modelo de detalhe da caixa de escadas.

No modelo de detalhe da cobertura, por ter alguns elementos diagonais, foi necessário o uso de cola, para garantir uma maior eficácia na montagem dos restantes elementos. Esta colagem foi feita entre a parede sólida e a cornija, entre as linhas e pernas das asnas e entre os caibros e as ripas. Os restantes elementos são todos montáveis e desmontáveis entre si (Figura 88).

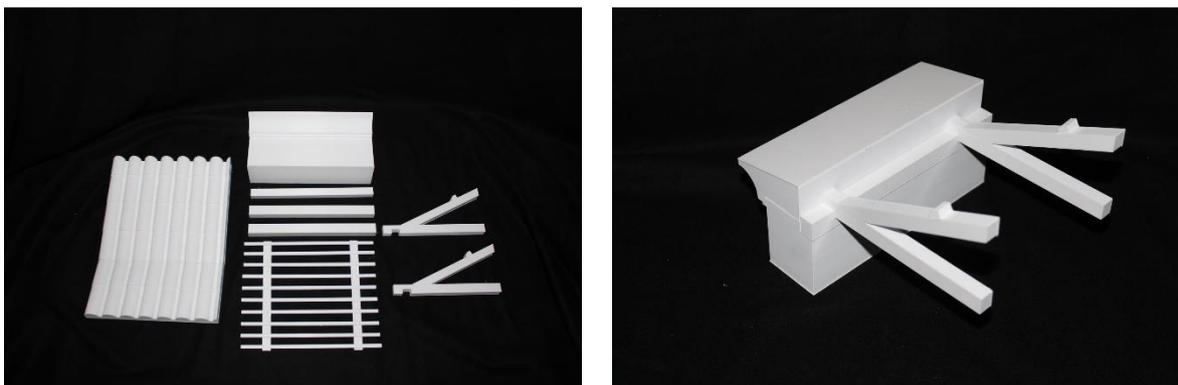




Figura 88. Sequência de montagem do detalhe da cobertura.

Relativamente ao modelo de detalhe das fundações de estacaria, todas as peças são individualizadas, sendo encaixadas através do uso de pregos, também eles impressos. Existem 18 pregos, nove deles conectando os toros entre si e os outros nove, conectando a estaca ao toro com que contacta.

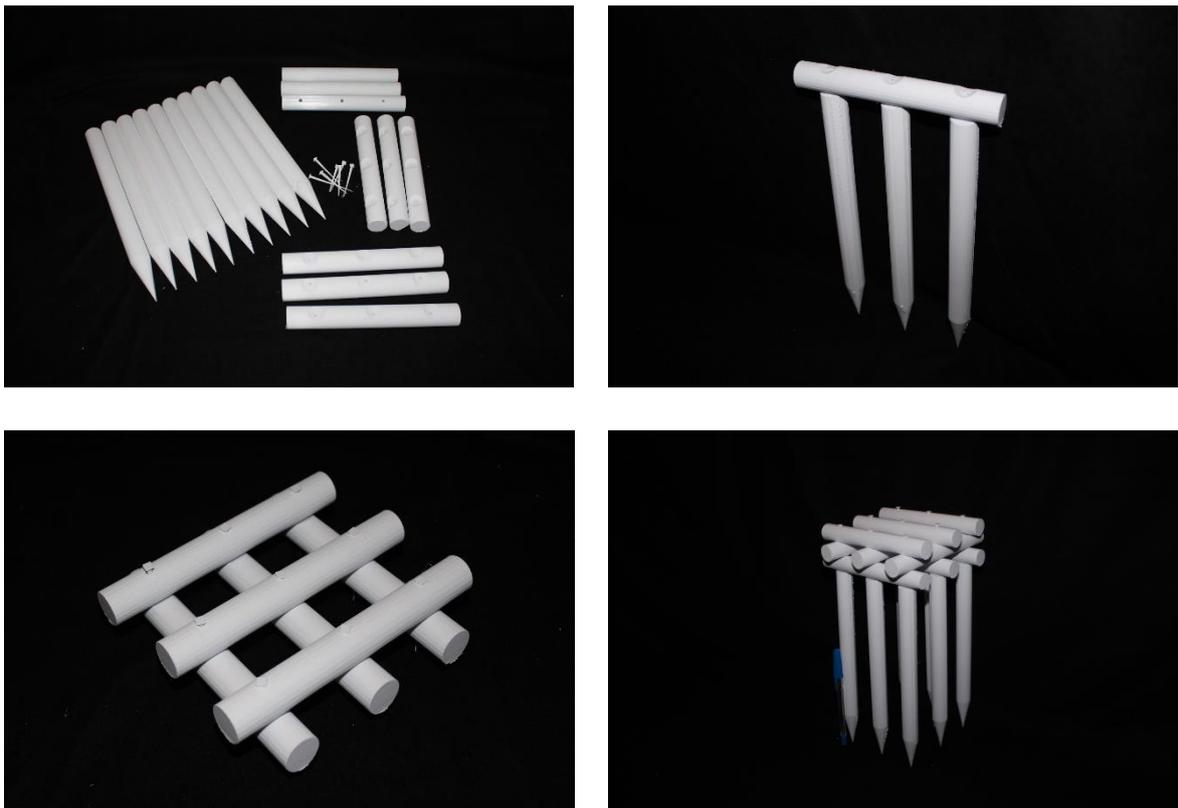


Figura 89. Sequência de montagem do detalhe das estacas de fundação.

### Discussão de resultados e desenvolvimentos futuros

O resultado dos modelos é, no geral, muito satisfatório. A leitura dos modelos como um conjunto permite uma compreensão muito completa daquilo que são os edifícios pombalinos, bem como se desenvolve a estrutura da gaiola pombalina.

O modelo à escala 1:50 representa uma réplica bem executada de como se estrutura um edifício pombalino tipo, permitindo o entendimento de como a estrutura se conecta com o restante edifício. O detalhe e completude deste modelo, desde a estrutura do piso térreo ao desenvolvimento da estrutura da cobertura, é resultado do estudo profundo de todos os elementos da estrutura em estudo. Os modelos à escala 1:10 representam de forma fidedigna cada peça componente e como cada uma encaixa nas restantes, mostrando, gradualmente, através de uma montagem tipo puzzle, como se obtém, passo a passo, cada detalhe.

O grande motor para o desenvolvimento destes modelos foi a vontade de conseguir completar os modelos já existentes e dar a conhecer que a gaiola pombalina não é apenas a típica e conhecida estrutura malhada com as cruzes de Santo André, mas sim um complexo sistema, meticulosamente pensado, que passa por cada piso de forma distinta, mas que se consegue conectar e funcionar como um todo.

Conseguiu-se realizar e produzir um modelo muito completo, que, apesar de necessitar de detalhes aproximados para assegurar a compreensão global de forma integral, responde a todos os requisitos e poderá ser utilizado como objetivo de ensino. Estes modelos permitem uma observação global, completa e generalizada daquilo que é a estrutura pombalina, bem como a possibilidade de a observar por diferentes ângulos.

A leveza, o tamanho, o nível de detalhe e o fácil transporte de todos os modelos permite que o objetivo principal, a utilização dos mesmos para fins didáticos, seja cumprido. Estes modelos, caso seja necessário, podem ser utilizados não só no âmbito do Instituto Superior Técnico, como facilmente transportados para outras instituições.

A verdadeira diferença entre este modelo e os já existentes é o facto de lhe estarem anexados detalhes a uma escala de menor redução, que, sendo desmontáveis, tornam a experiência da compreensão da estrutura muito mais pessoal, pois cada pessoa poderá, de uma forma simplificada, mas realista, simular a construção e as etapas necessárias adjacentes à produção de certas partes do edifício.

A validação dos modelos por parte da comunidade escolar (inicialmente prevista) não pôde ser realizada, devido à situação pandémica no âmbito da qual foi desenvolvida esta dissertação, mas esta validação poderá ocorrer assim que possível, e caso necessário, introduzir as alterações relevantes para aumentar a qualidade dos modelos.

Uma outra vantagem sobre estes modelos, principalmente em relação aos modelos à escala 1:10, é, tendo em conta que não são para fins de exposição, e o objetivo é serem manuseados por diversas pessoas, se necessário, as peças podem facilmente ser impressas de novo e substituídas, uma vez que a sua modelação já está feita, assim como o ficheiro para a impressora. Deste modo, numa questão de horas, qualquer peça pode ser reposta.

Vale a pena sublinhar que o valor didático acrescido destes modelos estará, também, diretamente relacionado com a possibilidade de, através da sua montagem, se poder simular o processo de construção da estrutura pombalina. Exemplo elucidativo será o resultado do enchimento dos alvéolos da cruz de Santo André. De facto, a experiência sensorial possibilitada pela maior consistência do conjunto após a inserção destes elementos constitui, certamente, uma demonstração cabal do comportamento estrutural desejável da gaiola pombalina como um todo, e um meio de transmissão de conhecimentos facilmente interiorizável pelo aluno, porque por si diretamente experimentado.

Há sempre espaço para melhorar o trabalho realizado, isto é, os modelos não são perfeitos, apresentam aspetos que podem ser melhorados, e ainda, caso se sinta necessidade, mais tarde podem-se criar mais detalhes que se considerem relevantes ou até fazer uma maquete completa, toda desmontável, a uma diferente escala, que ela por si só consiga mostrar exatamente todo o processo e elementos utilizados para a construção de um edifício pombalino.

A impressão de modelos a diferentes escalas das apresentadas neste trabalho é possível, mas prevê-se uma adaptação da modelação virtual, consoante a escala pretendida. O modelo do edifício foi pensado e realizado, visando um modelo físico à escala 1:50, circunstanciado pelos procedimentos próprios da tecnologia por impressão 3D. Caso se pretenda produzir um modelo numa escala de menor redução, é necessário rever a modelação para que esta apresente o nível de detalhe exigido por essa escala, e conseqüentemente, as peças impressas e sua montagem resultem num modelo com a leitura devida, onde toda a informação que exigida por um modelo de escala de menor redução esteja presente. A adaptação do modelo virtual não seria complexa uma vez que as peças de detalhe reproduzidas à escala 1:10 apresentam informação suficiente para cobrir grande parte dos detalhes do edifício completo, podendo essa informação ser facilmente transferida para o modelo total virtual do edifício.

No entanto, o planeamento de tal modelo seria sempre (tal como sucedeu neste caso) condicionado pelos processos de impressão 3D adotados. O volume de trabalho da impressora 3D é uma condicionante importante. Numa escala de menor redução, as peças constituintes do modelo teriam de ser desconstruídas e impressas por partes, e posteriormente montadas. Neste sentido, a revisão do modelo virtual não passa apenas pela informação e nível de detalhe que as peças exigem, mas também pelo planeamento da montagem de uma peça, a qual à escala 1:50 seria uma peça única mas a uma escala de menor redução, para o mesmo volume de impressão, a mesma peça sofreria mais sectionamentos, exigiria mais trabalho de pós-processamento para religar as suas partes e, muito

possivelmente, exigiria desenho específico de alguns encaixes visando assegurar a robustez do conjunto final.

No caso de se desejar obter modelos a escalas de maior redução (e.g., 1:100) o problema de adaptar previamente o modelo virtual à escala 1:50 já não se coloca. No programa de fatiamento as peças são facilmente ajustáveis às dimensões desejadas e os detalhes que não têm expressão (de acordo com as definições de impressão escolhidas) são automaticamente suprimidos no ficheiro gerado para a impressora.

As melhorias que poderiam ser realizadas são, por exemplo, no modelo à escala 1:50, tornar a parte representante do edifício mais realista, através da aplicação de mais detalhes, como as varandas e os seus gradeamentos, aplicar pormenores de cantaria típicos dos edifícios pombalinos, ou até usar uma cor diferente que seja mais comum no exterior dos edifícios pombalinos. Em relação aos modelos à escala 1:10, a utilização de mais pontos de encaixe apenas para fins de maquete, que permitissem a estabilidade de certas peças sem o uso de cola, já que o objetivo deles é serem desmontáveis. O ideal seria que todas as peças fossem montadas como um puzzle, mas por vezes, sentiu-se a necessidade de aplicar cola em certos encaixes entre peças, como por exemplo na linha e na perna do detalhe da cobertura, já que a perna é um elemento inclinado, que sem a cola não se estabiliza, a menos que exista um encaixe “invisível”, para este aspeto. A aplicação de cor nas diferentes peças também poderia trazer aos detalhes uma leitura mais facilitada, já que a cor ajuda e permite a distinção mais intuitiva dos diferentes elementos. Existem peças com defeitos mínimos, que não comprometem a leitura do modelo no seu todo, podendo essas peças serem de novo impressas, para que todas elas estejam “perfeitas”.

Neste sentido, ainda que existam detalhes que podem ser melhorados, tendo em conta o material disponível, o tipo de impressora em uso e o tempo dedicado, todos os modelos foram bem executados e respondem ao objetivo principal que é oferecer à comunidade escolar uma oportunidade de compreender de uma forma mais prática e direta, e não apenas pela análise de imagens, como se desenvolveu esta estrutura e como esta se conecta com o edifício no geral. O resultado final de cada modelo é apresentado nas Figuras abaixo.

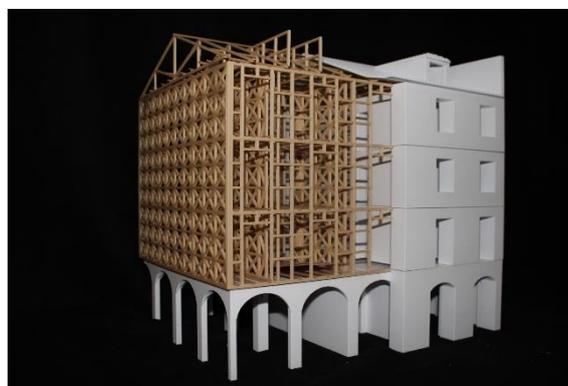


Figura 90. Resultado final do modelo de escala 1:50.



Figura 91. Resultado final do modelo de detalhe de frontal (escala 1:10).

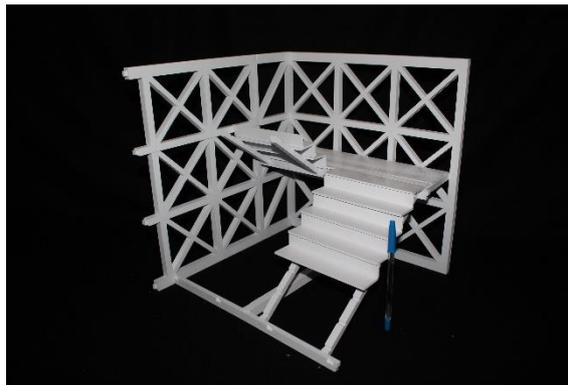


Figura 92. Resultado final do modelo de detalhe da caixa de escadas. (escala 1:10).



Figura 93. Resultado final do modelo de detalhe da cobertura (escala 1:10).



Figura 94. Resultado final do modelo de detalhe das estacas de fundação (escala 1:10).

Por último, o potencial didático dos modelos desenvolvidos deverá ser consolidado recorrendo à criação de documentação complementar, nomeadamente, guiões técnicos de montagem, visando a identificação das partes componentes do edifício e da gaiola pombalina através dos seus termos técnicos e ilustrando o seu modo de ligação. Tais documentos carecem de planeamento específico – o qual extravasa o âmbito desta dissertação. No entanto, constituem documentos complementares importantes, para o suporte a uma aplicação plena dos modelos desenvolvidos num processo de ensino-aprendizagem, nomeadamente, no que concerne à autonomia do(a) aluno(a) e estímulo ao seu espírito exploratório e de descoberta.

## CONCLUSÃO

A estrutura da gaiola pombalina é um verdadeiro exemplo representante da evolução da construção. A sua importância histórica e cultural não deve ser levada de ânimo leve. O facto de ser uma estrutura tão inovadora, tendo em conta o tempo e situação em que a cidade de Lisboa se encontrava, e uma vez que um sismo das mesmas dimensões não se repetiu (apesar das previsões nesse sentido), é vital preservar a integridade desta estrutura, porque grande parte dos edifícios da baixa pombalina foram construídos com base nela. A reabilitação deste tipo de edifícios deve ser ponderada e respeitar a estabilidade da estrutura, para que esta consiga manter o nível de segurança que se lhe associa, quando for necessário.

O estudo aprofundado da gaiola pombalina permitiu entender como esta funciona no seu todo, sendo cada elemento e cada encaixe presentes desde o piso térreo até ao piso de cobertura, essenciais para que esta trabalhe como um corpo uno. Sem este estudo, bem como o estudo das estruturas que se lhe antecede, não seria possível fazer uma simulação tão completa e detalhada da estrutura, o que prejudicaria e baixaria o nível de realismo dos modelos desenvolvidos neste trabalho. Cada encaixe, os diferentes tipos de entalhos, os diferentes tipos de pregos, a localização de cada peça, entre outros detalhes, foram pensados meticulosamente e utilizados nos sítios devidos, tornando a estrutura tão coesa, comportando-se como um todo e não por partes.

A evolução tecnológica, associada ao estudo do património, guiou a realização desta dissertação, que, apesar de se ter revelado um processo demorado, é muito vantajoso, quando comparado com os métodos tradicionais de produção de modelos, o seu tempo de realização, bem como a sua qualidade e resistência. O fluxo de trabalho digital considerado e o uso da tecnologia de impressão 3D permitiram o desenvolvimento dos modelos físicos de forma relativamente fácil, com custos moderados. Devido a estas vantagens, os modelos podem ser facilmente reimpressos - fator importante para a sua partilha e disseminação do conhecimento neles representado.

Os modelos obtidos atendem ao objetivo pretendido, pois representam de forma confiável o sistema de resistência sísmica da gaiola. É possível analisar, de vários ângulos, o desenvolvimento da estrutura ao longo dos quatro andares. Através da sua observação é possível descrever, de forma geral, como essa estrutura evolui, proporcionando uma compreensão global da mesma, ao contrário do que acontece com os modelos pré-existentes.

O desenvolvimento e produção dos modelos permitiram uma grande evolução a nível pessoal e profissional, uma vez que o nível de concentração, disciplina e exigência tinha de se encontrar no máximo. A utilização de métodos pouco explorados ao longo de todo o curso de mestrado integrado em Arquitetura, como por exemplo a modelação tridimensional, e uso de uma impressora 3D, permitiram a exploração de novas técnicas, que poderão ser aplicadas e representam uma mais valia no campo profissional.

Os modelos desenvolvidos podem contribuir para a divulgação do conhecimento sobre a gaiola pombalina visto que, para além de poderem ser utilizados como objetos de ensino, podem também ser

aplicados, por exemplo, no contexto de ações de formação e sensibilização sobre segurança sísmica para diferentes públicos-alvo.

O facto de estes modelos estarem disponíveis à comunidade estudantil, podendo ser manuseados e explorados, torna-os únicos, já que os modelos existentes da gaiola pombalina se apresentam em exposição e são limitados ao toque.

No futuro, pretende-se apresentar os modelos a docentes, de modo a incentivar a sua utilização como apoio ao ensino, seja este a nível universitário ou outro. Esperam-se críticas construtivas e novas ideias que completem e melhorem ainda mais os modelos produzidos, podendo estes estar sujeitos a alterações a qualquer momento, bem como à aplicação de novos elementos ou produção de novos detalhes.

A elaboração desta dissertação alertou não só para o facto de o património não estar a ser cuidado como deveria, sobrepondo-se estética à segurança, mas também para o facto de como há falta de aplicação de novos métodos de produção de projeto no ensino da Arquitetura. A falta de experiência aquando do início da modelação tridimensional, bem como a falta de conhecimento das novas tecnologias, ou dificuldade de acesso às mesmas, permitiram entender que o ensino da arquitetura, no geral, se mantém muito virado para a teoria, que claramente é necessária, mas com o avançar da tecnologia, é importante pensar numa forma de integração e ensino das novas potencialidades que a tecnologia apresenta para a arquitetura.

Os ateliers e empresas que contratam arquitetos, cada vez olham mais para a experiência que os estagiários ou jovens trabalhadores têm sobre a manipulação do mundo virtual. Neste sentido, este trabalho, por apresentar uma componente prática tão importante como a teórica, permitiu evoluir e conhecer estes novos métodos de trabalho que cada vez mais arquitetos estão a adotar, e perceber que, talvez fosse importante incluí-los um pouco mais ao longo do percurso académico.

Em suma, a elaboração da presente dissertação permitiu o crescimento do conhecimento da autora, bem como abrir a mente para todo um mundo de novos métodos de trabalho, que até então não conhecia. Os resultados obtidos neste trabalho foram muito satisfatórios, respondendo de forma positiva aos objetivos definidos.

## REFERÊNCIAS

- Aguiar, L. (2016). 'Um processo para utilizar a tecnologia de impressão 3D na construção de instrumentos didáticos para o ensino de ciências'. Dissertação de Mestrado em educação para a ciência (área de concentração: ensino de ciências). Faculdade de Ciências da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho".
- Almerbati, N. (2016). 'Heritage conservation in the new digital era: The benefits of 3D printing architecture screens in sustaining architecture and identity'. 4th International Conference for Heritage conservation, sustainable heritage: global vision, local experience, Dubai, UAE.
- Appleton, J. (2011). 'Reabilitação de Edifícios Antigos: Patologias e Tecnologias de Intervenção'. ORION, Ed. 2ª Edição.
- Arnold, K. H. (2012). 'Didactics, Didactic Models and Learning'. In: Seel N.M. (eds) Encyclopedia of the Sciences of Learning. Springer, Boston, MA. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1428-6\\_1833](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1428-6_1833). (Acedido em: 20-11-2020).
- Asato, O., Kato, E., Porto, V. and Inamasu, R. (2002). 'Analysis of open CNC architecture for machine tools'. In: Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences, Volume 24, Issue 3. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_issues&pid=0100-7386&lng=en&nrm=iso](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_issues&pid=0100-7386&lng=en&nrm=iso). (Acedido em: 14-11-2020).
- Attenni, M. (2019). 'Informative Models for Architectural Heritage'. In: Heritage, EISSN 2571-9408, Published by MDP. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/heritage2030125>. (Acedido em: 17-11-2020).
- Boa impressão 3D, (2017). 'Como funciona a impressora 3D FDM'. Disponível em: <https://boaimpressao3d.com.br/aplicacoes/como-funciona-impressora-3d-fdm/>. (Acedido em: 13-11-2020).
- Buswell, R., Soar R., Gibb, A. and Thorpe, A. (2007). 'Freeform Construction: Mega-scale Rapid Manufacturing for construction'. In: Automation in Construction, Volume 16, Issue 2, Pages 224-231.
- Cardoso, M. R. P. (2002). 'Vulnerabilidade Sísmica de Estruturas Antigas de Alvenaria - Aplicação a um Edifício Pombalino'. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Estruturas. Instituto Superior Técnico. Universidade de Lisboa.
- Celani, G. e Bertho, B. C. (2007). 'A Prototipagem Rápida no Processo de Produção de Maquetes de Arquitetura'. Em: GRAPHICA, Curitiba/Pr. Anais, Curitiba: UFPR, Páginas 1-10.
- Centofanti M., Brusaporci S. e Lucchese, V. (2014). 'Architectural Heritage and 3D Models'. Capítulo em: 'Computational Modeling of Objects Presented in Images: Fundamentals, Methods and Applications'. Springer, Ed. 1ª Edição.

Costa, F. (1971). 'Enciclopédia prática da construção civil: caderno 1: asnas de madeira'. Lisboa: Portugália Ed. 3ª Edição.

Cóias, V. (2005). 'Reabilitação Urbana, Baixa Pombalina: bases para uma intervenção de salvaguarda'. CML, Ed. 1ª Edição.

Facebook, Câmara Municipal de Lisboa, (2015). Disponível em: <https://www.facebook.com/camaradelisboa/posts/1089535494399733>. (Acedido em: 08-09-2020).

França, J. (1989). 'A reconstrução de Lisboa e a arquitectura pombalina'. Em: Biblioteca Breve, Volume 12, 3ª Edição. Instituto de Cultura e Língua Portuguesa, Ministério da Educação.

Ferreira, J. (2013). 'Terramoto de 1 de Novembro de 1755: Uma Abordagem Histórico-Geográfica em Contexto Pedagógico'. Dissertação de Mestrado em Ensino de História e Geografia no 3º Ciclo do Ensino Básico e no Ensino Secundário. Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra.

Ford, S. and Minshall, T. (2018). 'Invented Review Article: Where and how 3D printing is used in teaching and education'. In: Addictive Manufacturing, Volume 25, Pages 131-150. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.10.028>. (Acedido em: 18-11-2020).

Goldapple, L. (2017). 'Data meets modernismo: Sagrada Família 3D printing'. In: Atlas of the future. Disponível em: <https://atlasofthefuture.org/project/sagrada-familia-3d-printing/>. (Acedido em: 21-11-2020).

Glória, V. (2015). 'Análise do sistema construtivo dos edifícios pombalinos na Baixa Pombalina de Lisboa'. Dissertação de Mestrado em Arquitetura. Universidade Lusíada de Lisboa.

Hellmann, M. (1999). 'Les maquettes du monde classique - Grèce, Italie et Empire Romain. Dossiers d'Archeologie', Numéro 242, Pages 42-47.

Jamie, D. (2018). '3D Printing vs CNC Machining: Wich is best for prototyping'. In: 3D natives. Disponível em: <https://www.3dnatives.com/en/3d-printing-vs-cnc-160320184/>. (Acedido em: 14-11-2020).

Kristiánová K., Joklová V. and Mečiar I. (2018). 'Physical models in architecture education and the use of new technologies'. 11th annual International Conference of Education, Research and Innovation, Seville, Spain.

Klinger, K. (2007). 'Information Exchange in Digitally Driven Architecture'. 11<sup>th</sup> Iberoamerican Congress of Digital Graphics, México.

Langenbach, R. (2003). ' "Crosswalls" instead of shearwalls: A Proposed Research Project for the Retrofit of Vulnerable Reinforced Concrete Buildings in Earthquake Areas based on Traditional Himiş Construction'. 5th National Conference on Earthquake Engineering, Istanbul, Turkey.

Langenbach, R. (2007). 'From "Opus Craticium" to the "Chicago Frame": Earthquake-Resistant Traditional Construction.' In: International Journal of Architectural Heritage. Disponível em: <http://www.informaworld.com/openurl?genre=journal&issn=15583058>. (Acedido em: 10-09-2020).

Leitão, L. A. (1896). 'Arma de Engenharia - Curso Elementar de Construcções'. Escola Central da Arma de Engenharia, Estado-Maior do Exército, Lisboa.

Lopes, M. (2012). 'Estrutura Sismo-Resistente da Gaiola Pombalina: Passado e Futuro'. Conferência Internacional sobre Reabilitação de Estruturas Antigas de Alvenaria. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

Lourenço, P. B., Vasconcelos, G., e Poletti, E. (2014). 'Edifícios Pombalinos: Comportamento e reforço'. Seminário Intervir em Construcções Existentes de Madeira. Universidade do Minho, Guimarães.

Mahil, S. (2016). 'Fostering STEM+ Education: Improve Design Thinking Skills'. Global Engineering Education Conference (EDUCON), Abu Dhabi.

Mascarenhas, J. (2009). 'Sistemas de Construção V - O Edifício de Rendimento da Baixa Pombalina de Lisboa. Materiais Básicos (3ª Parte): o vidro'. Lisboa: Livros Horizonte. 3ª Edição.

Miranda, F. (2011). 'Caracterização dos edifícios pombalinos da Baixa de Lisboa'. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Nogueira, P. (2015). 'O terramoto de 1755'. In: Histórias com História. Disponível em: <https://historiaschistoria.blogspot.com/2015/11/o-terramoto-de-1755.html> (Acedido em: 01-09-2020).

Nunes, R. (2017). 'Constructive Characterization of Pombaline Buildings and Simplified Pushover Analysis of Frontal Walls'. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Pires, N. (2011). 'Modelação de paredes de edifícios pombalinos'. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Pupo, R. (2009). 'Inserção da Prototipagem e Fabricação Digitais no processo de projeto: um novo desafio para o ensino de arquitetura'. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas.

Ramos, L., e Lourenço, P. B. (2000). 'Análise das Técnicas de Construção Pombalina e Apreciação do Estado de Conservação Estrutural do Quarteirão do Martinho da Arcada'. Em: Revista Engenharia Civil, Número 7, Páginas 35–46. Disponível em: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/2497>. (Acedido em: 15-10-2020).

Ribechi, M (2015). 'The new frontiers of archaeology 2.0'. In: Digital meets Heritage. Disponível em: <https://www.digitalmeetsculture.net/article/the-new-frontiers-of-archaeology-2-0/>. (Acedido em: 16-11-2020).

Santos, V. (1989). 'Descrição do sistema construtivo do Pombalino.' Trabalho de síntese apresentado à Faculdade de Arquitectura da Universidade Técnica de Lisboa.

Santos, V. (1994). 'O sistema construtivo Pombalino em Lisboa em edifícios urbanos agrupados de habitação colectiva: Estudo de um legado humanista da 2ª metade do séc. XVIII: Contributos para uma metodologia de abordagem na área de recuperação e restauro arquitectónico de património construído'. Dissertação de Doutoramento em Arquitectura. Faculdade de Arquitectura da Universidade Técnica de Lisboa.

Santos, F. (2018). 'Futuras Tecnologias Aplicadas à Arquitectura: Do digital para o material'. Dissertação de Mestrado em Arquitectura. Departamento de Arquitectura, Universidade de Coimbra.

Teixeira, M. (2010). 'Reabilitação de edifícios pombalinos: Análise experimental de paredes de frontal'. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.

Tintillini, B. (2020). 'The archaeological site of the Roman city of Urbs Salvia'. Disponível em: [https://www.umbriaecultura.it/en/roman-city-urbs-salvia/#google\\_vignette](https://www.umbriaecultura.it/en/roman-city-urbs-salvia/#google_vignette). (Acedido em: 16-11-2020).

Wikimedia Commons, (2008). 'File: Gaiola pombalina.jpg'. Disponível em: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gaiola\\_pombalina.jp](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gaiola_pombalina.jp). (Acedido em: 08-09-2020).

# **Edifício Pombalino 3D:**

Modelos didáticos

## **ANEXOS**

### **ÍNDICE DE ANEXOS**

<b>Anexo 1:</b> Imagens do processo de modelação dos modelos virtuais .....	<b>2</b>
<b>Anexo 2:</b> Imagens do processo de planeamento da impressão dos modelos.....	<b>7</b>
<b>Anexo 3:</b> Imagens e fotografias do processo de impressão e montagem dos modelos .....	<b>13</b>

# **Anexo 1- Imagens do processo de modelação dos modelos virtuais**

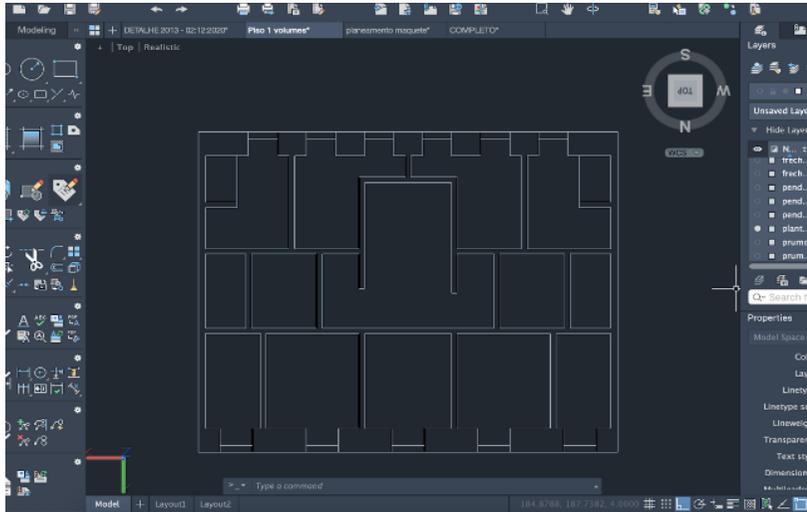


Figura 1. Planta do modelo desenvolvido.

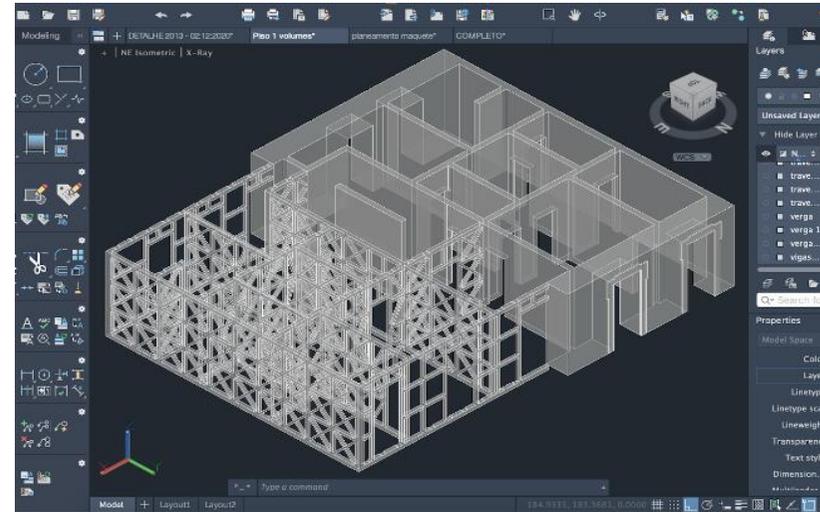


Figura 2. Perspetiva do desenvolvimento das paredes.

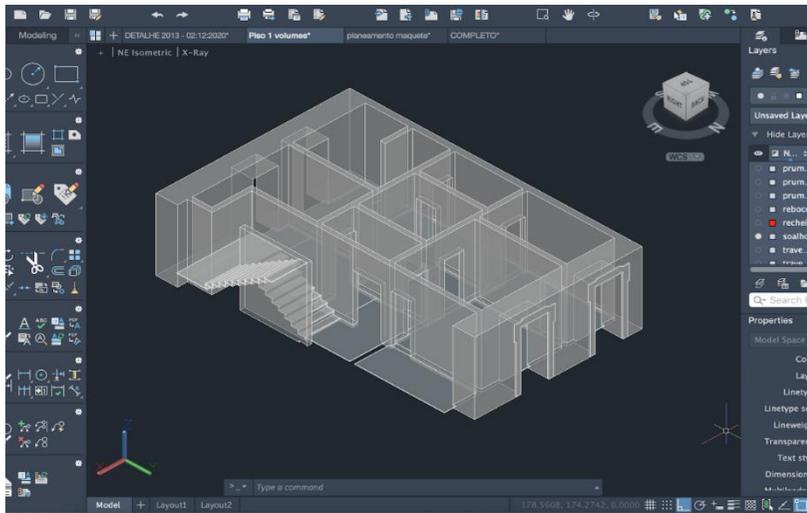


Figura 3. Integração da caixa de escadas no modelo.

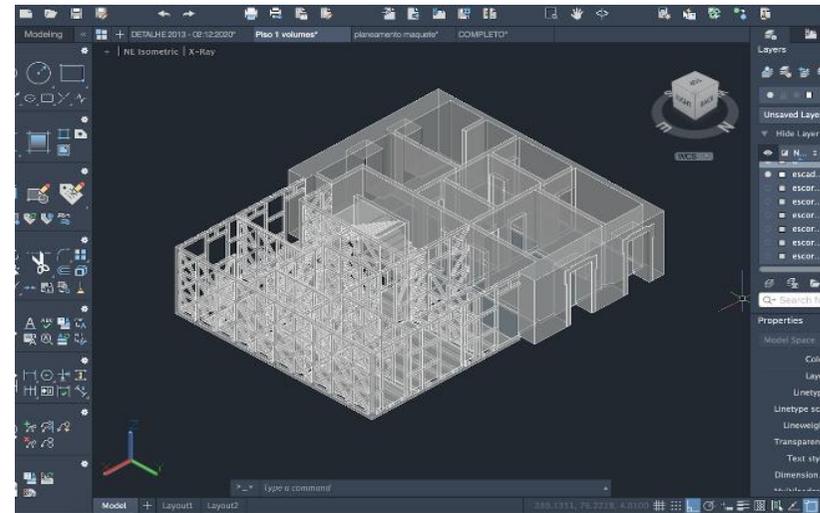


Figura 4. Modelação completa do primeiro piso

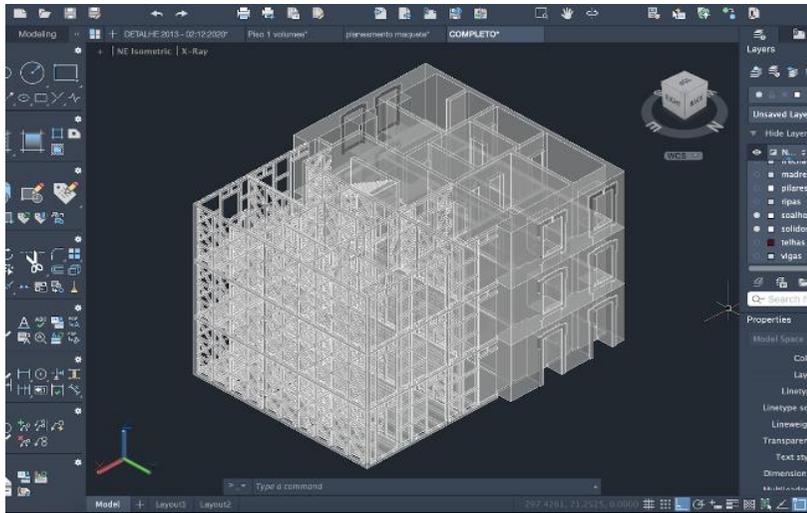


Figura 5. Modelação completa dos três pisos aéreos.

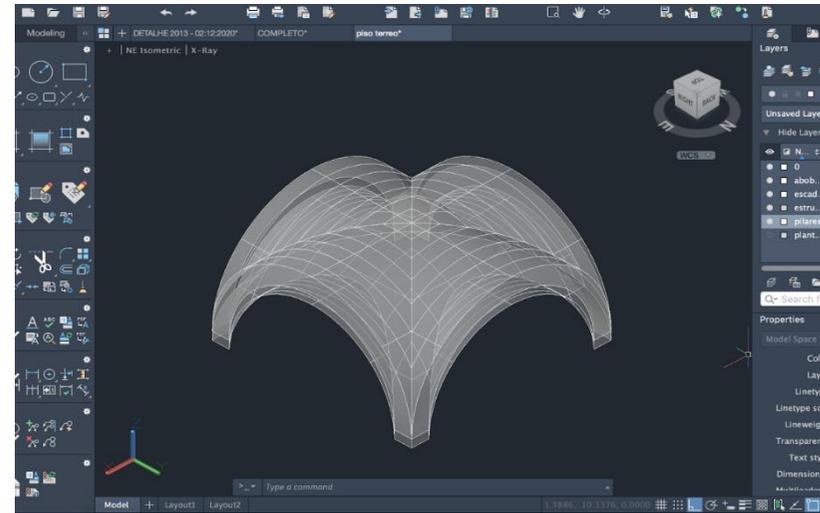


Figura 6. Modelação de uma abóbada de berço quadripartida.

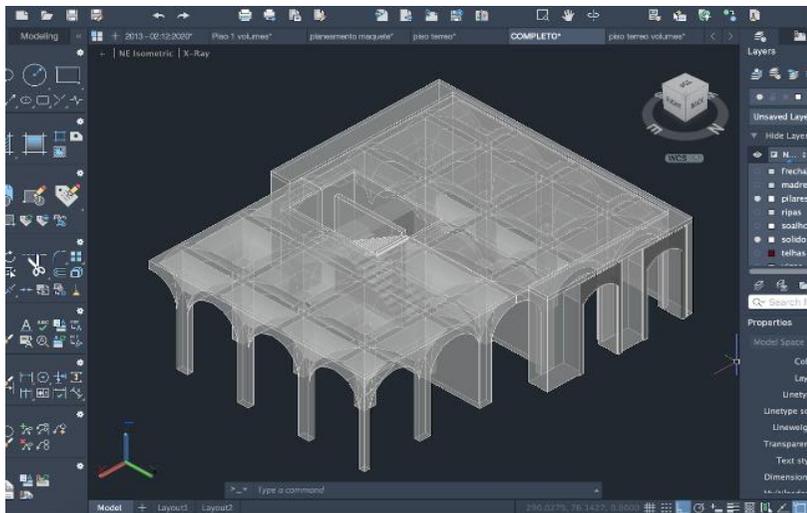


Figura 7. Modelação do piso térreo completo.

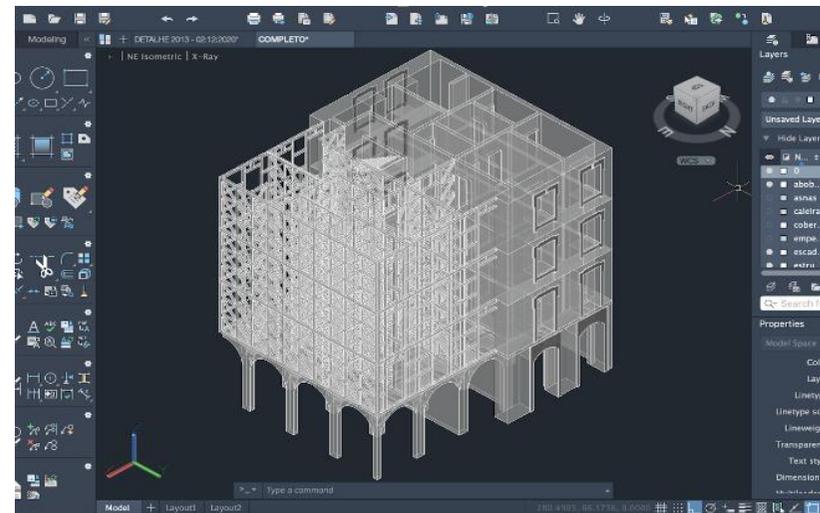


Figura 8. Modelação completa do piso térreo e pisos aéreos.

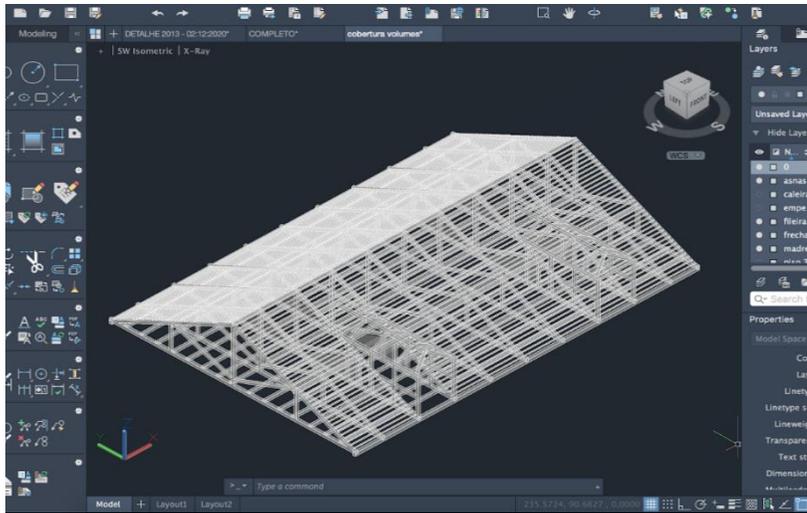


Figura 9. Estrutura completa da cobertura.

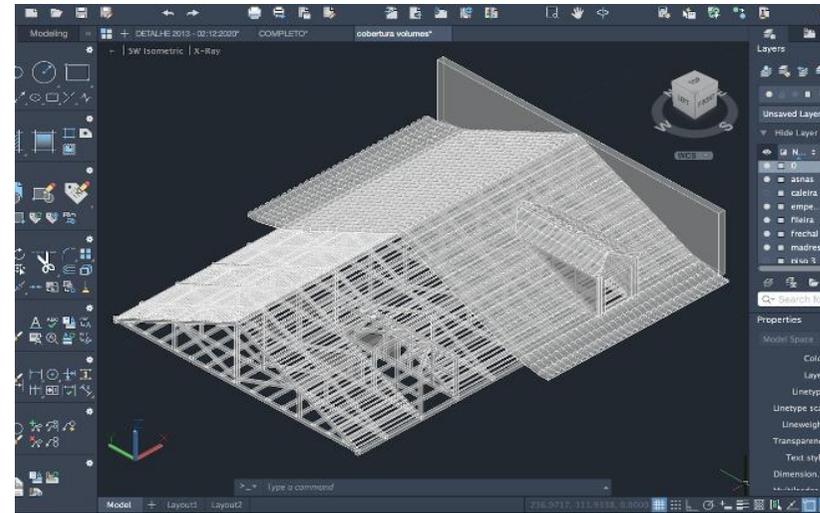


Figura 10. Modelação do piso de cobertura completo.

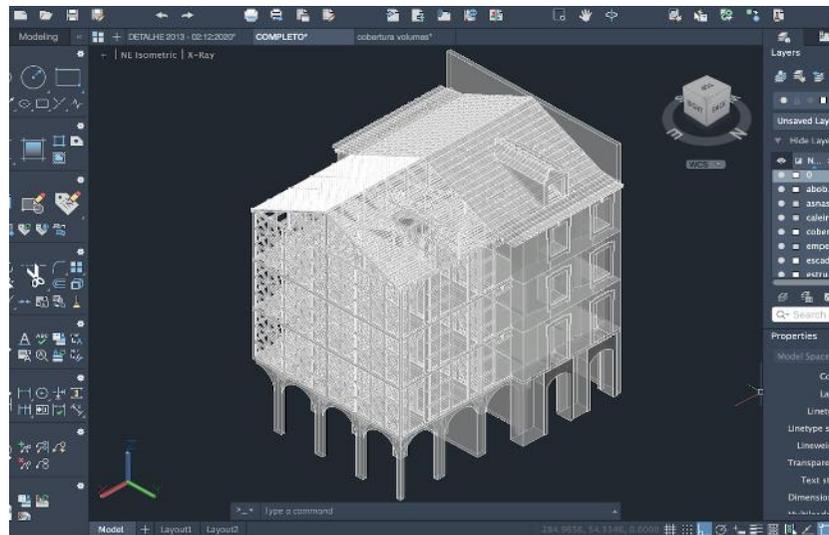


Figura 11. Modelação completa do edifício pomalino.

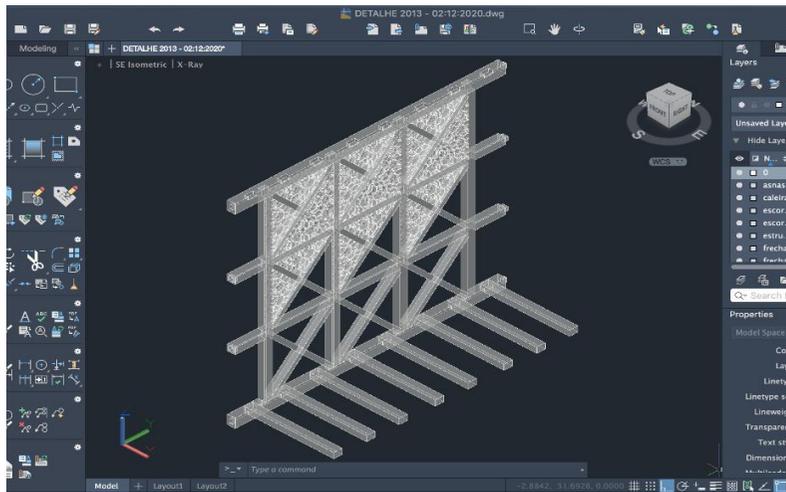


Figura 12. Modelação do modelo de detalhe de frontal (1:10).

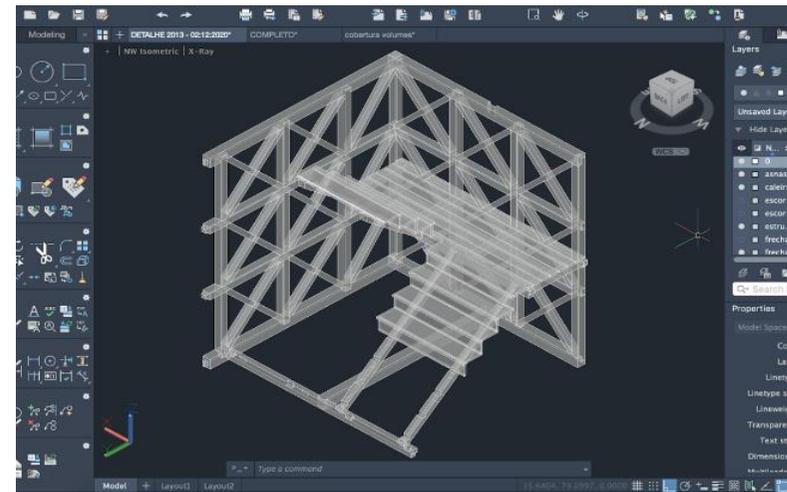


Figura 13. Modelação do modelo de detalhe de caixa de escadas (1:10).

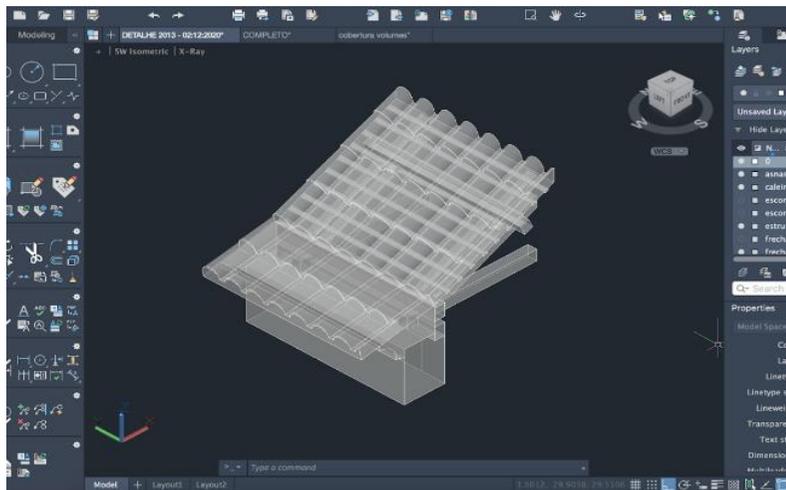


Figura 14. Modelação do modelo de detalhe da cobertura (1:10).

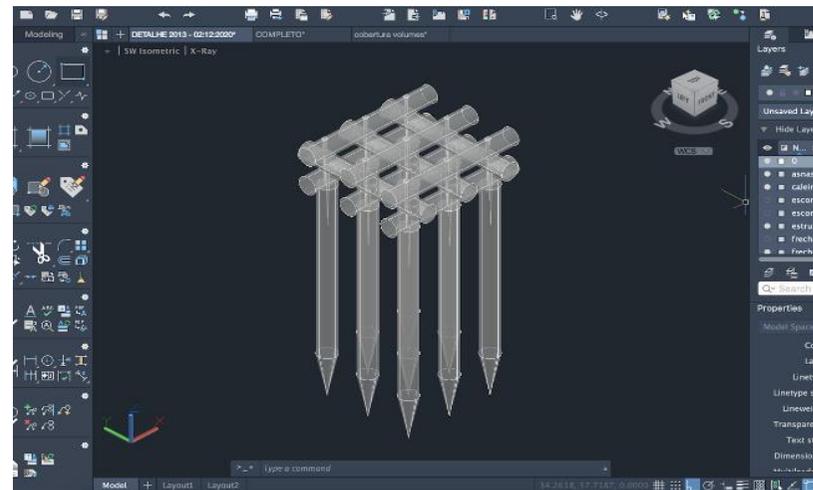


Figura 15. Modelação do modelo de detalhe de estacas de fundação (1:10).

## **Anexo 2-** Imagens do processo de planeamento da impressão dos modelos

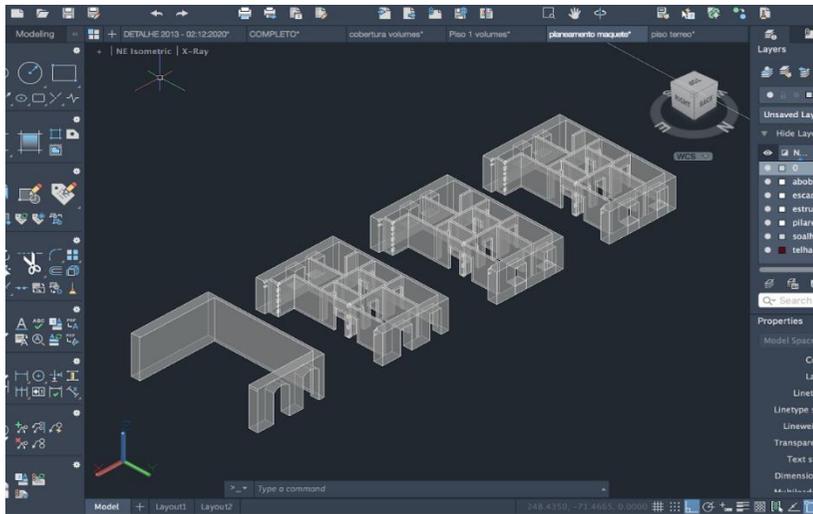


Figura 16. Planeamento dos elementos representativos do edifício.

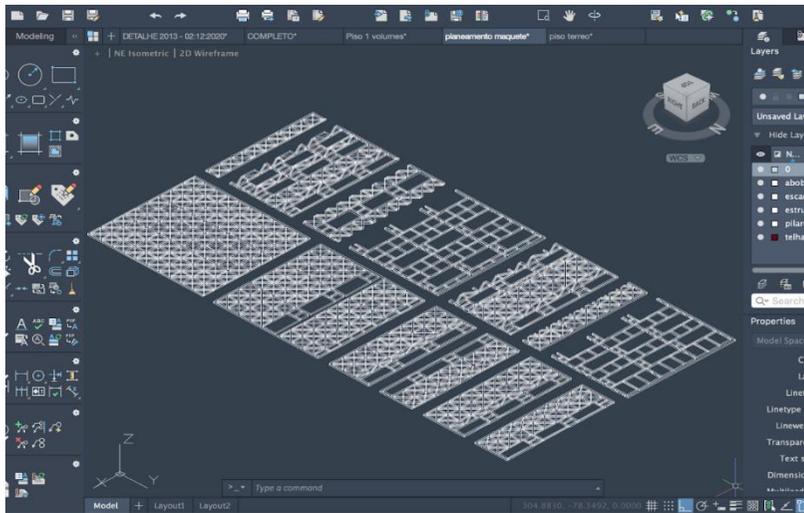


Figura 18. Planeamento da impressão dos painéis da estrutura da gaiola pombalina.

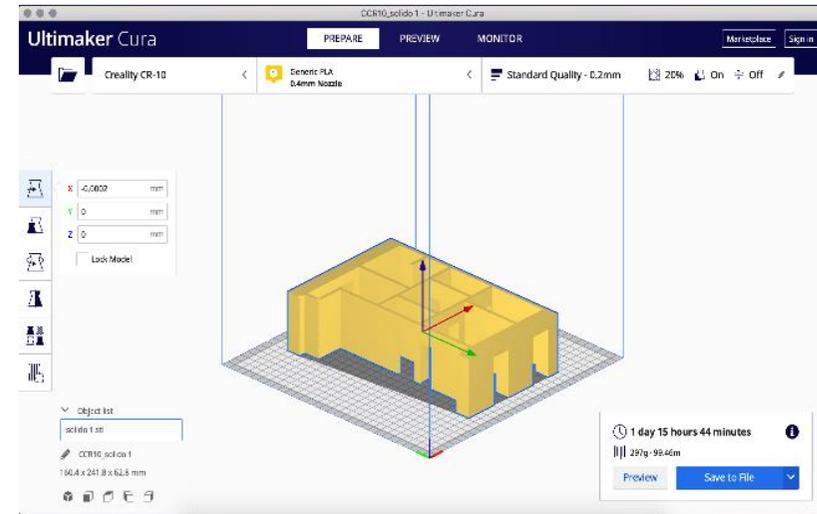


Figura 17. Simulação da impressão do primeiro piso aéreo como uma peça.

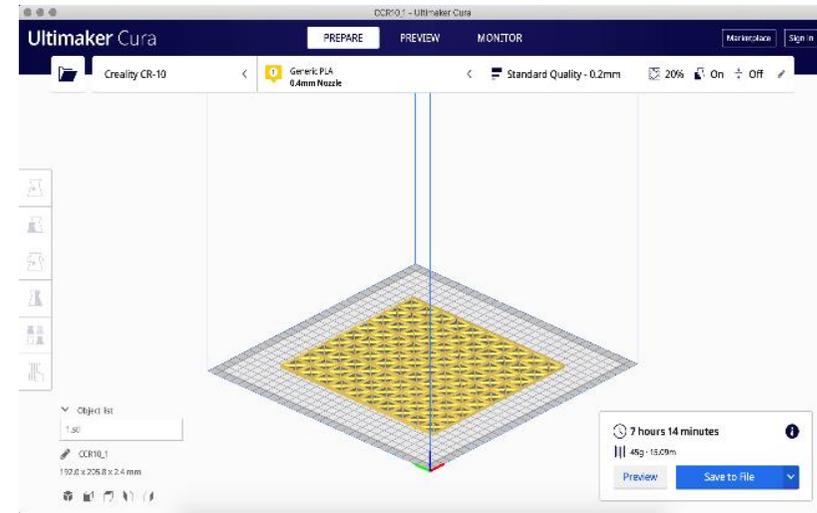


Figura 19. Simulação da impressão de uma peça da estrutura na horizontal.

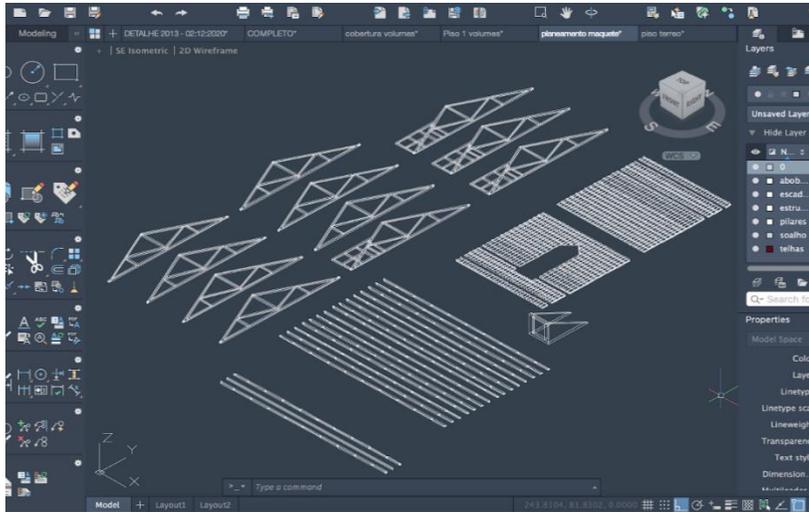


Figura 20. Planeamento dos elementos do telhado.

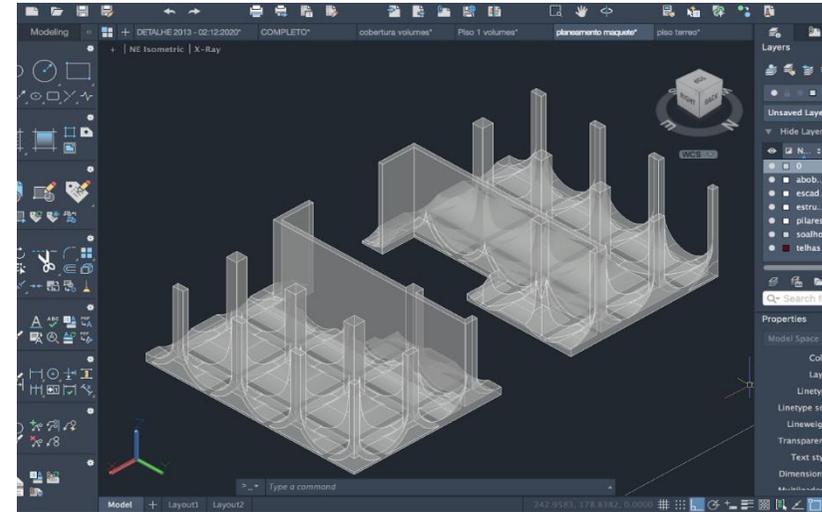


Figura 21. Planeamento das peças do piso térreo.

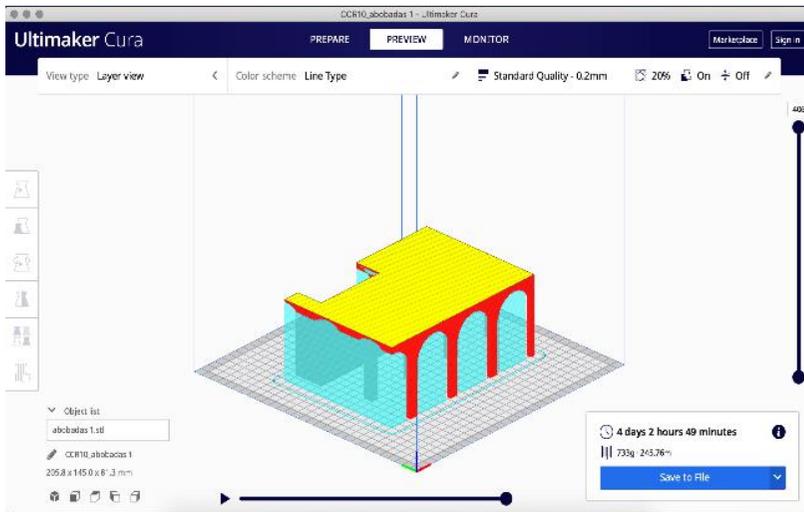


Figura 22. Simulação da impressão da superfície abobadada na sua posição original.

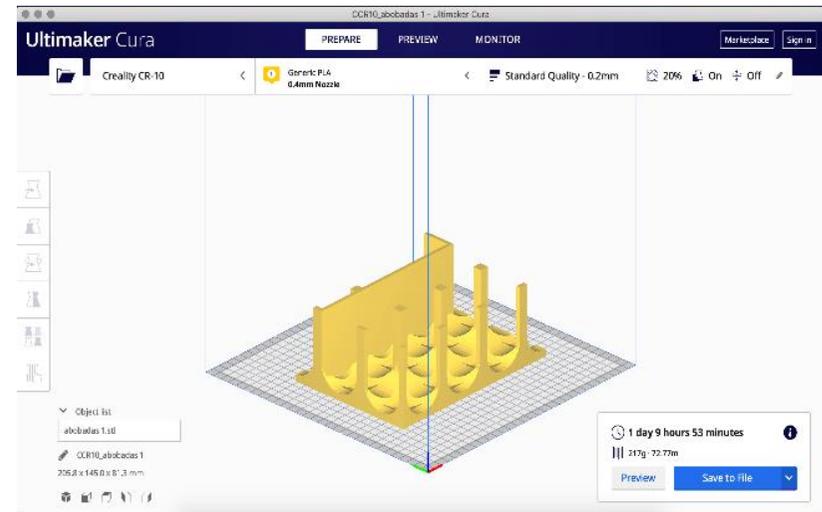


Figura 23. Simulação da impressão da mesma peça como previsto no planeamento.

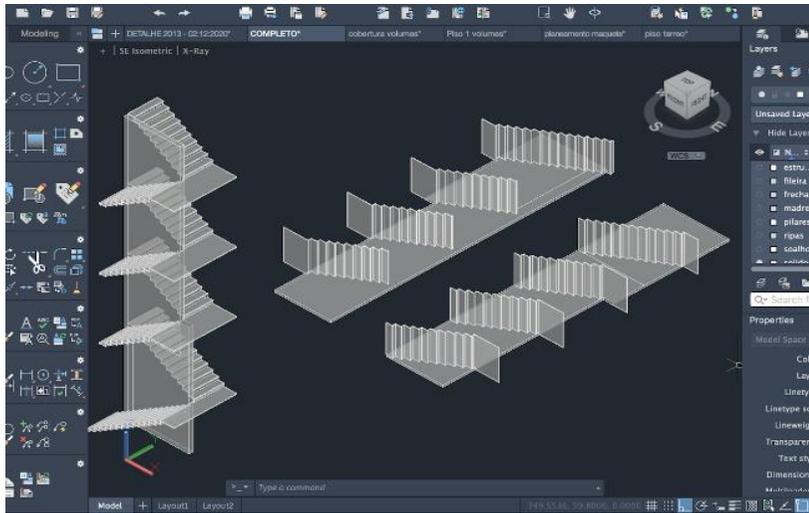


Figura 24. Planeamento da impressão das escadas e peça como elemento único.

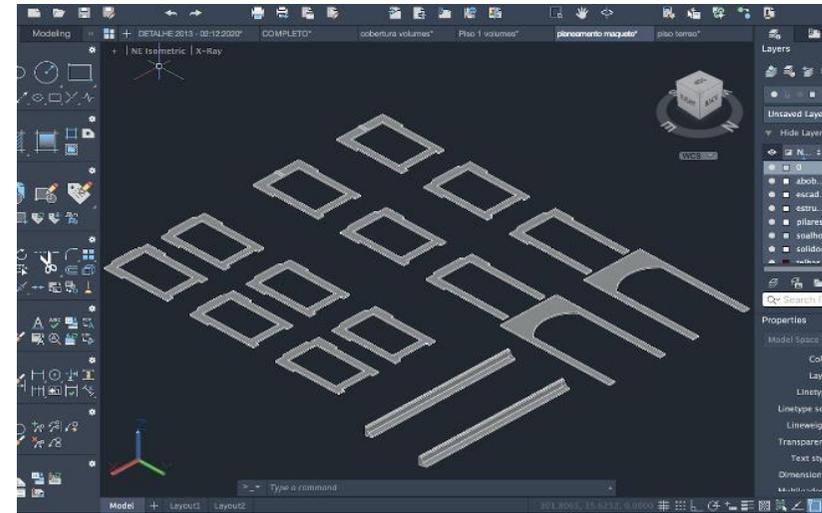


Figura 25. Planeamento das cantarias e corijas.

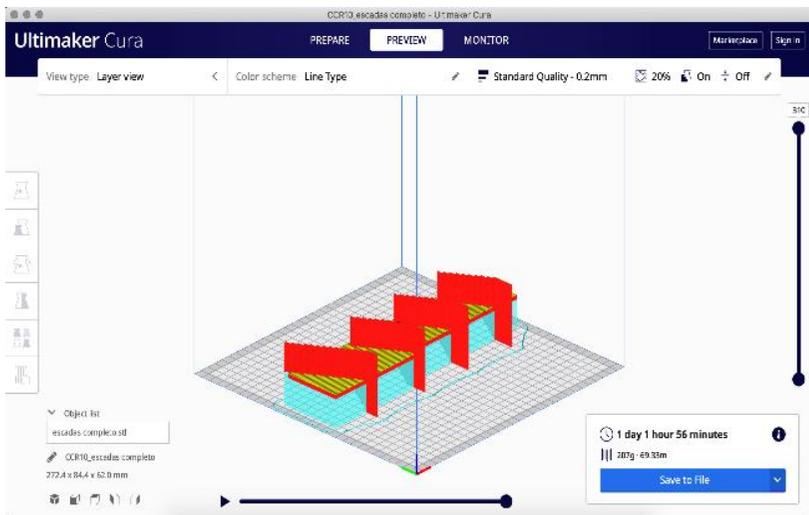


Figura 26. Planeamento da impressão das escadas como um todo.

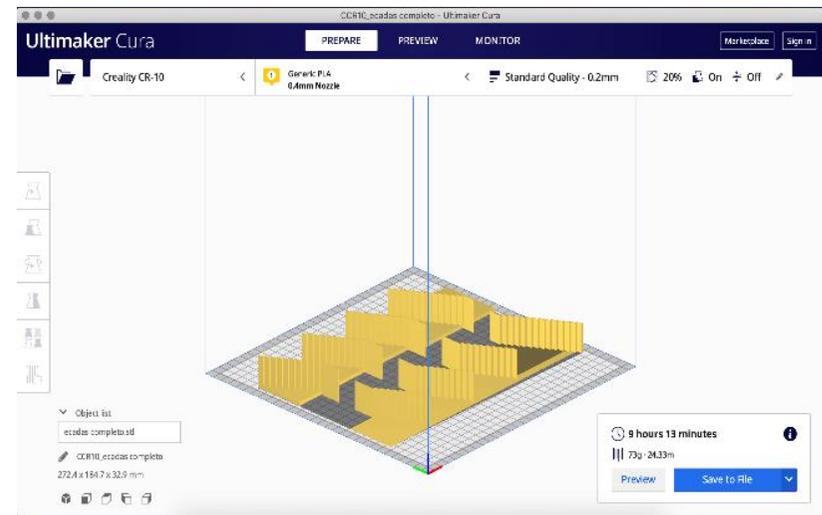


Figura 27. Simulação da impressão das escadas divididas

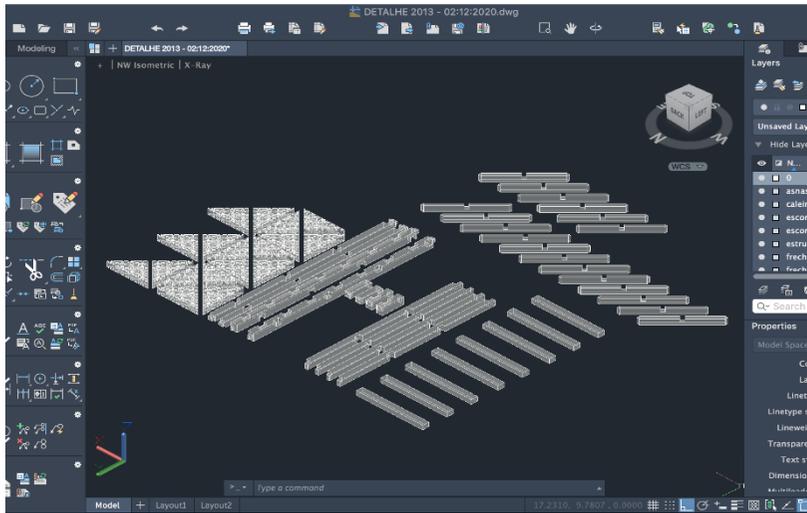


Figura 28. Planeamento das peças que compõem o detalhe da parede de frontal.

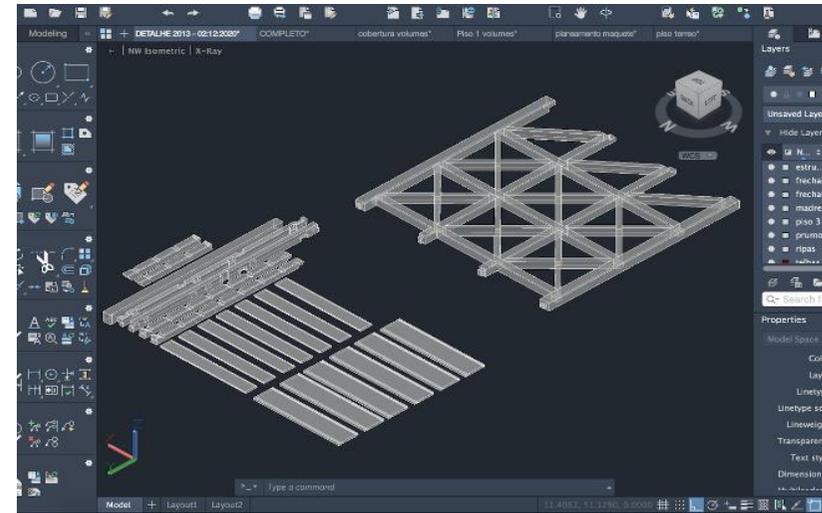


Figura 29. Planeamento das peças que compõem o detalhe da caixa de escadas.

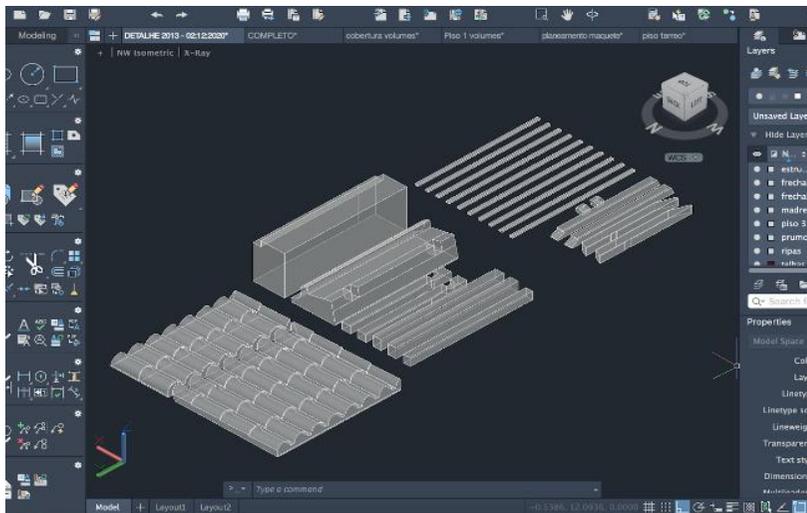


Figura 30. Planeamento das peças que compõem o detalhe da cobertura.

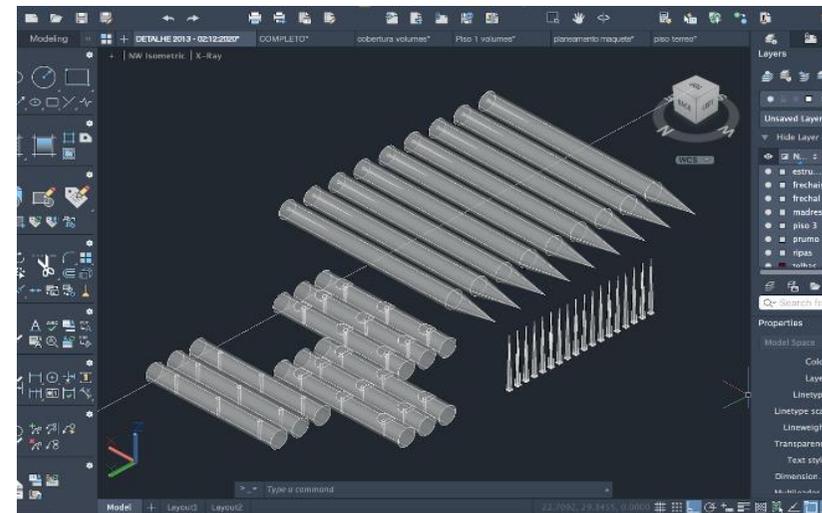


Figura 31. Planeamento das peças que compõem o detalhe das estacas de fundação.

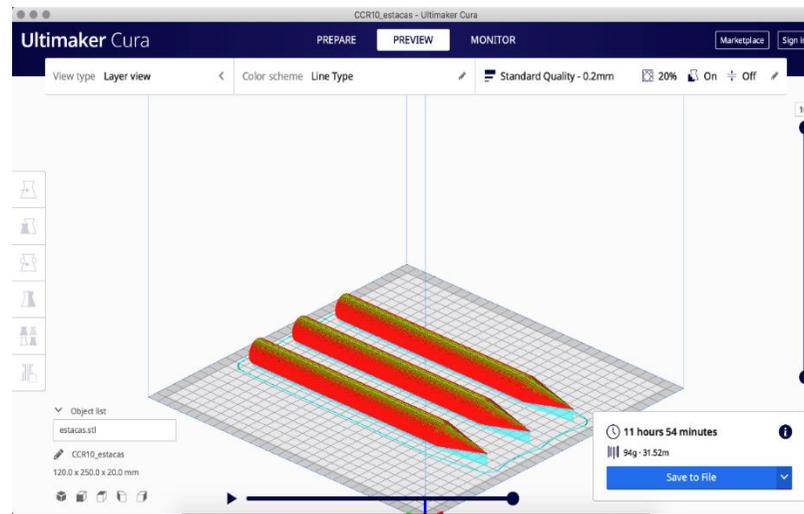


Figura 32. Exemplo de suportes inevitáveis (a azul ciano).

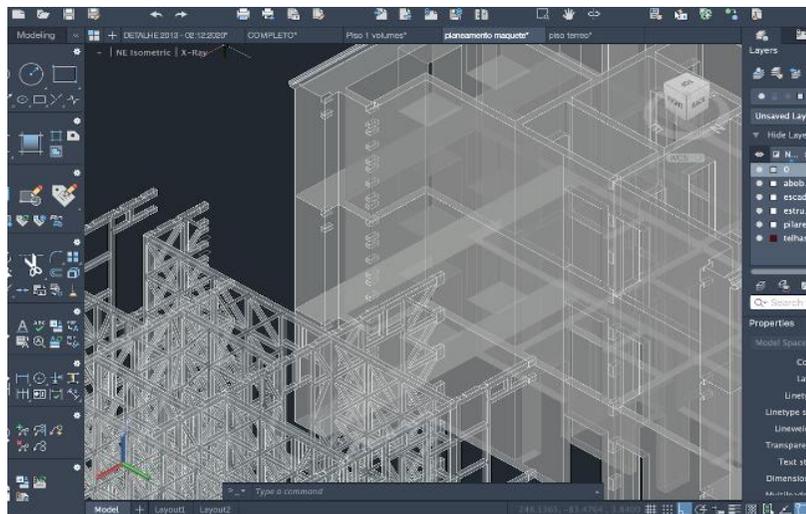


Figura 33. Articulação entre a estrutura da gaiola e o edifício (não encaixada).

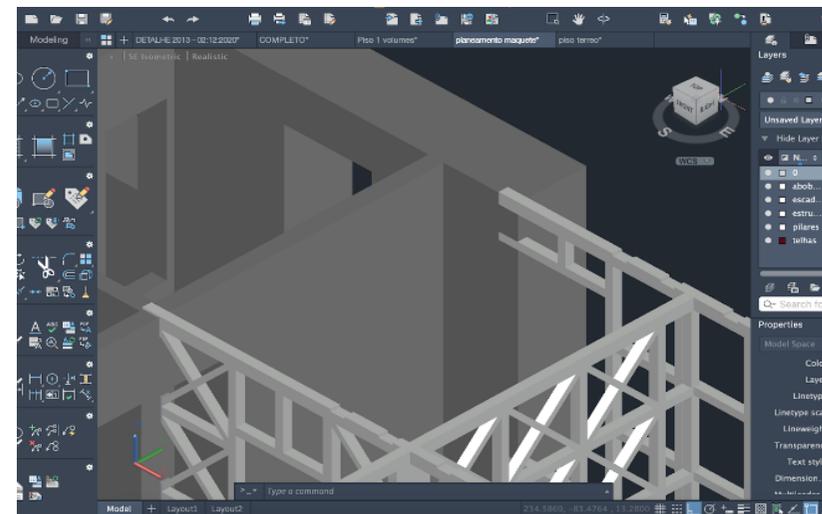


Figura 34. Articulação entre a estrutura da gaiola e o edifício (encaixada).

## **Anexo 3- Imagens e fotografias do processo de impressão e montagem dos modelos.**



Figura 35. Peça deformada por falta de aderência à base da impressora.



Figura 36. Peça inacabada por falta de material.

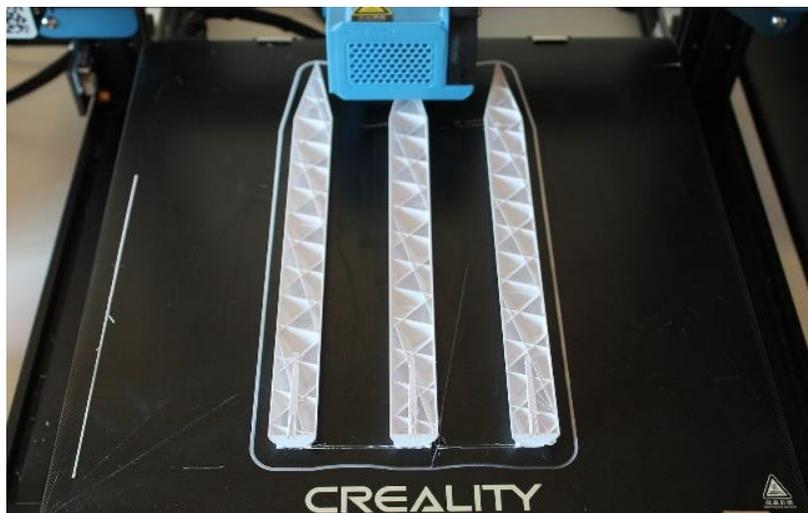


Figura 37. Impressão de estacas de fundação (1:10).

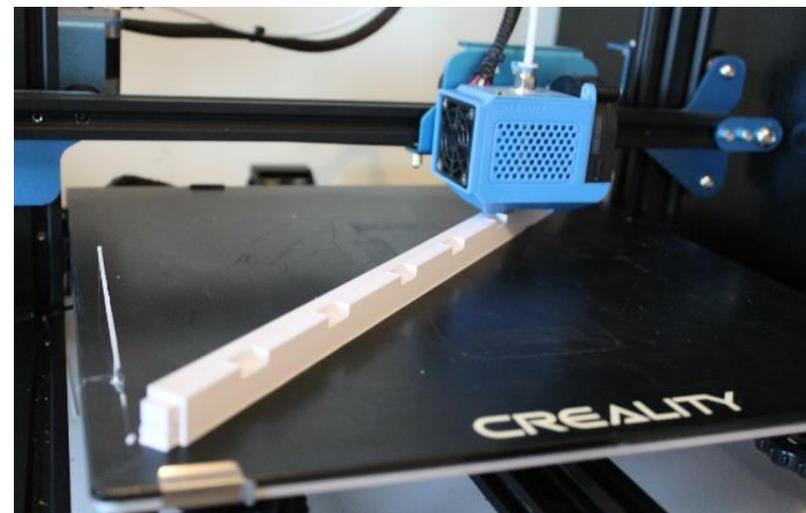


Figura 38. Impressão de frechal (1:10).

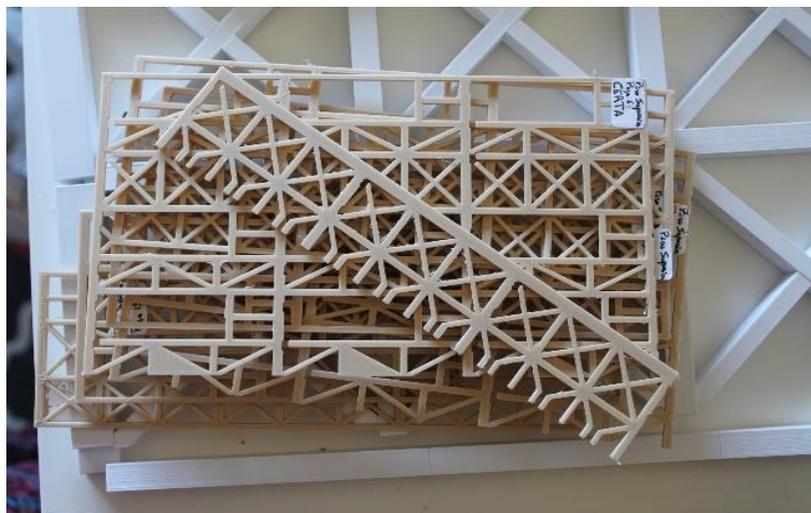
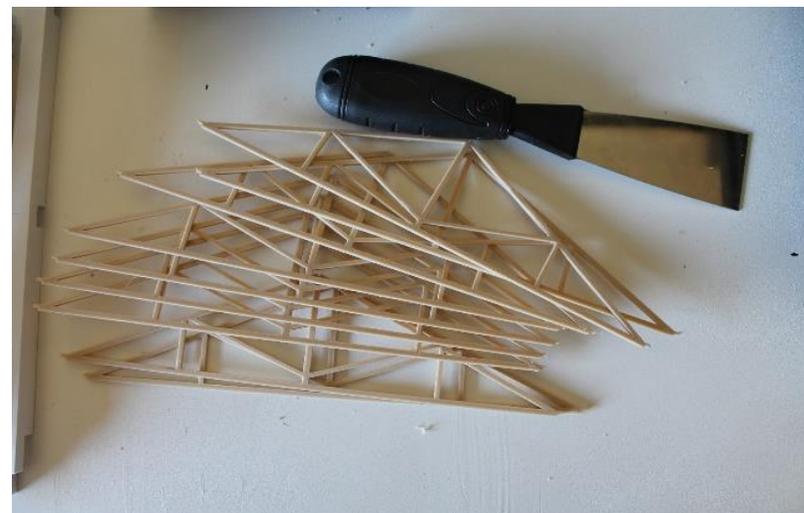


Figura 39. Frontais (1:50).



.Figura 40. Asnas (1:50).



Figura 41. Fundações (1:10).

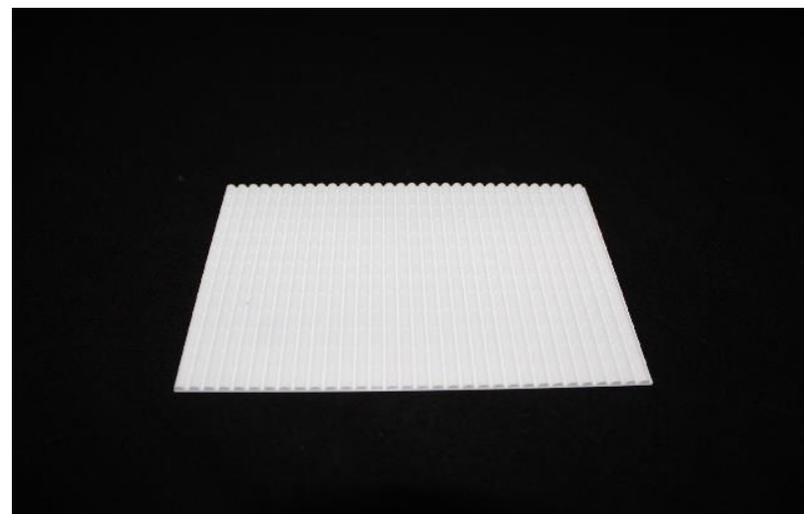


Figura 42. Telhado (1:50).

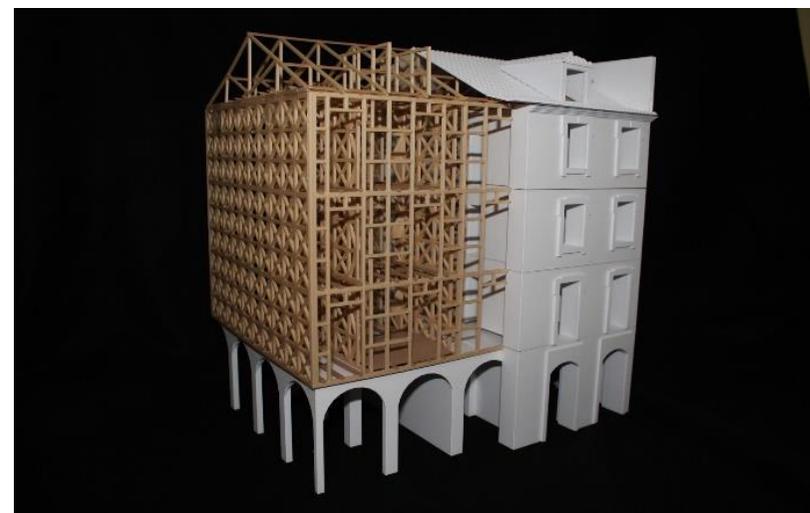
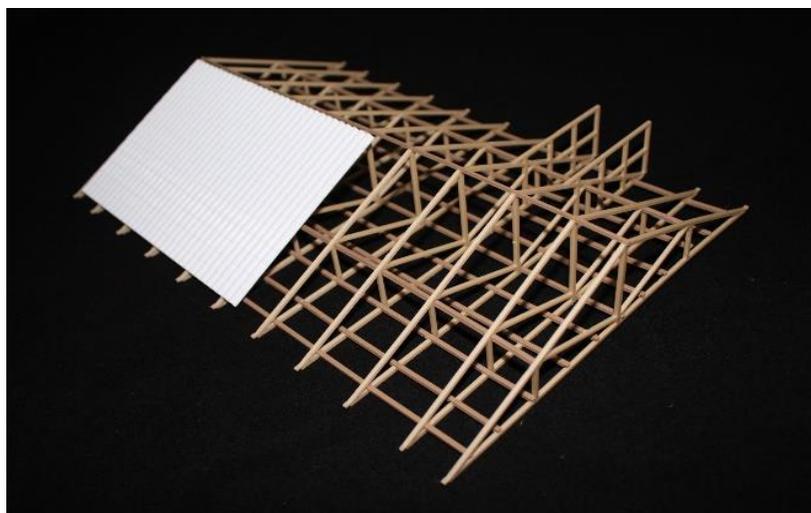
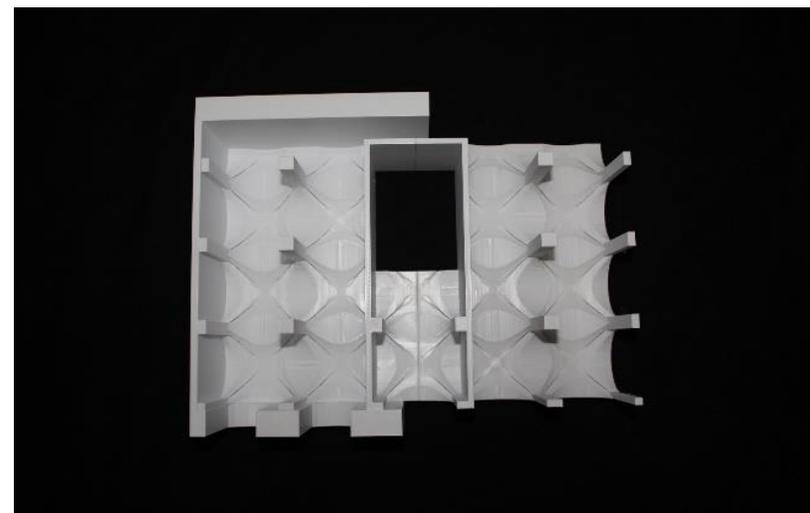


Figura 4. Sequência de fotografias ilustrativas da montagem do modelo de escala 1:50.

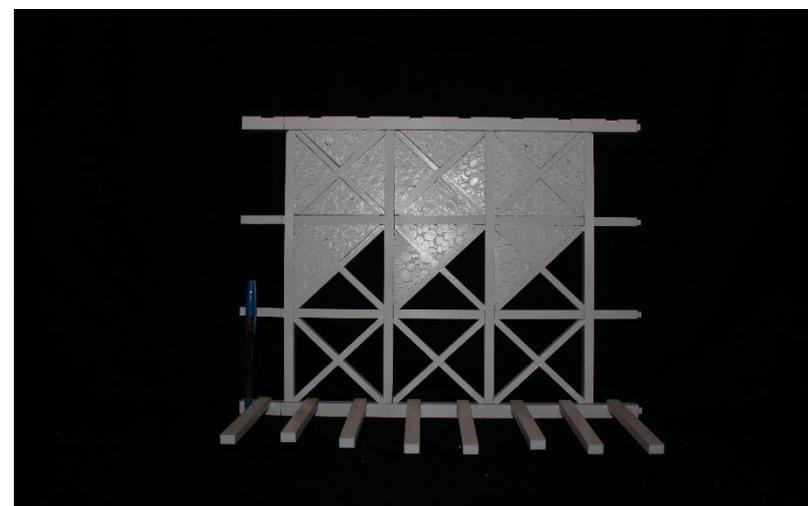
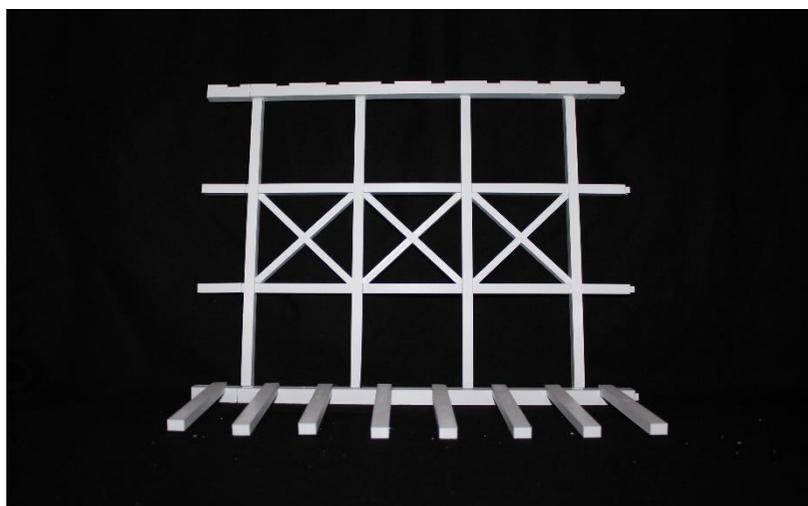
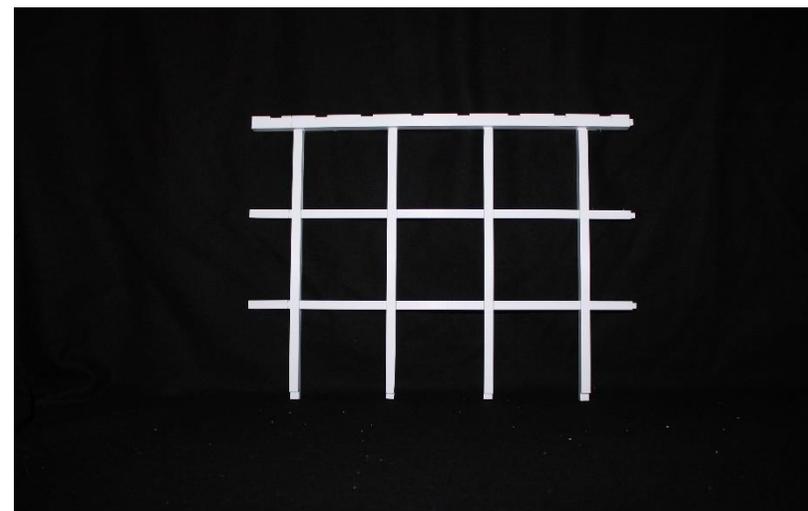
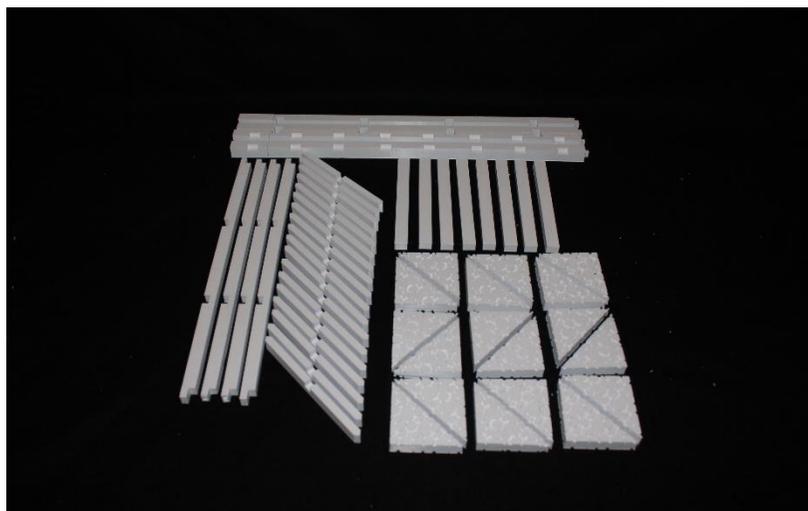


Figura 44. Sequência de fotografias ilustrativas da montagem do modelo de detalhe de frontal (1:10).

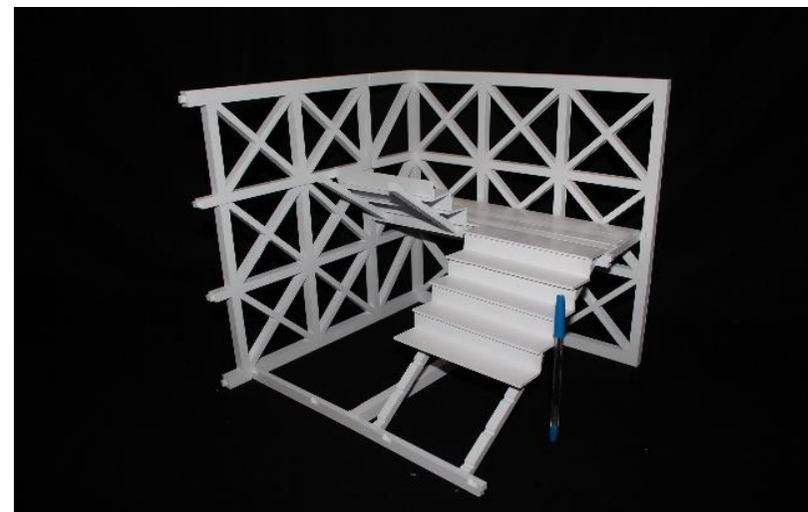
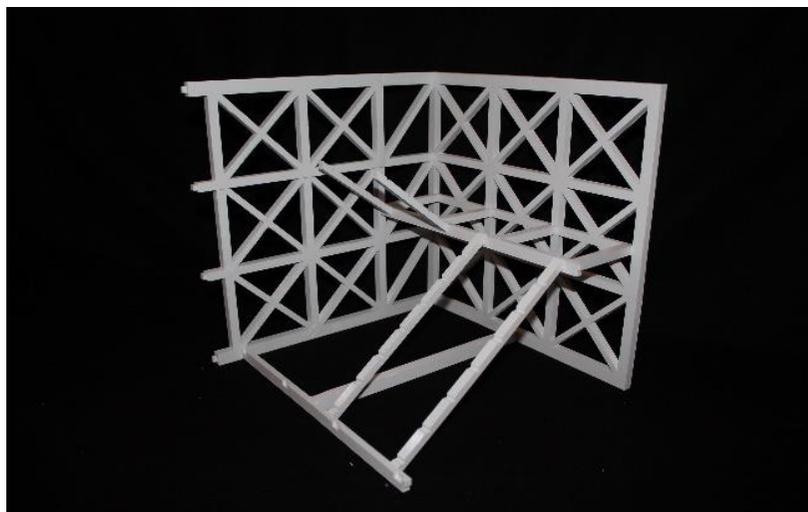
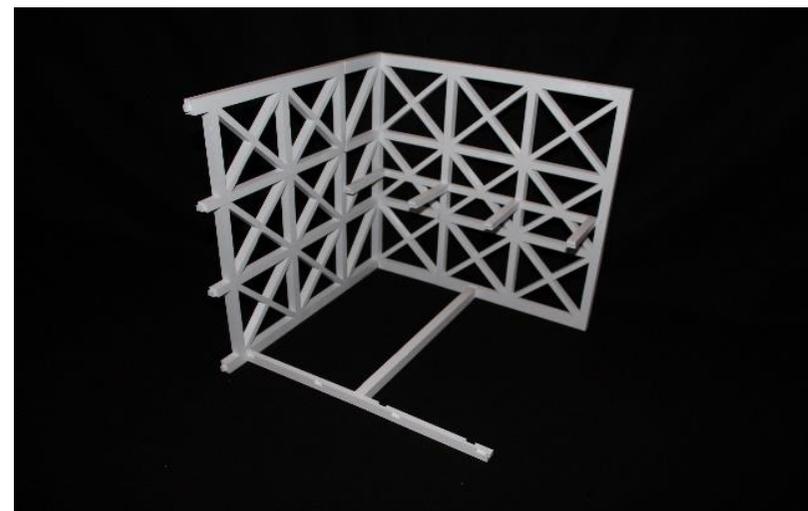
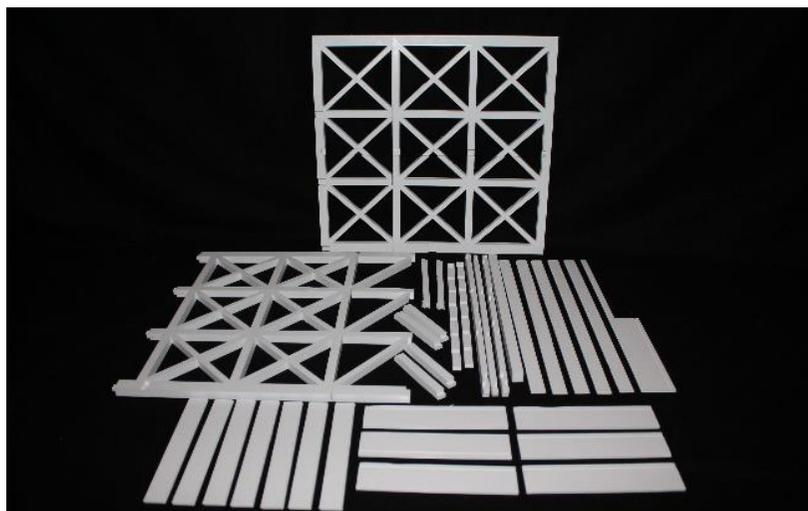


Figura 45. Sequência de fotografias ilustrativas da montagem do modelo de detalhe da caixa de escadasI (1:10).

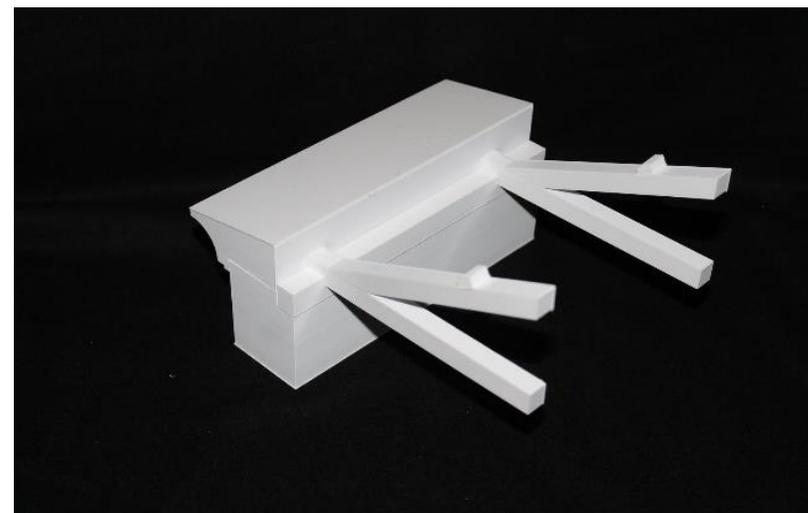


Figura 46. Sequência de fotografias ilustrativas da montagem do modelo de detalhe da cobertura (1:10).

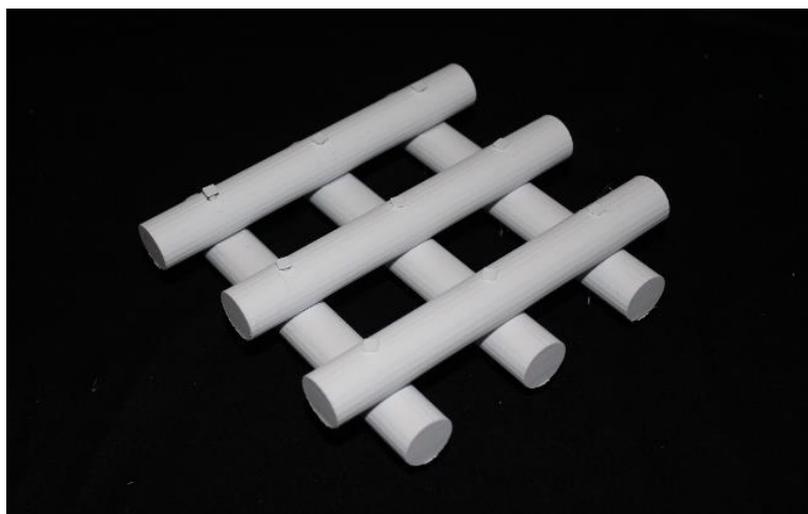


Figura 47. Sequência de fotografias ilustrativas da montagem do modelo de detalhe das estacas de fundação (1:10).