



Mestrado em Engenharia Civil - Construções Cívicas

***Avaliação experimental da resistência de alvenaria  
cerâmica com junta de encaixe***

Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia Civil

**Simão Santos Clérigo**

Leiria, *Setembro de 2016*





Mestrado em Engenharia Civil - Construções Cívicas

***Avaliação experimental da resistência de alvenaria  
cerâmica com junta de encaixe***

Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia Civil

**Simão Santos Clérigo**

Dissertação de Mestrado realizada sob a orientação do Doutor Florindo Gaspar, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e coorientação do Doutor Paulo Fernandes, Professor Coordenador da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, *Setembro de 2016*







# Agradecimentos

---

Quero aqui expressar os meus sinceros agradecimentos às pessoas que de forma direta ou indireta contribuíram para realização deste trabalho e me apoiaram no seu desenvolvimento. Agradeço em particular:

Ao meu orientador científico, o professor Florindo Gaspar pela orientação, pela pronta disponibilidade em todas as situações e pelos conhecimentos teóricos e práticos partilhados no desenvolvimento do trabalho, mas agradeço sobretudo pelos conselhos e críticas, que foram uma mais-valia para a realização deste trabalho e para a minha formação como engenheiro civil.

Ao meu coorientador, o professor Paulo Fernandes, por toda a partilha de informação sobre o procedimento da realização dos ensaios de compressão bem como toda a parte técnica envolvida.

À Eng.<sup>a</sup> Vânia Fernandes, técnica superior do laboratório de estruturas e betão do DEC-ESTG, pela disponibilidade e troca de conhecimentos sobre os procedimentos e realização dos ensaios, e ainda aos técnicos das equipas de manutenção do IPL pela disponibilidade.

À Prélis-Smart Ceramics, em especial ao Eng.º Luís Ferreira pela parceria que possibilitou este projeto, pela sua disponibilidade, troca de conhecimentos e pelo material fornecido, essencial à realização deste trabalho.

À empresa Civerpro, pelo fornecimento da argamassa polimérica, pela troca de informação e pelo material cedido ao Departamento de Engenharia Civil, importante na construção das alvenarias.

Ao Instituto Politécnico de Leiria e à Escola Superior de Tecnologia e Gestão por possibilitar a realização deste trabalho colocando ao dispor todos os equipamentos e meios técnicos necessários.

Aos meus amigos, pela amizade, companheirismo e apoio demonstrado durante a realização da presente dissertação.

À minha família e namorada, pelo constante apoio, compreensão e paciência ao longo da realização deste trabalho.



## Resumo

---

Em Portugal tal como no resto do mundo, predominavam nos edifícios antigos as alvenarias com função estrutural. À semelhança dos restantes países da Europa, também em Portugal as estruturas em alvenaria com função estrutural sofreram após a década de 60 uma estagnação, como consequência do domínio das estruturas reticuladas em betão armado.

Em países como Alemanha, França, Reino Unido e Itália, a utilização de alvenaria estrutural não sofreu o declínio acentuado e prolongado no tempo que se verificou em Portugal. Esta ressurgiu com o aparecimento de novos materiais, mais resistentes e com melhor comportamento térmico. Ocorreu também nestes países, o desenvolvimento de novas recomendações práticas aplicadas às estruturas em alvenaria, e o dimensionamento destas foi apoiado em projetos de investigação experimental e numa análise estrutural sólida.

Atualmente em Portugal, a construção com recurso a alvenaria estrutural é residual e em consequência, o desenvolvimento de novas soluções para alvenaria é quase inexistente. O tijolo *UNIKO* desenvolvido pela empresa Prélis-Smart Ceramics surge como uma nova solução para alvenaria, com características únicas ao nível geométrico permitindo uma utilização ao nível estrutural. Esta nova solução está associada ao conceito de faça-você-mesmo permitindo processos de autoconstrução.

O trabalho desenvolvido na presente dissertação foi de encontro às necessidades de compreender, por parte do fabricante, qual a melhor utilização para o tijolo *UNIKO*, assim como obter as suas características mecânicas. Para tal foi desenvolvida uma campanha experimental onde foram definidas 5 tipologias de paredes de alvenaria, nas quais foram empregues unidades cerâmicas *UNIKO*. Numa primeira fase foram realizados ensaios de modo a caracterizar os materiais, o tijolo e o cimento-cola, empregues na construção das paredes de alvenaria. Posteriormente foram realizados os ensaios de compressão axial às diferentes paredes de alvenaria, com o objetivo de obter as suas características mecânicas, caracterizar o seu comportamento estrutural e perceber quais as tipologias com melhor desempenho.

**Palavras-chave:** alvenaria, alvenaria estrutural, tijolo *UNIKO*, características mecânicas, ensaio de compressão axial.



# Abstract

---

In Portugal, as well as in the rest of the world there was a predominance, in the oldest buildings, of masonry with a structural function. Then, not only in Portugal but in other European countries, the masonry structures with a structural function suffer a stagnation after the decade of 60, as a result of the prevalence of reticulated structures in reinforced concrete.

The use of structural masonry did not have an equal decline and so prolonged in time in countries like Germany, France, United Kingdom, and Italy, as the one observed in Portugal. With the appearance of new materials, more resistant and with improved thermal behaviour, its utilization reappeared. In addition, there was a development in these countries of new practical recommendations applied to the masonry structures, plus the design of these was supported by experimental investigation projects and also on a cohesive structural analysis.

At the present time in Portugal, the construction with resource to structural masonry is residual, consequently the development of new solutions for masonry is almost inexistent. The *UNIKO* brick designed by the company Prélis-Smart Ceramics presents itself as a new option for masonry with unique characteristics at the geometric level, which allows it to be used at a structural level. This type of design is associated with the concept of do-it-yourself (DIY) providing auto construction processes.

The work developed in this thesis was in compliance with the need to understand, from the manufacturer point of view, what is the premier way to employ the *UNIKO* brick along with the aim to mechanically characterise it. Therefore, it was developed an experiment in which 5 typologies of masonry walls were defined and where it was use *UNIKO* ceramic units. Firstly, trials were executed in order to characterise the materials, brick and cement based adhesive, used in the construction of the masonry walls. Subsequently, trials of axial compression were performed on the distinct masonry walls, with the purpose of obtaining its mechanical properties, characterize its structural performance and ultimately comprehend which typologies have an unsurpassed performance.

**Keywords:** masonry, structural masonry, *UNIKO* brick, mechanical properties, axial compression test



# Índice de figuras

---

<b>Figura 1</b> - Vestígios de primeiras habitações em alvenaria de pedra .....	6
<b>Figura 2</b> - Exemplo de estruturas de alvenaria de grau elevado de desenvolvimento .....	8
<b>Figura 3</b> - Tipologias de alvenarias mais recorrentes em Portugal no passado, antes do domínio do tijolo cerâmico .....	10
<b>Figura 4</b> - Evolução da tipologia de alvenaria em Portugal desde 1940 até 1980 .....	11
<b>Figura 5</b> - Comparação de sistemas construtivos entre Portugal e outros países Europeus .....	19
<b>Figura 6</b> - Construção em alvenaria estrutural simples .....	23
<b>Figura 7</b> - Construção em alvenaria armada .....	24
<b>Figura 8</b> - Construção em alvenaria confinada .....	25
<b>Figura 9</b> - Esquemas representativos de sistemas de alvenaria estrutural mista .....	26
<b>Figura 10</b> - Unidades de alvenaria recorrentes em Portugal .....	28
<b>Figura 11</b> - Comparação do desenho de modelos propostos e tipologia de alvenaria correspondentes .....	30
<b>Figura 12</b> - Pano de alvenaria executada com unidades <i>Tecnotijolo</i> .....	30
<b>Figura 13</b> - Unidades <i>cBloco</i> de dimensões 30x20x19 .....	31
<b>Figura 14</b> - Elementos complementares para a construção de alvenarias com unidades <i>cBloco</i> .....	32
<b>Figura 15</b> - Tijolo <i>UNIKO</i> .....	32
<b>Figura 16</b> - Tijolos térmicos para aplicação em alvenaria de um pano .....	33
<b>Figura 17</b> - Elementos complementares para a construção de alvenarias com unidades <i>Biomur</i> .....	34
<b>Figura 18</b> - Modelos das unidades cerâmicas da marca <i>Alveolater</i> .....	35
<b>Figura 19</b> - Unidades cerâmicas do Grupo <i>Danesi</i> .....	36
<b>Figura 20</b> - Unidades cerâmicas do Grupo <i>Poroton</i> .....	37
<b>Figura 21</b> - Unidades cerâmicas <i>Unipor Coriso</i> do Grupo <i>Unipor</i> .....	37
<b>Figura 22</b> - <i>BT-Bloco Termodissipador</i> .....	38
<b>Figura 23</b> - Comparação entre o sistema tradicional de alvenaria e o sistema <i>BT-Bloco Termodissipador</i> .....	38
<b>Figura 24</b> - Variação da resistência das unidades cerâmicas para diferentes temperaturas de cozedura e percentagens de substituição de argila por subprodutos de mármore .....	40
<b>Figura 25</b> - Palha, resíduos de tabaco, serradura e argila .....	41
<b>Figura 26</b> - Unidade cerâmica obtida pela incorporação de resíduos provenientes da drenagem fluvial .....	43

<b>Figura 27</b> - Resistência mecânica de unidades cerâmicas com adição de diferentes percentagens de fosfogesso .....	45
<b>Figura 28</b> - Valores de resistência á compressão das unidades cerâmicas para diferentes percentagens de adição de cinzas de casca de arroz (RHA) e resíduos de canas de bagaço (SBA) .....	46
<b>Figura 29</b> - Percentagens de absorção de água para diferentes percentagens de adição de cinzas de casca de arroz (RHA) e resíduos de canas de bagaço (SBA) .....	46
<b>Figura 30</b> – Análise do coeficiente de transmissão térmica através de modelos de elementos finitos.....	47
<b>Figura 31</b> - Características geométricas da unidade cerâmica <i>UNIKO</i> .....	50
<b>Figura 32</b> - Características geométricas do tijolo térmico.....	50
<b>Figura 33</b> - Materiais utilizados na conceção das alvenarias.....	51
<b>Figura 34</b> - Procedimento de corte das unidades cerâmicas <i>UNIKO</i> , para obtenção de provetes para posterior ensaio á compressão.....	52
<b>Figura 35</b> - Procedimento de retificação dos provetes para posterior ensaio á compressão.....	53
<b>Figura 36</b> - Procedimento de pesagem de provetes cerâmicos.....	54
<b>Figura 37</b> - Preparação dos provetes cerâmicos para o ensaio à compressão.....	54
<b>Figura 38</b> - Dimensão dos provetes após o corte.....	55
<b>Figura 39</b> - Provetes do tijolo térmico após processo de retificação.....	55
<b>Figura 40</b> - Preparação dos provetes cerâmicos para ensaio de determinação de resistência á compressão.....	56
<b>Figura 41</b> - Preparação dos provetes de cimento-cola para posterior ensaio á compressão e flexão.....	57
<b>Figura 42</b> - Preparação dos provetes de cimento-cola para ensaio à flexão.....	58
<b>Figura 43</b> - Procedimento de ensaio á compressão dos provetes de cimento-cola.....	59
<b>Figura 44</b> - Provetes de argamassa polimérica.....	59
<b>Figura 45</b> - Alvenarias construídas com tijolo <i>UNIKO</i> .....	60
<b>Figura 46</b> - Processo construtivo das alvenarias da tipologia 1.....	62
<b>Figura 47</b> - Processo construtivo das alvenarias da tipologia 2.....	63
<b>Figura 48</b> - Processo construtivo das alvenarias da tipologia 3.....	64
<b>Figura 49</b> - Material utilizado na preparação do cimento-cola <i>Topcola Flex Super</i> .....	64
<b>Figura 50</b> - Processo construtivo das alvenarias da tipologia 4.....	66
<b>Figura 51</b> - Processo construtivo das alvenarias da tipologia 5.....	67
<b>Figura 52</b> - Preparação do ensaio de compressão axial.....	69
<b>Figura 53</b> - Esquema de posicionamento de defletómetros.....	71

<b>Figura 54</b> - Constituintes do sistema de controlo, registo e aquisição de dados.....	72
<b>Figura 55</b> – Esquema representativo dos patamares de carga e pausas efetuadas, durante os ensaios de compressão.....	73
<b>Figura 56</b> - Provetes após a realização do ensaio de resistência á compressão.....	75
<b>Figura 57</b> - Aspeto dos provetes após a realização do ensaio de resistência à compressão.....	76
<b>Figura 58</b> - Aspeto dos provetes de cimento-cola após a realização do ensaio de resistência á flexão.....	78
<b>Figura 59</b> - Aspeto dos provetes de cimento-cola após a realização do ensaio de resistência á compressão.....	79
<b>Figura 60</b> – Diagrama força-deslocamento do ensaio de compressão das alvenarias de tipologia 1, Alvenaria com contravento e sem material ligante nas juntas horizontais.....	81
<b>Figura 61</b> – Problemas ocorridos nos ensaios de compressão das alvenarias de tipologia 1.....	81
<b>Figura 62</b> – Diagrama força-deslocamento do ensaio de compressão das alvenarias de tipologia 2, Alvenaria com contraventamento e unidades cerâmicas retificadas.....	82
<b>Figura 63</b> – Momento da rotura da alvenaria 2.2 no ensaio de compressão.....	82
<b>Figura 64</b> – Diagrama força-deslocamento do ensaio de compressão das alvenarias de tipologia 3, Alvenaria sem contraventamento e com cimento-cola nas juntas horizontais.....	83
<b>Figura 65</b> – Diagrama força-deslocamento do ensaio de compressão das alvenarias de tipologia 4, Alvenaria sem contraventamento e com incorporação de varões de aço inoxidável em furações verticais.....	84
<b>Figura 66</b> – Comportamento da alvenaria 4.1 da tipologia 4 durante o ensaio de compressão axial.....	84
<b>Figura 67</b> – Diagrama força-deslocamento do ensaio de compressão das alvenarias de tipologia 5, Alvenaria sem contraventamento e com argamassa polimérica nas juntas horizontais.....	85



# Índice de Quadros

---

<b>Quadro 1</b> - Relação entre tipologias construtivas e épocas de construção, adapt. [19].....	11
<b>Quadro 2</b> - Extrato do capítulo III do RGEU [5].....	12
<b>Quadro 3</b> - Espessura de paredes de pedra ou tijolo (não incluindo rebocos e guarnecimentos) a que se refere o artigo 25º do RGEU [5].....	13
<b>Quadro 4</b> - Espessura de paredes de alvenaria segundo as regras da camara Municipal de Lisboa .....	13
<b>Quadro 5</b> - Diferentes grupos de unidades de alvenaria definidos por um conjunto de requisitos geométricos estabelecidos, adapt. [4].....	29
<b>Quadro 6</b> - Características das unidades cerâmicas da marca Alveolater de diferentes classes, adapt. [57].....	35
<b>Quadro 7</b> - Características das diferentes unidades cerâmicas da marca Poroton, adapt. [57].....	37
<b>Quadro 8</b> - Propriedades de unidades cerâmicas com diferentes quantidades de cinzas volantes, adapt. [64].....	40
<b>Quadro 9</b> - Composição química dos resíduos provenientes da extração do petróleo, aplicados em tijolos cerâmicos, adapt. [76].....	42
<b>Quadro 10</b> - Características de unidades cerâmicas com incorporação de resíduos de petróleo, adapt. [74].....	42
<b>Quadro 11</b> - Concentração de metais pesados provenientes de resíduos fluviais por mg/kg de material seco, adapt. [78].....	43
<b>Quadro 12</b> - Alteração das características das unidades cerâmicas pela incorporação de resíduos provenientes da indústria de reciclagem de papel, adapt. [79].....	44
<b>Quadro 13</b> - Composição de resíduos de ecrãs <i>LCD (liquid crystal display)</i> , adapt. [80].....	44
<b>Quadro 14</b> - Níveis de absorção de água para diferentes percentagens de adição de fosfogesso, adapt. [82].....	45
<b>Quadro 15</b> - Coeficientes de retração para diferentes percentagens de adição de fosfogesso, adapt. [82].....	45
<b>Quadro 16</b> – Descrição da tipologia das alvenarias, o número de ensaio e a designação da parede correspondente.....	70
<b>Quadro 17</b> - Valores de resistência à compressão obtidos no ensaio dos seis provetes cerâmicos .....	75
<b>Quadro 18</b> - Valores de resistência à compressão obtidos no ensaio dos provetes cerâmicos, provenientes do tijolo térmico .....	76

<b>Quadro 19</b> - Valores da tensão de rotura em flexão ( $\sigma_{rotura}$ ) obtidos nos provetes ensaiados.....	77
<b>Quadro 20</b> - Valores da tensão de rotura em compressão ( $\sigma_{rotura}$ ) obtidos nos provetes ensaiados .....	78
<b>Quadro 21</b> - Valores da tensão de rotura em compressão ( $\sigma_{rotura}$ ) e módulos de elasticidade (E) obtidos dos ensaios de compressão das 15 alvenarias.....	86

# Lista de Acrónimos

---

LEBA – Laboratório de Estruturas e Betão Armado

ETICS – External Thermal Insulation Composite Systems

EC 6 – Eurocódigo 6 – “Projeto de Estruturas de Alvenaria”

RGEU – Regulamento Geral das Edificações Urbanas

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

EC 8 – Eurocódigo 8 – “Projeto de Estruturas para Resistência aos Sismos”

CEN – Comité Europeu de Normalização

CTCV – Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro



# Índice

---

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>V</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>XII</b>
<b>ÍNDICE DE QUADROS</b> .....	<b>XV</b>
<b>LISTA DE ACRÓNIMOS</b> .....	<b>XVII</b>
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>XIX</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Estrutura.....	3
<b>2. A CONSTRUÇÃO EM ALVENARIA</b> .....	<b>5</b>
2.1. Introdução Histórica da Alvenaria.....	5
2.2. Evolução da Alvenaria em Portugal.....	8
2.2.1. Passado.....	8
2.2.2. A Alvenaria antiga em Portugal-legislação aplicável.....	12
2.2.3. Alvenaria em Portugal na atualidade.....	14
2.3. Alvenaria Estrutural.....	16
2.3.1. Declínio da Alvenaria Estrutural.....	16
2.3.2. Panorama Europeu.....	17
2.3.3. Panorama em Portugal.....	18
2.3.4. Panorama nos Estados Unidos da América.....	20
2.3.5. Panorama no Brasil.....	22
2.4. Tipos de Alvenaria Estrutural.....	22
2.4.1. Alvenaria Estrutural Simples.....	23
2.4.2. Alvenaria Armada.....	24
2.4.3. Alvenaria Confinada.....	24
2.4.4. Outros tipos de Alvenaria.....	26
2.5. O Eurocodigo 6.....	26
2.6. Novas soluções para alvenarias.....	27
2.6.1. Unidades de Alvenaria Correntes.....	28
2.6.2. Novas Soluções de Unidades de Alvenaria.....	29
2.6.3. Incorporações na pasta de Argila.....	39
<b>3. TRABALHO EXPERIMENTAL - MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>49</b>
3.1. Introdução.....	49
3.2. Materiais utilizados.....	50
3.3. Ensaio Experimentais.....	51
3.3.1. Ensaio à compressão do Tijolo UNIKO.....	51
3.3.2. Ensaio à compressão do Tijolo Térmico.....	54
3.3.3. Ensaio à compressão e flexão da argamassa.....	57
3.3.4. Ensaio à compressão das paredes de alvenaria.....	60
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>75</b>

4.1.	Ensaio à compressão do tijolo UNIKO.....	75
4.2.	Ensaio à compressão do tijolo térmico.....	76
4.3.	Ensaio de flexão e compressão dos provetes de cimento-cola.....	77
4.4.	Ensaio de compressão das alvenarias.....	80
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....</b>	<b>89</b>
5.1.	Conclusões e considerações finais.....	89
5.2.	Desenvolvimentos futuros.....	90
<b>6.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>91</b>





# 1. Introdução

---

## 1.1. Enquadramento

---

A alvenaria apresenta uma importância histórica bastante relevante, visto ser o elemento responsável pela habitabilidade dos abrigos construídos pelo homem, constituindo a estrutura dos edifícios construídos, desde os primórdios das civilizações [1].

Em Portugal como em grande parte dos países, as alvenarias têm sofrido evoluções ao longo das décadas. No nosso país os edifícios antigos eram predominantemente construídos com recurso a paredes resistentes simples de um só pano usando tijolo maciço ou perfurado. Nos anos 50 as paredes de alvenaria eram compostas geralmente por um pano exterior em pedra e um interior em tijolo furado, com existência de uma eventual caixa-de-ar. Posteriormente passaram-se a adotar dois panos em tijolo furado, com caixa-de-ar. Atualmente a grande maioria das alvenarias é composta por paredes duplas de tijolo furado na horizontal, com isolamento térmico, preenchendo total ou parcialmente a caixa-de-ar.

Recentemente tem ocorrido o ressurgimento das paredes simples, este reaparecimento está associado a soluções inovadoras de isolamento térmico pelo exterior, sistema *ETICS* (*External Thermal Insulation Composite Systems*) [1]. Outras soluções têm surgido, são exemplo, as paredes de alvenaria resistentes, construídas com blocos de furação vertical, e as paredes de alvenaria de montagem simplificada, construídas com recurso a unidades com encaixes otimizados, unidades retificadas ou sem necessidade de aplicação de argamassa nas juntas horizontais.

No século XX, a indústria do cimento financiou programas de pesquisas sobre o betão, levando a uma grande difusão deste material de construção, tornando-o no mais utilizado em todo o mundo, especialmente em obras de edificação. As soluções em alvenaria estrutural tornaram-se assim obsoletas, sendo aplicadas apenas em construções de pequena dimensão [2]. As paredes de alvenaria passaram a ter, apenas uma função de compartimentação, deixando de ser parte estrutural dos edifícios. As estruturas até então construídas com recurso a alvenaria resistente, eram dimensionadas tendo por base regras empíricas intuitivas. Constituídas por paredes muito espessas, nomeadamente em edifícios

mais altos, o que comparativamente às soluções mais esbeltas, obtidas com recurso às estruturas metálicas e de betão armado, tornaram as estruturas em alvenaria rudimentares e pouco atrativas, em termos económicos, funcionais, e tempos de execução. Os estudos mais aprofundados sobre as estruturas de alvenaria, surgiram apenas no final dos anos 40 na Europa, voltando a despertar o interesse sobre este tipo de estrutura, principalmente a nível económico. Estas estruturas foram encaradas de uma forma diferente e associadas a novos métodos de dimensionamento. No início da década de 50, o engenheiro suíço Paul Haller dimensionou e construiu em 1951 em Basileia, um edifício de 13 andares, em alvenaria estrutural não armada, com paredes resistentes internas de espessura de 15 cm e externas de 37,5 cm, caso este que demonstra uma clara evolução deste tipo de estrutura [3]. As alvenarias deixaram de ser espessas, pesadas e rígidas, tornando-se mais delgadas e leves, associadas também, a processos de produção mais industrializados e eficientes [2].

Atualmente em países como a Itália, Inglaterra, França, Estados Unidos, Canadá e Austrália, a utilização da alvenaria estrutural está amplamente difundida representando cerca de 10% a 50% da construção nova de edifícios de habitação [3], existindo desde á muito um conjunto de normas técnicas de dimensionamento e procedimentos construtivos.

Em Portugal o panorama atual é bastante diferente dos restantes países da Europa. A investigação e a criação de normas têm sido praticamente inexistente comparada com os restantes países. Antes da entrada em vigor do Eurocódigo 6 – NP EN 1996-1-1:2000 - “Projeto de estruturas de alvenaria – Parte1-1: Regras gerais para edifícios” [4], em Portugal, existia apenas o RGEU (Regulamento Geral das Edificações Urbanas) [5] com regras definidas pela Camara Municipal de Lisboa e ainda um documento técnico elaborado em 1990 pelo LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil) com regras práticas para a segurança de edifícios de pequena dimensão, de alvenaria confinada em relação á ação sísmica [6]. Deste modo a construção com recurso a alvenaria estrutural em Portugal é residual e em consequência, o desenvolvimento de novas soluções a este nível é pouco significativa.

A presente dissertação insere-se na área do estudo de novas soluções e produtos para a Construção Civil, neste caso específico, uma nova unidade cerâmica com características específicas ao nível da geometria, o tijolo *UNIKO*, desenvolvido pela Empresa Prélis-Smart Ceramics e com possibilidade para aplicação em alvenaria estrutural.

## **1.2. Objetivos**

---

Este trabalho teve como foco a solução inovadora de unidade de alvenaria, o tijolo *UNIKO*, constituindo a presente dissertação o primeiro trabalho de estudo sobre esta nova unidade cerâmica. O presente trabalho pretende assim, alargar os conhecimentos sobre o produto, dando novas informações, principalmente ao nível do comportamento mecânico pela ação de forças de compressão, e ainda das particularidades construtivas.

De modo a descrever o panorama atual das paredes de alvenaria, foi efetuada uma revisão bibliográfica sobre a realidade presente, e a evolução da alvenaria em geral no nosso país, estrutural e não estrutural. A evolução das normas e regulamentos existentes para projetos de alvenaria resistente em Portugal, o panorama internacional da construção de alvenaria resistente, e as inovações ao nível das unidades cerâmicas.

Numa primeira fase experimental, foram estudadas as características mecânicas do tijolo *UNIKO*, através da realização de ensaios de compressão axial. Como base de comparação foi ainda ensaiado um tijolo térmico de furação vertical, sendo esta uma solução desenvolvida também pela empresa Prélis-Smart Ceramics. Nesta fase, o objetivo foi determinar a resistência à compressão da unidade cerâmica em estudo. Para além das unidades cerâmicas foram ainda estudadas as características mecânicas das argamassas utilizadas na conceção das paredes de alvenaria, um cimento-cola e uma argamassa polimérica.

Seguiu-se uma segunda fase experimental, onde foram construídas paredes de alvenaria de diferentes tipologias, com características específicas. Foram utilizadas tipologias diferentes, de modo a simular os possíveis casos práticos de aplicação do tijolo *UNIKO*. Foram submetidas a ensaios de compressão simples, as paredes de alvenaria das diferentes tipologias.

## **1.3. Estrutura**

---

O presente trabalho encontra-se estruturado em cinco capítulos. Do capítulo 1 faz parte uma introdução composta por enquadramento, objetivos da dissertação e a presente estrutura.

No capítulo 2 é apresentado um estudo sobre a evolução e o estado atual das alvenarias em Portugal. O panorama da construção com alvenaria resistente ao nível nacional e internacional. É ainda apresentado um conjunto de novas soluções para alvenarias, resultado da pesquisa de trabalhos realizados a nível internacional e também em Portugal.

O capítulo 3 engloba todo o trabalho experimental desenvolvido em laboratório, sendo este o capítulo mais extenso. Numa primeira fase apresenta-se a campanha de ensaios realizados aos materiais empregues na construção das paredes de alvenaria. São descritos os ensaios de compressão axial realizados às unidades cerâmicas e os ensaios de compressão axial e de flexão ao cimento-cola empregue nas juntas horizontais das paredes de tipologia 3. Numa segunda fase é descrito todo o processo de execução das 15 paredes de alvenaria com recurso ao tijolo *UNIKO*, os trabalhos de preparação, a construção das paredes, o esquema de ensaio, o sistema de aquisição de dados e o procedimento de ensaio adotado.

No capítulo 4 são apresentados todos os resultados obtidos do trabalho experimental desenvolvido no capítulo 3, dos ensaios de determinação da resistência à flexão e compressão do cimento-cola, dos ensaios de compressão axial das unidades cerâmicas e dos ensaios de compressão axial de todas as paredes de alvenaria, bem como a discussão dos resultados.

O capítulo 5 engloba as conclusões finais retiradas da elaboração do trabalho, com apresentação de sugestões de trabalhos futuros, possíveis de serem realizados dentro do tema.

## 2. A Construção em Alvenaria

---

### 2.1. Introdução Histórica da Alvenaria

---

Quando surgem as primeiras civilizações surge paralelamente, como técnica de construção, a alvenaria. Esta técnica foi desde logo amplamente utilizada como forma de construção de habitações, monumentos e templos religiosos, visto que proporcionava as condições de habitabilidade necessárias ao homem. É de referir que a alvenaria como técnica construtiva tinha sempre função estrutural [7] [8].

O desejo de ostentação onde os edifícios refletissem o orgulho do povo e o nível coletivo atingido, foram dos principais fatores responsáveis pelo desenvolvimento da arquitetura e consequentemente da alvenaria. Exemplo de grandes obras construídas com recurso a alvenarias de pedra e tijolo e que sobreviveram até aos dias de hoje são, as três pirâmides de Guizé, Queóps, Quefren e Miquerinos (2675 a.C.), a muralha da China (215 a.C.) e a muralha de Jericó (6000 a.C.).

Como qualquer outra solução construtiva, existiu uma evolução das técnicas e materiais utilizados, sendo o bloco de pedra o material mais abundante e a matéria-prima mais importante, usada como material de construção nas civilizações pré-históricas, com aplicações em habitações, templos, estradas, pontes e fortificações.

A aplicação da pedra em alvenaria consistia na sobreposição de blocos de vários tamanhos, não sendo utilizado no início da técnica qualquer material de ligação entre os blocos. As primeiras habitações permanentes em alvenaria de pedra não-argamassada foram encontradas no lago Hullen em Israel e datam de 9000 a 8000 a.C. (Figura 1a).

Escavações realizadas em Ain Mallaha na Anatólia e em Tell Mureybet na Síria revelaram casas de estrutura circular com diâmetros entre 6m e 10m mas construídas com recurso a pedra natural ligada por argamassa, exemplo deste tipo de arquitetura é a da cidade de Khiroitikia em Chipre [9] (Figura 1b,c).

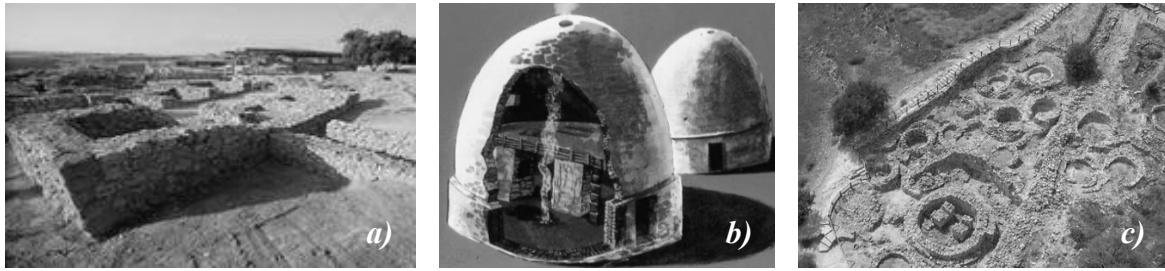


Figura 1 - Vestígios de primeiras habitações em alvenaria de pedra: a) Vestígios de alvenaria de pedra não argamassada no lago Hullen em Israel; b) Ilustração da arquitetura da cidade de Khiroitikia no Chipre; c) Vestígios de edificações construídas em pedra natural ligada por argamassa da cidade de Khiroitikia [9].

Mais tarde, com o desenvolvimento de utensílios metálicos capazes de aparelhar, extrair e talhar a pedra, surgem monumentos com características arquitetônicas mais evoluídas. Esta evolução é registada principalmente nas civilizações em torno do Mediterrâneo e exemplo disso são os monumentos que perduraram até aos dias de hoje. As três pirâmides de Guizé, Queóps, Quefren e Miquerinos (2675 a.C.), Palácio de Cnossos na ilha de Creta (1750 a.C.), câmara circular grega do período Micénico (1300 a.C.) [1].

Em países como Babilónia, Suméria e Egipto, a carência de materiais de construção combinada com a abundância de argila em certos locais, o clima quente e seco e a falta de pedra e madeira potenciaram o desenvolvimento do tijolo de barro [1]. Inicialmente a moldagem das unidades era realizada à mão sendo que só a partir da idade do bronze se terão utilizado moldes em madeira, associados a processos mais desenvolvidos.

Este era um material vantajoso visto ser mais leve que a pedra, possuir resistência mecânica e resistência ao fogo. Nos países acima mencionados são conhecidas obras com mais de 10000 anos, construídas com recurso a tijolos de barro, argila e adobe [8] [2]. No Egipto a utilização de tijolos em habitações data de 5000 a.C.. A maioria dos tijolos eram de lamas provenientes do rio Nilo. Para além da argila foram adicionados palha e areia à mistura com o objetivo de evitar a formação de fendas de retração durante o processo de secagem. Só mais tarde surge a técnica de cozedura aplicada a tijolos (4000 a.C.), sendo a primeira referência documentada sobre a técnica datada de 1300 a.C. presente num papiro [10]. Na Mesopotâmia existem vestígios da aplicação de tijolos cozidos e de tijolos coloridos nas fortificações de cidades (3000 a.C.). A utilização do tijolo cozido alargou-se a outras culturas proporcionando uma etapa de grande desenvolvimento da humanidade uma vez que permitiu a realização de grandes obras de arquitetura. Várias são as obras de

referência cuja sua construção tem por base a utilização de blocos cerâmicos. Exemplo disso são as muralhas e torre de Jericó na Jordânia (7000 a.C.) e os palácios de Khorsabad e de Sargão (4000 a.C.).

É na antiguidade clássica, com os romanos e gregos, que a construção sofreu uma evolução que deixou marcas até aos dias de hoje. É em 500 a.C. a 300 a.C., durante o império Romano que a produção de tijolos cerâmicos se estende a toda a Europa Ocidental. A sua implementação está associada a uma vontade de homogeneizar a arquitetura, a indústria da construção, a sociedade e a economia. Um dos fatores potenciador do uso do tijolo está no facto de este ser constituído por matéria-prima de fácil obtenção, e de ser um material de conceção relativamente simples [11]. Os romanos foram ainda responsáveis pelas primeiras utilizações da pozolana, substância que tinha propriedades de ligante hidráulico, fazendo posteriormente o seu uso generalizado nas construções, em especial nas alvenarias. O povo romano foi ainda responsável pela introdução de um novo tipo de alvenaria, que recorria a uma espécie de betão, constituído por amálgama de argamassa, saibro, desperdício de tijolos, telhas e cascalhos [7]. Posteriormente o exterior deste tipo de alvenarias era revestido com tijolos cozidos, mármore ou estuque. Os arcos e abobadas, técnicas de extrema importância na área da construção, foram também introduzidos pelos romanos [1].

Com os gregos a arte de construir atingiu um elevado patamar de perfeição. Exemplo disso são os grandes monumentos construídos em pedra com blocos de mármore perfeitamente talhados, estes são ainda responsáveis pela introdução da coluna e do lintel como técnicas construtivas (Pártenon 447 a.C.) [12]. No norte da europa, durante a era medieval, o período onde se inicia a queda do império romano, as construções eram na sua grande maioria construídas com recurso a tijolos, este fato prendeu-se sobretudo à escassez de pedra em algumas regiões. Durante este período, a alvenaria não registou progressos sendo o catolicismo o responsável pelos primeiros progressos a partir do século XI, com a introdução dos estilos Românico e Gótico. Destaque para elementos como, abobadas de berço, abobadas de arestas e arcos ogivais [13]. Para além das construções religiosas também as construções militares contribuíram para o desenvolvimento da construção e das alvenarias em particular.

Para além das mudanças arquitetónicas, as alvenarias não sofreram processos de desenvolvimento ao longo dos últimos séculos. Durante este período apenas algumas civilizações não ocidentais como os Maias, Incas e povos budistas e hinduístas no oriente, ergueram obras com grau de desenvolvimento superior [1]. Como exemplo são, Templo dos Maias do grande Jaguar (750 d.C.) (Figura 2a), Pátio dos Leões em Granada (1248 d.C.) (Figura 2b), Taj Mahal na Índia (1632 d.C.) (Figura 2c).

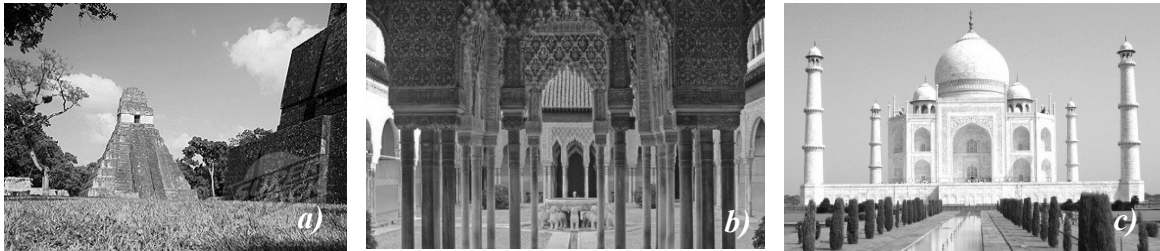


Figura 2 - Exemplo de estruturas de alvenaria de grau elevado de desenvolvimento: a)Templo dos Maias do Grande Jaguar (750 d.C.); b)Pátio dos Leões em Granada (1248 d.C.); c)Templo Taj Mahal na Índia (1632 d.C.) [1].

Nos séculos XVIII e XIX, com o processo de revolução industrial, os avanços tecnológicos permitiram um melhoramento das ferramentas e processos usados no fabrico de tijolos cerâmicos e outros materiais de construção para aplicação em alvenaria [14].

## 2.2. Evolução da Alvenaria em Portugal

---

### 2.2.1. Passado

---

Em Portugal tal como no resto do mundo, nos edifícios antigos predominaram as alvenarias com função estrutural, recorrendo a materiais e técnicas tradicionais, adaptadas sobretudo da tradição romana [15]. Consideram-se como edifícios antigos, as construções realizadas antes do aparecimento do betão armado.

Os diferentes tipos de alvenarias existentes no nosso país, são um reflexo do modo como a população se adaptou à natureza de cada região. A norte do país, os edifícios de grandes dimensões que se confundem com a paisagem, são uma consequência da rigidez do granito empregue na grande maioria das construções (Figura 3c, 3d, 3g). Na região de Lisboa e em certas zonas do Alentejo, o uso de pedra calcária é predominante. Nas beiras as paredes eram espessas e rebocadas, ocultando a fragilidade do calcário misturado com a terra argilosa da região (Figura 3f). A sul do território nacional as construções eram geralmente

de formas mais orgânicas, recorrendo a alvenarias de terra e barro [11]. Para além do granito, calcário e xistos eram ainda usados tijolos cerâmicos cozidos em forno, e técnicas como a taipa, o tabique, o adobe e em alguns locais eram ainda utilizadas argamassas.

A taipa (Figura 3a) é uma das técnicas de construção de alvenarias mais comum em edifícios antigos. Esta consiste na compactação no local da terra previamente humedecida, numa cofragem vertical. A terra é colocada por camadas e devidamente compactada entre cada camada com recurso a um pilão ou equipamentos mecânicos [16]. Esta técnica era sobretudo, usada em climas quentes e secos e com pouca precipitação, em especial Alentejo e Algarve. O tabique (Figura 3h) foi outra das técnicas de construção de alvenarias existente em Portugal, a nível geográfico esta verificou maior emprego nas regiões das beiras altas e baixas e Trás-os-Montes. Esta técnica é um sistema que combina terra madeira ou canas, e a capacidade resistente é essencialmente conferida pela adição de madeira ou outros elementos como as canas, sendo a terra um elemento secundário com função de enchimento [16].

Na zona centro do país, numa faixa que se estende de sul para o norte e abrange os distritos de Setúbal, Évora, Portalegre, Santarém, Leiria, Coimbra e Aveiro a técnica mais usada na construção de alvenarias foi o adobe, esta consiste na construção de alvenarias com recurso a blocos maciços de terra crus preparados em moldes e secos ao sol [16]. Os blocos de adobe (Figura 3b) são conseguidos a partir da mistura de terra e água, sendo por vezes reforçado com fibras vegetais. O assentamento dos blocos é acompanhado pela aplicação de argamassa à base de terra nas juntas. As argamassas de ligação, muitas das vezes utilizadas, variavam em função da região, local e forma de extracção dos constituintes.

Após o terramoto de 1 de novembro de 1755 que varreu grande parte do território nacional e destruiu quase por completo a cidade de Lisboa, surgiu principalmente na cidade de Lisboa, mas também nas áreas urbanas situadas a nordeste da cidade, uma nova forma de construir. Com alterações profundas principalmente ao nível das alvenarias com função de compartimentação, denominada por época Pombalina, esta prolonga-se sensivelmente até 1880 [17]. Numa fase anterior ao terramoto de 1755 os edifícios são denominados de pré-Pombalinos, estes são na sua maioria constituídos em alvenaria de pedra. A arquitetura Pombalina caracteriza-se pela construção de alvenarias dispostas segundo as duas direções ortogonais dos edifícios, constituídas por uma treliça de madeira que posteriormente é preenchida com elementos cerâmicos (Figura 3i). Estas paredes ligam-se às paredes

principais, através duma grade de madeira embebida na alvenaria pelo lado interior. As alvenarias exteriores são na grande maioria construídas em pedra calcária rebocada [18]. Posteriormente à época pombalina surgem os edifícios com estrutura de alvenaria tipo gaioleiro (1870 a 1930). Estes são caracterizados pela ausência da continuidade estrutural e tridimensional, onde as soluções para a ligação entre as paredes da fachada, das paredes e dos pavimentos são poucas adequadas. As técnicas de construção deste tipo de edifícios são precárias, tendo-se observado uma simplificação e alteração dos sistemas estruturais implementados após o sismo de 1755. O Quadro 1 mostra uma melhor compressão, da relação entre tipologias construtivas e a época de construção [19]. A Figura 3 mostra as diferentes soluções em alvenaria mais recorrentes no nosso país antes da massificação da aplicação do tijolo cerâmico cozido em alvenaria.

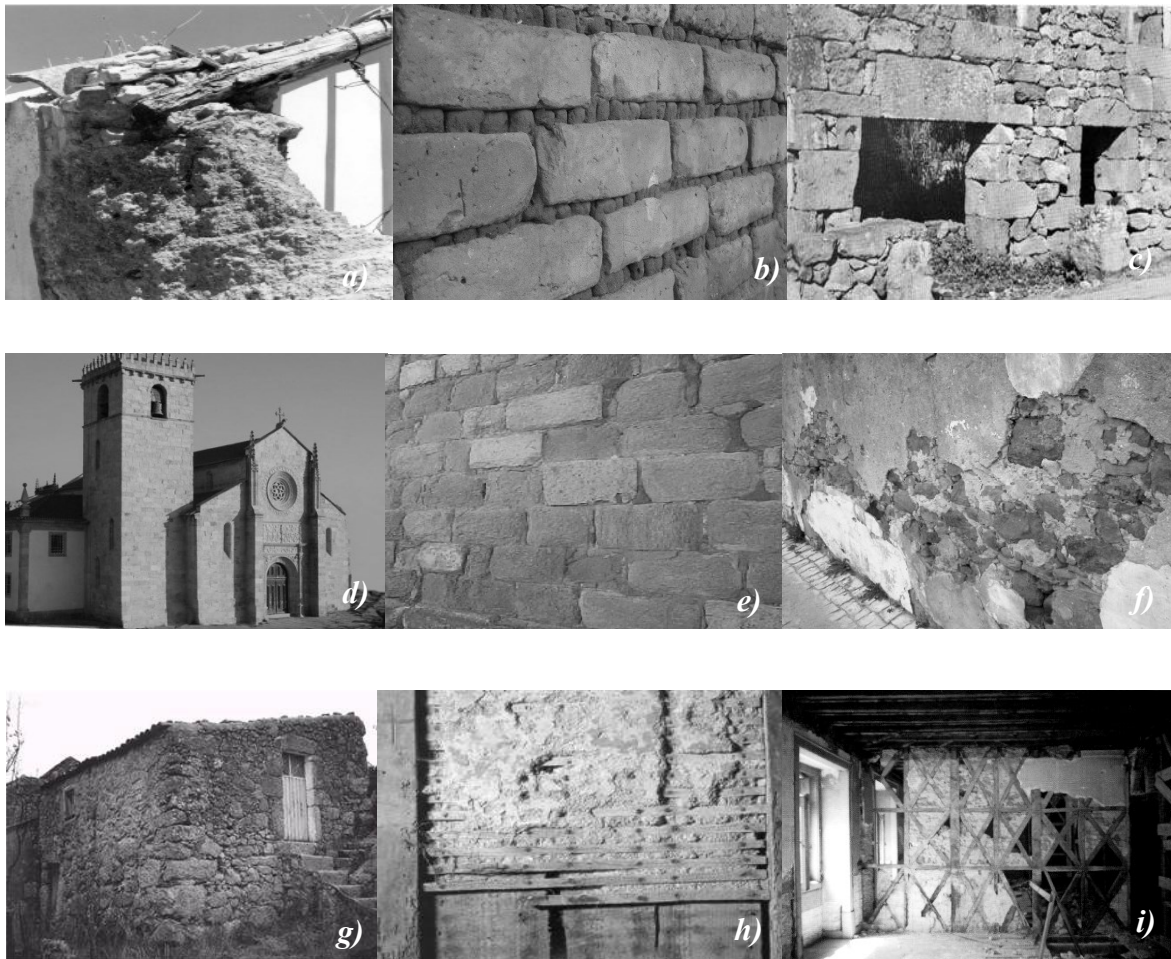


Figura 3 - Tipologias de alvenarias mais recorrentes em Portugal no passado, antes do domínio do tijolo cerâmico: a) Parede de Taipa [1]; b) Parede de Adobe [1]; c) Parede mista, composta por alvenaria de pedra ordinária e cantaria [20]; d) Alvenaria de pedra aparelhada assente em argamassa [20]; e) Paredes de enxilharia, constituídas por pedras aparelhadas pouco cuidadas [20]; f) Alvenaria ordinária, constituída por pedras irregulares em forma e dimensão, estas eram geralmente rebocadas [1]; g) Paredes em alvenaria de pedra seca, esta técnica dispensa o uso de argamassa [20]; h) Alvenaria em Tabique [20]; i) Alvenaria tipo da época Pombalina [3].

Quadro 1 - Relação entre tipologias construtivas e épocas de construção, adapt. [19].

Tipologia Construtiva	Época de construção
Edifícios com estrutura de alvenaria de pedra (pré-Pombalinos)	Anteriores a 1755
Edifícios com estrutura de alvenaria da época Pombalina e similares	Entre 1755 e 1870
Edifícios com estrutura de alvenaria tipo "gaioleiro"	Entre 1870 e 1930
Edifícios com estrutura mista de alvenaria e betão armado "lajes"	Entre 1930 e 1940
Edifícios com estrutura de betão armado e alvenaria de tijolo	Entre 1940 e 1960
Edifícios com estrutura de betão armado	Posterior a 1960

A par da revolução industrial ocorreu uma industrialização da construção. Surgiram nessa altura grandes indústrias cerâmicas, principalmente na zona centro de Portugal. Os tijolos foram-se tornando progressivamente mais leves passando a contar com furação horizontal por volta dos anos 40, contribuindo desta forma para a evolução das alvenarias. O tijolo cerâmico passa a ter um papel preponderante na construção das alvenarias. Durante o século XX, em Portugal, as alvenarias exteriores sofreram evolução, com a sequência ilustrada na Figura 4.

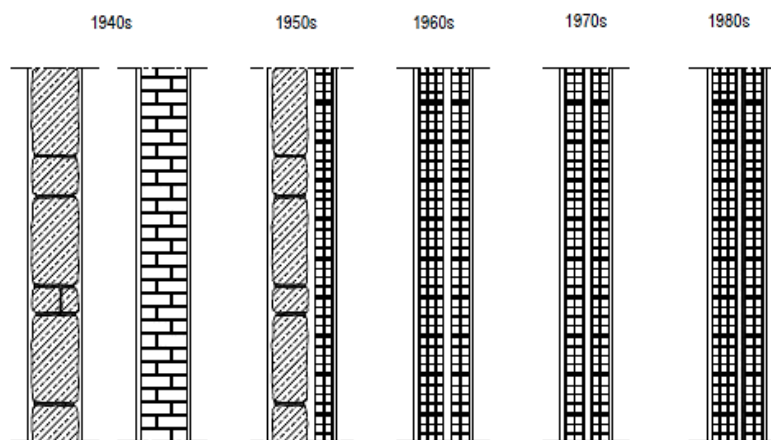


Figura 4 - Evolução da tipologia de alvenaria em Portugal desde 1940 até 1980 [1].

Nos anos 40 as paredes eram de pano simples, construídas com recurso a pedra ou a tijolo maciço. Nos anos 50 as alvenarias eram compostas por pano duplo com a parte interior de tijolo furado e o pano exterior em pedra, entre os dois panos existia uma eventual caixa-de-ar. Nos anos 60 e 70 as alvenarias construídas eram na sua grande maioria compostas por dois panos de tijolo de furação horizontal com caixa-de-ar na zona intermédia, sendo que nos anos 60 o pano exterior apresentava maior espessura (15cm). Nos anos 80 as alvenarias eram compostas tal como nos anos 60, por dois panos de tijolo furado, pano

exterior 15cm e pano interior 11cm, com introdução de isolamento térmico na caixa-de-ar [1].

## **2.2.2. A Alvenaria antiga em Portugal-legislação aplicável**

---

No passado, em Portugal, as alvenarias construídas eram parte estrutural dos edifícios, como tal, era necessário dotar as técnicas de construção de regras e procedimentos.

O dimensionamento em alvenaria foi evoluindo ao longo dos anos. Inicialmente o estabelecimento da espessura das paredes de alvenaria obedecia a considerações empíricas associadas à estabilidade, mas também relativas à estanquidade, à água da chuva e ao conforto térmico. O dimensionamento baseava-se no saber adquirido dos agentes intervenientes na construção dos edifícios, o qual era transmitido de geração em geração, conduzindo ao estabelecimento de regras empíricas. Mesmo em pleno séc. XX, a abordagem em termos de resistência dos materiais era rudimentar e conduzia à adoção de soluções tabeladas em função dos materiais constituintes dos elementos e do porte da construção. O RGEU (Regulamento Geral das Edificações Urbanas) [5] e as regras da camara Municipal de Lisboa serviam de base para a construção das alvenarias (Quadros 2, 3 e 4).

Quadro 2 - Extrato do capítulo III do RGEU [5].

---

### **CAPITULO III**

#### **Paredes**

*Artigo 23.º As paredes das edificações serão constituídas tendo em vista não só as exigências de segurança, como também as de salubridade, especialmente no que respeita à protecção contra a humidade e as variações de temperatura e a propagação de ruídos e vibrações.*

*Artigo 24.º Na construção das paredes de edificações de carácter permanente, utilizar-se-ão materiais adequados à natureza, importância, carácter, destino e, em todos os casos, suficientes condições de segurança e durabilidade.*

*Artigo 25.º Para as paredes das edificações correntes destinadas a habitação quando construídas de alvenaria de pedra ou de tijolo cerâmico maciço de 1.ª qualidade, com dimensões de 0,23 m x 0,07 m, poderá considerar-se assegurada, sem outra justificação, a sua resistência, sempre que se adoptem as espessuras mínimas fixadas na tabela seguinte:*

---

Quadro 3 - Espessura de paredes de pedra ou tijolo (não incluindo rebocos e guarnecimentos) a que se refere o artigo 25º do RGEU [5].

Ordem do andar (a partir de cima)	Grupo A Paredes das fachadas			Grupo B Paredes das empenas			Grupo C Paredes de separação de habitações Paredes de caixa de escada Paredes interiores carregadas em geral			Grupo D Paredes interiores de pequena extensão livre servindo de apoio a pavimentos de reduzido vão (máximo de 3 m <sup>2</sup> de pavimento por metro linear)			Grupo E Paredes interiores não recebendo carga		
	Pedra		Tijolo (Veças)	Pedra		Tijolo (Veças)	Pedra		Tijolo (Veças)	Pedra		Tijolo (Veças)	Pedra		Tijolo (Veças)
	Talhada (cm)	Irregular (cm)		Talhada (cm)	Irregular (cm)		Talhada (cm)	Irregular (cm)		Talhada (cm)	Irregular (cm)		Talhada (cm)	Irregular (cm)	
1	28	40	1	28	40	1	22		1			½			½
2	28	40	1 ½	28	40	1 ½	22		1			½			½
3	32	50	2	32	40	1 ½	22		1			1			½
4		60	2 ½	32	50	2	22		1			1			½
5		70	3	32	50	2	28	40	1 ½			1			1
6		80	3 ½		60	2 ½	28	40	1 ½			1			1
7		90	4		60	2 ½	32	50	2	28	40	1 ½	28	40	1 ½

Quadro 4 - Espessura de paredes de alvenaria segundo as regras da camara Municipal de Lisboa [21].

Ordem dos andares (a partir de cima)	Fachadas e apoio de vigamentos			Empenas e paredes sem cargas			Paredes de caves	Frontais com cargas e divisórias de escadas		Tabiques	
	Alvenaria ordinária	Alvenaria de tijolo	Blocos de betão	Alvenaria ordinária	Alvenaria de tijolo	Blocos de betão		Alvenaria de tijolo	Blocos de betão	Alvenaria de tijolo	Blocos de betão
1	40	1 ½	30	40	1 ½	20	60	½	10	½	10
2	50	2	40	40	1 ½	20		½	10	½	10
3	60	2 ½	40	40	1 ½	20		1	15	½	10
4	70	3	50	45	2	30		1 ½	20	½	10
5	80	3 ½	60	45	2	30		2	25	1	15
6	90	4	70	50	2 ½	30		2 ½	30	1	15

Observações:

Tijolo – 23 x 11 x 7.5

Altura dos andares – máximo 4m

Divisórias entre habitações > 20 cm

Paredes-mestras e empenas – tijolo de barro

Ao nível do comportamento dos edifícios à ação sísmica, em Portugal, as primeiras documentações técnicas tinham sido baseadas fundamentalmente na regulamentação inglesa. O “Regulamento de segurança das construções contra os Sismos” (R.S.C.C.S)

correspondente ao decreto de lei nº41658 de 31/05/1958, surge em 1958 com um conjunto de regras de dimensionamento e disposições construtivas para as construções face à ação sísmica. Só em 1990, é elaborado um documento técnico pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil, de regras práticas para a segurança de edifícios de pequeno porte de alvenaria confinada em relação à ação dos sismos [6].

Atualmente o EC8 – “Projeto de estruturas para resistência aos sismos” [22] é o regulamento utilizado para a construção em zonas sísmicas. Este documento contempla um capítulo destinado somente a estruturas de alvenaria. O EC8 apresenta definições distintas para alvenaria confinada e alvenaria armada. Segundo o EC8 as soluções de alvenaria confinada são caracterizadas como alvenarias executadas de modo rígido entre vigas e pilares construídos nas quatro extremidades. Para a alvenaria armada o EC8 define uma estrutura de alvenaria resistente, que possui na sua constituição varões ou rede metálica, embebidos na argamassa ou em elementos internos ao pano, executados por betão de enchimento criando assim uma estrutura rígida [22].

### **2.2.3. Alvenaria em Portugal na atualidade**

---

O princípio do século XX é caracterizado por um desenvolvimento extraordinário na utilização, compreensão do funcionamento e possibilidades do betão armado. O colapso da alvenaria como material estrutural dos edifícios iniciou-se principalmente com a introdução de regulamentos na Alemanha, França e Reino Unido para estruturas de betão armado, pelo que a utilização da alvenaria como material estrutural foi fortemente abalada nos países mais desenvolvidos.

Em 1911 são criadas em Portugal as Universidades de Lisboa e Porto e em 1918 é aprovado o 1º Regulamento Português no domínio do betão armado “Instruções Regulamentares para o Emprego do Betão Armado” (Decreto nº4036 de 28 de Março) [23]. A primeira disciplina de betão armado foi criada em 1922 na Faculdade Técnica da Universidade do Porto e em 1935 é publicado o “Regulamento do Betão Armado” [24] que sintetiza o estado do conhecimento até então. São realizadas a partir desta época as primeiras obras em betão armado, estas são principalmente obras de maior envergadura,

como pontes ou barragens. Destaque para o viaduto Duarte Pacheco em Lisboa, concluído em 1944, e a barragem do Cabril (1951).

Neste período, em Portugal, ainda era recorrente a construção de edifícios com alvenaria estrutural, sendo o betão armado aplicado apenas na estrutura da laje dos pisos. Só a partir dos anos 60 as estruturas reticuladas passaram a ser usadas em larga escala em Portugal e no resto da Europa [7].

Desde a “implementação” das estruturas reticuladas em betão armado em Portugal, que as alvenarias construídas, são praticamente todas sem função estrutural. Na construção das alvenarias o material mais empregue é o tijolo cerâmico, representando cerca de 50% dos elementos utilizados em paredes exteriores. Hoje em dia, existe em Portugal um conjunto de soluções para a construção de alvenarias com função de compartimentação ou de separação com o exterior. As soluções de seguida apresentadas são as mais recorrentes em Portugal [25].

Uma das soluções para paredes exteriores consiste numa parede dupla, construída a partir de alvenaria de tijolo cerâmico de furação horizontal, sendo a parede mais espessa de 15cm. É aplicado o isolamento térmico, com recurso a placas de poliestireno ou por poliuretano projetado, preenchendo parcialmente a caixa-de-ar.

Outro tipo consiste também numa alvenaria de pano duplo, com o pano exterior realizado em alvenaria de tijolo cerâmico maciço de furação horizontal ou ainda de blocos de betão. Nestes casos o pano interior é geralmente composto por alvenaria de tijolo cerâmico de furação horizontal de espessura de 11cm ou 15cm. A caixa-de-ar é preenchida pelo isolamento térmico, acima referido.

A utilização de paredes de pano simples, para posterior aplicação de sistema *ETICS* (*External Thermal Insulation Composite System*) tem ganho expressão, sendo uma técnica bastante utilizada atualmente no nosso país. Esta consiste na aplicação, na face exterior do pano de parede, isolamento térmico e acústico. O isolamento é constituído por placas de poliestireno expandido, lã mineral ou aglomerado de cortiça, coladas aos blocos de betão e revestidas por um reboco de espessura reduzida armado com malha de fibra de vidro [26].

Para a construção de alvenarias mais eficientes, são utilizados atualmente os tijolos térmicos de furação vertical e encaixe lateral. Este tipo de unidade cerâmica oferece

relativamente ao tijolo comum, de furação horizontal, maior inércia térmica, maior resistência mecânica e melhor isolamento térmico e acústico [27]. Este produto é combinado com sistemas de isolamento pelo exterior, como por exemplo, o sistema *ETICS*.

Ao nível das paredes de compartimentação, atualmente estas são construídas recorrendo sobretudo a tijolo de furação horizontal de 7cm, 9cm e 11cm, sendo as paredes de maior espessura aplicadas na compartimentação de casas de banho e cozinhas devido à necessidade de aplicação das respetivas instalações.

## **2.3. Alvenaria Estrutural**

---

### **2.3.1. Declínio da Alvenaria Estrutural**

---

Uma parede com função estrutural pode ser definida como um componente estrutural contínuo vertical, retilíneo ou curvilíneo, constituído pela solidarização, por meio de um ligante (argamassa), de um conjunto de elementos resistentes (unidades de alvenaria) e que podem integrar elementos de reforço de outra natureza (varões metálicos, ligadores ou outros). De acordo com a função estrutural que desempenha, as paredes podem ser classificadas como paredes armadas, não armadas, confinadas ou de contenção.

Como já referido anteriormente, à semelhança dos restantes países da Europa, também em Portugal as estruturas em alvenaria com função estrutural sofreram, após a década de 60, uma estagnação, consequência do domínio das estruturas reticuladas em betão armado [7]. Outra das causas para o “quase” desaparecimento das estruturas em alvenaria resistente, foi o fato de estas apresentarem fraco desempenho face às ações sísmicas.

Após as primeiras situações de estruturas de alvenaria sujeitas à ação sísmica, foram introduzidas algumas soluções como, tirantes, ligadores, varões nas juntas e armaduras de madeira (cruzes de Santo André - época pombalina), de modo a melhorar o comportamento destas estruturas. Contudo, os conhecimentos técnicos reduzidos, as condicionantes económicas, a ausência de regulamentação e a frequência reduzida da ocorrência de sismos numa região, levaram à repetição dos danos provocados em situações semelhantes. Os sismos de grande magnitude ocorridos em São Francisco, EUA (1906), Messina, Itália

(1908) e Tóquio, Japão (1923), com efeitos devastadores, levaram a crer que as construções em alvenaria estrutural não eram seguras face às ações sísmicas. Existe um grande número de construções que sobreviveram até aos dias de hoje às ações sísmicas, facto este que se deve a aspectos como, a regularidade em planta das estruturas, qualidade de construção e o emprego de materiais capazes de fornecer resistência à ação sísmica [28].

A inexistência de regulamentação para o dimensionamento, conceção e projeto de estruturas em alvenaria, foi outro dos fatores que contribuiu para o seu desuso. Esta situação conduzia a uma generalização por parte dos projetistas, visto existir uma variedade de tipologias de alvenarias resistentes, esta situação levava na maioria dos casos ao aparecimento de algumas anomalias nas construções [28].

Pela experiência adquirida, nos países com risco sísmico moderado e elevado, a solução passou por utilizar a alvenaria estrutural simples apenas em edifícios de pequeno porte, visto o fraco desempenho em situações de sismo. Por outro lado, a alvenaria confinada e a alvenaria armada demonstram um excelente comportamento perante as ações sísmicas, podendo estas serem utilizadas em edifícios de médio e grande porte [29].

### **2.3.2. Panorama Europeu**

---

Na Europa a alvenaria estrutural ressurgiu nos anos 50, com o aparecimento de novos materiais, mais resistentes e com melhor comportamento térmico. Ocorre também o desenvolvimento de novas recomendações práticas aplicadas às estruturas em alvenaria. O dimensionamento das estruturas era apoiado em projetos de investigação experimental e numa análise estrutural sólida, em tudo semelhante à adotada para estruturas em betão armado ou metálicas. Estima-se que atualmente as estruturas em alvenaria representem em alguns países da Europa, Estados Unidos, Canadá e Austrália entre 10% e 25% dos novos edifícios de habitação [3].

Paul Haller, engenheiro suíço deu em 1951, um passo importante para a alvenaria estrutural na Europa. Este dimensionou e construiu em Basileia, um edifício de 13 andares (42m) em alvenaria não armada, com paredes resistentes internas de 15cm de espessura e externas de 37,5cm. Este edifício é considerado como um marco para a alvenaria estrutural

não armada [7] [3]. Em alguns países onde não era recorrente o uso de alvenaria estrutural, esta prática ganhou peso. Exemplo disso é a Suíça, onde a utilização de alvenaria cerâmica estrutural passou a ser prática recorrente, particularmente nas últimas décadas.

Desta época destacam-se ainda outras construções de elevada importância na área da alvenaria estrutural na Europa. Exemplo disso são:

- Três torres de 13 pisos (41,40m) em Basel na Suíça em 1951 constituídas por paredes exteriores de 38cm e interiores de 15cm e blocos com uma resistência à compressão de 30MPa; [1]
- Uma torre com 18 pisos em Schwamendingem, Suíça, com paredes de espessura não superior a 30cm. [1]
- Edifício de escritórios construído em Londres-King Street em alvenaria armada [2].

Surgem assim na década de 50, alguns edifícios de elevada importância sobretudo em Inglaterra, Alemanha e Suíça até 18 andares e com alvenarias de espessura reduzida. Na Europa a grande maioria das soluções em alvenaria estrutural recorre a unidades cerâmicas de furação vertical ou horizontal [30].

### **2.3.3. Panorama em Portugal**

---

Em países como Alemanha, França, Reino unido, Itália e EUA, a utilização de alvenaria estrutural não sofreu o declínio acentuado e prolongado no tempo que se verificou em Portugal. Nestes países a alvenaria estrutural soube-se adaptar, aliada a novas tecnologias, processos e novas correntes arquitetónicas, mantendo um papel importante na construção [7].

Em Portugal o cenário é diferente dos restantes países da Europa. Embora a utilização de alvenaria estrutural tenha tido expressão dominante no passado, atualmente a sua aplicação como solução construtiva estrutural, é residual. Existe uma discrepância entre Portugal e alguns países europeus na utilização de sistemas estruturais [25] (Figura 5). Atualmente em Portugal os edifícios em estrutura de betão armado representam cerca de 98% dos edifícios construídos mostrando o claro domínio desta técnica [25].

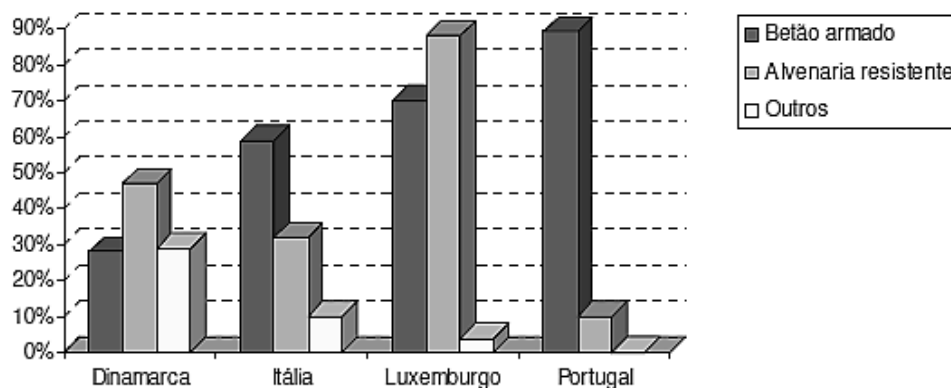


Figura 5 - Comparação de sistemas construtivos entre Portugal e outros países Europeus [25].

Os trabalhos em alvenaria representam atualmente em Portugal uma parcela importante no custo total das construções, estima-se que estas correspondem de 8.5 a 10.5 % do custo total das construções [31]. Segundo estudos realizados é possível afirmar que a nível económico, a construção de edifícios de pequeno porte em alvenaria estrutural, é economicamente viável quando comparando com as soluções correntes, em estrutura de betão armado. São estimadas reduções de custos entre 10% e 25% [32].

Para além das vantagens económicas, os sistemas em alvenaria resistente, podem ter como vantagens técnicas, a simplificação do processo construtivo, menor diversidade de materiais empregues, redução de mão-de-obra, menos desperdícios de material e maior rapidez de execução [11], levando à diminuição dos prazos de conclusão das construções.

Dado o panorama da economia europeia, e tendo em conta o estado atual da construção em Portugal, onde cada vez mais as questões económicas têm papel preponderante e existe uma procura constante de soluções que sejam economicamente mais viáveis. A construção em alvenaria resistente, pensada, planificada e economicamente mais atrativa pode ganhar terreno e competir com as atuais e dominantes estruturas reticuladas de betão armado. A introdução do Eurocodigo 6 [4], complementado pelas partes do Eurocodigo 8 [22] que à alvenaria estrutural diz respeito, bem como a inclusão da temática das alvenarias resistentes nos planos de estudo das escolas de engenharia e arquitetura, podem mudar mentalidades e levar à alteração do panorama atual das alvenarias resistentes em Portugal. Se em países como a Itália e Alemanha, em que as soluções em alvenaria com função

resistente representam, respetivamente 30% e 50% do mercado da construção de edifícios, não existem razões para justificar a não aplicação da técnica em Portugal [33].

A construção em alvenaria resistente, atualmente em Portugal é quase inexistente, como exemplos isolados da aplicação desta técnica temos:

- Agência da Caixa Geral de Depósitos de Avis concluída em 1991, foi construída igualmente em alvenaria simples de tijolo com projeto de estruturas da autoria do Eng.º José António Crespo e do Eng.º Saldanha Palhoto [34]. A aplicação do tijolo como material estrutural não foi empregue em todo edifício, existindo partes do mesmo em estrutura reticulada de betão.
- Biblioteca Bento de Jesus Caraça na Moita, distrito de Setúbal, foi concluída em 1997 e teve como autor do projeto de estruturas o Eng.º Teixeira Trigo, esta teve como elemento estrutural a alvenaria de tijolo [34], tal como a Agência da Caixa Geral de Depósitos de Avis também a presente construção apresenta em partes, estrutura de betão armado.
- Edifício da Guarda Nacional Republicana em Ourique, construída em 2001 em alvenaria resistente confinada, com recurso a blocos *Isobloco* da marca Pavileca, de 32cm de espessura [28].
- Conjunto habitacional construído no Algarve em 2006, neste projeto o processo construtivo adotado foi a alvenaria estrutural confinada com unidades de alvenaria de blocos de betão, sendo os elementos de betão armado, pilares e cintas executados no interior da própria alvenaria. Para a solidarização do conjunto, foram ainda aplicadas armaduras nas juntas horizontais do tipo *Murfor* [7].
- Construção de residência em Ílhavo-Aveiro em 2006 em alvenaria confinada com unidades cerâmicas de furação vertical [3].

#### **2.3.4. Panorama nos Estados Unidos da América**

---

O edifício Monadnock Building, construído em Chicago em 1891 com 16 pisos e paredes de 1,80m na base, é tido como o último exemplo de uma grande construção em alvenaria resistente segundo regras antigas [35].

O aparecimento de grandes estruturas em alvenaria resistente na Europa fez despertar o interesse dos engenheiros norte americanos. A década de 60 marca o retorno pelo interesse e investimento na investigação e desenvolvimento de novas soluções na área das alvenarias estruturais nos EUA [36]. Em maio de 1966 foi editado o primeiro código americano de alvenaria estrutural, denominado “*Recommended Building Code Requirements for Engineered Brick Masonry*”. Em 1967 realiza-se o primeiro congresso de estruturas de alvenaria (*International Brick/Block Masonry Conference*) em Austin, Texas. Alguns países americanos passaram a ver a técnica de construção em alvenaria estrutural como uma solução válida e vantajosa a par das soluções em betão armado e metal. Nesta altura surgem edifícios de pequena dimensão bem como estruturas de vários pisos. Como exemplos são:

- Edifício Park-Mayfair-East em Denver – Colorado, este edifício é composto por 17 pisos e construído em alvenaria armada, com paredes de espessura total de 28 cm, compostas por 2 panos de tijolo de 9.2 cm e espaço intermédio de 9.5cm preenchido em betão. Este edifício era considerado até á data a estrutura mais arrojada construída em alvenaria armada [37].
- Edifícios Park-Lane Towers, conjunto de edifícios construídos em 1970, compostos por 20 pisos (63m de altura) com paredes de espessura de 20 cm, a partir de tijolos de 100 MPa de resistência à compressão [38].
- Hotel Excalibur - Las Vegas - Nevada, O Hotel inaugurado em 1990 é formado por quatro torres, cada uma com 28 pisos, e contendo cada uma delas 1008 apartamentos. A resistência à compressão especificada na base das paredes de alvenaria armada de blocos de betão é de aproximadamente 28 MPa. Este edifício é atualmente considerado a maior estrutura construída em alvenaria armada [38].

É de referir que o terramoto de 1933 de Long Beach levou à proibição da construção de alvenaria simples na Califórnia, e noutros estados dos EUA [39], devido às consequências catastróficas sobretudo em estruturas construídas em alvenaria simples. A alvenaria armada é a solução mais recorrente neste país, quer para edifícios de pequeno e grande porte [28]. Atualmente o “*ACI Manual Building Code Requirements and Specifications for Masonry Structures and Related Commentaries (ACI 530/530.1-05)*” é um dos documentos normativos aplicado nos EUA, para a construção em alvenaria estrutural [40].

### **2.3.5. Panorama no Brasil**

---

O ano de 1966 marca a introdução da técnica de alvenaria estrutural no Brasil com a construção de edifícios em alvenaria armada no conjunto habitacional “Central Parque da Lapa” em São Paulo. A obra mais marcante desta introdução é a construção de quatro edifícios com 12 pisos também no “Central Parque da Lapa” em 1972 em alvenaria armada [2]. O melhoramento das técnicas de fabrico e utilização dos blocos cerâmicos e silico-calcários estruturais bem como a aplicação da alvenaria estrutural na construção a larga escala de bairros sociais no início da década de 80 e as pesquisas, testes experimentais e criação de normalizações de modo a reconhecer a alvenaria estrutural como um processo construtivo eficiente e racional levaram à disseminação desta técnica por todo o país [41]. Atualmente a alvenaria armada é utilizada em edifícios até 24 pisos enquanto para edifícios até 13 andares a alvenaria não armada é a técnica mais recorrente muito pelo facto de o território brasileiro apresentar na grande maioria uma baixa atividade sísmica permitindo o uso da técnica [23]. A norma ABNT NBR 15961-1:2011 – Alvenaria estrutural – Blocos de concreto – Parte 1: Projetos [42], especifica os requisitos mínimos exigíveis para o projeto de estruturas de alvenaria de blocos de concreto. A norma ABNT NBR 15961-2:2011 – Alvenaria estrutural – Blocos de concreto – Parte 2: Execução e controle de obra [43], estabelece os requisitos mínimos para a execução e controlo de obras com estruturas de alvenaria que utilizam blocos de betão.

### **2.4. Tipos de Alvenaria Estrutural**

---

A alvenaria estrutural é um conceito, onde as próprias paredes de delimitação da construção desempenham em simultâneo, a função de suporte e estabilidade da edificação, para todas as ações ocorrentes [8]. As alvenarias podem ser classificadas tendo em conta o aspeto final, a localização e a sua função estrutural. A função resistente de uma alvenaria é definida pela contribuição que esta tem na estabilidade da construção, para além de resistirem a ações horizontais, as paredes resistentes devem de ser capazes de suportar as ações verticais devidas ao peso próprio dos elementos estruturais e sobrecargas de utilização transmitidas pelas lajes [44]. São os elementos horizontais de laje que garantem uma distribuição eficaz das ações horizontais, pelos elementos verticais resistentes em

função da sua rigidez. São definidas como as tipologias de alvenaria resistentes mais usuais, alvenaria resistentes simples, armada e confinada [7].

### 2.4.1. Alvenaria Estrutural Simples

---

Em países de baixa sismicidade como Alemanha, Holanda ou Noruega ou de risco sísmico moderado como Itália e Espanha, as soluções em alvenaria estrutural simples apresentam grande peso na construção de edifícios habitacionais [3]. No panorama europeu, estima-se que as soluções em alvenaria estrutural simples representem de 15% a 50% da construção nova de edifícios de habitação [3].

Segundo o EC 6 [4], as alvenarias resistentes simples são construídas pela sobreposição predefinida e ordenada de unidades de alvenaria unidas por argamassa (Figura 6a,b), a sobreposição das unidades de alvenaria deverá de ser pelo menos 40% da altura das unidades ou 40mm. É frequente a execução de cintas armadas no topo de cada painel de alvenaria com o objetivo de garantir a ligação entre a parede e a laje que nela assenta [7]. As unidades deverão ter robustez suficiente para evitar a rotura da alvenaria por resistência à compressão insuficiente. A segurança por rotura à compressão é garantida pela imposição de limites mínimos na furação vertical, e espessura das unidades de alvenaria [44]. A ação sísmica é o maior condicionante às estruturas de alvenaria simples. Segundo o regulamento EC 8 [22] as estruturas simples de alvenaria não podem ser aplicadas em zonas de elevado risco sísmico, a sua aplicação fica restringida a locais de risco sísmico reduzido desde que sejam cumpridos alguns requisitos mínimos. O EC 8 [22] define uma espessura mínima para alvenarias com unidades que não a pedra natural, de 24cm, para zonas de relativa sismicidade e uma espessura mínima de 17cm para alvenarias em zonas de baixo risco sísmico.

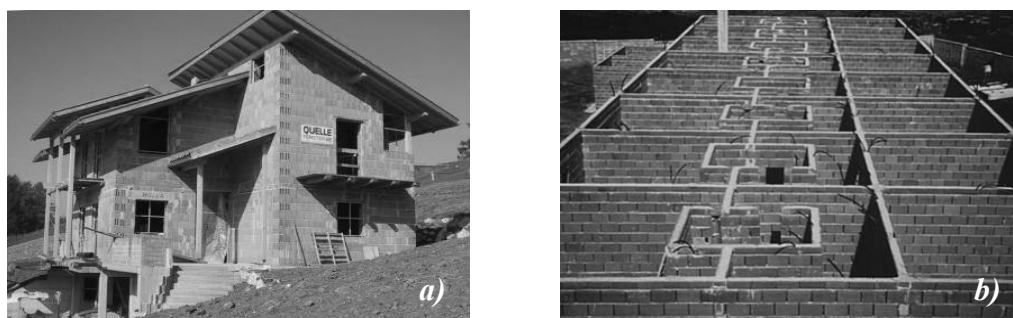


Figura 6 - Construção em alvenaria estrutural simples; a) Construção de moradia em alvenaria estrutural simples; b) Obra em alvenaria estrutural simples no Brasil [7].

## 2.4.2. Alvenaria Armada

---

A solução em alvenaria armada, consiste na aplicação de armaduras nas juntas horizontais ou nos espaços verticais das unidades cerâmicas, que são posteriormente preenchidos com betão ou calda de cimento. Para a aplicação das armaduras, as unidades de alvenaria quer sejam de betão ou cerâmicos, têm de garantir na sua geometria, cavidades para a posterior introdução das armaduras. Na grande maioria dos casos as unidades possuem cavidades verticais (Figura 7a) sendo que existem soluções que integram cavidades horizontais para aplicação de armaduras horizontais.

A aplicação de armadura horizontal requer atenção especial pois é necessário garantir uma espessura de junta aceitável, ao mesmo tempo que um recobrimento adequado das armaduras [44].

A aplicação de armaduras permite obter um melhor comportamento estrutural das alvenarias face à ação sísmica, pelo aumento da resistência e capacidade de dissipação de energia [45]. Podem ser utilizadas armaduras treliçadas em aço inoxidável tipo *Murfor* ou armaduras ordinárias nas juntas horizontais e verticais (Figura 7b).



Figura 7 - Construção em alvenaria armada; a)Execução de alvenaria de blocos de cimento com armadura horizontal tipo *Murfor* [28]; b),c)Execução de alvenaria estrutural em blocos de betão com armadura vertical do tipo *Murfor* [44].

## 2.4.3. Alvenaria Confinada

---

A alvenaria confinada pode ser definida como um sistema de paredes, construídas de forma rígida entre elementos de vigas e pilares (ou cintas e montantes) de pequena dimensão, ligeiramente armados nos quatro lados (Figura 8a). Os elementos de confinamento podem ser executados simultaneamente à construção da alvenaria, ficando embutidos no interior

(Figura 8c,d,e,f), ou executados com recurso a elementos de cofragem numa fase posterior à construção da parede [7]. Os elementos de confinamento não devem ser tidos em conta no dimensionamento da alvenaria confinada segundo o EC 6 [4]. Os elementos de confinamento garantem à estrutura de alvenaria, um incremento de ductilidade e capacidade de dissipar energia em caso de sismo [44].

O EC 8 [22] estabelece que os elementos de confinamento devem ser colocados na intersecção de todas as paredes, para assegurar a estabilidade do conjunto estrutural. Adicionalmente, devem ser colocados elementos de confinamento nos bordos das aberturas, com área superior a  $1,5\text{m}^2$ , bem como nas extremidades das paredes. O mesmo regulamento define ainda uma distância máxima entre elementos de confinamento de 5,0m. A dimensão mínima dos elementos de confinamento é de 150mm.

Segundo estudos de avaliação experimental [46], é possível concluir que a solução de alvenaria resistente confinada em comparação com uma solução de alvenaria resistente simples, proporciona uma maior resistência mecânica a ações de corte, uma maior capacidade de dissipação de energia e maior ductilidade [44].



Figura 8 - Construção em alvenaria confinada; a),b)Construção de moradia em Ílhavo em alvenaria confinada com recurso a unidades cerâmicas de furação vertical [3]; c),d)Construção em alvenaria confinada de blocos de betão [11] [3]; e),f)Elementos cerâmicos, específicos para execução de montantes de confinamento [11]; g)Construção da Esquadra de Polícia de Segurança Pública (PSP) de Ourique, em alvenaria confinada de blocos de betão [11].

#### 2.4.4. Outros tipos de Alvenaria

---

Quando as paredes de alvenaria simples e confinadas são dotadas de armaduras horizontais de redistribuição de esforços, estamos perante uma solução mista (Figura 9a,b) [44].

O sistema de alvenaria pré-esforçada é outro tipo de alvenaria existente. Este tem por base a colocação de varões, no interior dos panos de parede. Numa segunda fase são aplicadas forças de tração nos varões, com recurso a macacos hidráulicos. Desta forma são transmitidas forças de compressão à alvenaria, aumentando assim a resistência ao corte, melhorando a capacidade de suportar esforços devido às ações horizontais, reduzindo também as tensões de tração [44].

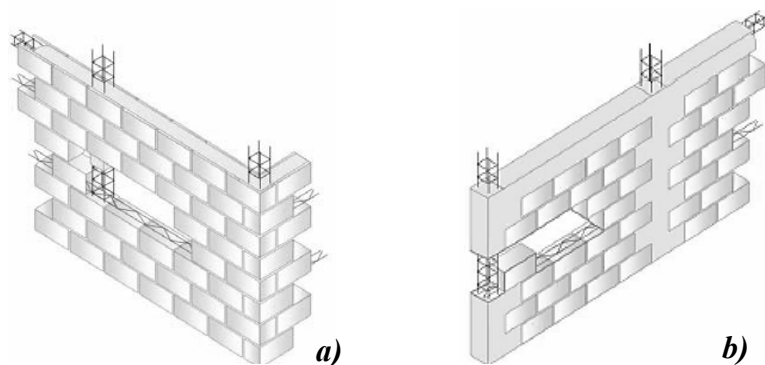


Figura 9 - Esquemas representativos de sistemas de alvenaria estrutural mista; a) Alvenaria confinada (montantes e cintas) com armaduras horizontal treliçadas nas juntas de argamassa [7]; b) Alvenaria confinada (pilares e vigas) com armaduras horizontal treliçadas nas juntas de argamassa [7].

### 2.5. O Eurocodigo 6

---

O Eurocodigo 6 - “Projeto de estruturas de alvenaria” [4] é atualmente o regulamento de base, na Europa para o dimensionamento de estruturas de alvenaria simples, armada, alvenaria pré-esforçada e alvenaria confinada e ainda dos acessórios de ligação correspondentes [32]. O processo de preparação e conceção dos Eurocodigos estruturais foi iniciado em 1987 sob a responsabilidade da comissão Europeia, tendo sido transferida a pasta para o CEN (Comité Europeu para a Normalização) em 1990. Em Portugal a primeira fase de preparação do EC 6 [4] foi concluída em 1994 com a aprovação da pré-norma ENV 1996-1-1, sendo publicada pelo CEN em 1995, mas só em 1996 ocorre a aprovação formal da ENV 1996-1-1 pelo NIS (Institutos Nacionais de Normalização). No

período 1996-98 ocorre o processo de tradução para português e a preparação do DNA (Documento Nacional de Aplicação) pelo GT6 (Grupo de Trabalho 6) [47].

Em dezembro de 2002 foi aprovada na SC6 (Subcomissão 6 do Comité Técnico) a EN 1996-1-1 sendo confirmada pelos NIS em 2003. Em 2005 a norma foi finalmente publicada pelo CEN, ao mesmo tempo foram preparadas e aprovadas as restantes partes do EC 6 [4], a EN1996-1-2 (Segurança ao Fogo), a EN 1996-2 (Seleção de Materiais e Execução) e a EN199-3 (Métodos Simplificados). Atualmente o EC 6 [4] apresenta quatro partes sendo que duas delas tem NP EN correspondente.

- EN 1996-1-1:2005+A1:2012-“Regras gerais para estruturas de alvenaria armada e não armada”. Em Portugal existe a versão portuguesa NP EN 1996-1-1:2005+A1:2015;
- EN 1996-1-2:2005/AC:2010-“Regras Gerais para a Verificação da Resistência ao Fogo”. Com errata já incluída existe em Portugal como norma correspondente a NP EN 1996-1-2:2015;
- EN 1996-2:2006/AC:2009-“Selection of Materials and Execution of Masonry”, não existindo NP EN correspondente;
- EN 1996-3:2006/AC:2009-“Simplified calculation methods for unreinforced masonry structures”, não existindo uma norma correspondente em Portugal.

## **2.6. Novas soluções para alvenarias**

---

A procura por novas soluções na área das unidades cerâmicas tem sido constante, prova disso é a quantidade de investigação realizada com o objetivo de encontrar novas unidades, com características melhoradas, quer ao nível térmico, acústico e mecânico. As inovações em unidades de alvenaria cerâmica têm surgido sobretudo em países com fortes tradições de construção em alvenaria estrutural, como Alemanha, França, Itália e Luxemburgo. Este facto é potenciador do desenvolvimento de novos produtos e técnicas de construção, com ganhos de produtividade, custo e melhoria das construções [25]. Noutros países o foco é a incorporação de resíduos na pasta de argila, de modo a dar um fim apropriado a resíduos poluentes, e ao mesmo tempo, a procura por soluções mais económicas para a construção.

### 2.6.1. Unidades de Alvenaria Correntes

---

As unidades de alvenaria têm contribuído para a evolução e criação de novas tipologias de alvenarias. Existem no mercado português diferentes tipos de unidades cerâmicas, o tijolo maciço (Figura 10a), perfurado (Figura 10b), o tijolo perfurado horizontalmente (Figura 10c) e o tijolo térmico de furação vertical com ou sem encaixe lateral (Figura 10d,e), sendo estes os que tem maior utilização. Para além das unidades cerâmicas estão ainda disponíveis no mercado nacional blocos de betão leve, blocos de betão celular autoclavado e blocos silico-calcários.

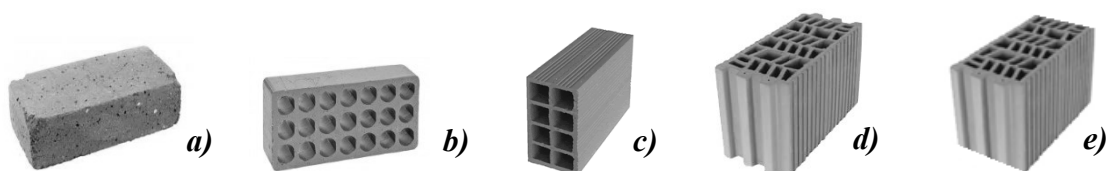


Figura 10 - Unidades de alvenaria recorrentes em Portugal: a)Tijolo Maciço; b)Tijolo Perfurado; c)Tijolo de furação horizontal; d)Tijolo de furação vertical com encaixe; e)Tijolo de furação vertical sem encaixe; [48].

A NP EN 1996-1-1 - “Regras Gerais para estruturas de alvenaria armada e não armada” [4], que define quatro grupos diferentes de unidades de alvenaria segundo um conjunto de requisitos estabelecidos, características de furação e percentagem de furação, volume de qualquer furo, espessura dos septos e a espessura equivalente [49].

A EN 771 é constituída por 6 partes, estabelecendo as características e tolerâncias admissíveis na fabricação das diferentes unidades empregues em estruturas de alvenaria. Dependendo da qualidade de fabrico e com a declaração de conformidade, as unidades podem ser classificadas como sendo de Categoria I ou II [49]. A norma NP EN 771:2011 [50] encontra-se dividida segundo os diferentes tipos de materiais. Para unidades cerâmicas é aplicável a NP EN 771-1, para blocos silico-calcários a NP EN 771-2, para blocos de betão de agregados correntes ou leves a NP EN 771-3, para blocos de betão celular autoclavado é aplicável a NP EN 771-4, para blocos de pedra artificial a NP EN 771-5 e em blocos de pedra natural é aplicada a NP EN 771-6. Para a realização de ensaios às unidades é aplicável a norma NP EN 772, constituída por 22 partes. O Quadro 5 adaptado da NP EN 1996-1-1:2005 [4] define os quatro diferentes grupos de unidades segundo a percentagem de furação.

Quadro 5 - Diferentes grupos de unidades de alvenaria definidos por um conjunto de requisitos geométricos estabelecidos, adapt. [4].

Unidades de Alvenaria		Requisitos geométricos para definição do agrupamento de unidades de Alvenaria						
		Grupo1	Grupo 2		Grupo 3		Grupo 4	
			Furação Vertical				Furação horizontal	
Volume de furos (% do volume total)	cerâmico	≤ 25	> 25; ≤ 55		> 12; ≤ 70		> 25; ≤ 70	
	betão corrente		> 25; ≤ 60		> 50; ≤ 70		> 25; ≤ 70	
Volume de qualquer furo (% do volume total)	cerâmico	≤ 12,5	cada furo ≤ 1%		cada furo ≤ 1%		cada furo ≤ 30%	
	betão corrente		total de furos ≤ 12,5%		total de furos ≤ 12,5%			
Dimensão mínima dos septos (mm)	cerâmico	septos sem exigência	interno	externo	interno	externo	interno	externo
	betão corrente		5	8	3	6	6	8
Espessura equivalente (% da largura total)	cerâmico	sem exigência	≥ 16		≥ 12		≥ 16	
	betão corrente		≥ 18		≥ 15		≥ 45	

**Notas:**

1. A espessura equivalente é a espessura dos septos interiores e exteriores, medida horizontalmente através da unidade de alvenaria e perpendicularmente à face da parede de alvenaria resistentes.
2. No caso de furos em forma cônica, ou furos celulares, deve ser usada a média da espessura dos septos interiores e exteriores.

## 2.6.2. Novas Soluções de Unidades de Alvenaria

### Em Portugal

Em Portugal, embora poucos, também existem bons exemplos da inovação e procura de novas soluções em unidades de alvenaria, estas têm surgido muito pelas parcerias entre empresas e as academias. Dias *et al* [51] fizeram em 1993, um dos primeiros estudos em Portugal sobre novas geometrias de unidades cerâmicas com furação vertical, que permitissem a execução de alvenarias de um só pano, mas com desempenhos semelhantes ao de paredes duplas e com isolamento (Figura 11).

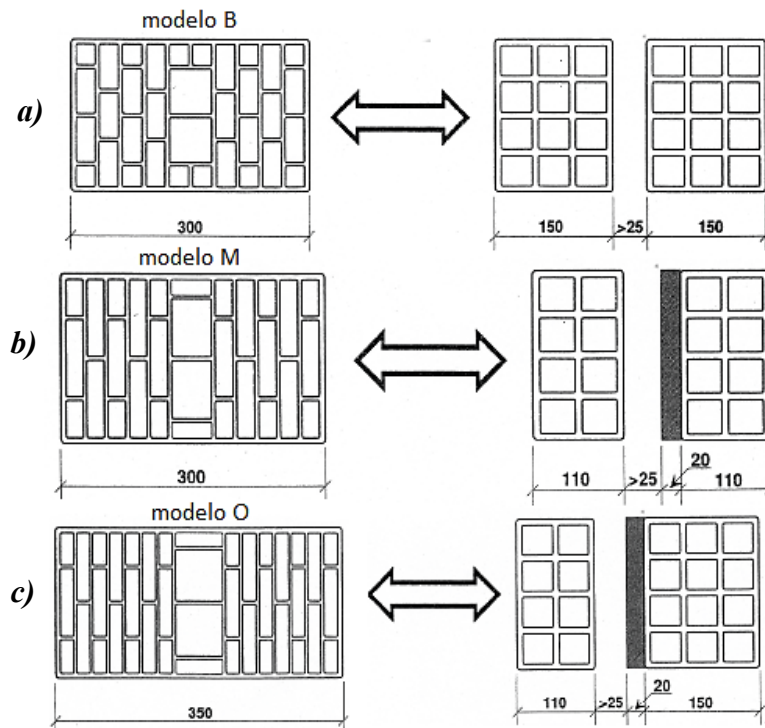


Figura 11 - Comparação do desenho de modelos propostos e tipologia de alvenaria correspondentes; a)Modelo B comparado com parede de tijolo de 15; b)Modelo M comparado com parede dupla de tijolo de 11 com placa de cortiça de 20m na caixa-de-ar; c)Modelo O comparado com parede dupla de tijolo interior de 11 e exterior de 15 com isolamento de cortiça de 20mm em caixa-de-ar [51].

Outra das propostas apresentadas em Portugal foi o *Tecnotijolo* [52] [53], esta nova unidade cerâmica apresenta uma ligeira alteração de formato dos tijolos convencionais (30x20x9; 30x20x11; 30x20x15; 30x20x20cm<sup>3</sup>). Esta apresenta nas extremidades verticais um encaixe vertical (Figura 12), tornando-se desnecessária a aplicação de argamassa nas juntas verticais.

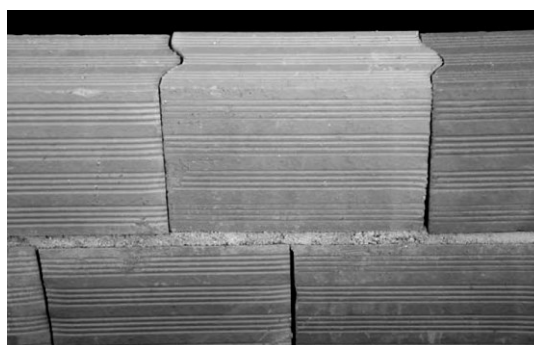


Figura 12 - Pano de alvenaria executada com unidades *Tecnotijolo* [52].

Este produto apresenta como maiores vantagens, a rapidez de execução, redução do consumo de água, areia e cimento, redução de abertura de roços horizontais, diminuição

dos desperdícios de argamassa e maior facilidade de transferência de humidades do interior para o exterior das habitações [54].

O sistema *cBloco* foi desenvolvido por Dias *et al* [55] e pelo CTCV (Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro), em colaboração com a Universidade do Minho, a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e por um conjunto de empresas cerâmicas produtoras, designado NAC (Novas Alvenarias Cerâmicas). A conceção da unidade teve como objetivo a procura por uma solução que garantisse os requisitos térmicos impostos, mas também uma unidade cerâmica com um comportamento mecânico adequado para utilização em soluções de alvenaria simples, confinada e armada em Portugal [7]. A unidade distingue-se pela geometria e pela furação vertical (Figura 13) que permite obter uma unidade com resistência mecânica à compressão elevada, ideal para uma função estrutural, mas que permite obter também um desempenho térmico melhorado quer pela geometria quer pela incorporação de resíduos provenientes de indústrias de madeira e papel.

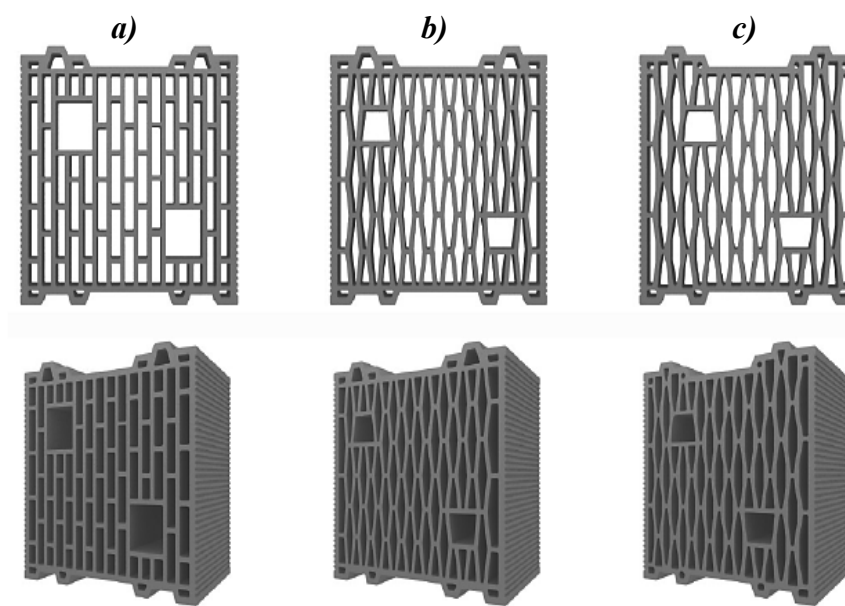


Figura 13 - Unidades *cBloco* de dimensões 30x20x19; a)Retângulos; b)Losango; c)Bagos de arroz [55].

Para além das unidades cerâmicas foram ainda desenvolvidos elementos complementares (Figura 14) com a mesma composição das unidades *cBloco* de modo a tornar a construção mais eficiente, evitando cortes, desperdícios e pontes térmicas.



Figura 14 - Elementos complementares para a construção de alvenarias com unidades *cBloco*; a) Peça para confinamento; b) Peça para confinamento terminal; c) Lintel; d) Forra térmica ou divisória; e), f) Peça de ajuste horizontal; g), h) Forra térmica [55].

A Prélis-Smart Ceramics desenvolveu em 2013 uma unidade cerâmica, o tijolo *UNIKO* com características ao nível da geometria, que a tornam única (Figura 15a). Esta nova solução, já em comercialização, abre caminho para processos de autoconstrução do tipo faça você mesmo, visto ser um produto de fácil e rápida instalação [56].

O tijolo *UNIKO* possui um sistema de encaixe macho-fêmea ao nível da junta vertical, constituído por uma junta contínua de deslizamento, que dispensa a utilização de argamassa (Figura 15b), deste modo é possível a elevação de panos de alvenaria a seco, apenas por sistema de encaixe. A aplicação deste sistema não dispensa por completo a utilização de argamassa ou cola na junta horizontal.

O tijolo *UNIKO* possui ainda uma furação vertical de diâmetro 8mm, junto da zona de encaixe (Figura 15c), que permite a introdução de varões metálicos, sendo possível construir uma alvenaria armada e com um comportamento melhorado, face a forças horizontais de corte [56].

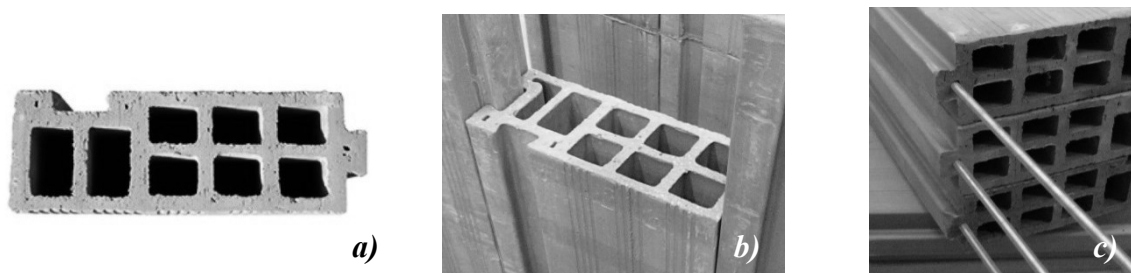


Figura 15 - Tijolo *UNIKO*; a) Geometria do tijolo *UNIKO*; b) Pormenor da junta de encaixe no tijolo *UNIKO*; c) Aplicação de varões metálicos no tijolo *UNIKO* [56].

Na Europa, existe um conjunto de países como França, Itália e Alemanha que apresentam um grande nível de desenvolvimento e inovação ao nível das unidades cerâmicas, visto apresentarem larga tradição na construção de alvenaria com função estrutural. Este fato é potenciador do desenvolvimento de novos produtos de alvenaria cerâmica e de técnicas de construção, com vantagens significativas, situação que não se verifica em Portugal, como já referido anteriormente [7].

### **Desenvolvimento em França**

Em França as novas soluções em unidades cerâmicas surgem em 1976 com o desenvolvimento de um tijolo para aplicação em alvenaria estrutural de pano único. Atualmente as marcas Biomur e Porotherm são os maiores produtores de unidades cerâmicas tendo desenvolvido ao longo dos anos diferentes tipologias de tijolos cerâmicos especialmente para aplicação em alvenaria estrutural (Figura 16a,b). Estes fabricantes produzem unidades cerâmicas semelhantes, a partir de uma mistura de argila com resíduos combustíveis como, serradura, celulose ou ainda poliestireno reciclado. Durante o processo de cozedura os resíduos são consumidos diminuindo assim o tempo de cozedura, ao mesmo tempo que se formam alvéolos de ar que permitem às unidades cerâmicas melhorar o seu comportamento térmico [57] [58].

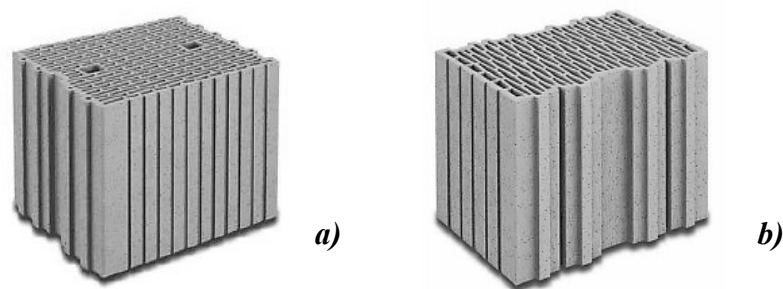


Figura 16 - Tijolos térmicos para aplicação em alvenaria de um pano; a) Unidade cerâmica da marca Porotherm; b) Unidade cerâmica da marca Biomur [57].

Para além das unidades cerâmicas base foram ainda desenvolvidos pela marca Biomur um conjunto de elementos cerâmicos complementares para a construção em tijolos térmicos (Figura 17).

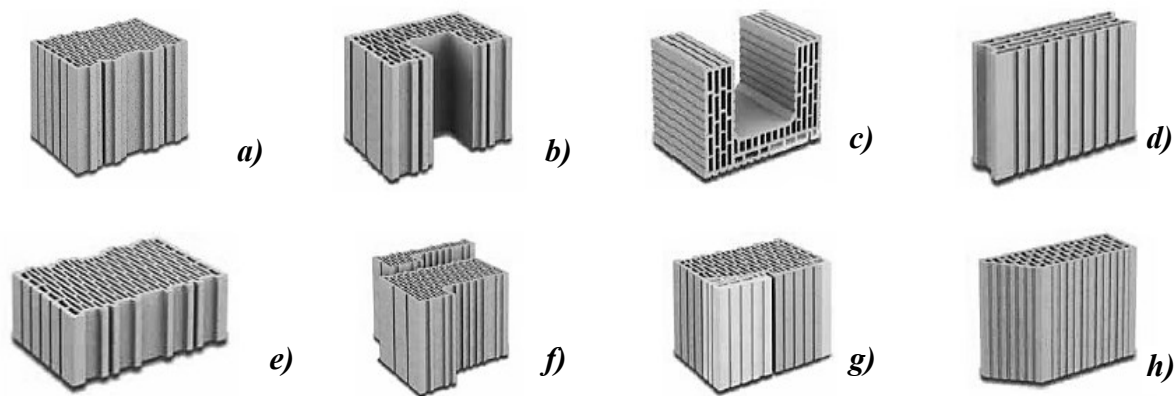


Figura 17 - Elementos complementares para a construção de alvenarias com unidades Biomur; a) Peça base; b) Peça de coluna; c) Lintel; d) Peça de partição; e) Meia peça; f,g) Peças de ombreira; h) Peça de ângulo [57].

### Desenvolvimento em Itália

Em Itália surgiu em 1986, o consórcio Alveolater formado por um conjunto de 17 empresas industriais da cerâmica [57]. Este grupo tem desenvolvido ao longo dos anos, novas unidades cerâmicas, sobretudo com fim para a construção de alvenaria resistente. Para a obtenção de tijolos com características termo isolantes melhoradas, são incorporados na composição dos tijolos materiais como, serradura, poliestireno ou ainda casca de arroz.

Nos blocos *Perlater*, um dos modelos desenvolvidos pela Alveolater [59], as características térmicas melhoradas são conseguidas pela introdução de grãos de perlite, conferindo à pasta de cerâmica uma maior capacidade de isolamento térmico. Este material poroso de cor branca e muito leve é obtido da expansão de rocha vulcânica como a Obsidiana, que quando sujeita a tratamento térmico, sofre um aumento de vinte vezes o seu volume. Para além da incorporação de materiais na pasta cerâmica, as unidades desenvolvidas pela Alveolater possuem uma geometria melhorada, dos alvéolos internos de furação, com um número elevado de fiadas na direção perpendicular do fluxo térmico, que contribui para uma melhor capacidade de isolamento térmico das unidades [57].

Os tijolos desenvolvidos pela Alveolater são classificados segundo a sua percentagem de furação, com intervalos entre os 45% e os 60% (Figura 18), e com recomendações para diferentes utilizações, sendo os mais compactos, mais adequados para aplicação em zonas sísmicas. As unidades do modelo classe 45 (Figura 18a) são recomendados para aplicação

em alvenaria estrutural e em zonas sísmica e não sísmicas. Por sua vez os modelos classe 55 (Figura 18b) são apenas recomendados para paredes resistentes em zonas de baixa sismicidade. Os modelos classe 60 (Figura 18c) são de uso exclusivo para alvenarias de compartimentação sem qualquer função estrutural [59].



Figura 18 – Modelos das unidades cerâmicas da marca Alveolater; a) Unidades cerâmicas da Classe 45; b) Unidades cerâmicas da Classe 55; c) Unidades cerâmicas da Classe 60 [18]

O Quadro 6 mostra as características dos modelos da marca Alveolater, classe 45, classe 55 e classe 60 de furação horizontal e vertical.

Quadro 6 - Características das unidades cerâmicas da marca Alveolater de diferentes classes, adapt. [57].

Característica	Classe 45	Classe 55	Classe 60- Furação vertical	Classe 60- Furação horizontal
Largura (mm)	350	350	350	350
Percentagem de furação (%)	40 a 45	40 a 45	55 a 70	55 a 70
Massa volúmica aparente (Kg/m <sup>3</sup> )	800 a 870	800 a 870	450 a 600	450 a 600
Resistência característica á compressão f <sub>bk</sub> (Mpa)	12	9 a 10	9	2,5
Coefficiente global de transmissão de calor (W/m <sup>2</sup> K)	0,60 - 0,65	0,55 - 0,60	0,53 - 0,55	0,53 - 0,55
Condutividade térmica equivalente λ <sub>e</sub> (W/mK)	0,24 - 0,26	0,22 - 0,24	0,21 - 0,22	0,21 - 0,22
Isolamento acústico da alvenaria a 500 Hz R <sub>w</sub> (dB)	> 53	> 50	48	49
Resistência ao fogo (R.E.I)	180	180	180	180

Em Itália o grupo Danesi é umas das empresas que mais tem apostado na inovação das unidades cerâmicas. Em 2009 criou a gama de produtos *Thermokappa* (Figura 19a) com características específicas não só pela sua geometria, mas também, por estas unidades possuírem no seu interior, zonas com isolamento térmico de poliestireno expansível (EPS) permitindo obter um tijolo com características melhoradas ao nível térmico. Este modelo apresenta um coeficiente de transmissão térmica U igual a 0,30 W/m<sup>2</sup>°C [60]. Em Janeiro de 2013 foi apresentado o *Normablok* (Figura 19b,c), este sistema oferece uma solução de elevado nível tecnológico, permitindo uma construção ainda mais eficiente ao nível

energético  $U$  ( $0,18 \text{ W/m}^2\text{°C}$ ). Este novo produto é composto por uma unidade cerâmica em que as furações verticais são preenchidas por poliestireno expansível (EPS) com adição de grafite [60].

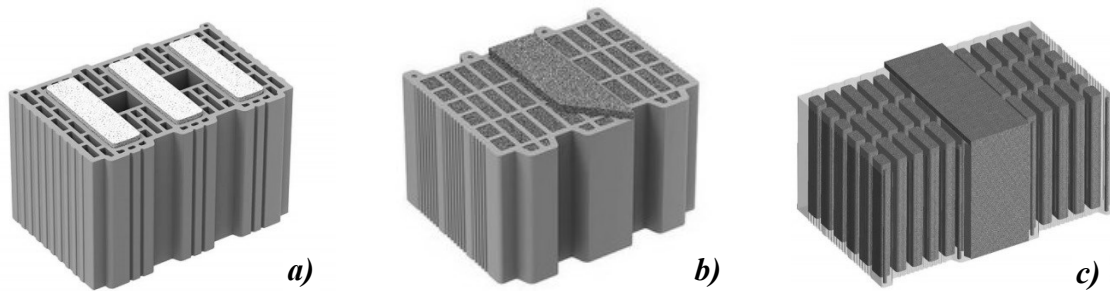


Figura 19 - Unidades cerâmicas do Grupo Danesi; a) Unidade cerâmica *Thermokappa 45*; b),c) Unidade cerâmica *Normablok* [60].

Para além das novas geometrias e incorporação de isolamentos, o grupo Danesi desenvolveu em sistema de retificação das faces das unidades cerâmicas, este processo permite obter uma construção com melhor comportamento perante a ação sísmica uma vez que as unidades estão totalmente em contacto na junta horizontal [60].

### **Desenvolvimento na Alemanha**

A Alemanha é também um dos países da Europa onde as soluções em alvenaria estrutural estão amplamente difundidas. As unidades cerâmicas foram alvo de grandes desenvolvimentos, surgiram unidades com novas geometrias e com incorporação de materiais isolantes. Neste país foram formados três consórcios para desenvolvimento e produção de novas unidades cerâmicas para alvenaria resistente, Poroton, Unipor e Termopor [57].

O consórcio Poroton da qual faz parte o grupo Italiano Danesi anteriormente referido, é o maior produtor de unidades cerâmicas na Alemanha e é detido pela Wienerberger [61], um grupo Internacional Austríaco com diversas unidades de produção presentes em vários países [54].

Os recentes desenvolvimentos levaram à criação de unidades cerâmicas com os alvéolos preenchidos com material isolante granulado á base de perlite, é o caso do modelo *T9* (Figura 20a), uma unidade cerâmica com capacidades isolantes muito elevadas (Quadro 7) [57].

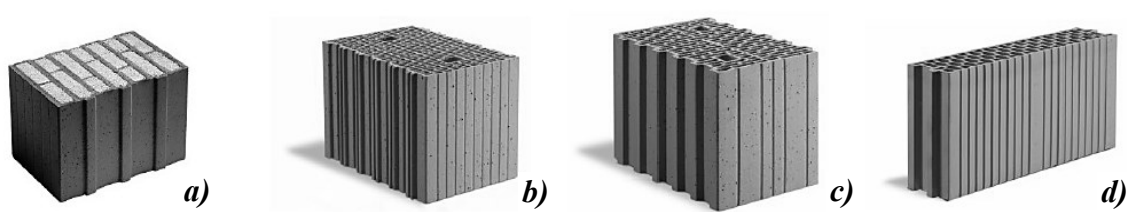


Figura 20 - Unidades cerâmicas do Grupo Poroton; a) Modelo T9; b) Modelo T10; c) Modelo T14; d) Modelo T7,5 [57].

Quadro 7 - Características das diferentes unidades cerâmicas da marca Poroton, adapt. [57].

Característica	Modelo T9	Modelo T10	Modelo T14	Modelo T7.5
Dimensões CxLxA (mm)	248x300x249	248x300x249	248x490x249	498x75x238
Massa (Kg)	12,1	11,6	21,1	14,5
Massa volúmica (Kg/m <sup>3</sup> )	650	650	700	800
Resistência á compressão (Mpa)	6	6	8	6
Condutividade térmica equivalente $\lambda_e$ (W/m.K)	0,09	0,10	0,14	0,16

O mais recente desenvolvimento da marca Unipor levou à criação da unidade cerâmica *Unipor Coriso* que tem por base o preenchimento das furações de unidades cerâmicas com lã mineral granulada, (0.14 W/m<sup>2</sup>°C) (Figura 21) [62].

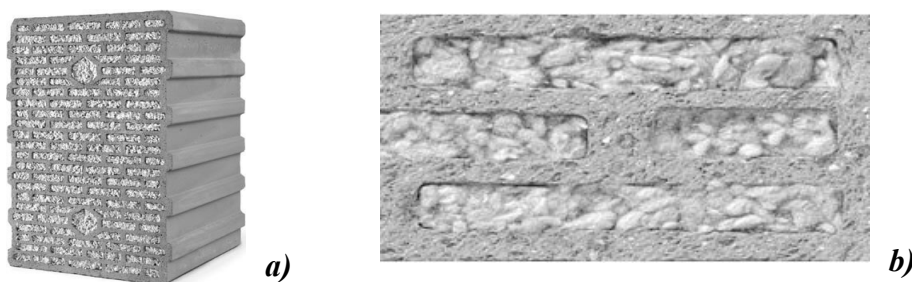


Figura 21 - Unidades cerâmicas *Unipor Coriso* do Grupo Unipor; a) Modelo *Unipor Coriso*; b) Detalhe do modelo *Unipor Coriso* [57].

## Desenvolvimento na Colômbia

Em 2009 os arquitetos Johanna Navarro e Miguel Niño criaram uma unidade cerâmica de furação horizontal com uma geometria totalmente diferentes dos tijolos cerâmicos recorrentes. O *BT-Bloco Termodissipador* é um tijolo cerâmico que adota o mesmo

processo de fabrico por extrusão dos tijolos recorrentes, mas que se distingue pela sua forma irregular (Figura 22).

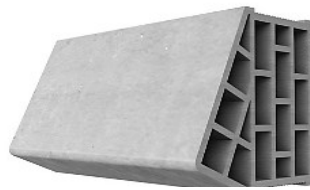


Figura 22- *BT-Blocko Termodissipador* [63].

Uma das superfícies do *BT-Blocko* assume a forma de um triângulo irregular, permitindo que os raios ultravioleta sejam redirecionados para cima e não para o solo. Esta unidade possui uma furação horizontal de menor dimensão o que permite uma redução da quantidade e da velocidade de propagação do calor (Figura 23). Para além disso a furação horizontal da zona triangular da unidade permite a deslocação de ar no seu interior, facto que contribui para a diminuição da temperatura nessa zona da unidade cerâmica. Outro aspeto que contribui para que esta seja uma solução ainda mais sustentável, é a presença de uma zona para o assentamento de argamassa, deste modo é possível evitar desperdícios e ocultar as zonas de junta [63].

A forma diferenciada desta solução permite diferentes formas de instalação e disposição das unidades cerâmicas, fator capaz de dar uma maior liberdade na linguagem arquitetónica.

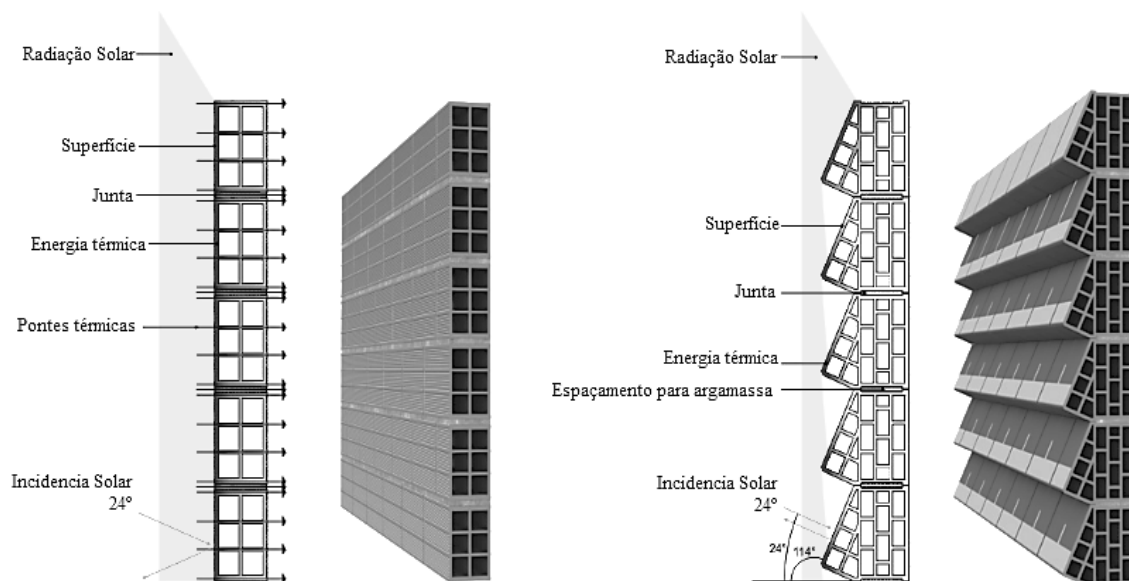


Figura 23 - Comparação entre o sistema tradicional de alvenaria e o sistema *BT-Blocko Termodissipador* [63].

### **2.6.3. Incorporações na pasta de Argila**

---

A incorporação de outros materiais por substituição de certas percentagens de argila tem levado à realização de várias investigações a nível internacional e que recorrem aos mais variados resíduos, vão desde serradura até resíduos provenientes de ecrãs *LCD* (*liquid crystal display*). Os estudos permitem muitas das vezes obter uma unidade cerâmica com características melhoradas, níveis de resistência à compressão superiores, níveis de absorção de água inferiores e desempenhos mais eficientes ao nível térmico e acústico.

A inovação das unidades cerâmicas pela incorporação de outros materiais permite, em alguns dos casos, obter uma temperatura de cozedura inferior ao normal, o que constitui uma boa maneira da indústria cerâmica contribuir para uma construção mais sustentável. Um dos grandes objetivos da utilização de resíduos em unidades cerâmicas deve-se a uma tentativa de encontrar uma forma de tratamento para alguns resíduos poluentes, e em países subdesenvolvidos uma via para tornar a construção mais acessível.

#### **Incorporação de Cinzas Volantes**

Linglin *et al* [64] estudaram em 2005 a substituição de uma certa quantidade de argila em unidades cerâmicas por cinzas volantes. As unidades com incorporação de cinzas volantes necessitam de uma temperatura de cozedura mais elevada do que as tradicionais unidades, a adição deste tipo de material traduz-se numa redução da resistência à compressão, mas tem como vantagens, a obtenção de unidades cerâmicas com baixa absorção de água e boa resistência ao fenómeno gelo-degelo (Quadro 8).

Cultrone *et al* [65] estudaram também a aplicação de cinzas volantes e referem que a sua aplicação conduz a uma alteração da cor das unidades cerâmicas, possibilitando a sua aplicação de face à vista.

Quadro 8 - Propriedades de unidades cerâmicas com diferentes quantidades de cinzas volantes, adapt. [64].

Cinzas volantes:Argila (volume)	Temperatura de cozedura (°C)	Porosidade aparente (%)	Absorção de água (%)	Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Força de compressão (MPa)
50 :50	1000	35,82	22,18	1,61	50,0
	1050	30,37	17,62	1,72	98,5
	1100	1,34	0,61	2,20	parcialmente vítreo
60 : 40	1000	39,83	26,94	1,48	25,4
	1050	36,65	23,62	1,55	39,6
	1100	16,14	7,95	2,03	parcialmente vítreo
70 : 30	1000	40,62	28,08	1,44	21,5
	1050	39,76	27,54	1,44	27,8
	1100	27,69	10,99	1,87	parcialmente vítreo
80 : 20	1000	42,12	31,26	1,35	14,7
	1050	39,80	27,86	1,43	25,4
	1100	29,05	12,61	1,84	parcialmente vítreo

### Incorporação de Resíduos Minerais

Um estudo realizado, levou à compreensão do efeito da adição de subprodutos da indústria de transformação de mármore em tijolos cerâmicos [66]. Deste estudo foi possível concluir que uma percentagem de substituição de 15% de argila, por subprodutos de mármore e uma temperatura de cozedura de 850°C podem ser obtidas unidades com elevadas resistências à compressão (Figura 24).

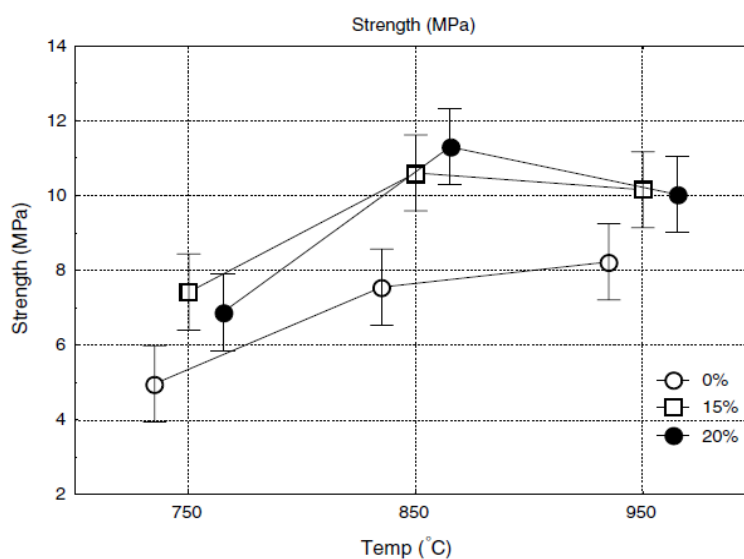


Figura 24 - Variação da resistência das unidades cerâmicas para diferentes temperaturas de cozedura e percentagens de substituição de argila por subprodutos de mármore [66].

Foram ainda analisados por outros autores [67], a possibilidade de substituição de argila por resíduos minerais, como o pó de granito e de caulino conjuntamente com escórias de alto-forno. Com esta composição foi possível obter unidades cerâmicas com excelente comportamento aos ácidos.

### **Incorporação de Resíduos Orgânicos**

Um dos estudos realizados na área das unidades cerâmicas teve como base a adição de resíduos provenientes da indústria produtora de azeite. Os resíduos utilizados, derivados da produção de azeite são designados de “água ruças”, estes são caracterizados por possuírem um teor orgânico elevado, A cozedura dos tijolos poderá ser realizada a uma temperatura inferior, passando de 920°C para 880°C permitindo assim uma redução do consumo de energia entre 2,4% a 7,3% com a obtenção de unidades cerâmicas com características físicas e mecânicas idênticas às dos tijolos sem a adição [68] [69].

A redução da densidade dos tijolos cerâmicos pela incorporação de aditivos orgânicos tem sido objeto de estudo de vários investigadores. Em Portugal um estudo realizado por Cruz em 2000 [70] teve como objetivo a análise do desempenho de blocos cerâmicos com a adição de resíduos de serradura, de poliestireno e de perlite, do estudo o autor concluiu que a adição dos materiais permitiu obter um bloco com características melhoradas ao nível térmico e acústico. Também a nível internacional têm sido realizados trabalhos com a adição deste tipo de matéria em unidades cerâmicas [71] [72] [73] [74].

Em 2008 Demir [75] estudou a aplicabilidade de vários resíduos orgânicos como serradura, resíduos de tabaco e resíduos vegetais (Figura 25) como meio de formação de micro porosidades em unidades cerâmicas. Segundo o autor do estudo não existem problemas de moldagem para percentagens de adições inferiores a 10% da massa da unidade.



Figura 25 - Palha, resíduos de tabaco, serradura e argila [75].

## Incorporação de Resíduos da Indústria Petrolífera

Em 2005 Monteiro e Vieira [76] investigaram o efeito da adição de resíduos provenientes da indústria extratora de petróleo, em tijolos cerâmicos. Os resíduos utilizados eram compostos por água, uma parte substancial de matéria orgânica e alguns metais pesados (Quadro 9).

Quadro 9 - Composição química dos resíduos provenientes da extração do petróleo, aplicados em tijolos cerâmicos, adapt. [76].

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	BaO	CaO	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO
13,7	2,52	6,69	11,1	9,97	4,46	0,18	0,95	2,30	0,42

Da investigação foi possível concluir que a adição de uma percentagem até 30% de resíduos, não altera as características das unidades cerâmicas, sendo a resistência à flexão o único parâmetro que sofre alteração, esta começa por um ligeiro aumento para uma percentagem de resíduos até 5%, para percentagem de adição superiores ocorre a diminuição da resistência à flexão (Quadro 10).

Quadro 10 - Características de unidades cerâmicas com incorporação de resíduos de petróleo, adapt. [74].

Resíduos de petróleo (%)	Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )		Retração linear (%)		Absorção de água (%)		Força de rutura (Mpa)	
	750°C	950°C	750°C	950°C	750°C	950°C	750°C	950°C
0	1,47 ± 0,21	1,58 ± 0,20	6,7 ± 0,4	9,5 ± 0,7	25,2 ± 3,3	24,5 ± 2,8	6,2 ± 0,6	10,4 ± 0,8
5	1,48 ± 0,15	1,62 ± 0,17	6,7 ± 0,3	9,9 ± 0,8	25,1 ± 2,9	23,6 ± 3,0	6,9 ± 0,5	12,1 ± 0,9
10	1,50 ± 0,19	1,66 ± 0,14	6,7 ± 0,3	10,1 ± 0,5	25,1 ± 3,5	23,2 ± 2,6	6,3 ± 0,5	10,9 ± 0,7
20	1,46 ± 0,23	1,60 ± 0,19	6,7 ± 0,4	10,5 ± 1,1	26,6 ± 3,8	24,4 ± 2,8	4,2 ± 0,4	7,2 ± 0,7
30	1,50 ± 0,22	1,64 ± 0,17	5,6 ± 0,2	8,0 ± 0,7	25,6 ± 4,1	24,7 ± 2,4	3,4 ± 0,3	6,8 ± 0,5

Em 2007 Monteiro *et al* [77] aplicaram o mesmo processo, mas a uma escala industrial, chegando à conclusão que a percentagem ideal de adição de resíduos de origem petrolífera, não deverá ser superior a 5% da massa de argila. A utilização de resíduos de origem petrolífera, na produção de tijolos cerâmicos poderá ajudar a resolver o problema do tratamento associado a estes resíduos, em contrapartida, durante o processo de cozedura é libertada uma quantidade considerável de poluentes.

## Incorporação de Resíduos Provenientes da dragagem de leitos de Rios

Samara *et al* [78] avaliaram em 2009, a possível utilização de resíduos poluentes como carvão, ferro, aço, vidro e químicos (Quadro 11), provenientes da dragagem de leitos de rios que têm como efluentes algumas indústrias poluidoras.

Quadro 11 - Concentração de metais pesados provenientes de resíduos fluviais por mg/kg de material seco, adapt. [78].

Elemento	Cádmio (Cd)	Crómio (Cr)	Cobre (Cu)	Chumbo (Pb)	Zinco (Zn)
Sedimento em bruto	12,8	413	150,7	1373	5032
Nível 1	1,2	90	45	100	276
Nível 2	2,4	180	90	200	552

Uma vez que existe um elevado nível de metais pesados provenientes dos resíduos fluviais, e de modo a garantir uma concentração dentro dos limites legais, os resíduos são previamente tratados por um processo denominado de novosol. Este inicia-se com uma fase de calcinação a 650°C para destruição da matéria orgânica, do ácido fosfórico e cal, para posteriormente gerar compostos de fosfato e cálcio de baixa solubilidade. Os resíduos obtidos do processo são constituídos por um pó sem cheiro e com uma densidade semelhante à de uma argila. Numa fase industrial foram utilizados na substituição da argila 15% de resíduos fluviais. Da investigação resultaram unidades cerâmicas (Figura 26) com incremento dos valores de resistência à compressão de 63%, redução da porosidade de 10% e de 13% na absorção de água.

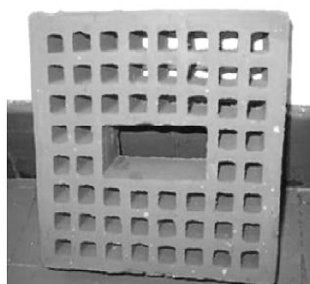


Figura 26 - Unidade cerâmica obtida pela incorporação de resíduos provenientes da drenagem fluvial [78].

## Incorporação de Resíduos Provenientes da Reciclagem de Papel

Outro dos estudos envolveu a aplicação de resíduos provenientes da indústria recicladora de papel na produção de tijolos cerâmicos [79]. Os resíduos resultantes desta indústria

apresentam uma elevada quantidade de matéria orgânica, 40% de celulose e 60% de calcite e outros minerais argilosos. Do estudo foram obtidas unidades cerâmicas com uma condutibilidade térmica reduzida em metade, mas com resistência mecânica suficiente. O quadro seguinte (Quadro 12) mostra a alteração da absorção de água, da resistência à compressão e da condutibilidade térmica com o aumento da incorporação dos resíduos nas unidades cerâmicas, a uma temperatura de cozedura de 1100°C.

Quadro 12 - Alteração das características das unidades cerâmicas pela incorporação de resíduos provenientes da indústria de reciclagem de papel, adapt. [79].

Propriedades	Percentagem de adição de resíduos de papel por peso			
	0%	10%	20%	30%
Medidas usando o teste de Arquimedes				
Porosidade aparente (%)	30,8	30,9	46,2	52
Absorção de água (%)	16,7	23,9	31,9	40,4
Força de compressão (Kg/cm <sup>2</sup> )				
na direção de aplicação da força	400 ± 200	160 ± 20	76 ± 9	51 ± 1
na direção transversal de aplicação da força	450 ± 150	235 ± 15	150 ± 10	74 ± 1
Condutividade térmica (W/mk)	0,83 ± 0,03	0,59 ± 0,03	0,48 ± 0,01	0,42 ± 0,02

### Incorporação de Resíduos de ecrãs LCD (*liquid crystal display*)

Em 2007 Lin [80] estudou a aplicabilidade de resíduos de ecrãs de LCD, em tijolos cerâmicos. Os resíduos são constituídos na sua maioria por vidro e uma pequena percentagem de metais pesados (Quadro 13).

Quadro 13 - Composição de resíduos de ecrãs LCD (*liquid crystal display*), adapt. [80].

SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	Cu	Zn	Pb	Cr
64%	0,3 %	0,27 (mg/Kg)	0,23 (mg/Kg)	0,65 (mg/Kg)	0,18 (mg/Kg)

A incorporação deste tipo de resíduos permite obter uma unidade cerâmica com algumas características melhoradas, estas apresentam uma menor absorção e ganhos ao nível da resistência mecânica, sendo obtida uma resistência máxima com uma incorporação de 30% de resíduos. Existem outros autores que estudaram a possibilidade de incorporação deste tipo de resíduos em tijolos cerâmicos [81] mas estabelecendo em 2% a percentagem máxima de adição de resíduos. Para percentagens superiores a 2% a plasticidade da mistura e a resistência final sofrem uma redução.

## Incorporação de Fosfogesso

Outros autores [82] estudaram a utilização de fosfogesso em tijolos cerâmicos. Deste estudo foi possível concluir que a substituição de argila por fosfogesso em grande percentagem, leva a uma redução da resistência mecânica das unidades, mas que mesmo assim, permite obter tijolos cerâmicos com nível de resistência satisfatório (Figura 27).

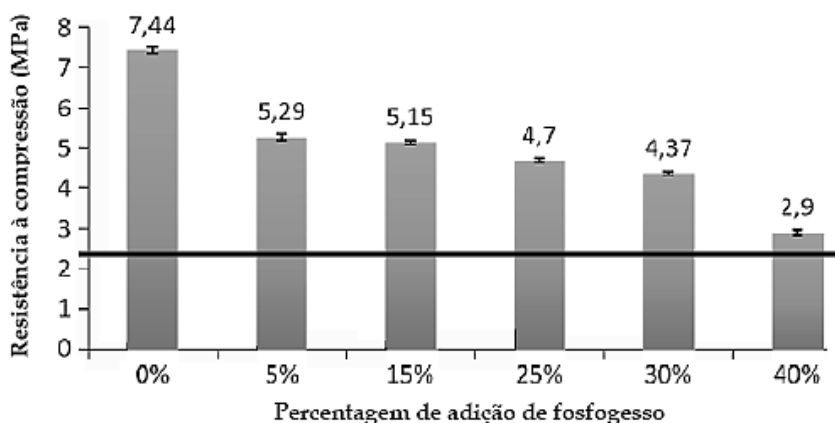


Figura 27 - Resistência mecânica de unidades cerâmicas com adição de diferentes percentagens de fosfogesso [82].

Do estudo foi ainda possível concluir, que as unidades com percentagem de adição de fosfogesso entre 5% e 15% apresentam uma redução da absorção de água em comparação com unidades cerâmicas sem adição (Quadro 14).

Quadro 14 - Níveis de absorção de água para diferentes percentagens de adição de fosfogesso, adapt. [82].

M0%	M5%	M15%	M25%	M30%	M40%	Limite regulamentar
7,15	5,3	5,7	7,65	11,2	13,4	15

No que diz respeito aos níveis de retração, foi definida uma percentagem máxima de adição de resíduos de 30%, uma vez que para percentagens superiores, é excedido o limite regulamentar do coeficiente de retração estabelecido (Quadro 15).

Quadro 15 - Coeficientes de retração para diferentes percentagens de adição de fosfogesso, adapt. [82].

M0%	M5%	M15%	M25%	M30%	M40%	Limite regulamentar
6,66	6,7	7,2	6,7	7,5	10	8

## Incorporação de cinzas de casca de arroz e de resíduos de cana de bagaço

No início de 2016 Kazmi *et al* [83] estudaram a incorporação de cinzas de casca de arroz e de resíduos de cana de bagaço em tijolos cerâmicos. A incorporação destes materiais numa

percentagem de 15% na composição dos tijolos cerâmicos, permitiu obter, para unidades com adição de resíduos de cana de bagaço, uma redução de 15% no peso e 4% para unidades com incorporação de cinzas de casca de arroz.

Do estudo foi ainda possível concluir, que para uma adição de 5% de cinzas de casca de arroz e resíduos de cana de bagaço, a resistência á compressão das unidades manteve um nível bastante satisfatório, sendo que para adições superiores a 5% os valores da resistência á compressão descem (Figura 28).

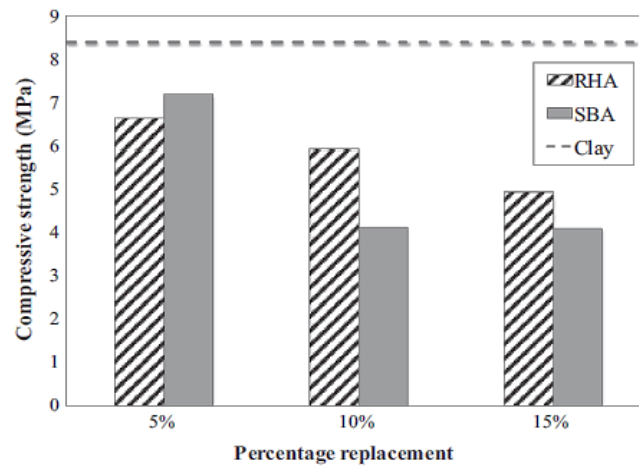


Figura 28 - Valores de resistência á compressão das unidades cerâmicas para diferentes percentagens de adição de cinzas de casca de arroz (RHA) e resíduos de canas de bagaço (SBA) [83].

Para maiores percentagens de incorporação de cinzas de casca de arroz e resíduos de cana-de-açúcar, a porosidade aumenta, levando conseqüentemente a um aumento da absorção de água. Para tijolos com uma percentagem de 5% de incorporação de cinzas de casca de arroz e resíduos de cana de bagaço foram registados respetivamente percentagens de absorção de água de 18% e 21% (Figura 29).

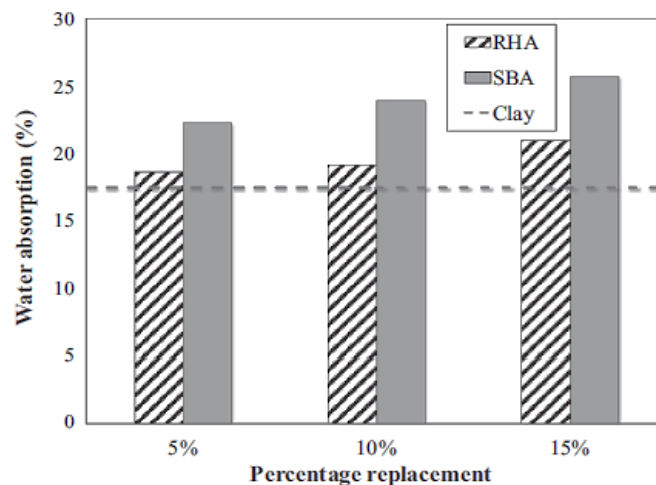


Figura 29 - Percentagens de absorção de água para diferentes percentagens de adição de cinzas de casca de arroz (RHA) e resíduos de canas de bagaço (SBA) [83].

## Incorporação de lamas resultantes do tratamento de superfícies de alumínio

Em 2012 foi desenvolvida em Portugal, uma investigação no âmbito das adições de outros materiais e resíduos em unidades cerâmicas. O estudo teve como base, a adição de lamas resultantes do tratamento de superfícies de alumínio, em unidades cerâmicas [84] [85]. Para a realização do estudo foi utilizado um tijolo térmico 30x19x24 desenvolvido pela empresa Preceram. A geometria foi mantida, tendo-se alterado a matéria-prima pela incorporação de lamas resultantes da anodização e lacagem do alumínio. As unidades cerâmicas com incorporação de resíduos, foram submetidas a ensaios para determinação da absorção de água, percentagem de vazios e determinação da resistência á compressão. Depois de realizados todos os ensaios necessários, foi possível concluir que as propriedades físicas, massa volúmica, absorção de água e percentagem de vazios das unidades com incorporação de lamas, apresentam valores dentro das exigências normativas. Ao nível da resistência mecânica, foram registadas perdas pouco significativas quando analisado o ensaio á compressão para a face mais desfavorável, onde ocorreu uma diminuição da resistência de 7,3 MPa para 6,3 MPa. Ao nível do comportamento térmico a nova unidade cerâmica permite um incremento considerável ao nível do desempenho térmico, permitindo uma redução de cerca de 11% do coeficiente de transmissão térmica (Figura 30a,b).

Com a realização do estudo foi possível concluir que a adição de lamas provenientes da anodização e lacagem do alumínio permite obter uma unidade cerâmica com características físicas e mecânicas idênticas às de uma unidade cerâmica sem adição com a vantagem de ter um desempenho térmico melhorado e ao mesmo tempo contribuir para uma construção mais sustentável [84].

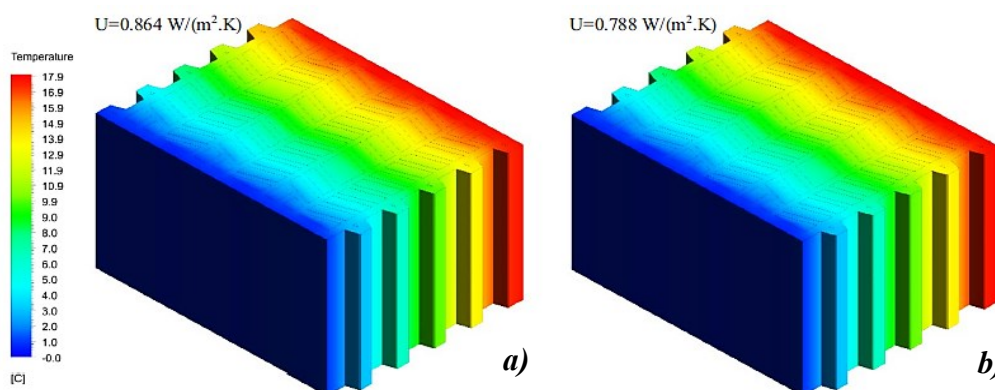


Figura 30 – Análise do coeficiente de transmissão térmica através de modelos de elementos finitos; a) Modelo de tijolo original; b) Modelo de tijolo com adição de lamas resultantes do tratamento de superfícies de alumínio [85].



## 3. Trabalho Experimental - Materiais e Métodos

---

### 3.1. Introdução

---

O trabalho experimental da presente dissertação foi desenvolvido no LEBA (Laboratório de Estruturas de Betão Armado) da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria, ao longo do qual foram construídas 15 paredes de alvenaria, de cinco tipologias diferentes, sendo 3 de cada tipologia, utilizando o tijolo *UNIKO*.

Numa primeira fase foi necessária a realização de ensaios, para a caracterização mecânica dos diferentes materiais empregues na construção das várias paredes de alvenaria, nomeadamente às unidades cerâmicas, e argamassas utilizadas nas juntas horizontais em algumas tipologias.

Foram ensaiadas 5 tipologias de paredes de alvenaria de modo a representar as possíveis aplicações para a unidade cerâmica *UNIKO*. A primeira tipologia é uma alvenaria com as unidades cerâmicas contraventadas e sem qualquer elemento de ligação nas juntas horizontais. A segunda tipologia é constituída por elementos cerâmicos contraventados e com as suas faces superiores e inferiores retificadas. Na terceira tipologia, as unidades cerâmicas não se encontram contra ventadas e é feita a ligação nas juntas horizontais com recurso a um cimento-cola. Na quarta tipologia as unidades cerâmicas estão dispostas sem contraventamento, e foi introduzido um varão roscado  $\phi 8$  mm de aço inoxidável no interior das unidades cerâmicas. A quinta e última tipologia, é em tudo idêntica à tipologia 3, sendo que nesta foi utilizada uma argamassa polimérica. No ponto 3.2. são especificados os diferentes materiais utilizados.

Depois de realizada a construção das paredes de alvenaria, estas foram sujeitas a ensaios de compressão axial simples, com o objetivo final de avaliar o comportamento estrutural da unidade cerâmica *UNIKO*, nas diferentes tipologias criadas, bem como a resistência do conjunto alvenaria.

## 3.2. Materiais utilizados

Como referido anteriormente, foram utilizados vários materiais na conceção das várias tipologias de alvenarias. O material base utilizado, foi o tijolo *UNIKO*, uma unidade cerâmica desenvolvida recentemente, com características específicas ao nível da geometria. Um dos objetivos do presente trabalho passou pela avaliação das características mecânicas e do comportamento estrutural, ainda não conhecido do material. Ao nível das características geométricas, o tijolo *UNIKO*, apresenta 250 mm de comprimento, 100 mm de largura e 380 mm de altura, um sistema de encaixe macho-fêmea (Figura 31), e tem um peso unitário médio de 9,85 Kg.

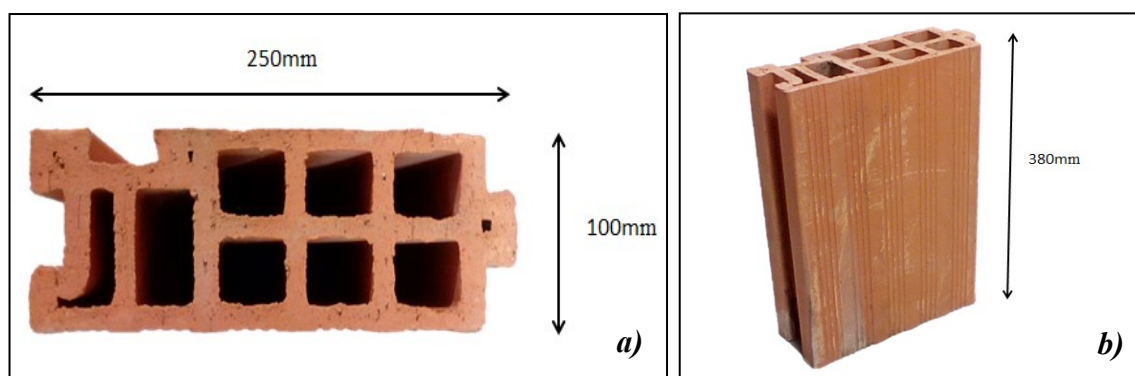


Figura 31 - Características geométricas da unidade cerâmica *UNIKO*; a)Comprimento e largura do tijolo *UNIKO*; b)Altura do tijolo *UNIKO*.

Como base de comparação ao valor de resistência à compressão do tijolo *UNIKO*, foram ainda submetidos a ensaios de compressão, tijolos térmicos também da marca Prélis-Smart Ceramics, visto este tipo de unidade cerâmica possuir níveis de resistência à compressão que permitem a sua utilização em alvenaria estrutural, como tal achou-se oportuno o seu estudo neste âmbito. O tijolo térmico utilizado apresenta 300 mm de comprimento, 190mm de largura e 190 mm de altura (Figura 32) e uma massa volúmica de  $952\text{Kg/m}^3$ .

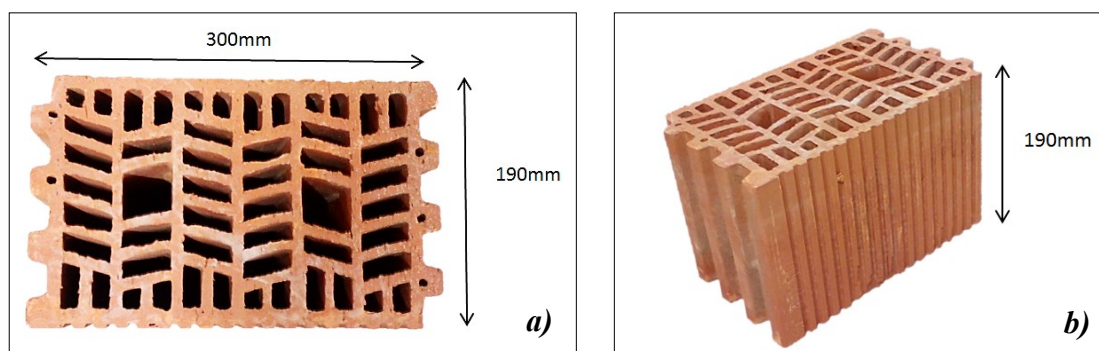


Figura 32 - Características geométricas do tijolo térmico; a)Comprimento e largura do tijolo térmico; b)Altura do tijolo térmico.

Para além das unidades cerâmicas foram ainda utilizadas, em algumas juntas horizontais dois tipos de argamassa. Um cimento-cola, de designação *Topcola Flex Super* da marca Topeca (Figura 33a), nas alvenarias da tipologia 3 e uma argamassa polimérica da marca Civerpro (Figura 33b), nas alvenarias de tipologia 5. Segundo o fabricante a *Topcola Flex Super* é indicada para a colagem de peças cerâmicas de médio porte, sendo assim ideal para a colagem das unidades cerâmicas, na construção das paredes de alvenaria. Este tipo de material, permitiu obter uma junta horizontal entre os tijolos de reduzida espessura. A argamassa polimérica utilizada no trabalho experimental foi fornecida pela empresa Civerpro. Optou-se pela utilização de uma argamassa deste tipo, uma vez que permite obter uma colagem mais rápida das unidades, o que se revelou muito vantajoso no processo de construção das paredes de alvenaria. Para além de ser necessária uma menor quantidade de argamassa nas juntas quando comparada com o cimento-cola utilizado na construção das alvenarias da tipologia 3.

Nas alvenarias da tipologia 4, foram aplicados varões roscados de aço inoxidável  $\phi 8$  mm nas furações verticais existentes nas unidades cerâmicas, e ainda porcas sextavadas M8 de aço inoxidável nas extremidades dos varões roscados (Figura 33c).



Figura 33 - Materiais utilizados na conceção das alvenarias; a) Cimento-cola *Topcola Flex Super* da marca Topeca; b) Varão roscado  $\phi 8$  mm de aço inoxidável e porca sextavada M8 de aço inoxidável; c) Argamassa Polimérica da marca Civerpro.

### 3.3. Ensaios Experimentais

---

#### 3.3.1. Ensaio à compressão do Tijolo UNIKO

---

##### Corte de provetes

Todo o processo de preparação e ensaio à compressão dos provetes cerâmicos, seguiu as regras e imposições presentes na norma NP EN 772-1:2002 [86].

Foram preparados 6 provetes para ensaio. Ao nível das dimensões, foi necessário o corte das unidades cerâmicas, uma vez que estas apresentam uma altura excessiva para a realização do ensaio (380 mm). Depois de efetuado o corte, as unidades cerâmicas passaram a ter uma altura de 300mm. O corte foi realizado com recurso a uma máquina de serrar Diamant Boart TS900F (Figura 34b), e todos os cortes foram efetuados lenta e progressivamente, de modo a não danificar as unidades cerâmicas. Os provetes obtidos após o corte são apresentados na Figura 34d.

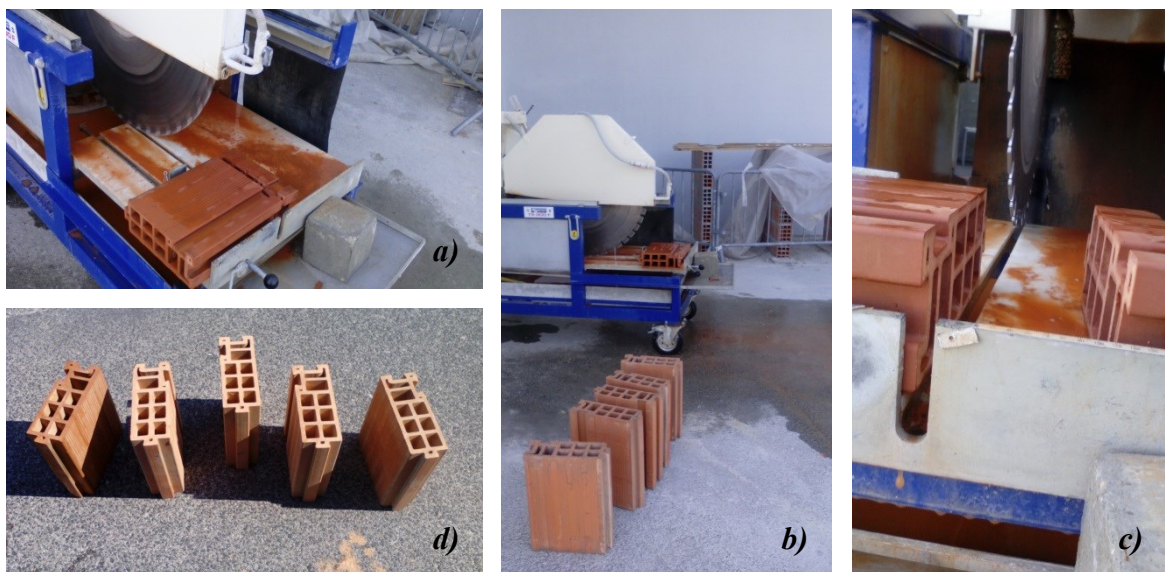


Figura 34 - Procedimento de corte das unidades cerâmicas *UNIKO*, para obtenção de provetes para posterior ensaio à compressão; a),b)Procedimento de corte; c)Corte já efetuado em unidade cerâmica; d)Provetes obtidos.

### Retificação de provetes

Depois do corte dos provetes, estes tiveram de ser regularizados por desgaste, nas faces que posteriormente iriam estar em contacto com a máquina de ensaio à compressão. Este processo foi realizado com recurso a uma retificadora PMD Piccinotti (Figura 35d), presente no LEBA. A etapa de retificação de cada um dos seis provetes revelou-se morosa, visto tratar-se de um processo repetitivo e lento de modo a não comprometer a qualidade dos provetes. Os provetes foram colocados um de cada vez na retificadora, depois de posicionado e fixo o provete debaixo do disco de desgaste é necessário verificar a altura a partir da qual o disco inicia a retificação. Seguiu-se um processo de repetidas passagens do disco pela face do provete, ao mesmo tempo que foi necessário baixar gradualmente o braço vertical da cabeça do disco de desgaste. O processo de retificação fica concluído

quando toda a face do provete cumpre com os requisitos de planeza e paralelismo definidos pela norma NP EN 772-1:2002 [86]. A Figura 35 mostra o processo de retificação dos provetes.

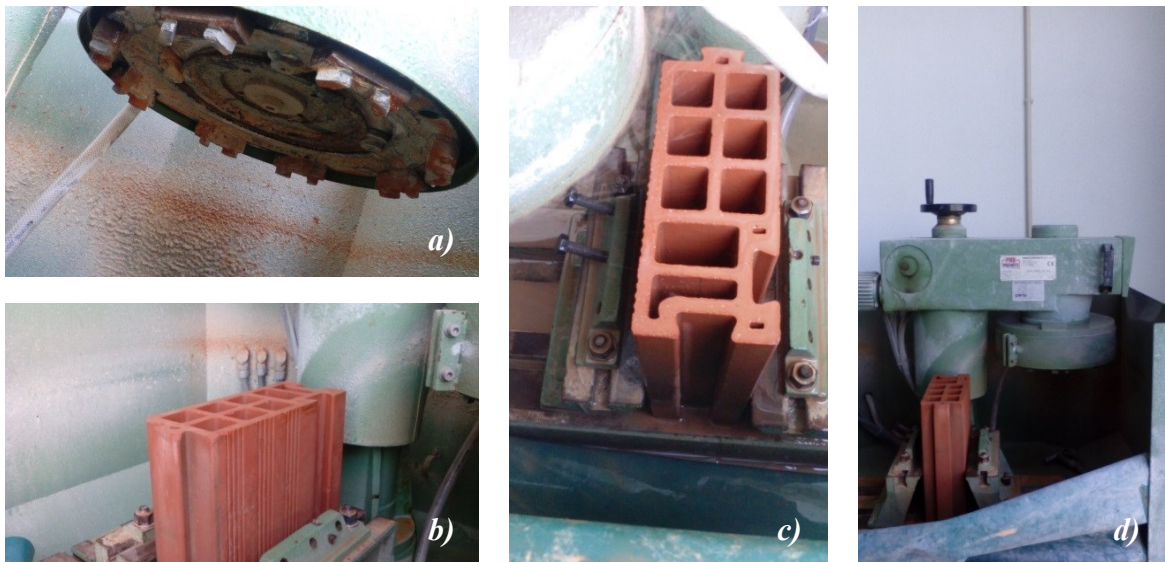


Figura 35 - Procedimento de retificação dos provetes para posterior ensaio á compressão; a)Disco de retificação; b)Posicionamento de provete na retificadora; c)Processo de retificação; d)PMD Piccinotti.

### **Pesagem**

Após a retificação os provetes foram armazenados no LEBA para secagem. Foram respeitadas as condições para a condição de “seco ao ar”, que define ainda uma temperatura ambiente superior a 15°C e uma humidade relativa inferior a 65%, situação prevista na norma NP EN 772-1:2002 [86]. A norma NP EN 772-1:2002 [86] define um período mínimo de secagem de 14 dias, sendo possível o ensaio dos provetes antes do prazo estabelecido, caso tiver sido atingida uma massa constante, determinada quando a perda de massa entre duas pesagens é inferior a 0,2% da massa total.

O período de secagem dos provetes decorreu durante 22 dias, após a qual, a perda de massa entre a pesagem anterior foi inferior a 2% da massa total dos provetes. Durante o processo de secagem foram efetuadas cinco pesagens com pelo menos 24h de intervalo entre si. Para a realização das pesagens foi utilizada uma balança Mettler Toledo ID 1 plus, disponível no LEBA (Figura 36a).



Figura 36 - Procedimento de pesagem de provetes cerâmicos; a),b)Monitor da balança Mettler Toledo ID 1 plus; c),d)Pesagem de provetes.

### Procedimento do ensaio à compressão

Depois de preparados os seis provetes cerâmicos, e de estes estarem secos, passou-se à preparação do ensaio de compressão para determinação da sua resistência mecânica. De modo a determinar a resistência à compressão dos provetes, foi utilizada a máquina de ensaio Form Test mega 2-3000-100D, disponível no LEBA (Figura 37a). Todo o ensaio foi realizado segundo os parâmetros impostos pela norma NP EN 772-1:2002 [86], nomeadamente a velocidade de aplicação de carga, tempo de ensaio e posicionamento dos provetes no equipamento de ensaio. No ensaio em causa foi usada uma velocidade de aplicação de carga de  $0,05 \text{ N/mm}^2/\text{s}$ .

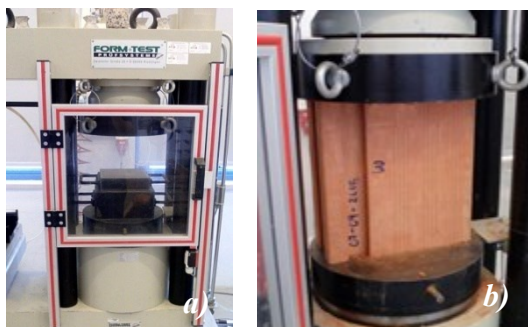


Figura 37 - Preparação dos provetes cerâmicos para o ensaio à compressão; a)Máquina de ensaio Form Test mega 2-3000-100D; b)Colocação de provetes na máquina de ensaio.

### 3.3.2. Ensaio à compressão do Tijolo Térmico

#### Corte de provetes

Como já referido anteriormente, todo o processo de preparação e ensaio à compressão dos provetes cerâmicos, seguiu as regras e imposições presentes na norma NP EN 772-1:2002

[86]. À semelhança dos provetes cerâmicos preparados anteriormente, também para os tijolos térmicos foram preparados seis provetes. Devido às grandes dimensões das unidades cerâmicas, foi necessário o seu corte, de modo a ser possível a realização do ensaio à compressão na máquina de testes.

Do tijolo térmico inicial com 300 mm de comprimento, 190 mm de largura e 190 mm de altura, foram obtidos após o corte, provetes com 185 mm de comprimento, 190 mm de largura e 190 mm de altura (Figura 38). O corte foi realizado com recurso à máquina de serrar Diamant Boart TS900F.

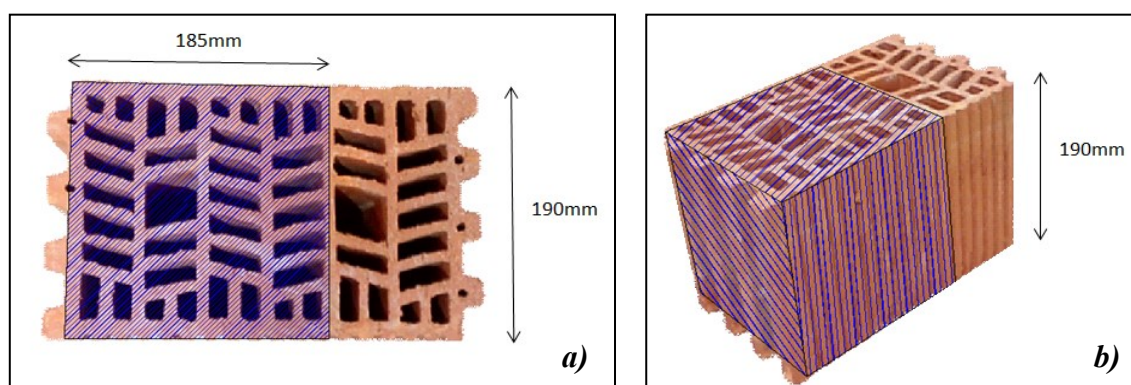


Figura 38 - Dimensão dos provetes após o corte; a) Comprimento e largura dos provetes; b) Altura dos provetes.

### Retificação de provetes

O processo de retificação aplicado aos provetes neste caso, foi em tudo idêntico ao processo descrito anteriormente, na retificação dos provetes do tijolo *UNIKO*. O processo de retificação ficou concluído quando toda a face dos provetes cumpre com os requisitos de planeza e paralelismo definidos pela norma NP EN 772-1:2002 [86]. A figura 39 mostra os provetes após o processo de retificação.

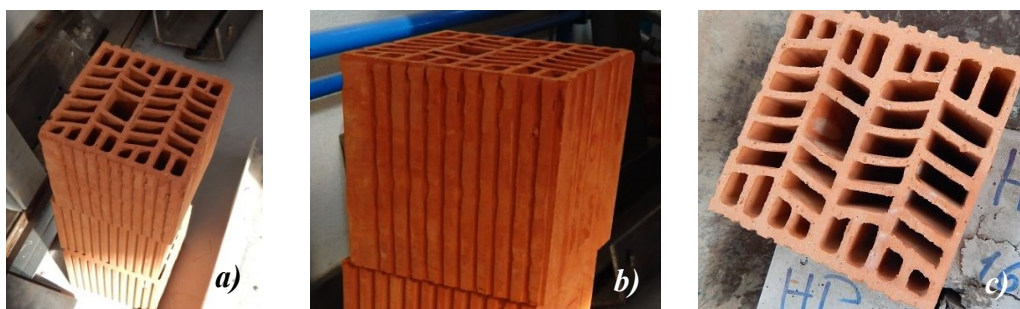


Figura 39 - Provetes do tijolo térmico após processo de retificação

## Pesagem

Durante o processo de secagem os provetes foram armazenados no LEBA. Tal como no processo de pesagem dos provetes anteriores, foram respeitadas as condições para uma condição de “seco ao ar”, prevista na norma NP EN 772-1:2002 [86], que define uma temperatura ambiente superior a 15°C, e uma humidade relativa inferior a 65%.

O período de secagem dos provetes, decorreu durante 38 dias, após o qual a perda de massa entre a pesagem anterior foi inferior a 2% da massa total dos provetes. Ao longo do processo de secagem, foram efetuadas quatro pesagens com pelo menos 24 horas de intervalo entre si. Tal como no processo de pesagem anterior foi utilizada a balança Mettler Toledo ID 1 plus presente no LEBA.

## Procedimento do ensaio de compressão

Uma vez prontos os provetes, procedeu-se à preparação dos ensaios de compressão para determinação da sua resistência. Tal como nos ensaios anteriores, a resistência à compressão dos provetes foi determinada com recurso ao equipamento de ensaio Form Test mega 2-3000-100D, presente no LEBA. Todo o ensaio foi realizado segundo os parâmetros impostos pela norma NP EN 772-1:2002 [86] (Figura 40).

À semelhança do ensaio anterior, foi utilizada uma velocidade de aplicação de carga de 0,05 N/mm<sup>2</sup>/s.



Figura 40 - Preparação dos provetes cerâmicos para ensaio de determinação de resistência à compressão.

### 3.3.3. Ensaios à compressão e flexão da argamassa

#### Preparação dos provetes

Para a conceção das alvenarias da tipologia 3, foi utilizado o cimento-cola *Topcola Flex Super*, nas juntas horizontais, entre as unidades cerâmicas. De modo a caracterizar o cimento-cola aplicado, foram retiradas amostras do material, durante a construção das três paredes de alvenaria da tipologia 3. O material recolhido, foi posteriormente colocado em moldes prismáticos de dimensões normalizadas (2x4x16 cm) e previamente banhados com óleo descofrante (Figura 41a,b,c). Após a sua secagem, estes foram desmoldados e devidamente identificados (Figura 41d). Posteriormente os vários provetes foram imersos em água para respeitar o tempo de cura (Figura 41e).



Figura 41 - Preparação dos provetes de cimento-cola para posterior ensaio à compressão e flexão; a)Aplicação de óleo descofrante; b)Remoção de material em excesso; c)Provetes preparados para secagem; d)Provetes de cimento-cola após desmoldagem; e)Provetes imersos em água.

#### Procedimento de ensaio de flexão e compressão dos provetes de argamassa

Toda a preparação do ensaio à compressão e flexão dos provetes de cimento-cola, teve por base os critérios impostos pela norma NP EN 196-1:2006 [87]. O ensaio de determinação da resistência à flexão é o primeiro a ser realizado. Este consiste, de um modo geral, no assentamento de uma das faces dos provetes, em dois apoios cilíndricos à mesma distância do centro dos provetes, e submetê-los a forças crescentes com ponto de aplicação na face oposta e a meio vão, até ocorrer a rotura do material por flexão. Posteriormente realiza-se o ensaio de resistência à compressão com a metade dos prismas, resultantes do ensaio de flexão. É aplicada uma carga gradual crescente, numa das faces e numa dada área, até ocorrer a rotura do material, sendo assim possível determinar a carga máxima suportada pelo provete. Os ensaios de flexão e compressão para a determinação das características mecânicas do cimento-cola, foram realizados com recurso ao equipamento de ensaio Form Test mega 2-3000-100D, já referida anteriormente nos ensaios de determinação da

resistência à compressão dos provetes. Neste tipo de ensaio é utilizado o módulo de flexão existente no equipamento para o efeito.

### Ensaio de resistência à flexão

O provete foi posicionado no acessório específico para o ensaio de flexão, centrado sobre os roletes de apoio e com o eixo longitudinal perpendicular aos pontos de apoio (Figura 42a). Depois de definida a posição, desceu-se o braço de aplicação de força até este estar em contacto com a superfície dos provetes (Figura 42c). Posteriormente foram aplicadas forças gradualmente crescentes, a uma velocidade de ensaio de 50 N/s, até à rotura dos provetes. Todo o procedimento de ensaio seguiu as imposições da norma NP EN 196-1:2006 [87].

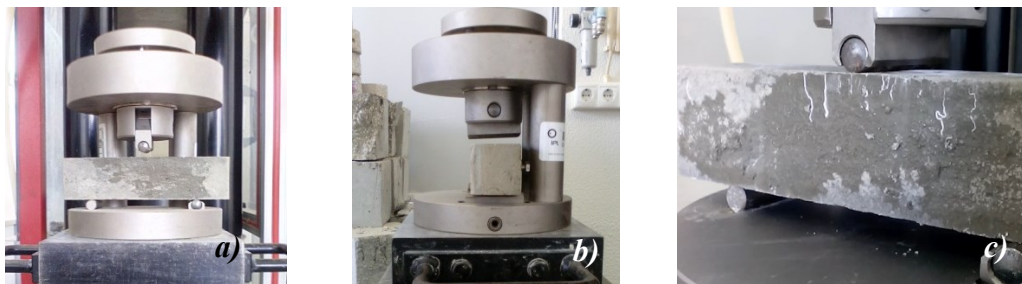


Figura 42 - Preparação dos provetes de cimento-cola para ensaio à flexão; a),b)Posicionamento dos provetes na máquina de ensaio; c)Braço da máquina de ensaio, em contacto com a superfície do provete.

### Ensaio de resistência à compressão

Seguiu-se o ensaio de compressão, realizado com os meios-prismas resultantes do ensaio anterior de flexão (Figura 43a). Foi necessário centrar cuidadosamente cada provete no acessório utilizado para o ensaio de compressão, sendo o equipamento de ensaio, o mesmo que foi utilizado no ensaio de flexão (Figura 43b). Fez-se descer o braço vertical do equipamento de ensaio, até o prato superior do acessório de compressão estar em contacto com a face superior do provete (Figura 43c). Posteriormente foram aplicadas forças gradualmente crescentes e contínuas, com uma velocidade de 2400 N/s até ocorrer a rotura do provete. Todo o procedimento de ensaio à compressão seguiu as imposições da norma NP EN 196-1:2006 [87].

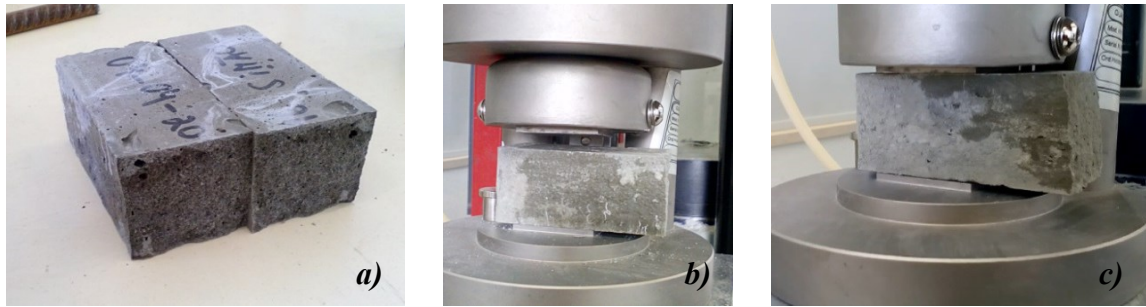


Figura 43 - Procedimento de ensaio á compressão dos provetes de cimento-cola; a)Provetes semi-prismáticos; b)Posicionamento dos provetes na máquina de ensaio; c)Superfície superior do acessório de ensaio, em contacto com a superfície do provete;

### Argamassa polimérica

Para além do cimento-cola utilizado na construção das alvenarias de tipologia 3, como já referido anteriormente, foi utilizada na concepção das alvenarias de tipologia 5 uma argamassa polimérica, desenvolvida pela marca Civerpro.

À semelhança do procedimento de preparação dos ensaios de compressão e flexão do cimento-cola, foram também retiradas amostras de argamassa polimérica, durante a construção das paredes de alvenaria da tipologia 5. O material recolhido, foi posteriormente colocado em moldes prismáticos de dimensões normalizadas (2x4x16 cm) e previamente banhados com óleo descofrante. Visto ser uma argamassa polimérica e de modo a assegurar a desmoldagem dos provetes sem problemas, foi previamente colocada uma camada de película de polietileno.

Observou-se que a secagem dos provetes é muito lenta, fazendo-se primeiro na periferia do provete, não se atingindo a cura total do mesmo (Figura 44). Como tal não foi possível obter as características mecânicas do produto utilizado.



Figura 44 - Provetes de argamassa polimérica.

### 3.3.4. Ensaio à compressão das paredes de alvenaria

---

#### Construção das paredes de alvenaria

Como já referido anteriormente, foram construídas 15 paredes de alvenaria, divididas em 5 tipologias, de modo a simular as possíveis aplicações para a unidade cerâmica em estudo, sendo as soluções adotadas, inseridas numa filosofia de faça você-mesmo, associada ao próprio tijolo *UNIKO*. As paredes construídas apresentam todas as mesmas dimensões, 1140 mm de altura, 750 mm de comprimento e 100 mm de espessura (Figura 45a). Estas tem na sua constituição 9 unidades cerâmicas, sendo que no caso das tipologias em que foi adotado um sistema de contraventamento, uma das unidades foi dividida em duas partes de altura igual (Figura 45b).

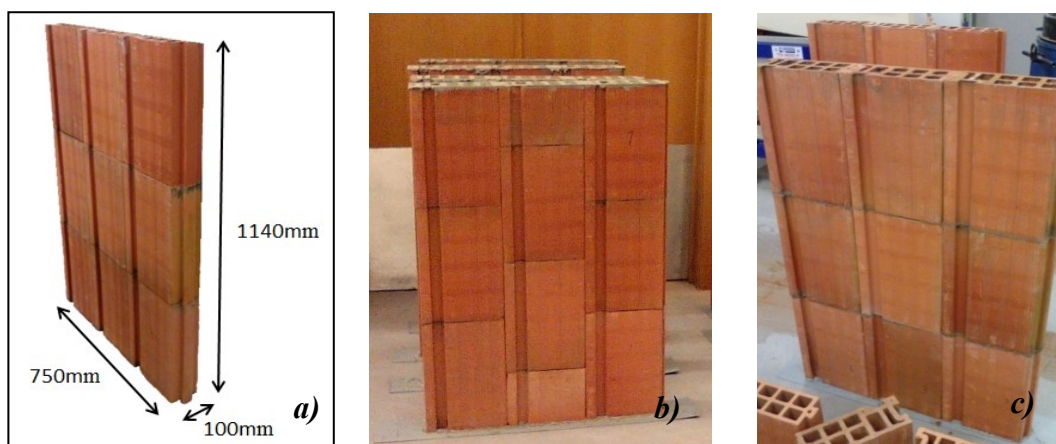


Figura 45 - Alvenarias construídas com tijolo *UNIKO*; a)Dimensões das alvenarias; b)Alvenaria com sistema de contraventamento; c)Alvenaria sem sistema de contraventamento.

#### Tipologia 1 - Alvenaria com contraventamento e sem material ligante nas juntas horizontais

As alvenarias da tipologia 1 foram realizadas com contraventamento das unidades cerâmicas, aplicadas sem rectificação das mesmas, e sem aplicação de material ligante nas juntas horizontais.

O processo de construção das alvenarias inicia-se com a colocação da uma chapa metálica de 2 mm de espessura no chão. Esta serve de base para o assentamento das unidades cerâmicas e possibilita, posteriormente, o transporte das alvenarias para o local de ensaio. No segundo passo, foi necessário colocar argamassa na face dos tijolos que iria estar em

contacto com a chapa metálica, de modo a criar uma base de assentamento das alvenarias (Figura 46a), para o efeito foi utilizado o cimento-cola já referido anteriormente também utilizado nas juntas horizontais das alvenarias da tipologia 3.

A aplicação do cimento-cola nas unidades cerâmicas, foi realizado com recurso a um aplicador manual de massa de juntas, com capacidade de 650 cc, de estrutura leve de alumínio e com gatilho regulador de pressão. A utilização deste acessório permitiu uma aplicação mais fácil, rápida e limpa do cimento-cola e conseqüentemente uma redução do consumo de material, visto não existirem desperdícios (Figura 46b).

De modo a criar o contraventamento das unidades cerâmicas, foi executado o corte a meia altura, do tijolo intermédio da primeira fiada. A colocação da primeira fiada de tijolos foi realizada alguns dias antes, da construção da restante alvenaria. Este processo foi adotado em todas as alvenarias, de modo a garantir a secagem do cimento-cola aplicado na base, e estas não sofrerem desvios de verticalidade ao longo da sua construção (Figura 46c). Após a secagem do cimento-cola da base, seguiu-se a aplicação da segunda fiada de unidades cerâmicas e posteriormente a terceira (Figura 46d).

Depois de colocados todos os tijolos, foi necessário criar no topo das alvenarias, uma camada nivelada e sem irregularidades, de modo a garantir o perfeito contacto entre a alvenaria e o perfil em I, colocado sobre as paredes de alvenaria durante os ensaios de compressão.

Para a realização desta camada, foi utilizado o mesmo cimento-cola aplicado na base, sendo posteriormente colocada uma chapa metálica de espessura de 1mm sobre o cimento-cola previamente aplicado (Figura 46e). Este processo revelou-se delicado e moroso visto ser necessário garantir o perfeito nivelamento da camada. Para tal, foi utilizado um nível para a verificação do correto nivelamento de toda a camada (Figura 46f).

As alvenarias foram mantidas no laboratório até á realização dos ensaios de compressão axial.

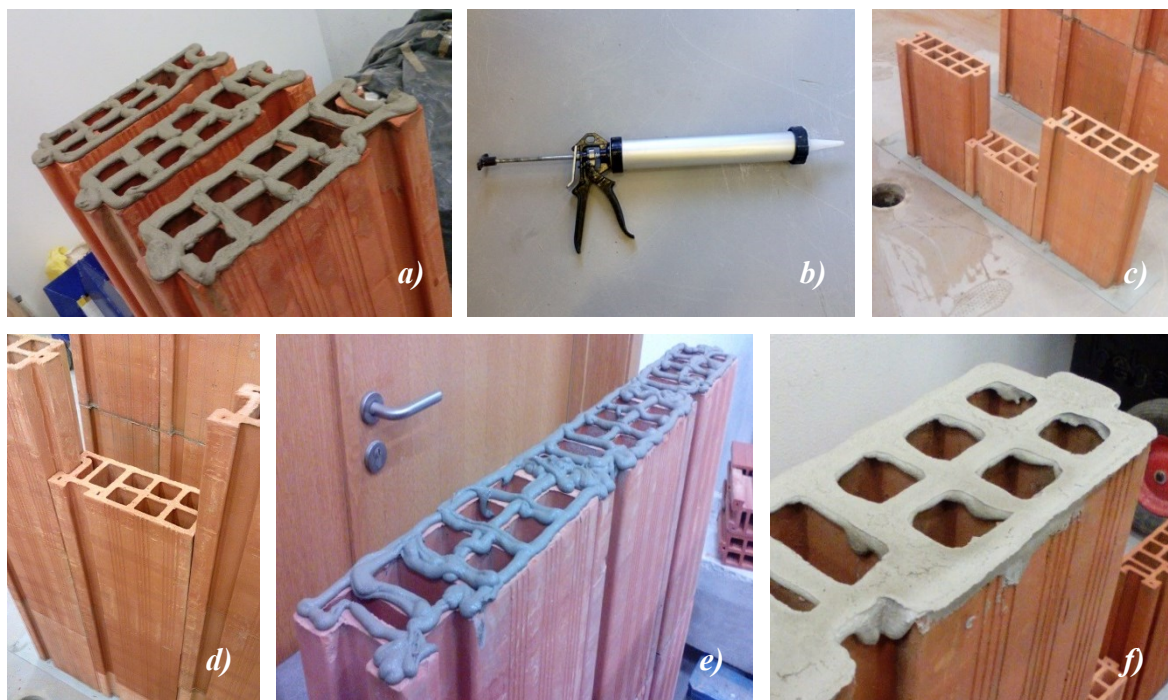


Figura 46 - Processo construtivo das alvenarias da tipologia 1; a)Aplicação de cimento-cola na face inferior das unidades da primeira fiada; b)Aplicador manual de massa de juntas de capacidade 650cc; c)Primeira fiada concluída; d)Conclusão da terceira fiada de tijolos; e)Aplicação de cimento-cola no topo da alvenaria; f)Aspetto final da camada de regularização aplicada no topo das alvenarias.

### **Tipologia 2 - Alvenaria com contraventamento e unidades cerâmicas retificadas**

À semelhança da tipologia 1, também nas alvenarias da tipologia 2, foi adotado o contraventamento das unidades cerâmicas, sendo que estas sofreram um processo de retificação nas faces superior e inferior, permitindo um melhor contacto entre unidades. Não foi utilizado qualquer tipo de material ligante nas juntas horizontais.

O processo de construção das alvenarias da tipologia 2 é em tudo idêntico ao processo anteriormente descrito, sendo que neste caso foi necessária a retificação de todas as unidades aplicadas.

Em primeiro lugar foi necessário proceder ao corte da unidade cerâmica intermédia da primeira fiada, de modo a criar o contraventamento das unidades e de seguida foi efetuada a retificação de todos os tijolos a aplicar na alvenaria (Figura 47a). Posteriormente à retificação, procedeu-se à aplicação da primeira fiada com cimento-cola na base (Figura 47b). Depois de seco o cimento-cola da base, seguiu-se a aplicação das restantes unidades

cerâmicas já retificadas (Figura 47c). Posteriormente foi colocado o cimento-cola no topo da alvenaria, num processo semelhante ao das restantes alvenarias (Figura 47d).

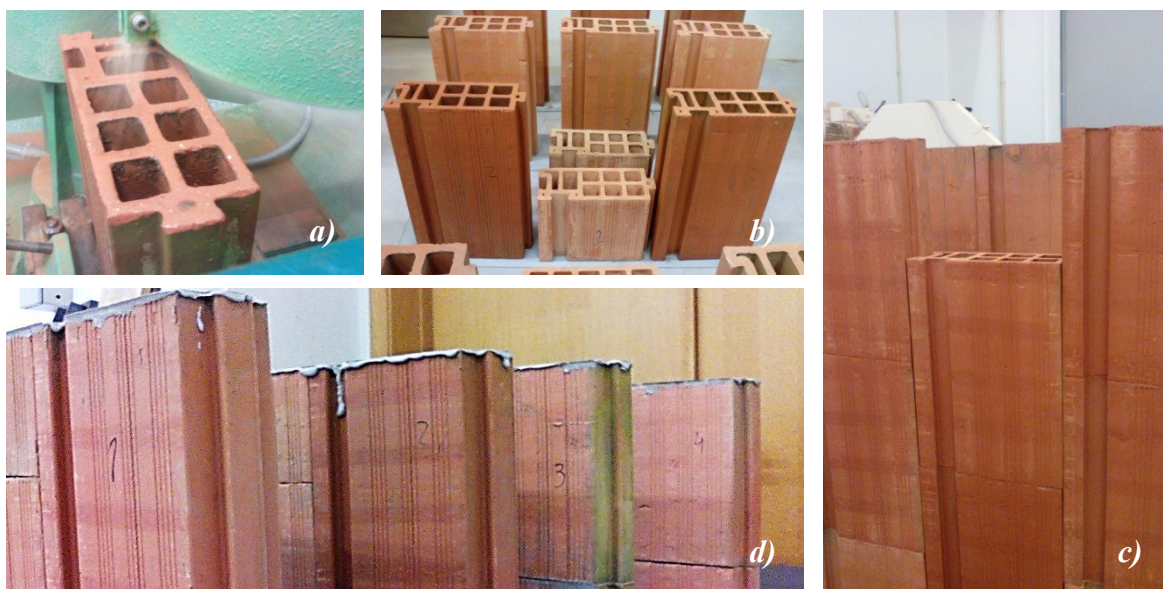


Figura 47 - Processo construtivo das alvenarias da tipologia 2; a)Retificação das unidades cerâmicas; b)Preparação da primeira fiada de unidades cerâmicas; c)Construção das alvenarias de tipologia 2; d)Alvenarias concluídas com topo executado com cimento-cola.

### **Tipologia 3 - Alvenaria sem contraventamento e com cimento-cola nas juntas horizontais**

Ao contrário das tipologias anteriormente descritas, na tipologia 3 as unidades cerâmicas não foram contraventadas, e a ligação entre os tijolos é conseguida com a utilização do cimento-cola *Topcola Flex Super*, em junta fina.

Em primeiro lugar foi aplicado o cimento-cola na face inferior dos tijolos, em contacto com a chapa de aço (Figura 48a), depois de seco o cimento-cola, foi possível prosseguir com a construção das alvenarias. Foi necessária a colocação de cimento-cola na face superior das unidades da fiada inicial, para o posterior assentamento das unidades da segunda fiada (Figura 48b) e assim sucessivamente até á terceira fiada de tijolos (Figura 48c). Para a aplicação do cimento-cola, foi utilizado o aplicador de massa manual. Neste processo foi necessário garantir que as faces das unidades estavam limpas, sem poeiras e resíduos, de modo a assegurar a total eficácia do cimento-cola.

O processo de construção das paredes de alvenaria desta tipologia, revelou-se de maior dificuldade e moroso, uma vez que foi necessária a preparação de todo o cimento-cola e de

garantir a sua aplicação de forma uniforme na face das unidades, de modo a que o assentamento destas, fosse executado da forma mais correcta. Para o topo foi adotado o processo já descrito nas tipologias anteriores.

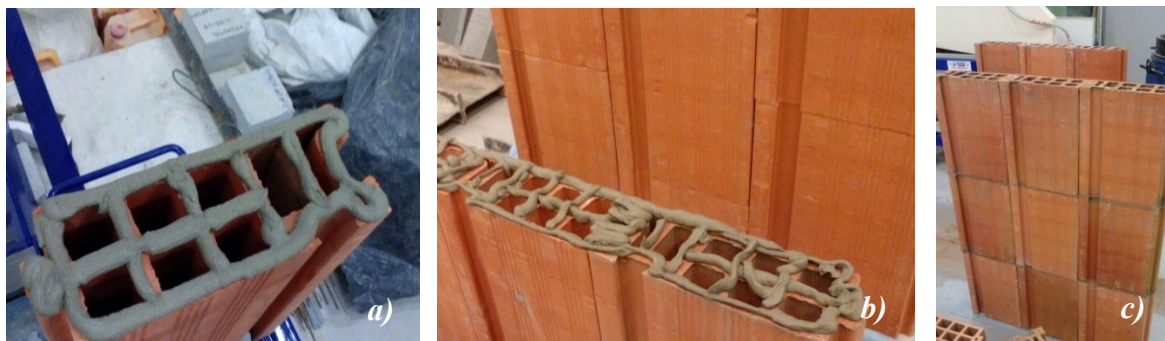


Figura 48 - Processo construtivo das alvenarias da tipologia 3; a)Aplicação de cimento-cola nas unidades da primeira fiada; b)Aplicação de cimento-cola na face superior das unidades da primeira fiada; c)Alvenaria com as três fiadas de tijolos concluídas.

Todo o cimento-cola *Topcola Flex Super* utilizado, foi preparado no LEBA. Para a sua preparação, em primeiro lugar, foi necessário verificar qual a quantidade de água a misturar com o cimento-cola, sendo definido pelo fabricante uma mistura de 6 litros de água por saco de 25 Kg. A preparação do cimento-cola foi sempre realizada em pequenas quantidades e tendo em conta a quantidade de material necessário em cada situação. Para a pesagem da quantidade do material em pó foi utilizada a balança Mettler Toledo ID 1 plus presente no LEBA, já referida anteriormente. Para a determinação da quantidade de água, foi utilizado um vaso de medição (Figura 49a).

No processo de mistura foi utilizado um tabuleiro de alumínio (Figura 49b), e a amassadura foi realizada manualmente com recurso a uma colher de pedreiro (Figura 49c) até ser obtida uma massa com consistência plástica, homogénea e sem grumos. Após o processo de amassadura foi necessária a colocação da mistura no tubo do aplicador manual.

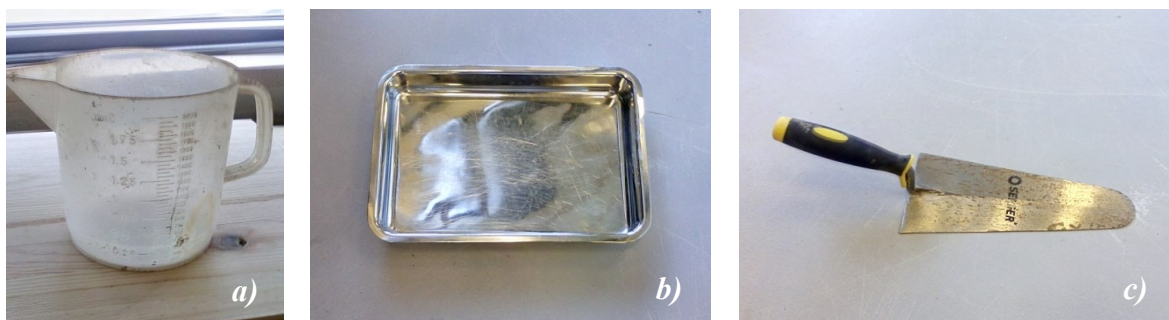


Figura 49 - Material utilizado na preparação do cimento-cola *Topcola Flex Super*; a)Vaso de medição; b)Tabuleiro de alumínio; c)Colher de pedreiro.

#### **Tipologia 4 - Alvenaria sem contraventamento e com incorporação de varões de aço inoxidável em furações verticais**

Nas alvenarias da tipologia 4, não foi adotado o contraventamento das unidades cerâmicas nem aplicado qualquer material ligante nas juntas horizontais, sendo a ligação entre as unidades cerâmicas realizada por meio de varões roscados de  $\phi 8\text{mm}$ , inseridos numa das cavidades verticais do tijolo *UNIKO*, garantindo assim a estabilidade das alvenarias.

O processo de montagem das alvenarias desta tipologia apresentou dificuldades acrescidas, uma vez que foi necessário proceder a algumas alterações nas unidades cerâmicas, para possibilitar a aplicação de porcas sextavadas M8 de aço inoxidável, nas extremidades dos varões roscados, e o posterior aperto entre os tijolos.

As porcas foram aplicadas nas extremidades dos varões. Para o efeito foi necessário criar um espaço adicional, nas extremidades da furação vertical de  $\phi 9\text{ mm}$  existente no tijolo, com diâmetro acrescido de  $\phi 14\text{ mm}$  e uma profundidade de cerca de  $8\text{ mm}$ , permitindo assim a incorporação da porca no tijolo (Figura 50a). O processo foi realizado com recurso a um berbequim e uma broca específica para o efeito, nas furações das faces inferiores das unidades da primeira fiada e na face superior das unidades da terceira fiada. Posteriormente inseriram-se os varões nos tijolos da base e foram aplicadas as porcas nas extremidades (Figura 50b).

Após este processo foi possível colocar o cimento-cola da base e as unidades cerâmicas sobre a chapa metálica (Figura 50c,d). Após a secagem da base seguiu-se a construção da restante parede. Para além de garantir o correcto encaixe macho-fêmea das unidades, foi necessário inserir os varões de aço inoxidável nas furações destinadas para o efeito, existentes nas unidades (Figura 50e).

No topo da alvenaria foram aplicadas as porcas, nos varões previamente colocados. Nesta etapa foi necessário proceder ao aperto das porcas aplicadas e posteriormente ao corte do varão em excesso (Figura 50f). De seguida foi possível realizar a camada de regularização no topo das alvenarias.

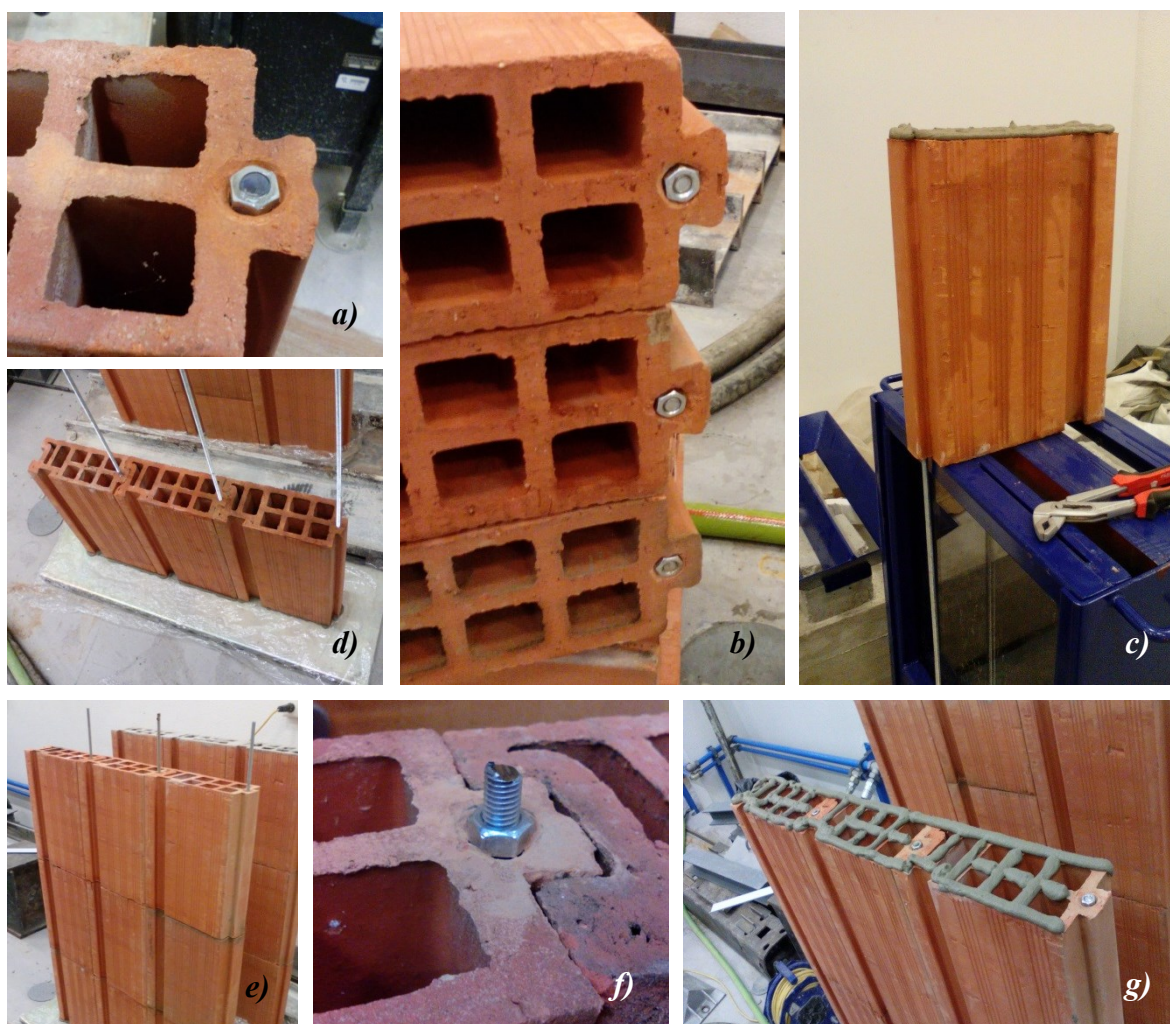


Figura 50 - Processo construtivo das alvenarias da tipologia 4; a),b)Incorporação de porca sextavada nas unidades cerâmicas; c)Aplicação de cimento-cola na face inferior das unidades da primeira fiada; d)Conclusão da primeira fiada; e)Parede de tipologia 4 sem aplicação da porca na parte superior; f)Aperto da porca; g)Aplicação do cimento-cola na face superior das alvenarias.

### Tipologia 5 - Alvenaria sem contraventamento e com argamassa polimérica nas juntas horizontais

Na tipologia 5, à semelhança da tipologia 3, não foi adotado o contraventamento das unidades cerâmicas, e a ligação entre os tijolos foi conseguida com a utilização da argamassa polimérica, fornecida pela empresa *Civerpro*.

Numa primeira fase foi aplicado o cimento-cola na face inferior dos tijolos que formam a base (Figura 51a) e respeitado o tempo necessário para a sua secagem. Posteriormente foi construída a restante parede, num processo onde foi necessária a aplicação da argamassa polimérica. Esta foi fornecida já pronta sem ser necessária a adição de água ou aditivos no

momento da sua aplicação, sendo apenas necessária a sua colocação no tubo do aplicador manual.

Uma das grandes vantagens da utilização deste tipo de argamassa é o seu grande rendimento, sendo necessário o uso de uma quantidade de material muito menor quando comparado com as argamssas tradicionais, permitindo ainda uma colagem mais rápida dos elementos. O último processo consistiu na aplicação do cimento-cola no topo das alvenarias, de modo a criar a superfície nivelada, necessária para a posterior realização dos ensaios de compressão axial.

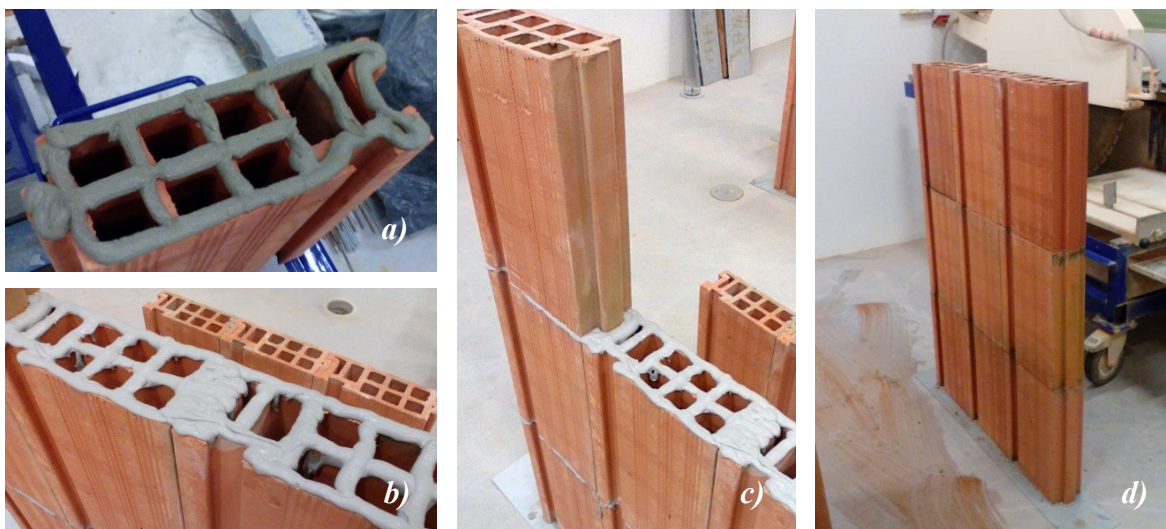


Figura 51 - Processo construtivo das alvenarias da tipologia 5; a) Colocação de cimento-cola na face inferior das unidades da primeira fiada; b),c) Aplicação de argamassa polimérica nas unidades cerâmicas; d) Aspeto final nas alvenarias da tipologia 5 sem a camada de topo.

### **Dificuldades no processo de construção das alvenarias**

Ao longo do processo de montagem das alvenarias foram sentidas algumas dificuldades, sobretudo na fase inicial, muito pela inexperiência de construção com este tipo de unidade cerâmica. Uma das maiores dificuldades prendeu-se com a verticalidade dos elementos durante a construção das paredes de alvenaria. Com a aplicação de cimento-cola na base, é criada uma camada capaz de sofrer deformação com o assentamento do tijolo *UNIKO*, outro fator desfavorável é a grande esbelteza da unidade cerâmica utilizada. Para obter uma verticalidade das paredes satisfatória, foi necessária uma constante verificação com recurso a um nível, para além disso, foi aplicado o esquema de montagem já explicado

anteriormente, onde é executada a primeira fiada e só depois de seco o cimento-cola da base, é construída a restante parede.

Outra das dificuldades surgiu durante o encaixe entre unidades, nas juntas horizontais do tipo macho-fêmea. A existência de rebarbas de material nas extremidades da zona de encaixe entre unidades cerâmicas, não permite que este seja realizado de forma fácil, provocando bastante dificuldade durante o processo. De modo a reduzir esta dificuldade foram removidas as rebarbas dos tijolos antes da montagem.

Outro dos problemas que surgiu durante o processo de construção das alvenarias e que requereu especial atenção foi o facto de em algumas situações de encaixe entre as unidades cerâmicas, ocorrer a quebra de pedaços de material e consequentemente estes ficarem situados na zona da junta, não permitindo o seu correto assentamento. De modo a evitar este tipo de situação, foi necessária especial atenção durante o encaixe entre as unidades cerâmicas, sendo que em alguns dos casos foi mesmo necessária a remoção do tijolo para efectuar a limpeza dos resíduos. Noutras situações, os pedaços de material que por qualquer motivo se partiram do tijolo, não permitiram concluir o processo de encaixe entre os tijolos. Nestas situações foi necessário remover os tijolos para retirar o material em excesso, e aplicar uma nova unidade cerâmica.

### **Preparação e procedimento do ensaio de compressão axial das alvenarias**

Depois de concluída a construção das 15 alvenarias, foi possível realizar os ensaios de compressão axial, com o objectivo final de determinar as características mecânicas das paredes de alvenaria e as diferenças comportamentais entre as várias tipologias. Nesta parte do trabalho será apresentada a preparação dos ensaios, o sistema de ensaio aplicado, a colocação da instrumentação e o programa de ensaio adotado. Todas as etapas referidas foram realizadas no Laboratório de Estruturas e Betão Armado (LEBA) do Instituto Politécnico de Leiria, e tendo por base a norma NP EN 1052-1:2002 [88].

Antes de iniciar os ensaios, foi necessária a verificação da posição do pórtico metálico que serviu de base para a realização do ensaio e do atuador fixo ao pórtico, de maneira a ser possível a colocação das alvenarias no local pretendido (Figura 52a). O pórtico presente no LEBA é constituído por dois pilares HEB300 ligados no topo, a uma viga HEB600, com recurso a 24 parafusos M24. O pórtico está devidamente fixo ao piso do laboratório, de

modo a evitar quaisquer movimentos do mesmo. Como base de assentamento das alvenarias durante os ensaios, foi utilizada uma viga metálica HEB300 reforçada com nervuras verticais (Figura 52a). De modo a ocorrer uma distribuição uniforme das cargas verticais transmitidas pelo atuador, foi colocado sobre a camada de regularização de cimento-cola de cada parede um perfil IPE140 (Figura 52b).

De modo a evitar a queda do perfil IPE140 no colapso das alvenarias, foi necessário criar um sistema de segurança que evitasse problemas de maior. Em primeiro lugar foi efetuada uma furação em cada extremidade do perfil, na zona da alma (Figura 52c), posteriormente foram fixadas na viga HEB600 do topo do pórtico duas cintas, para o suporte do perfil em I no momento da sua queda (Figura 52d, 52e).

Na ligação entre as cintas e o perfil IPE140, foram utilizadas duas argolas metálicas, inseridas no perfil e posteriormente um conjunto de cerra-cabos, finalizando assim a ligação entre o perfil em I e as cintas (Figura 52e).

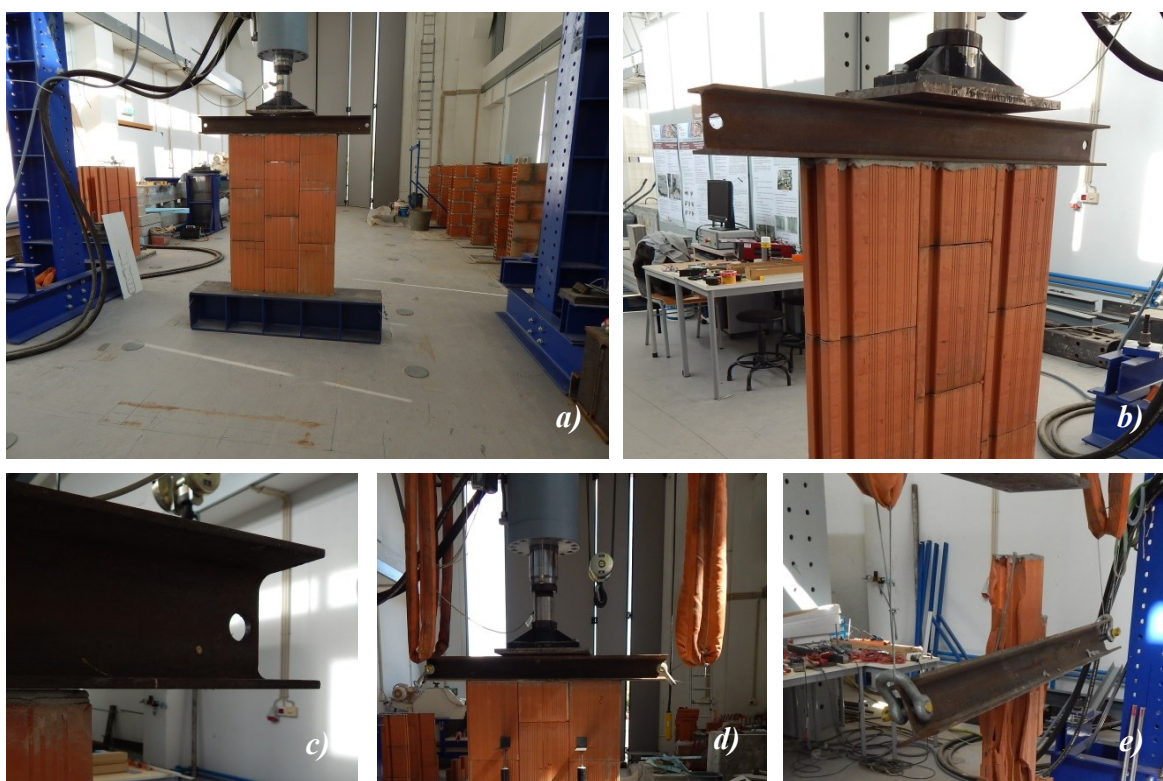


Figura 52 - Preparação do ensaio de compressão axial; a) Posicionamento correto das alvenarias; b) Colocação do perfil IPE140 sobre a alvenaria; c) Furação na alma do perfil IPE140 para criação de sistema de segurança; d) Sistema de segurança composto por argolas metálicas, cerra-cabos e cintas de 10 Ton.; e) Sistema de segurança ativado após o colapso da alvenaria.

O Quadro 16 mostra as tipologias das paredes de alvenaria, a descrição de cada tipologia, o número do ensaio e a designação da parede correspondente.

Quadro 16 – Descrição da tipologia das alvenarias, o número de ensaio e a designação da parede correspondente.

Tipologia da alvenaria	Descrição da Tipologia	Nº de ensaio	Designação da Parede
1	Alvenaria com contraventamento e sem material ligante nas juntas horizontais	1	1.1
		2	1.2
		3	1.3
2	Alvenaria com contraventamento e unidades cerâmicas retificadas	1	2.1
		2	2.2
		3	2.3
3	Alvenaria sem contraventamento e com cimento-cola nas juntas horizontais	1	3.1
		2	3.2
		3	3.3
4	Alvenaria sem contraventamento e com incorporação de varões de aço inoxidável em furações verticais	1	4.1
		2	4.2
		3	4.3
5	Alvenaria sem contraventamento e com argamassa polimérica nas juntas horizontais	1	5.1
		2	5.2
		3	5.3

### Instrumentação e sistema de aquisição de dados

De maneira a registar os deslocamentos verticais, ocorridos durante a realização dos ensaios de compressão nas alvenarias, foram utilizados dois transdutores de deslocamento da marca TML, modelo CDP – 100 Tokyo Sokki Kenkyujo, com um curso de 100 mm e uma sensibilidade de  $100 \times 10^{-6}$ /mm, conforme indicado pelo fabricante.

A colocação dos transdutores de deslocamento nas paredes, seguiu as regras definidas pela norma NP EN 1052-1:2002 [88]. A Figura 53a mostra o esquema adotado para a aplicação dos transdutores de deslocamento. Os pontos verdes representados na figura mostram o local exato da aplicação dos transdutores de deslocamento, e os pontos amarelos, o local de aplicação das chapas utilizadas, a partir das quais os transdutores de deslocamento iniciam as medições.

De modo a permitir uma fácil aplicação e remoção, os transdutores de deslocamento foram aplicados em bases magnéticas, apoiadas numa cantoneira metálica com o comprimento da

alvenaria (750mm) e com abas de 50mm (Figura 53b). A fixação das chapas metálicas, colocadas sobre os transdutores de deslocamento, foi efectuada com recurso a fita adesiva de dupla face. Nas cantoneiras que serviram de base para os transdutores de deslocamento, foram utilizados 2 grampos metálicos nas duas extremidades como meio de fixação (Figura 53c).

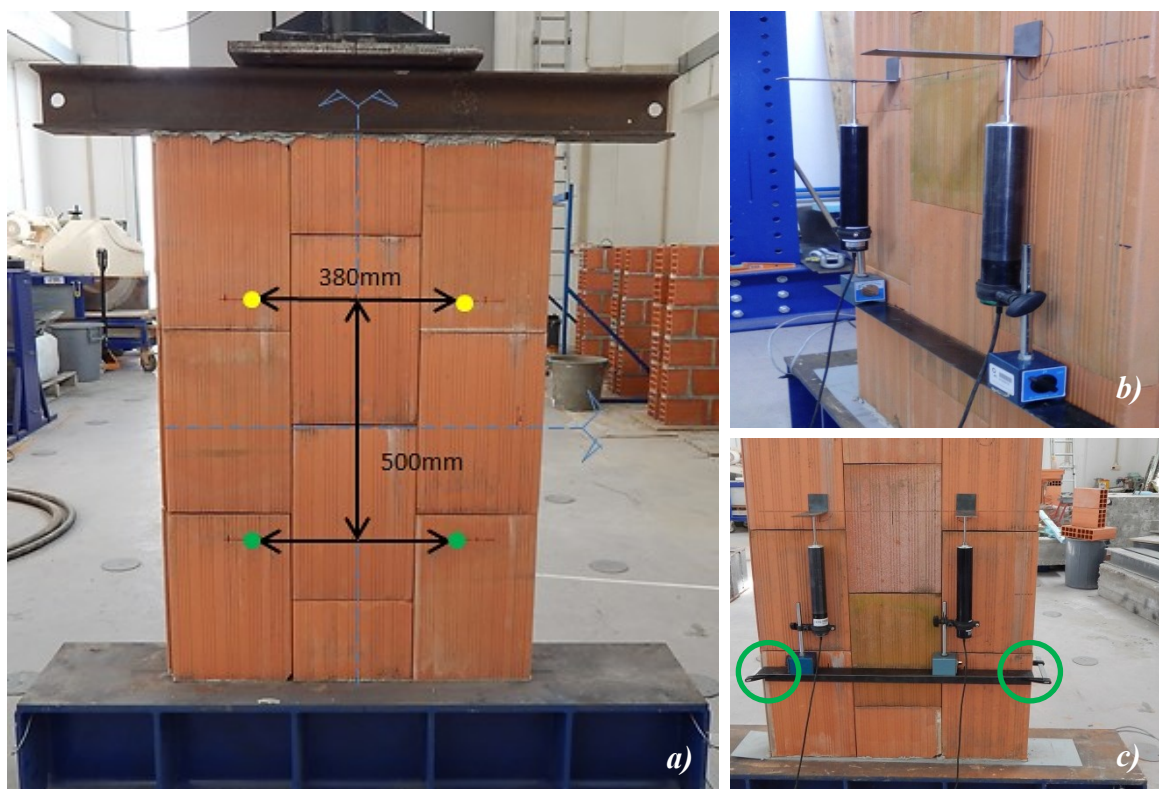


Figura 53 - Esquema de posicionamento de defletómetros; a)Esquema de colocação de defletómetros e chapas metálicas; b)Pormenor da colocação dos defletómetros, chapas metálicas e bases magnéticas; c)Aspetto final do esquema de colocação dos defletómetros, chapas, bases magnéticas e grampos.

A transmissão de carga para as alvenarias foi efectuada pelo atuador hidráulico, modelo CH4-100/C300 da marca Servosis com capacidade máxima de 1000 kN e com uma célula de carga incorporada também da marca Servosis, modelo PCI-200 com capacidade de 200 Ton. (Figura 54a). Ligado ao atuador está um grupo hidráulico da marca MEB, modelo 225S-4 que faz o seu acionamento (Figura 54b).

De maneira a acompanhar e registar o procedimento de aplicação de cargas de compressão nas alvenarias, foi adotado um sistema com capacidade de controlo, registo e aquisição de dados, disponível no LEBA. Este sistema foi constituído por um data logger modelo TDS-303 Tokyo Sokki Kenkyujo da marca TML (Figura 54d), onde estavam conectados os dois transdutores de deslocamento aplicados nas alvenarias (Figura 54c). Por sua vez, o atuador

era comandado através de computador, usando o software Servosis PCD2K, ao mesmo tempo que monitorizava e registava o deslocamento e força no decorrer dos vários ensaios (Figura 54e).



Figura 54 - Constituintes do sistema de controlo, registo e aquisição de dados; a) Atuador hidráulico, modelo CH4-100/C300 da marca Servosis; b) Grupo hidráulico da marca MEB, modelo 225S-4; c) Defletómetros com ligação ao Data Logger; d) Data logger modelo TDS-303 Tokyo Sokki Kenkyujo da marca TML; e) Registo de dados no software Servosis PCD2K.

### Procedimento adotado para o ensaio à compressão

Antes de iniciar os ensaios de compressão foi necessário definir o procedimento a adotar na sua realização. De modo a seguir um procedimento normalizado, todos os parâmetros dos ensaios foram estabelecidos com base na norma NP EN 1052-1:2002 [88]. De maneira a seguir os requisitos definidos pela norma. A aplicação da carga de compressão em controlo de força, ocorreu a uma velocidade de 0,25 kN/s, em três patamares de carga distintos.

O primeiro patamar de carga corresponde ao início do ensaio, e termina quando é atingida uma força de 25 kN, depois de atingido este valor seguiu-se uma pausa de 120 segundos, onde foi mantida a força de compressão. Terminada a primeira pausa do ensaio, é iniciado

o segundo patamar de carga que termina aos 50 kN, seguindo-se novamente uma pausa de 120 segundos. O último patamar de carga termina, quando é atingida uma força de 75 kN, seguido da pausa de 120 segundos (Figura 55). Concluída a fase de controlo de força, foi iniciada a fase de controlo de deslocamento. Neste última etapa a carga foi aplicada a uma velocidade constante de 0,02mm/s até ocorrer a rotura da alvenaria. A carga foi aplicada uniformemente no topo das paredes de alvenaria.

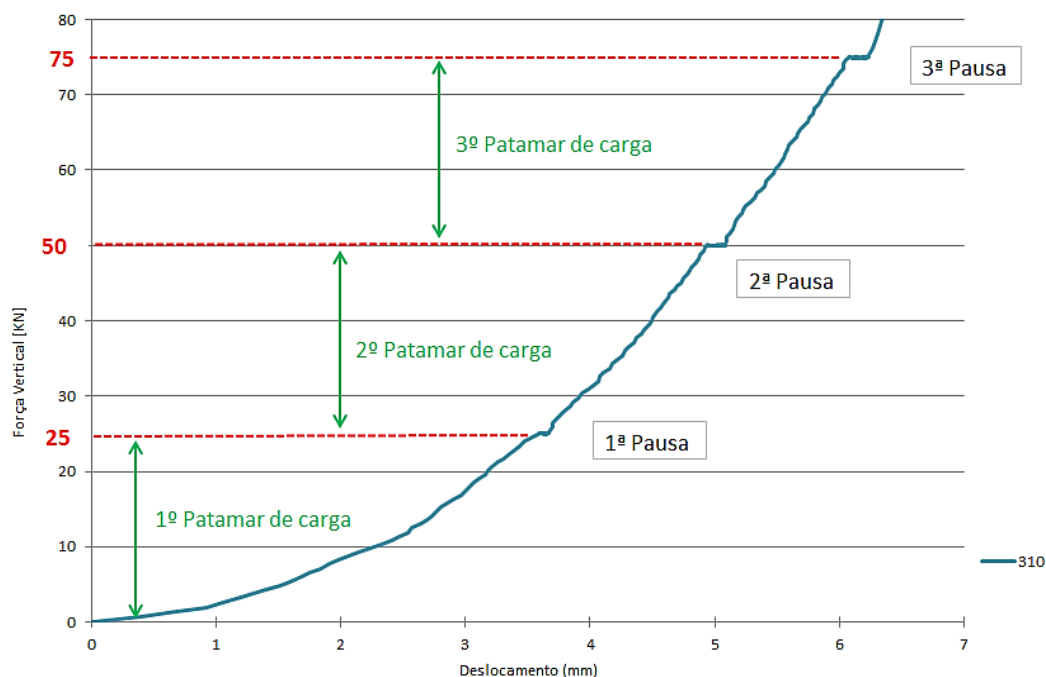


Figura 55 – Esquema representativo dos patamares de carga e pausas efetuadas, durante os ensaios de compressão.

Antes da realização dos ensaios foi necessária a verificação de todos os elementos envolvidos no procedimento, de modo a não comprometer os resultados, para além disso foi necessária a configuração do procedimento de ensaio no software Servosis PCD2K antes de cada ensaio.



## 4. Resultados e Discussão

### 4.1. Ensaio à compressão do tijolo UNIKO

O Quadro 17, mostra os valores obtidos do ensaio à compressão simples dos provetes do tijolo *UNIKO*. Foram obtidos valores médios da tensão de rotura em compressão ( $\sigma_{rotura}$ ) de 11,57 MPa, para o cálculo da tensão foi considerada a área de 250 cm<sup>2</sup> correspondente à área da secção transversal dos tijolos.

Quadro 17 - Valores de resistência à compressão obtidos no ensaio dos seis provetes cerâmicos.

Nº Provede	Força de rotura em compressão, $F_{rotura}$ [kN]	Tensão de rotura em compressão, $\sigma_{rotura}$ [MPa]
1	275,20	11,01
2	329,80	13,19
3	284,30	11,37
4	262,90	10,52
5	322,10	12,88
6	261,40	10,46
Média ( $\sigma_{rotura}$ )		11,57
Valor máximo ( $\sigma_{rotura\text{máx}}$ )		13,19
Valor mínimo ( $\sigma_{rotura\text{min}}$ )		10,46
Desvio padrão ( $\Delta\sigma_{rotura}$ )		1,19

Alguns valores obtidos apresentam certa discrepância, quando comparados com os restantes, fato que pode ser explicado pela existência de fissuras em alguns tijolos, levando conseqüentemente a uma diminuição da resistência à compressão. A figura 56 mostra os provetes, após a realização do ensaio de compressão.

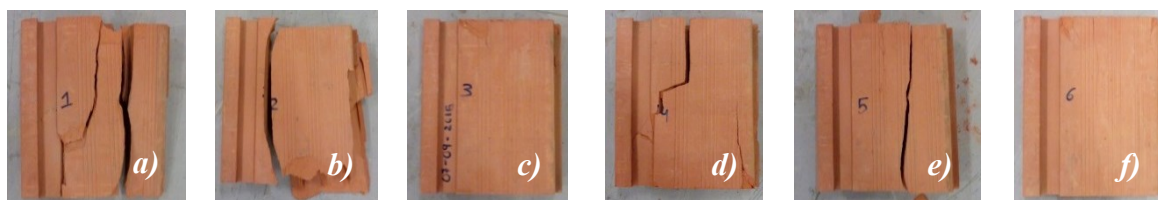


Figura 56 - Provetes após a realização do ensaio de resistência á compressão.

## 4.2. Ensaio à compressão do tijolo térmico

Os valores obtidos do ensaio à compressão simples dos provetes cerâmicos, provenientes dos tijolos térmicos, são apresentados no Quadro 18. Foram obtidos valores médios da tensão de rotura em compressão ( $\sigma_{\text{rotura}}$ ) de 13 MPa. Para o cálculo da tensão foi considerada a área de 351,5 cm<sup>2</sup> correspondente à área da secção transversal dos tijolos.

Quadro 18 - Valores de resistência à compressão obtidos no ensaio dos provetes cerâmicos, provenientes do tijolo térmico

Nº Provette	Força de rotura em compressão, $F_{\text{rotura}}$ [kN]	Tensão de rotura em compressão, $\sigma_{\text{rotura}}$ [MPa]
1	500,90	14,27
2	456,70	12,97
3	333,90	9,49
4	609,90	17,33
5	408,90	11,62
6	434,00	12,33
	Média ( $\sigma_{\text{rotura}}$ )	13,00
	Valor máximo ( $\sigma_{\text{rotura máx}}$ )	17,33
	Valor mínimo ( $\sigma_{\text{rotura min}}$ )	9,49
	Desvio padrão ( $\Delta\sigma_{\text{rotura}}$ )	2,65

Como é visível pela observação do Quadro 18, o provete nº3, apresenta um valor de resistência à compressão bastante inferior, quando comparado com os restantes. Esta discrepância pode ser explicada pela existência de uma fissura, de grandes dimensões num dos septos do provete. Outras variações visíveis nos resultados obtidos, para a resistência à compressão dos provetes, podem ser explicadas pela existência de algumas fissuras não visíveis, já existentes nos tijolos, ou formadas durante a realização do corte dos tijolos térmicos. A Figura 57 mostra o aspeto dos provetes após a realização do ensaio de resistência à compressão.



Figura 57 - Aspeto dos provetes após a realização do ensaio de resistência à compressão.

Depois da análise dos valores de tensão de rotura em compressão ( $\sigma_{rotura}$ ), tendo sido obtido para o tijolo térmico um valor médio de 13 MPa, e para o tijolo *UNIKO* um valor médio de 11,57 MPa, pode deste modo, o tijolo *UNIKO*, ser aplicado com uma função estrutural, uma vez que cumpre com os valores de tensão admissível impostos no EC 6 e EC 8. Os valores obtidos mostram a semelhança, dos dois produtos, ao nível da resistência.

### 4.3. Ensaio de flexão e compressão dos provetes de cimento-cola

No processo de determinação das características mecânicas da argamassa adotada, nas juntas horizontais das alvenarias da tipologia 3, foram realizados 3 ensaios de resistência à flexão e 3 ensaios de resistência à compressão, uma vez que as três alvenarias da tipologia 3 foram construídas todas em fases distintas. Os ensaios de caracterização mecânica da argamassa foram realizados no mesmo dia da realização dos ensaios de compressão da alvenaria correspondente, sendo a primeira série de ensaios realizada quando os provetes tinham uma idade de 26 dias, a segunda série 21 dias, e a terceira série aos 19 dias. O Quadro 19 mostra os valores obtidos da realização dos ensaios de flexão dos vários provetes.

Quadro 19 - Valores da tensão de rotura em flexão ( $\sigma_{rotura}$ ) obtidos nos provetes ensaiados

Nº Parede	Idade dos provetes	Nº Provede	Força de rotura em Flexão, $F_{rotura}$ [kN]	Tensão de rotura em flexão, $\sigma_{rotura}$ [MPa]	Média ( $\sigma_{rotura}$ )	Desvio padrão ( $\Delta\sigma_{rotura}$ )
3.1	26 Dias	1	1,82	4,20	4,23	0,35
		2	1,98	4,60		
		3	1,67	3,90		
3.2	21 Dias	1	1,91	4,49	4,29	0,36
		2	1,65	3,88		
		3	1,92	4,50		
3.3	19 Dias	1	1,77	4,14	3,91	0,27
		2	1,70	3,99		
		3	1,54	3,61		

Para o cálculo da tensão de rotura em flexão,  $\sigma_{rotura}$  de cada provede, foi aplicada a seguinte expressão:

$$\sigma_{rotura} = \frac{1,5 \times F_{rotura} \times l}{d_1 \times d_2^2} \quad (1)$$

Onde:

- $\sigma_{\text{rotura}}$  – tensão de rotura em flexão [MPa];
- $F_{\text{rotura}}$  – força de rotura á flexão [N];
- $l$  – distancia entre apoios (100mm);
- $d_1$  e  $d_2$  – dimensão das arestas dos topos do provete (ambas 40mm).

A Figura 58 mostra o aspeto dos provetes após a realização do ensaio de flexão.



Figura 58 - Aspeto dos provetes de cimento-cola após a realização do ensaio de resistência á flexão.

Depois de realizados os ensaios de flexão, e obtidos os meios-prismas de argamassa, foi possível proceder á realização dos ensaios de compressão. O Quadro 20 mostra os valores obtidos para os diferentes provetes de cimento-cola nos ensaios de compressão.

Quadro 20 - Valores da tensão de rotura em compressão ( $\sigma_{\text{rotura}}$ ) obtidos nos provetes ensaiados

Nº Parede	Idade dos provetes	Nº Provete	Força de rotura em compressão, $F_{\text{rotura}}$ [kN]	Tensão de rotura em compressão, $\sigma_{\text{rotura}}$ [MPa]	Média ( $\sigma_{\text{rotura}}$ )	Desvio padrão ( $\Delta\sigma_{\text{rotura}}$ )				
3.1	26 Dias	1	26,52	16,58	16,04	0,51				
			26,11	16,32						
		2	26,02	16,27						
			25,86	16,16						
		3	25,13	15,70						
			24,30	15,19						
			24,30	15,19						
		3.2	21 Dias	1			28,16	17,60	17,27	1,21
							26,03	16,27		
2	30,11			18,82						
	29,10			18,19						
3	24,89			15,55						
	27,49			17,18						
	27,49			17,18						
3.3	19 Dias			1	22,63	14,14	14,32	0,62		
					24,47	15,29				
		2	23,05	14,41						
			21,51	13,45						
		3	23,48	14,61						
			22,41	14,01						
			22,41	14,01						

Para o cálculo da tensão de rotura em compressão,  $\sigma_{\text{rotura}}$ , de cada provete, foi aplicada a seguinte expressão:

$$\sigma_{\text{rotura}} = \frac{F_{\text{rotura}}}{A} \quad (2)$$

Onde:

- $\sigma_{\text{rotura}}$  – tensão de rotura em compressão [MPa];
- $F_{\text{rotura}}$  – força de rotura á compressão [N];
- $A$  – área da zona comprimida (40mmx40mm=1600mm<sup>2</sup>).

A Figura 59 mostra o aspeto dos provetes após a realização do ensaio de compressão.

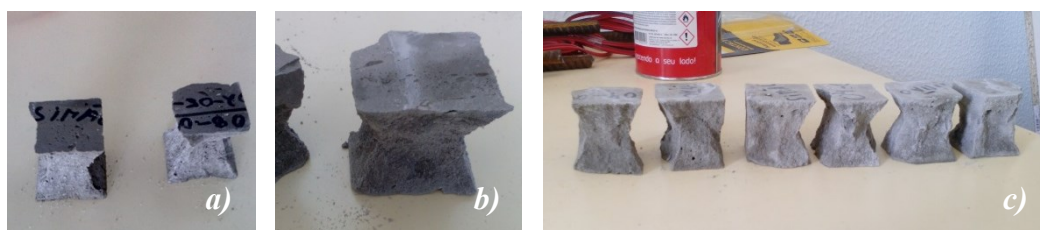


Figura 59 - Aspeto dos provetes de cimento-cola após a realização do ensaio de resistência á compressão.

Da análise dos resultados obtidos, não é possível concluir de forma concreta, a influência da idade na resistência do cimento-cola, uma vez que os provetes com uma idade de 26 dias, apresentam um valor medio de tensão de rotura em flexão inferior ao valor obtido para os provetes com uma idade de 21 dias, 4,23 MPa e 4,29 MPa respetivamente. O mesmo foi verificado para a situação de compressão, onde foi obtido um valor medio de tensão de rotura em compressão de 16,04 MPa para os provetes com 26 dias de idade e 17,27 MPa para os provetes com uma idade menor, de 21 dias. Analisando os resultados obtidos para os provetes com 19 dias de idade, os últimos a serem ensaiados, e comprando-os com os valores dos provetes com 21 e 26 dias de idade, é possível afirmar que estes ainda estariam em processo de cura, podendo atingir valores médios de tensão de rotura em flexão e compressão superiores com idades maiores. Os valores de tensão de flexão e compressão obtidos para o cimento-cola, expressam a qualidade necessária para a sua aplicação com um fim de construção. Uma vez que este foi utilizado para a realização de uma junta fina, situação prevista na NP EN 1996-1-1:2000 [4], definindo que a resistência das argamassas utilizadas em junta fina não é contabilizada para a resistência final da

alvenaria, como tal a resistência à compressão das paredes não deverá ter influência da resistência do cimento-cola, empregue na sua construção.

#### **4.4. Ensaio de compressão das alvenarias**

---

Depois de definido o programa de ensaio, e de serem verificados todos elementos envolvidos, foi possível iniciar os vários ensaios de compressão.

De seguida, são apresentados os gráficos força-deslocamento, agrupados segundo as diferentes tipologias onde são apresentadas as forças de compressão máximas obtidas para cada parede, e a tensão de compressão correspondente, começando pela tipologia 1 e assim sucessivamente.

Numa primeira análise dos diagramas correspondentes aos ensaios das alvenarias da tipologia 1 (Figura 60), é possível verificar em ambas as curvas um elevado deslocamento na fase inicial, que pode ser explicado pelo modo como foram aplicadas as unidades cerâmicas e pelo seu rigor geométrico. Na tipologia 1, as unidades não possuem na junta horizontal qualquer tipo de argamassa, nem se encontram retificadas, pelo que o assentamento foi realizado diretamente entre unidades. Uma vez que as faces dos tijolos não apresentam uma superfície totalmente plana, não foi possível o total contacto entre faces (Figura 61a). Durante o ensaio, ao serem carregadas, as unidades acomodaram e ocuparam os espaços existentes, o que explica o elevado deslocamento verificado no início do ensaio. Para além dos espaços entre as unidades, outro dos problemas prendeu-se com a encurvadura existente nas faces dos tijolos, que apesar de ser mínima, levou à criação de pontos de concentração de tensões nas extremidades das unidades cerâmicas, que ao longo do ensaio provocaram fissuras verticais, afectando o comportamento global das alvenarias (Figura 61b).

Da análise do gráfico é ainda possível verificar, especialmente nas curvas dos ensaios das paredes 1.2 e 1.3, que existem picos de carga seguidos de quedas com repetições cíclicas, este comportamento mostra a resistência oferecida pelas alvenarias e a sua capacidade de recuperação face à carga aplicada.

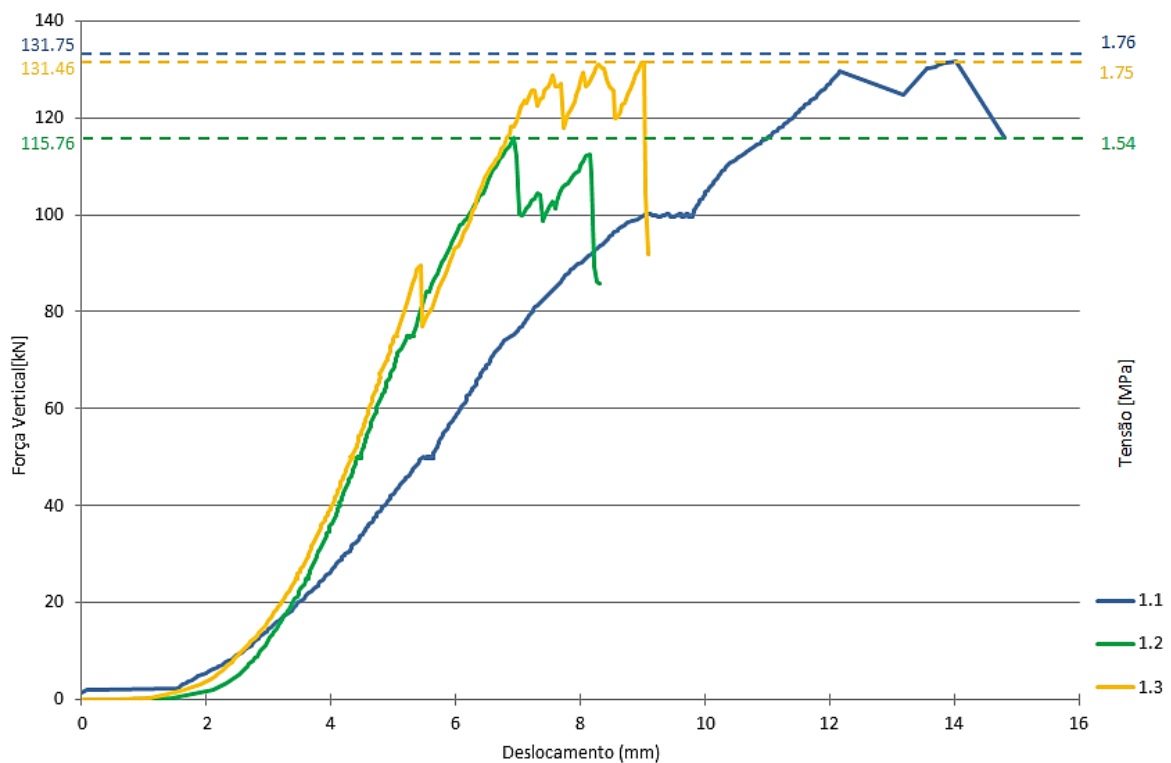


Figura 60 – Diagrama força-deslocamento do ensaio de compressão das alvenarias de tipologia 1, Alvenaria com contravento e sem material ligante nas juntas horizontais.



Figura 61 – Problemas ocorridos nos ensaios de compressão das alvenarias de tipologia 1; a) Espaço existente entre as unidades; b) Fissuras provocadas por concentração de tensões em pontos específicos.

Em comparação com os diagramas obtidos para a tipologia 1, é possível verificar na tipologia 2 um comportamento inicial diferente, à exceção da curva azul, correspondente ao ensaio da parede 2.3. Nesta tipologia não existe um deslocamento inicial tão acentuado (Figura 62), uma vez que as unidades se encontravam retificadas permitindo um contacto total entre as unidades cerâmicas, não existindo por isso espaço entre estas nas juntas. O

comportamento distinto da parede 2.3 pode ser explicado por algum menor rigor construtivo que permitiu maiores deslocamentos iniciais. É ainda possível verificar que na tipologia 2, e comparativamente à tipologia anterior, após ser atingida a carga máxima de compressão ocorre imediatamente a rotura da alvenaria de forma súbita e sem aviso prévio, o que demonstra um comportamento “frágil” das alvenarias desta tipologia (Figura 63).

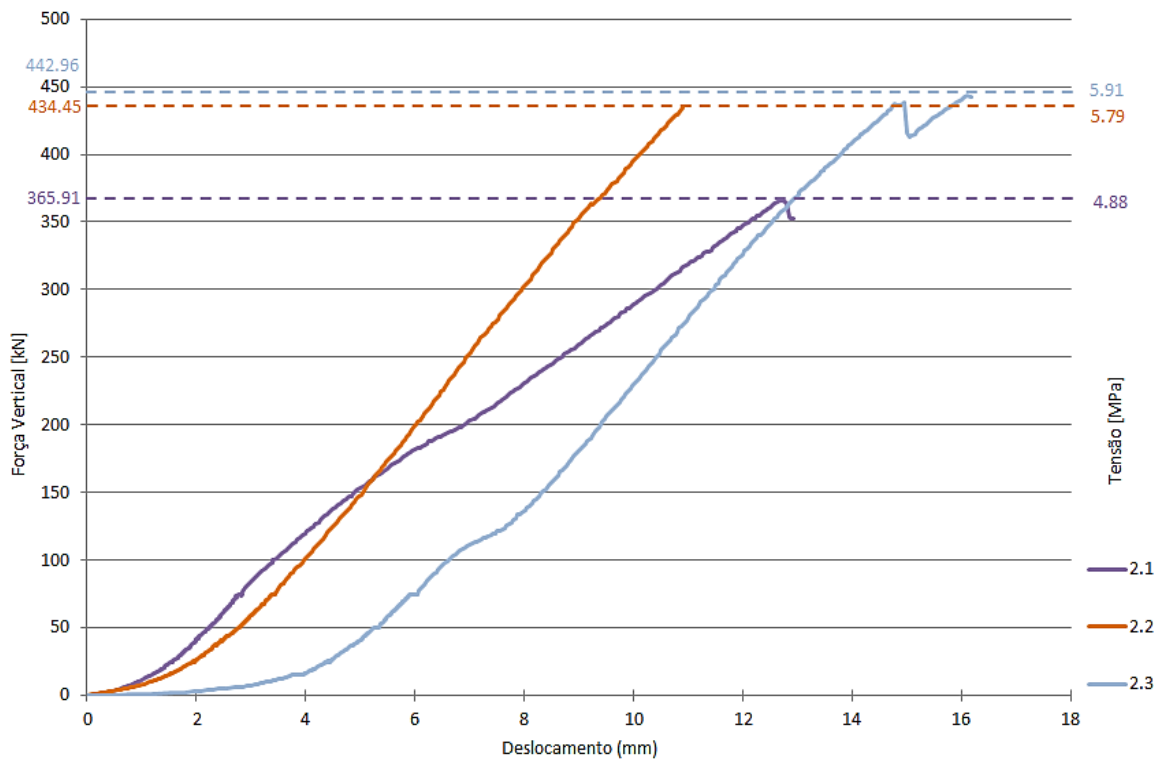


Figura 62 – Diagrama força-deslocamento do ensaio de compressão das alvenarias de tipologia 2, Alvenaria com contraventamento e unidades cerâmicas retificadas.

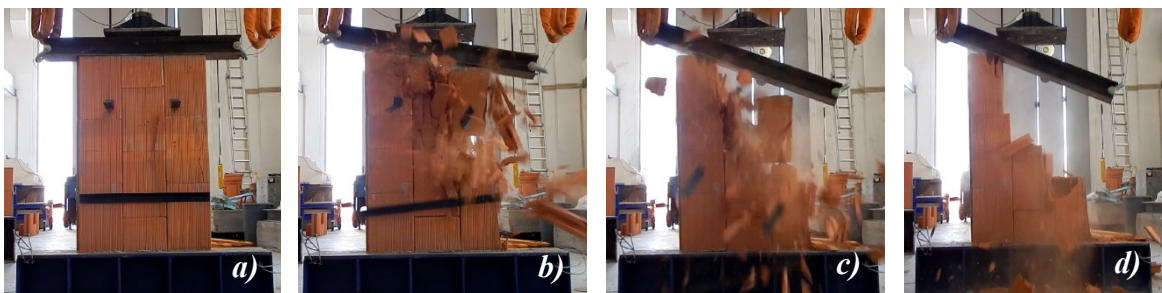


Figura 63 – Momento da rotura da alvenaria 2.2 no ensaio de compressão.

Em análise aos diagramas força-deslocamento das paredes da tipologia 3 (Figura 64), é possível verificar o mesmo comportamento “frágil”, que caracteriza as alvenarias da tipologia 2, onde após ser atingida a carga máxima de compressão, ocorre a rotura da alvenaria. O elevado deslocamento inicial verificado da curva azul, representativa do

ensaio da parede de alvenaria 3.3, poderá estar associado ao menor rigor, no nivelamento do topo de cimento-cola da alvenaria, levando no início do ensaio, à acomodação do perfil IPE 140, nos espaços criados pelo desnivelamento.

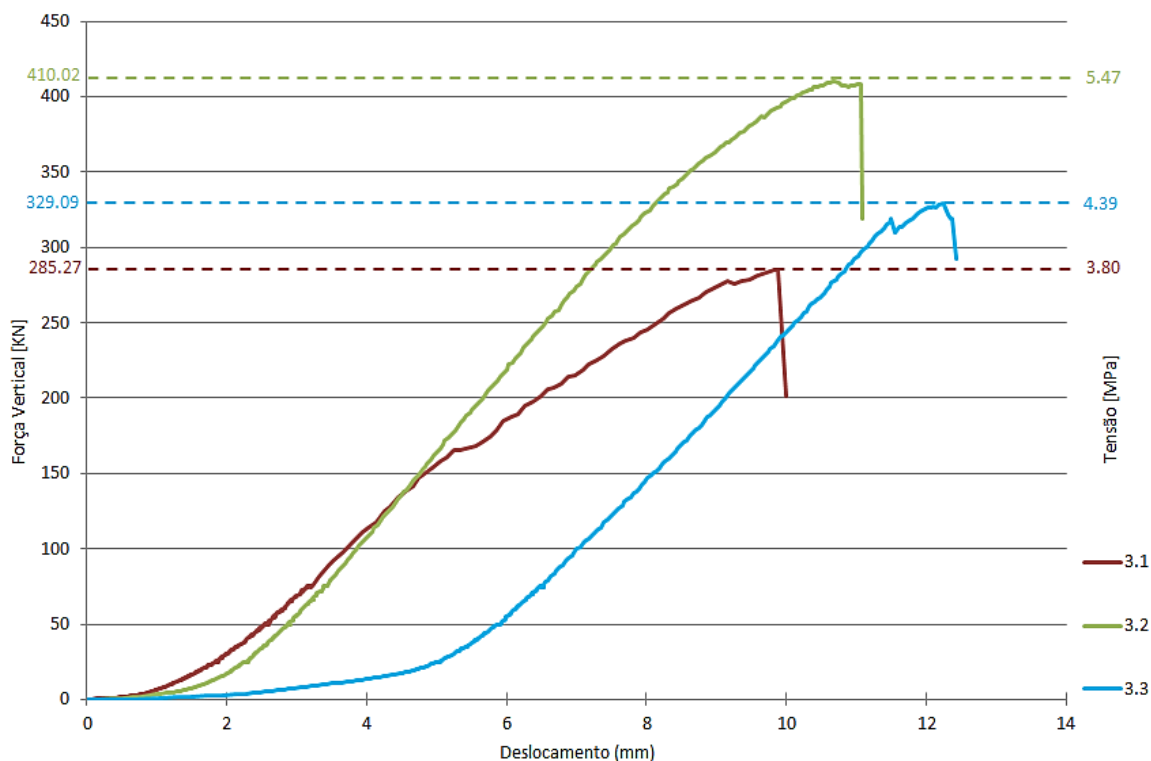


Figura 64 – Diagrama força-deslocamento do ensaio de compressão das alvenarias de tipologia 3, Alvenaria sem contraventamento e com cimento-cola nas juntas horizontais.

A incorporação de varões verticais nas unidades cerâmicas, não se revelou na solução mais vantajosa na resposta a cargas de compressão, sendo que a sua aplicação poderá eventualmente ter efeitos benéficos em situações de esforço transversal. Da análise dos diagramas da tipologia 4 (Figura 65), é possível verificar um menor deslocamento inicial em comparação com as paredes da tipologia 1, onde também não foi utilizado qualquer material ligante nas juntas horizontais, mas a utilização de varões permitiu o aperto das unidades cerâmicas, levando a uma diminuição dos deslocamentos iniciais.

Ao longo dos diagramas, é possível verificar ainda, o registo de algumas perturbações, que podem ser explicadas pela influência dos varões no comportamento das alvenarias. Os varões ao serem comprimidos, pela imposição das cargas de compressão, sofrem flexão, e devido ao pouco espaço que possuem, dentro das cavidades dos tijolos, vão imprimir deformações laterais nas unidades cerâmicas provocando fissuras (Figura 66), fenómeno que pode explicar as perturbações registadas. Outros dos aspetos a registar neste tipo de

alvenaria, é o seu comportamento após ser atingida a carga máxima de compressão, sendo possível verificar no gráfico que após atingido o pico máximo de carga, as alvenarias continuam a resistir às cargas impostas, embora em níveis mais baixos. O comportamento verificado deve-se em grande parte à presença dos varões, conferindo um comportamento menos frágil a este tipo de alvenaria.

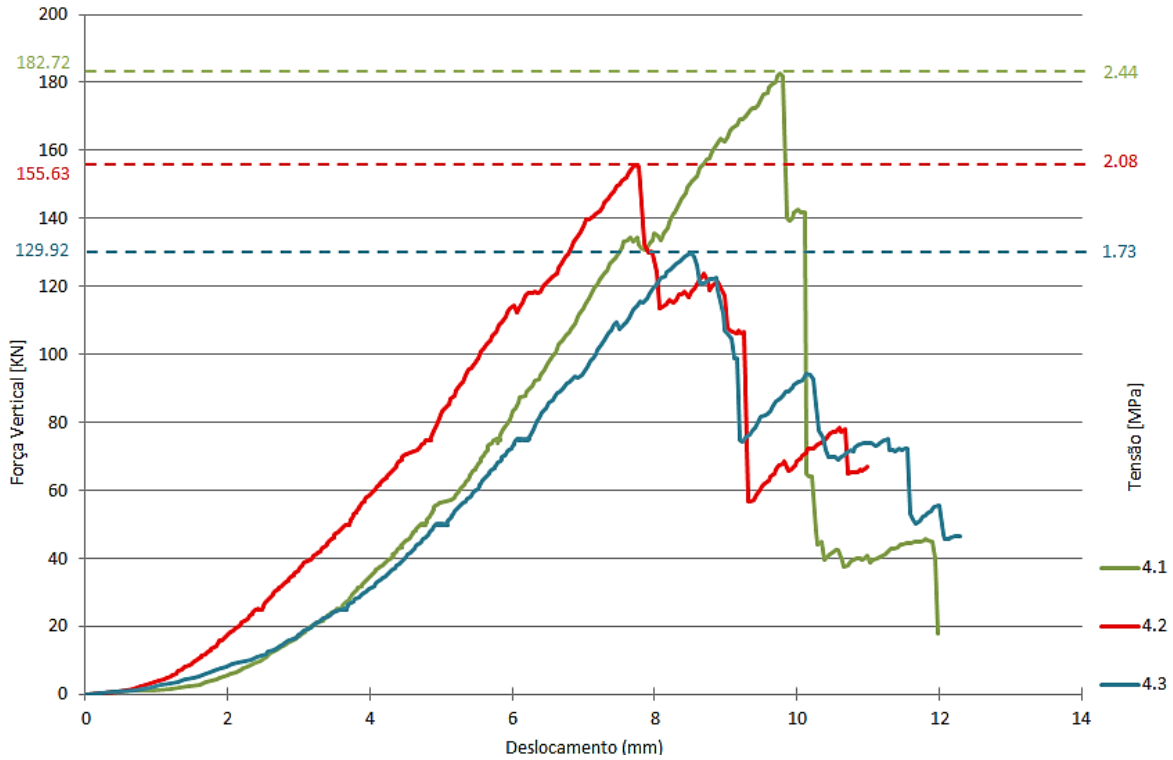


Figura 65 – Diagrama força-deslocamento do ensaio de compressão das alvenarias de tipologia 4, Alvenaria sem contraventamento e com incorporação de varões de aço inoxidável em furações verticais.

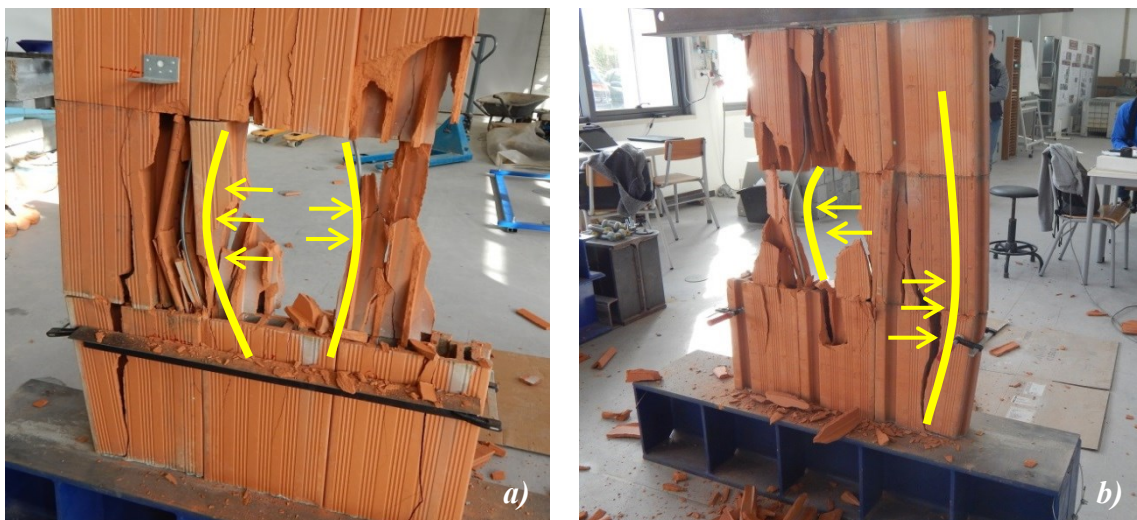


Figura 66 – Comportamento da alvenaria 4.1 da tipologia 4 durante o ensaio de compressão axial, as linhas amarelas representam os varões fletidos

À semelhança das alvenarias com unidades retificadas e com cimento-cola nas juntas horizontais, também as alvenarias com argamassa polimérica nas juntas horizontais (tipologia 5), apresentam um comportamento “frágil” (Figura 67). O diagrama correspondente à alvenaria 5.1 apresenta um traço irregular, porque foi necessário interromper o ensaio devido a um imprevisto. Este incidente pode ter afetado o resultado final da tensão de rotura em compressão para a alvenaria 5.1.

Os resultados para a alvenaria 5.2 não são apresentados uma vez que não foi possível fazer a aquisição de dados, tendo sido apenas possível registar um valor máximo de força de compressão de 356,36 kN.

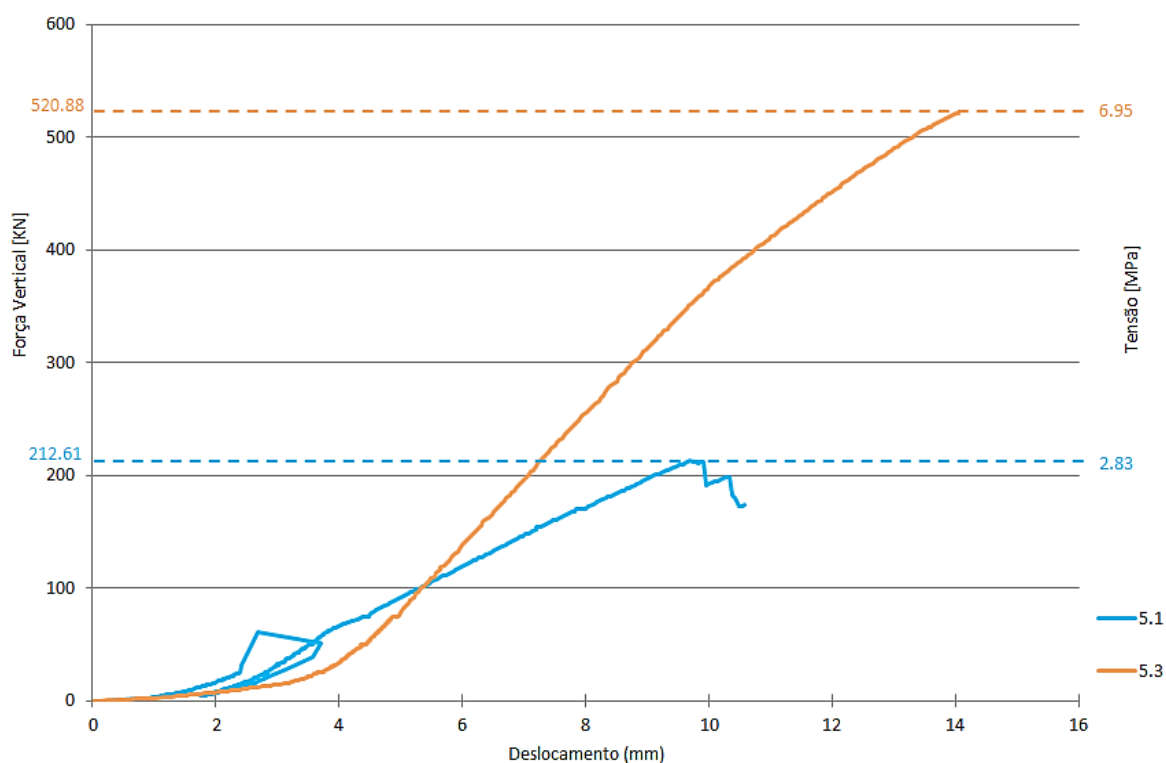


Figura 67 – Diagrama força-deslocamento do ensaio de compressão das alvenarias de tipologia 5, Alvenaria sem contraventamento e com argamassa polimérica nas juntas horizontais.

O Quadro 21 apresenta o resumo de todos os valores obtidos da realização dos ensaios de compressão das paredes de alvenaria, força máxima de compressão ( $F_{rotura}$ ), tensão de rotura em compressão ( $\sigma_{rotura}$ ) e os módulos de elasticidade (E) obtidos para o deslocamento dos transdutores no intervalo de 25 a 50 kN.

Quadro 21 - Valores da tensão de rotura em compressão ( $\sigma_{rotura}$ ) e módulos de elasticidade (E) obtidos dos ensaios de compressão das 15 alvenarias.

Tipologia de alvenaria	Nº Parede	Força máxima de compressão, $F_{rotura}$ [kN]	Media ( $F_{rotura}$ )	Tensão de rotura em compressão, $\sigma_{rotura}$ [MPa]	Media ( $\sigma_{rotura}$ )	Módulo elasticidade, E [GPa]	
						Transdutores	
						25 a 50 [GPa]	Media [GPa]
Normal contraventada	1.1	131,75	126,32	1,76	1,68	0,2	0,28
	1.2	115,76		1,54		*	
	1.3	131,46		1,75		0,36	
Contraventada com unidades retificadas	2.1	365,91	414,44	4,88	5,53	4,56	2,15
	2.2	434,45		5,79		0,84	
	2.3	442,96		5,91		1,06	
Com cimento-cola nas juntas horizontais	3.1	285,27	341,46	3,8	4,55	1,33	1,33
	3.2	410,02		5,47		*	
	3.3	329,09		4,39		*	
Com varões verticais	4.1	182,72	156,09	2,44	2,08	0,47	0,49
	4.2	155,63		2,08		0,44	
	4.3	129,92		1,73		0,57	
Com argamassa polimérica nas juntas horizontais	5.1	212,61	363,28	2,83	4,84	1,25	2,18
	5.2	356,36		4,75		*	
	5.3	520,88		6,95		3,11	

\* Não foi possível obter resultado devido a anomalia no equipamento

Para o cálculo da tensão de rotura em compressão,  $\sigma_{rotura}$ , de cada parede, foi aplicada a seguinte expressão:

$$\sigma_{rotura} = \frac{F_{rotura}}{A} \quad (1)$$

Onde:

- $\sigma_{rotura}$  – tensão de rotura em compressão [MPa];
- $F_{rotura}$  – força de rotura á compressão [N];
- A – área de carregamento das alvenarias (100mmx750mm=75000mm<sup>2</sup>).

Da comparação de resultados, é possível observar em primeiro lugar, nos valores da força máxima de compressão ( $F_{rotura}$ ) que as alvenarias da tipologia 2 são as que apresentam

valores mais elevados, com uma média de 414,44 KN, seguidas das alvenaria da tipologia 5 (363,28 KN) e da tipologia 3 (341,46 KN). As alvenarias da tipologia 1 e 4 são as que apresentam os resultados mais baixos para os valores médios de força máxima de compressão, 126,32 KN e 156,09 KN respectivamente. Os valores do módulo de elasticidade variam de modo diferente uma vez que não foram tidos em conta os módulos de elasticidade (E) para as alvenarias 1.2, 3.2 e 3.3, devido a problemas no equipamento de medição. Da análise de valores para o módulo de elasticidade (E) no intervalo de 25 kN a 50 kN, as alvenarias da tipologia 5 são as que apresentam melhor resultado (2,18 GPa), seguidas das alvenarias de tipologia 2 (2,15 GPa), tipologia 3 (1,33 GPa), tipologia 4 (0,49 GPa) e tipologia 1 (0,28 GPa). Note-se no entanto que na parede 2.1 que se obteve um módulo de elasticidade muito superior (4,56 GPa) quando comparado com os dois ensaios da mesma tipologia, devendo por esse motivo ser observado com alguma reserva.

Os resultados obtidos mostram a influência que pode ter a aplicação de um material ligante nas juntas horizontais ou a retificação das faces superior e inferior das unidades cerâmicas, visto as tipologias 2, 3 e 5 apresentam um melhor comportamento face às restantes, maiores valor de resistência e módulo de elasticidade.



## 5. Conclusões e desenvolvimentos futuros

---

### 5.1. Conclusões e considerações finais

---

A prática de construção de estruturas de alvenaria, em Portugal é residual. Como consequência, o desenvolvimento de novas soluções cerâmicas para aplicação em estruturas de alvenaria é igualmente muito reduzido.

São poucos os novos desenvolvimentos realizados ao nível das unidades cerâmicas. O tijolo *UNIKO* desenvolvido e produzido pela Prélis-Smart Ceramics, é uma nova unidade cerâmica, com características específicas ao nível da geometria e com capacidade para aplicação em alvenaria estrutural, contrariando a tendência e dando ao mercado da construção um produto inovador.

O trabalho experimental realizado na dissertação permitiu conhecer as características mecânicas deste novo produto e qual a sua melhor utilização em alvenaria.

Com a realização dos ensaios de compressão axial ao tijolo *UNIKO*, foi possível obter um valor médio de tensão de rotura em compressão ( $\sigma_{\text{rotura}}$ ), de referência de 11,57 MPa, muito próximo do valor médio obtido para o tijolo térmico (13 MPa), também ensaiado à compressão. Os valores de resistência à compressão obtidos para o tijolo *UNIKO*, demonstram a sua qualidade e a capacidade para aplicação em estruturas de alvenaria.

Da realização dos ensaios de compressão, e pelos valores obtidos para as várias alvenarias, é possível retirar duas conclusões. A primeira é a de que as paredes de alvenaria onde foi utilizado cimento-cola (Tipologia 3), argamassa polimérica nas juntas (Tipologia 5) e as paredes de alvenaria onde as unidades cerâmicas foram retificadas (Tipologia 2), apresentam comportamentos similares entre si. Por outro lado, as paredes de alvenaria onde não foi utilizado qualquer material ligante nas juntas horizontais (Tipologia 1), e as que possuíam varões nas furações verticais (Tipologia 4), apresentam comportamentos também idênticos entre si.

É ainda possível concluir que nas alvenarias das Tipologias 2, 3 e 5 obtiveram-se melhores valores médios de força máxima de compressão ( $F_{\text{rotura}}$ ) e consequentemente melhores valores médios de módulo de elasticidade (E). Nas alvenarias de tipologia 1 e 4 foram

obtidos valores similares entre si, mas muito distantes dos valores conseguidos nas restantes tipologias, sendo que entre as duas tipologias 1 e 4, as alvenarias onde foram utilizados varões nas juntas verticais (Tipologia 4), apresentam uma ligeira melhoria comportamental.

## **5.2. Desenvolvimentos futuros**

---

Como trabalhos futuros sugere-se a criação de novas tipologias de paredes de alvenaria com recurso ao tijolo *UNIKO* e o seu estudo comportamental.

Para além da criação de novas tipologias sugere-se o estudo comportamental das alvenarias sobre a ação de forças de corte, alargando assim os conhecimentos sobre o comportamento deste tipo de parede de alvenaria.

Sugere-se ainda a modelação numérica em software de cálculo das diferentes tipologias criadas, obtendo um melhor conhecimento sobre o comportamento deste tipo de estrutura.

## 6. Bibliografia

---

- [1] Hipólito, S., “*Construções em alvenaria-Apontamentos*”, FEUP, Porto, 2003.
- [2] Lourenço, P.B., Sousa, Hipólito J.C., “*Análise, projecto e reforço de estruturas de alvenaria*”, FEUP, Porto, 2000.
- [3] Lourenço, P.B., “*Possibilidades Actuais na Utilização da Alvenaria Estrutural*”, Seminário sobre Paredes de Alvenaria, 2007, pp.1-14.
- [4] Instituto Português da Qualidade (IPQ), “*Projecto de estruturas de alvenaria – Parte1-1: Regras gerais para edifícios*”, NP EN 1996-1-1:2000, Novembro, 2000.
- [5] Regulamento Geral das edificações Urbanas, Decreto-Lei nº38 382 de Agosto de 1951.
- [6] Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), “*Segurança de Edifício de Pequeno Porte de Alvenaria Confinada em Relação à Acção dos Sismos*”, Regras Práticas, Lisboa, 1990, pp.12.
- [7] Gouveia, J., et al, “*Soluções construtivas em alvenaria*”, Congresso Construção 2007 - 3.º Congresso Nacional, Universidade de Coimbra, Portugal, 2007.
- [8] Morais, A., “*Alvenaria estrutural: Novo processo construtivo*”, ARTiTEXTOS02, Setembro de 2006, pp.101-111.
- [9] Février, P., “*História do Mundo*”, Vol. 1, Verbo, 1985.
- [10] Spencer, A.J., “*Brick architecture in ancient Egypt*”, Aris & Philiphs, Reino Unido, 1979, pp.160.
- [11] Gouveia, J., et al, “*Alvenaria estrutural: Aplicação a um caso de estudo*”, 4ª Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, Lisboa, LNEC, 2006.
- [12] Unesco., “*História da Humanidade*”, Vol. I, Editorial Verbo, Lisboa, 1986.
- [13] Croci, G., “*The Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage*”, Computational Mechanics Publications, Southampton, UK and Boston, USA, 1998.
- [14] Elliot, C., “*Technics and architecture: The development of materials and systems of buildings*”, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, Estados Unidos, 1992.
- [15] Appleton, J., “*Reabilitação de Edifícios Antigos – Patologias e Tecnologias de Intervenção*”, Edições Orion, 2ª Edição, Novembro de 2003.
- [16] Rodrigues, F., “*Construções em terra crua. Tecnologias, potencialidades e patologias*”, Revista Musa, Junho, 2007, pp.149-155.

- [17] Ramos, L., Lourenço, P., “*Análise das técnicas de construção pombalina e apreciação do estado de conservação estrutural do quarteirão do Martinho da Arcada*”, Engenharia Civil, 2000, p. 35-46.
- [18] [http://wwwext.lnec.pt/LNEC/DE/NESDE/divulgacao/gaiol\\_const\\_sism-lnec](http://wwwext.lnec.pt/LNEC/DE/NESDE/divulgacao/gaiol_const_sism-lnec) [Acesso em:17-03-2016]
- [19] Oliveira, C., Cabrita, A., “*Tipificação do parque habitacional de Lisboa – Documento introdutório do tema*”, 1º Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios de Habitação, LNEC, Lisboa, 1985.
- [20] <http://www.civil.ist.utl.pt/~joaof/tc-cor/17%20Paredes%20-%20COR.pdf> [Acesso em:04-03-2016]
- [21] Regras da Camara Municipal de Lisboa, Lisboa.
- [22] Instituto Português da Qualidade (IPQ), “*Projecto de estruturas para resistência aos sismos – Parte 1: Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios*”, NP EN 1998-1:2010, 2010.
- [23] Regulamento para o emprego do betão armado, Decreto de lei nº4036 de 28 de Março de 1918.
- [24] Regulamento do Betão Armado (RBA), Decreto de lei nº25948 de 16 de Outubro de 1935.
- [25] Sousa, H., “*Alvenarias em Portugal. Situação actual e perspectivas futuras*”. Seminário sobre paredes de alvenaria, Porto, 2002.
- [26] Freitas, V., “*Isolamento Térmico de Fachadas pelo Exterior. Reboco Delgado Armado Sobre Poliestireno Expandido – ETICS*”, Dezembro, 2002.
- [27] <https://pt.scribd.com/doc/95998132/Tijolo-Termico-e-Acustico-Preceram> [Acesso em:22-02-2016]
- [28] Lourenço, P., “*Concepção e projecto para alvenaria*”, Seminário sobre paredes de Alvenaria, Universidade do Minho, Guimarães, 2002, p.77-110.
- [29] Bruneau, M., “*Performance of masonry structures during the 1994 Northridge (Los Angeles) earthquake*”, Canadian Journal of Civil Engineering, California, EUA, 1994, pp.378-402.
- [30] Porto, F., et al, “*In-plane cyclic behaviour of a new reinforced masonry system: Experimental results*”, Engineering Structures, 2011, pp.2584-2596.
- [31] Bezelga, A., “*Edifícios de Habitação-Characterização e estimação técnico económica*”, Universidade Técnica de Lisboa, 1984.
- [32] Rei, J. C. M.; “*Edifícios de pequeno porte em alvenaria resistente: Viabilidade técnico-económica*”, Dissertação de Mestrado, FEUP, Porto, Julho de 1999.

- [33] Gouveia, J., Lourenço, P., “*O eurocodigo 6 e o dimensionamento de estruturas de alvenaria*”, Construção Magazine, 2006, pp.34-40.
- [34] Ferreira, H., “*Conhecer o tijolo para construir arquitectura*”, Seminário sobre paredes de alvenaria, Porto, 2002.
- [35] Beall, C., “*Masonry Design and Detailing for Architects, Engineers and Contractors*”, 4th Edition, McGraw-Hill, 1997.
- [36] Schneider, R.R., Dickey, W.L., “*Reinforced Masonry Design*”, Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1980. 691pp.
- [37] <http://www.hms.civil.uminho.pt/ibmac/1967/400.pdf> [Acesso em:04-03-2016]
- [38] Amrhein, J. E., “*Reinforced Masonry Engineering Handbook - Clay and Concrete Masonry*”, 6ª edição, Masonry Institute of America, USA, 1998, 496pp.
- [39] Lui, E., Chen, W., “*Handbook of Structural Engineering*”, Second Edition, CRC Press, New York, 2005
- [40] ACI/ASCE/TMS, “*Manual Building Code Requirements and Specifications for Masonry Structures and Related Commentaries*”, 530/530. 1-13, 2012.
- [41] Franco, L., “*PCC 2515 – Alvenaria Estrutural*”, Apresentações Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, Brasil, 2004.
- [42] Norma ABNT NBR 15961-1:2011 – “*Alvenaria estrutural – Blocos de concreto – Parte 1: Projectos*”.
- [43] Norma ABNT NBR 15961-2:2011 – “*Alvenaria estrutural – Blocos de concreto – Parte 2: Execução e controle de obra*”.
- [44] Vasconcelo, V., “*Alvenarias armada-soluções inovadoras em Portugal*”, Seminário sobre paredes de alvenaria, 2007, pp.103-128.
- [45] Haach, G., et al, “*Cyclic behaviour of truss type reinforced concrete masonry walls*”, 7º Congresso de Sismologia e Engenharia Sísmica, SPES, FEUP, Porto, 2007, 12pp.
- [46] Gouveia, P., Lourenço, P., “*Masonry shear walls subjected to cyclic loading: influence of confinement and horizontal reinforcement*”, Proceedings of the Tenth North American Masonry Conference, The Masonry Society, USA, 2007, pp.838-848.
- [47] Pompeu, S., “*O contexto normativo recente dos eurocódigos sobre estruturas de alvenaria*”, Seminário sobre paredes de alvenaria, 2007, pp.1-20.
- [48] Medeiros, E., et al, “*Controlo e Qualidade na execução de Alvenarias de Tijolo Cerâmico*”, 2004.

- [49] Ivone, M., et al, “*Dimensionamento de estruturas de alvenaria sujeita a acções sísmicas*”, 7º Congresso de Sismologia e Engenharia Sísmica, SPES, FEUP, Porto, 2007, pp.1-11.
- [50] Instituto Português da Qualidade (IPQ), “*Especificações para unidades de alvenaria. Parte 1: Unidades cerâmicas*”, NP EN 771-1:2012, Outubro, 2012.
- [51] Dias, A., et al, “*Estudo do Redesenho do Tijolo*”, Associação Portuguesa de Industriais de Cerâmica de Construção-APICC, Coimbra, 1993, 69pp.
- [52] Neves, R., “*Estudo do Comportamento e Optimização de Novos Tijolos: Avaliação Comparada*”, Relatório N° 3.2.1.3201-1ª/04 para a Construcer, 2005.
- [53] Magalhães, S., “*Tecnotijolo – Inovação nas Alvenarias*”, Monografia de Licenciatura, Universidade Fernando Pessoa, 2009.
- [54] Mascarenhas, J., et al, “*O Tecnotijolo – Uma Solução Mais Económica e Ecológica para a Execução de Alvenarias*”, Congresso de Inovação na Construção Sustentável CINCOS’08, Centro Habitat, Cúria, Portugal, 2008, pp.103-108.
- [55] Dias, A., et al, “*Desenvolvimento de Um Bloco Cerâmico para a Construção Sustentável*”, Congresso de Inovação na Construção Sustentável CINCOS’08, Centro Habitat, Cúria, Portugal, 2008, pp.165-172.
- [56] <http://prelis.pt/> Acesso em: 02-04-2016
- [57] Dias, A., “*Uma breve retrospectiva de soluções de paredes de elementos cerâmicos*” Congresso – Paredes divisórias: Passado, presente e futuro, 2011, pp.37-55.
- [58] <http://wienerberger.fr/> [Acesso em:04-04-2016]
- [59] <http://www.alveolater.com/> [Acesso em:04-04-2016]
- [60] <http://www.danesilaterizi.it/> [Acesso em:22-04-2016]
- [61] <http://www.wienerberger.com/> [Acesso em:12-05-2016]
- [62] <http://www.unipor.com/> [Acesso em:19-05-2016]
- [63] <http://www.archdaily.com/778158/in-detail-heat-dispersing-brick-developed-in-colombia> [Acesso em:23-05-2016]
- [64] Lingling, X., et al, “*Study on Fired Bricks with Replacing Clay by Fly Ash in High Volume Ratio*”, Construction and Building Materials, Vol. 19, 2005, pp.243-247.
- [65] Cultrone, G., Sebastián, E., “*Fly ash addition in clayey materials to improve the quality of solid bricks*”, Construction and Building Materials, Vol.23, 2009, pp.1178-1184.

- [66] Saboya, F., et al, “*The Use of the Powder Marble By-Product to Enhance the Properties of Brick Ceramic*”, Construction and Building Materials, Vol. 21, 2007, pp.1950- 1960.
- [67] El-Mahllawy, M., “*Characteristics of acid resisting bricks made from quarry residues and waste steel slag*”, Construction and Building Materials, Vol.22, 2008, pp.1887-1896.
- [68] Mekki, H., et al, “*Valorization of Olive Mill Wastewater by its Incorporation in Building Bricks*”, Journal of Hazardous Materials, Vol. 158, 2008, pp.308-315.
- [69] Casa, J., et al, “*Valorisation of waste water from two-phase olive oil extraction in fired clay brick production*”, Journal of Hazardous Materials, Vol. 169, 2009, pp.271-278.
- [70] Cruz, J., “*Estudo de Blocos Cerâmicos Aditivados para Melhoria do Desempenho Térmico*”, Tese de Mestrado, Protocolo LNEC-IST, Lisboa, 2000.
- [71] Kohler, R., “*Use of Leather Residues as pore-forming agents for masonry bricks*”, Ziegelindustrie International, Vol. 58, 2002, pp.30-38.
- [72] Ducman, V., Kopar, T., “*The influence of different waste additions to clay-product mixtures*”, Materials and Technology, Vol.41, 2007, pp.289-293.
- [73] Demir, I., et al, “*Utilization of kraft pulp production residues in clay brick production*”, Building and Environment, Vol.40, 2005, pp.1533-1537.
- [74] Demir, I., “*An investigation on the production of construction brick with processed waste tea*”, Building and Environment, Vol. 41, 2006, pp.1274-1278.
- [75] Demir, I., “*Effect of organic residues addition on the technological properties of clay bricks*”, Waste Management, Vol.28, 2008, pp.622-627.
- [76] Monteiro, S., Vieira, C., “*Effect of oily waste addition to clay ceramic*”, Ceramics International, Vol.31, 2005, pp.353-358.
- [77] Monteiro, S., et al, “*Red Ceramic Industrial Products Incorporated with Oily Wastes*”, Construction and Building Materials, Vol. 21, 2007, pp.2007-2011.
- [78] Samara, M., et al, “*Valorization of stabilized river sediments in fired clay bricks: Factory scale experiment*”, Journal of Hazardous Materials, Vol.163, 2009, pp.701-710.
- [79] Sutcu, M., Akkurt, S., “*The Use of Recycled Paper Processing Residues in Making Porous Brick with Reduced Thermal Conductivity*”, Ceramics International, Vol. 35, 2009, pp.2625-2631.
- [80] Lin, K., “*The effect of heating temperature of thin film transistor-liquid crystal display (TFTLCD) optical waste glass as a partial substitute partial for clay in eco-brick*”, Journal of Cleaner Production, Vol.15, 2007, pp.1755-1759.

- [81] Dondi, M., et al, “*Recycling PC and TV Waste Glass in Clay Bricks and Roof Tiles*”, Waste Management, Vol. 29, 2009, pp.1945-1951.
- [82] Ajam, L., et al, “*Characterization of Tunisian Phosphogypsum and its Valorization in Clay Bricks*”, Construction and Building Materials, Vol. 23, 2009, pp.3240-3247.
- [83] Kazmi, S., et al, “*Manufacturing of sustainable clay bricks: Utilization of waste sugarcane bagasse and rice husk ashes*”, Construction and Building Materials, Vol. 120, 2016, pp.29-41.
- [84] Grilo, I., et al, “*Melhoramento do Comportamento mecânico e térmico de tijolos de alvenaria cerâmica aditivada com resíduos da indústria do alumínio*”, Construção Magazine, n°52, 2012, pp.21-23.
- [85] Santos, P., et al, “*Enhancement of the thermal performance of perforated clay brick walls through the addition of industrial nano-crystalline aluminium sludge*”, Construction and Building Materials, Vol. 101, 2015, pp.227-238.
- [86] Instituto Português da Qualidade (IPQ), “*Métodos de ensaio de blocos para alvenaria - determinação da resistência á compressão*”, NP EN 772-1:2002, Julho, 2002.
- [87] Instituto Português da Qualidade (IPQ), “*Métodos de ensaios de cimentos-determinação das resistências mecânicas*”, NP EN 196-1:2006, 2006.
- [88] Instituto Português da Qualidade (IPQ), “*Métodos de ensaio para alvenarias. Parte 1: Determinação da resistência á compressão*”, NP EN 1052-1:2002, Setembro, 2002.