

# **CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE ALVENARIAS DE BLOCOS DE SOLO-CIMENTO COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS**

**Gabriel Fernando Spuldaro**

Relatório Final da Dissertação apresentado à  
**Escola Superior de Tecnologia e de Gestão**  
**Instituto Politécnico de Bragança**

Para a obtenção do grau de Mestre em  
**Engenharia da Construção**

**Bragança, 2020**



**INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA**  
Escola Superior de Tecnologia e de Gestão



# **CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE ALVENARIAS DE BLOCOS DE SOLO-CIMENTO COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS**

**Gabriel Fernando Spuldaro**

Relatório Final da Dissertação apresentado à  
**Escola Superior de Tecnologia e de Gestão**  
**Instituto Politécnico de Bragança**

Para a obtenção do grau de Mestre em  
**Engenharia da Construção**

No âmbito da dupla diplomação com a  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**

Trabalho realizado sob orientação de  
**Eduarda Pires Luso**  
**Débora Macanjo Ferreira**  
**Rodrigo Scoczynski Ribeiro**

**Bragança, 2020**

# Agradecimentos

Quero agradecer a Deus, que me deu o dom da vida e sempre iluminou meus passos, possibilitando minha chegada até este momento. Aos meus pais Ironi e Cleia, que sempre foram meu porto seguro, minhas inspirações de força e de fé, sem os quais eu jamais chegaria tão longe.

A aqueles que me são mais próximos, meu irmão Lucas Spuldaro, meus demais familiares e amigos, que souberam compreender por vezes a minha ausência e me ouviram muitas vezes, falar sobre meu trabalho, sempre me dando forças para seguir em frente.

Às minhas orientadoras Professora Débora Ferreira e Professora Eduarda Luso, por sua disponibilidade e pelo seu entusiasmo na partilha de conhecimento. Ao meu coorientador Professor Rodrigo Ribeiro, por todo o acompanhamento e apoio prestado. Aos três eu agradeço tudo o que me ensinaram enquanto professores e todas as sugestões e conselhos que me deram ao longo do trabalho.

Aos técnicos e responsáveis pelo laboratório de Materiais de Construção e laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais do IPB, por sua disponibilidade e auxílio. Aos técnicos do Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho, por toda ajuda, incentivo e colaboração que me deram durante o programa experimental deste trabalho. À Lurdes Cruz e ao Guilherme Gontijo, por todo auxílio no processo de estudo da fabricação dos blocos de solo-cimento. Ao Leonardo Delgado, por sua ajuda e troca de ideias durante os ensaios de qualidade do ar.

Agradeço aos meus amigos e colegas, companheiros de percurso desde a graduação na UTFPR Guarapuava, pelas preciosas trocas de ideias e palavras de incentivo ao longo de todo o curso. São muitos nomes para se citar aqui, mas durante este mestrado fiz amigos que levarei comigo para toda a vida.

A todos agradeço e dedico o resultado deste trabalho.

# Resumo

No presente trabalho foram fabricados blocos de solo-cimento com adição de resíduos orgânicos, para avaliar o potencial de reutilização destes resíduos em blocos usados na construção de alvenarias de vedação. Os blocos foram confeccionados a partir de duas composições estudadas em trabalhos prévios, uma delas com a adição de resíduos orgânicos e outra sem resíduos, para objeto de comparação. Em virtude da heterogeneidade do resíduo orgânico adicionado aos blocos, foram realizados ensaios de medição de gases, em um ambiente controlado e submetido a presença dos blocos. Estes ensaios foram realizados com auxílio do analisador de gases *Gasera One Pulse* e apresentaram um contributo inicial para a análise da qualidade do ar interior em ambientes com a utilização destes blocos. Com os blocos de solo-cimento fabricados, foram construídos dois tipos de alvenarias: paredes de blocos com adição de resíduos, denominadas como provetes SCR, e paredes de blocos sem adição de resíduos, denominadas como provetes SC. Em ambos os tipos de parede utilizou-se mesma argamassa de assentamento, elaborada com os mesmos materiais dos blocos sem resíduos. Estas paredes foram submetidas ao ensaio de resistência à compressão, seguindo as recomendações apresentadas na norma EN 1052-1 [1]. As paredes SCR apresentaram uma resistência média à compressão de 3,13 MPa e as paredes SC apresentaram uma resistência média de 5,00 MPa. Apesar da menor resistência das paredes SCR, em relação as paredes SC, ao se comparar os resultados obtidos com os resultados encontrados por outros autores, para diferentes paredes de blocos de solo-cimento, concluiu-se que as alvenarias SCR apresentaram resultados acima da média. Além disso, o modo de ruptura das paredes SCR foi muito similar ao das paredes SC, quando submetidas ao excesso de carregamento, não sendo identificado nenhum comportamento anormal. Desta forma, concluiu-se que a adição do resíduo orgânico, aos blocos de solo-cimento, não é um impedimento para a aplicação destes na construção de alvenarias de vedação.

**Palavras-chave:** Alvenaria; blocos de solo-cimento; resíduo orgânico; qualidade do ar interior.

# Abstract

In the present work, soil-cement blocks were made with the addition of organic residues, to evaluate the reusing potential of these residues in blocks used for construction of non-load-bearing walls. The blocks were made using compositions that were studied in previous works. For comparison, two different compositions were manufactured, one with the addition of organic residues and other one without. Due to the heterogeneity of the organic waste added to the blocks, gas measurement tests were carried out in a controlled environment, on presence of the blocks. These tests were performed with the aid of the Gasera One Pulse, a gas analyser, and served as an initial contribution to the analysis of indoor air quality associated to the use of these blocks. With the manufactured soil-cement blocks, two types of masonry were built: masonry made with blocks with addition of waste, referred to as SCR specimens, and masonry made with blocks without addition residue, referred to as SC specimens. In both types of wall, the same mortar was used, made with the same materials as the blocks without residues. These walls were subjected to the compressive strength test, following the recommendations presented in EN 1052-1 [1]. SCR walls had an average compressive strength of 3.13 MPa and SC walls had an average strength of 5.00 MPa. Despite the lower resistance of SCR walls, compared to SC walls, when comparing the results obtained with the results found by other authors, for different masonry of soil-cement blocks, it was concluded that SCR masonry presented above average results. Furthermore, the rupture mode of SCR walls was very similar to rupture mode of SC walls and no abnormal behaviour was identified. Thus, it was concluded that the addition of organic waste to the soil-cement blocks would not be an obstacle to their application in the construction of non-load-bearing walls.

**Keywords:** Masonry; soil-cement blocks; organic waste; indoor air quality.

# Índice Geral

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>I</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>II</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>III</b>
<b>ÍNDICE GERAL</b> .....	<b>IV</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS</b> .....	<b>XI</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. Contextualização do tema e motivação do trabalho .....	1
1.2. Objetivos do trabalho .....	3
1.3. Organização da dissertação .....	3
<b>2. ESTADO DA ARTE</b> .....	<b>5</b>
2.1. Considerações iniciais.....	5
2.2. Construção em terra .....	5
2.3. Métodos de construção em terra .....	8
2.3.1. Taipa.....	8
2.3.2. Adobe .....	9
2.3.3. Blocos de Terra Compactada, BTC .....	10
2.4. Estabilização do solo para a fabricação dos BTC.....	11
2.5. Requisitos normativos para os blocos de solo-cimento .....	12
2.5.1. Normas brasileiras.....	13
2.5.2. Norma espanhola.....	14
2.6. Composições e a caracterização dos blocos de solo-cimento .....	16

2.6.1. Materiais que compõem os blocos .....	17
2.6.2. Proporções dos materiais nas composições dos blocos.....	20
2.7. Qualidade do ar no interior de edificações .....	22
2.8. Caracterização mecânica de alvenarias.....	23
2.8.1. Ensaio de resistência à compressão.....	24
2.8.2. Influência da argamassa de assentamento.....	25
2.8.3. Modos de ruptura de alvenarias .....	26
2.9. Alvenarias de blocos de solo-cimento .....	28
<b>3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>31</b>
3.1. Considerações Iniciais .....	31
3.2. Produção dos blocos de solo-cimento.....	31
3.3. Análise da qualidade do ar.....	37
3.4. Construção e caracterização mecânica das alvenarias de blocos de solo- cimento .....	42
3.4.1. Construção dos provetes de alvenaria .....	42
3.4.2. Ensaio de compressão axial das alvenarias .....	47
3.4.3. Ensaio de compressão da argamassa de assentamento .....	52
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>54</b>
4.1. Análise da qualidade do ar para os blocos de solo-cimento .....	54
4.1.1. Amônia (NH <sub>3</sub> ) .....	54
4.1.2. Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) .....	56
4.1.3. Metano (CH <sub>4</sub> ).....	59
4.1.4. Óxido nitroso (N <sub>2</sub> O) .....	60
4.2. Caracterização mecânica das alvenarias de blocos de solo-cimento .....	62
4.2.1. Argamassa de assentamento.....	62
4.2.2. Resistência à compressão das alvenarias .....	63
4.2.3. Modos de ruptura das paredes.....	68
<b>5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>72</b>
5.1. Considerações finais .....	72
5.2. Trabalhos futuros .....	73

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 75**

# Índice de Tabelas

Tabela 1 – Recomendações ABNT para o solo de blocos de solo-cimento.....	13
Tabela 2 – Requisitos ABNT para resistência à compressão e absorção de água de blocos de solo-cimento. ....	14
Tabela 3 – Dimensões correntes dos blocos de solo-cimento em [mm]. ....	14
Tabela 4 – Classificação de BTC em função da sua resistência à compressão. ....	15
Tabela 5 – Resumo de resultados obtidos no trabalho já realizado.....	16
Tabela 6 – Limites de consistência do solo. ....	17
Tabela 7 – Propriedades físicas do caulino. ....	18
Tabela 8 – Características do cimento.....	19
Tabela 9 – Composição e características do resíduo orgânico. ....	20
Tabela 10 – Proporções em massa dos blocos de solo-cimento.....	21
Tabela 11 – Teor de água ótimo das composições. ....	21
Tabela 12 – Limites de exposição humana a agentes químicos presentes no ar. ....	23
Tabela 13 – Resistência à compressão de alvenarias de BTC estudadas por diferentes autores. ....	29
Tabela 14 – Quantidades de cada material necessário para a produção de 1 bloco .....	33
Tabela 15 – Resumo das medições de gases realizadas. ....	39
Tabela 16 – Quantidades de cada material utilizado por amassadura de argamassa, em [g]. ....	44
Tabela 17 – Idade com a qual os provetes de alvenaria foram ensaiados. ....	52
Tabela 18 – Resistência à compressão da argamassa de assentamento.....	62
Tabela 19 – Resistência à compressão das alvenarias ensaiadas.....	63

Tabela 20 – Comparação dos resultados obtidos com os resultados de diferentes autores. 64

# Índice de Figuras

Figura 1 – Construções históricas feitas em terra ao redor do mundo. ....	6
Figura 2 – Construção de parede em taipa. ....	9
Figura 3 – Desmolde e secagem de blocos de adobe. ....	10
Figura 4 – Residência com alvenarias em BTC, Alentejo, Portugal. ....	11
Figura 5 – Diagrama da granulometria do solo. ....	15
Figura 6 – Zona recomendada para limites de consistência do solo. ....	15
Figura 7 – Curva granulométrica do solo. ....	18
Figura 8 – Instrumentação de alvenaria para ensaio à compressão. ....	25
Figura 9 – Estado de fissuração de alvenaria submetida a carregamento uniformemente distribuído. ....	27
Figura 10 – Tipos de fissuração de alvenaria por aparecimento de esforços à tração. ....	27
Figura 11 – Equipamento utilizado na produção dos blocos de solo-cimento. ....	32
Figura 12 – Dimensões em milímetros do bloco de solo-cimento fabricado. ....	32
Figura 13 – Balança Precisa® 30000D SCS. ....	33
Figura 14 – Pesagem individual dos materiais. ....	34
Figura 15 – Preparação final da mistura dos materiais para um bloco de solo-cimento. ....	35
Figura 16 – Processo de compactação e desmolde de um bloco de solo-cimento. ....	36
Figura 17 – Blocos de solo-cimento em câmara húmida. ....	37
Figura 18 – Equipamentos utilizados para realização dos ensaios de qualidade do ar. ....	38
Figura 19 – Etapas do ensaio de qualidade do ar: Bloco SC10R20 com 1 dia de cura. ....	40
Figura 20 – Etapas do ensaio de qualidade do ar: Bloco SC10R20 com 28 dias de cura. ..	40
Figura 21 – Etapas do ensaio de qualidade do ar: Bloco SC10 com 1 dia de cura. ....	41

Figura 22 – Etapas do ensaio de qualidade do ar: Bloco SC10 com 28 dias de cura. ....	41
Figura 23 – Dimensões dos provetes de alvenaria construídos. ....	43
Figura 24 – Corte dos blocos de solo-cimento. ....	43
Figura 25 – Etapas do assentamento de blocos para um provete de alvenaria. ....	46
Figura 26 – Aspeto final dos demais provetes de alvenaria. ....	47
Figura 27 – Regularização do topo da alvenaria. ....	48
Figura 28 – Alvenaria já regularizada e centralizada no pórtico de ensaio. ....	49
Figura 29 – Instrumentação dos LVDTs. ....	50
Figura 30 – Provete de alvenaria pronto para ser ensaiado. ....	51
Figura 31 – Retificação de topo dos cilindros de argamassa. ....	52
Figura 32 – Ensaio de compressão de um provete de argamassa. ....	53
Figura 33 – Resultados dos ensaios de qualidade do ar: Amônia (NH <sub>3</sub> ). ....	55
Figura 34 – Concentrações obtidas para o NH <sub>3</sub> e seus limites de exposição segundo a EN 1796. ....	56
Figura 35 – Resultados dos ensaios de qualidade do ar: Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ). ....	57
Figura 36 – Concentrações obtidas para o CO <sub>2</sub> . ....	58
Figura 37 – Resultados dos ensaios de qualidade do ar: Metano (CH <sub>4</sub> ). ....	59
Figura 38 – Concentrações obtidas para o CH <sub>4</sub> . ....	60
Figura 39 – Resultados dos ensaios de qualidade do ar: N <sub>2</sub> O. ....	61
Figura 40 – Curvas de tensão-deformação obtidas nos ensaios de compressão das paredes SC. ....	65
Figura 41 – Curvas de tensão-deformação obtidas nos ensaios de compressão das paredes SCR. ....	66
Figura 42 – Comparação das curvas de tensão-deformação das paredes SCR e SC. ....	67
Figura 43 – Modos de ruptura das paredes SCR após serem ensaiadas à compressão. ....	69
Figura 44 – Modos de ruptura das paredes SC após serem ensaiadas à compressão. ....	71

# Índice de Símbolos e Abreviaturas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AENOR – *Asociación Española de Normalización y Certificación*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

BTC – Blocos de Terra Compactada

CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono

CH<sub>4</sub> – Metano

ESTiG – Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Bragança

IPB – Instituto Politécnico de Bragança

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LVDT – Transdutor para medição de deslocamento linear

NBR – Norma Técnica Brasileira

NCI – *National Cancer Institute*

NH<sub>3</sub> – Amônia

NP – Norma Portuguesa

N<sub>2</sub>O – Óxido Nitroso

QAI – Qualidade do Ar Interior

SC – Solo e Cimento

SC<sub>10</sub> – Composição de blocos feitos de solo estabilizado com 10% de cimento

SCR – Solo, Cimento e Resíduo Orgânico

SC<sub>10</sub>R<sub>20</sub> – Composição de blocos feitos de solo estabilizado com 10% de cimento e com adição de 20% de resíduo orgânico

UNE – Norma Técnica Espanhola

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1. Contextualização do tema e motivação do trabalho

A indústria da construção civil tem um importante papel na criação e na aplicação de práticas que promovam um desenvolvimento mais sustentável para o meio ambiente. Isso porque, este sector representa um dos maiores consumidores de recursos naturais não renováveis do mundo, chegando a atingir um consumo de 3000 Mt de matérias-primas por ano [2]. Considerando que recursos naturais não renováveis são finitos e escassos, se faz necessário o estudo de técnicas construtivas mais eficientes e com menor impacto ao meio ambiente [3].

Além da exploração intensiva de recursos naturais, muitos dos materiais e técnicas convencionalmente empregues na construção civil não levam em conta o conceito de desenvolvimento sustentável. Sendo assim, os processos de fabricação, transporte e aplicação destes materiais resultam em altos consumos de energia e de geração de resíduos. Tudo isso dificulta o equilíbrio ambiental, condicionando o presente e pondo em risco a qualidade de vida das gerações futuras [4].

Nestas perspectivas, a construção em terra crua apresenta inúmeras vantagens a nível económico e ambiental, se comparada com as técnicas construtivas mais usuais nos dias de hoje. Dentre as técnicas de construção em terra, uma que tem se mostrado bastante promissora é o uso de blocos de terra compactada (BTC) para construção de alvenarias. Estes blocos não dependem de uma vasta gama de equipamentos em sua fabricação, não sendo

necessário que passem por nenhum processo de combustão, o que reduz significativamente o consumo energético e a emissão de gases poluentes como o CO<sub>2</sub> [2].

A grande variabilidade dos solos existentes é um dos critérios que impedem uma maior difusão da técnica dos BTC. Na maioria dos casos, o solo deve passar por um processo de estabilização com algum aglutinante químico, como por exemplo o cimento, para que sejam garantidas as características físico-químicas necessárias desse material. Por esta razão, o BTC é também conhecido como bloco de solo-cimento, definido na NBR 8491 [5] como um *“componente de alvenaria constituído por uma mistura homogênea, compactada e endurecida de solo, cimento Portland, água e, eventualmente, aditivos”*.

Como o bloco de solo-cimento representa uma técnica construtiva com menor impacto ao meio ambiente, é crescente o número de estudos que buscam a aplicação desta técnica na produção de blocos ecológicos. Em um desenvolvimento sustentável, as práticas de reutilização e reciclagem de materiais são fundamentais, evitando desperdícios e potencializando a economia. Com este intuito, a introdução de diversos tipos de resíduos, nas composições de blocos de solo-cimento, tem sido avaliada como uma forma de reciclagem destes materiais, agregando aos blocos um cunho ainda mais sustentável [6].

Recentemente, no Instituto Politécnico de Bragança (IPB), Nepomuceno [7] estudou composições de solo-cimento com adição de resíduos orgânicos, para avaliar o potencial de recuperação destes resíduos na fabricação de blocos ecológicos. O resíduo usado foi fornecido pela empresa Resíduos do Nordeste na sua granulometria mais fina, previamente triturado. Foram desenvolvidas duas composições com os mesmos materiais, uma delas com adição de resíduos orgânicos e outra sem, que foram submetidas a ensaios de resistência à compressão, de absorção de água e de durabilidade. Com estes ensaios, observou-se que os provetes com adição de resíduos apresentaram uma diminuição da sua resistência à compressão, em relação aos provetes sem a adição do resíduo. Entretanto, os resultados mostraram que as duas composições respeitam os valores exigidos por normas que regulamentam o uso de blocos de solo-cimento, nomeadamente, as normas brasileira (NBR 8491 [5]), espanhola (UNE 41410 [8]) e alemã (DIN 18945 [9]).

Uma vez que, os blocos de solo-cimento com incorporação de resíduos orgânicos alcançaram as exigências normativas, se faz necessário o estudo destes blocos na prática, ou seja, aplicados em alvenarias, para assim agregar uma maior confiabilidade ao uso desse material na construção civil.

## 1.2. Objetivos do trabalho

Este trabalho pretende dar continuidade aos trabalhos já desenvolvidos no IPB, sendo assim, pretende-se analisar o comportamento mecânico de alvenarias construídas com os blocos de solo-cimento com incorporação de resíduos orgânicos. Pretende-se ainda dar um contributo para a análise da qualidade do ar interior em ambientes sujeitos a presença dos blocos. Portanto, os objetivos específicos deste trabalho são:

- Fabricar blocos de solo-cimento com adição de resíduos orgânicos a partir de composições previamente estudadas;
- Realizar um ensaio de medição de gases emitidos em um ambiente com a presença dos blocos de solo-cimento fabricados;
- Realizar o ensaio de resistência à compressão para dois tipos de alvenarias: uma construída com blocos de solo-cimento com adição de resíduos orgânicos e outra com blocos feitos com os mesmos materiais, porém sem adição de resíduos;
- Comparar os resultados obtidos nos ensaios das paredes com blocos com resíduos, com as paredes de blocos sem resíduos, e também com paredes de blocos de solo-cimento estudadas por diferentes autores.

## 1.3. Organização da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos, conforme é descrito na sequência.

No Capítulo 1 apresenta-se uma breve introdução sobre o tema, assim como a motivação para o estudo de alvenarias de blocos de solo-cimento com incorporação de resíduos orgânicos. Neste capítulo são apresentados ainda os objetivos almejados por esta dissertação e a maneira como a mesma está estruturada.

No Capítulo 2 é efetuada uma revisão bibliográfica que dá enquadramento teórico aos temas abordados nesta dissertação.

No Capítulo 3 explicam-se todos os procedimentos e ensaios realizados durante o programa experimental deste trabalho.

No Capítulo 4 são apresentados e discutidos todos os resultados obtidos durante o programa experimental.

No Capítulo 5 são expostas as conclusões obtidas com o presente trabalho e se faz uma breve análise de possíveis trabalhos futuros, com o intuito de dar continuidade a este tema.

# Capítulo 2

## Estado da Arte

### 2.1. Considerações iniciais

Neste capítulo serão apresentadas todas as informações que darão o enquadramento teórico necessário para justificar o programa experimental e a discussão de resultados. A informação está disposta de modo a explicar o contexto histórico da terra como um material de construção, assim como os métodos de construção que a utilizam, com foco nos blocos de terra compactada (BTC) e na caracterização mecânica de alvenarias construídas com este material.

### 2.2. Construção em terra

A construção em terra é uma prática milenar utilizada pelo homem desde os primórdios da civilização. Não se pode dizer ao certo a data em que a terra começou a ser utilizada como um material de construção, mas existem evidências de obras datadas de 7.500 a.C. que foram feitas de blocos de adobe, o que indica a utilização desse material cerca de 10.000 anos atrás [10].

O uso da terra na construção pode ser observado em diferentes estruturas de diferentes períodos históricos ao redor de todo o mundo, isso devido à abundância desse material. Há elementos históricos construídos em terra com milhares de anos como templos, igrejas, pirâmides e até mesmo cidades inteiras, que trespassaram gerações e podem ainda ser observados nos dias de hoje. A Muralha da China é um exemplo de estrutura, que hoje é

considerada uma das maravilhas do mundo moderno, na qual foram construídos longos trechos em terra compactada, estes que vieram a ser revestidos com alvenaria de pedra mais tarde [2], [10].

Na Figura 1 observam-se algumas das diversas obras espalhadas por todo o mundo que utilizaram a terra como material em alguma etapa de sua construção e que perduram até aos dias de hoje.



(a) Trecho em terra na Muralha da China.



(b) Pirâmide do Sol de Teotihuacan, México.



(c) Edifícios feitos em adobe, Shibam, Iémen.



(d) Castelo de Paderne, Algarve, Portugal.

Figura 1 – Construções históricas feitas em terra ao redor do mundo.

Fonte: Adaptado de [2], [11].

O fato de existirem tantas obras milenares executadas através de técnicas de construção em terra evidencia a importância histórica e o quão versátil e durável este material pode ser. Segundo Berge [10], mais de 30% da população mundial vive em habitações feitas de terra, principalmente em países que estão em desenvolvimento e que não possuem uma forte industrialização. Entretanto, nas últimas décadas a construção em terra tem experimentado um renascimento devido às vantagens e benefícios que este material pode trazer para a construção civil contemporânea.

Os argumentos ambientais devido ao cunho ecológico da construção em terra são os principais motivadores para a busca e aperfeiçoamento de técnicas que utilizam esse material. Contudo, a construção em terra, quando bem aplicada, pode apresentar vantagens técnicas, econômicas, culturais e sociais, comparada com as técnicas construtivas hoje vistas como convencionais. De entre os principais benefícios do uso da terra na construção, diferentes autores como Torgal, Eires e Jalali [2] e Adam e Agib [12] enumeram as seguintes como as mais importantes:

- Do ponto de vista ecológico: a terra é uma matéria-prima de fácil acesso, disponível em abundância, da qual podem ser feitos materiais que não requerem nenhum processo de queima. Por serem utilizados em seu estado cru, não provocam poluição e a emissão de dióxido carbono desde a sua extração até seu tratamento é baixa. Por se tratar de um material natural, o retorno de materiais de terra para a natureza não tem impacto negativo, sendo que os materiais não estabilizados com outras adições podem ser simplesmente desagregados e depositados no ambiente.

- Do ponto de vista técnico: a terra é um material versátil que pode ser implementado em vários elementos de uma edificação, é também um material incombustível que apresenta excelentes propriedades de resistência ao fogo e permite que edificações construídas em terra consigam manter um balanço da temperatura interna bastante satisfatório. As propriedades higroscópicas do material permitem uma certa absorção de humidade controlando a humidade relativa do ar no interior das edificações trazendo benefícios para a saúde dos usuários.

- Do ponto de vista econômico: utilizando a terra como um material local o custo de aquisição e de transporte da matéria-prima é significativamente reduzido. O processamento desse material para a utilização na construção não requer grande quantidade de mão de obra e nem muitos equipamentos, isso acarreta um baixo consumo energético na produção e manuseio dos solos.

- Do ponto de vista cultural e social: a construção em terra tem um enorme potencial arquitetônico, que permite gerar uma identidade visual única nos lugares onde ela se encontra, além disso, faz parte da história da construção antiga em diversas regiões do mundo e conservar essa tradição enaltece a cultura local. Existem ainda lugares em que o solo é um dos únicos materiais em abundância, tornando possível a utilização desse material

na construção de habitações com custo reduzido, acessíveis para os grupos sociais de menor poder econômico.

Apesar de todas as vantagens supracitadas, as técnicas de construção em terra ainda possuem pouca aceitação por grande parte da sociedade, sendo vistos como materiais de qualidade inferior. Isso ocorre devido ao facto que em muitos países existe uma falta de normas que regulem o uso do solo como um material de construção. Assim como acontece com qualquer outro material, o uso da terra na construção civil tem suas vantagens e também suas limitações. Por limitações podem-se nomear algumas como a sua baixa resistência à tração e flexão, a baixa resistência ao impacto e a durabilidade reduzida em situações de proteção inadequada, ou falta de manutenção apropriada, especialmente em regiões com muita humidade [12].

Para que o uso da terra na construção seja bem aplicado, tirando proveito de todas as vantagens e superando as limitações que esse material pode oferecer, faz-se necessário ter conhecimento não só sobre o material em si, mas também sobre os métodos construtivos nos quais a terra é utilizada.

### **2.3. Métodos de construção em terra**

São inúmeros os métodos conhecidos para a construção de paredes de terra crua, contudo, em relação ao seu modo de execução, todos esses métodos podem ser resumidos em três grupos principais, que são: elementos em alvenaria, monolíticos e mistos. As paredes em alvenaria são compostas por blocos individuais conectados entre si por uma argamassa, sendo que de entre as técnicas mais utilizadas nesse sistema estão o adobe e os blocos de terra compactada. No caso de paredes monolíticas a terra é compactada em moldes de madeira, formando um só elemento, como é o caso da construção em taipa. Já em paredes mistas, a terra é utilizada somente como preenchimento de estruturas geralmente feitas em madeira ou bambu [13]. Nas subseções seguintes serão apresentadas as técnicas mais usuais de construção em terra.

#### **2.3.1. Taipa**

Consiste numa técnica de construção de paredes monolíticas com a utilização de um solo mais seco, com consistência de terra húmida, tornando o uso desta técnica mais

frequente em regiões de climas quentes e secos, sem abundância de água [14]. A elevação das paredes em taipa é feita *in situ*, onde se coloca a terra entre tábuas de madeira, que funcionam como uma cofragem, e se vai compactando a terra em várias camadas. Essa compactação pode ser obtida manualmente, com o auxílio de um pilão, ou ainda de forma mecanizada com o uso de compressores pneumáticos [15]. As camadas são compactadas até o total preenchimento da cofragem, sendo esta removida e reerguida para a execução das camadas superiores até que a parede alcance a altura desejada [16]. Na Figura 2 observa-se uma parede em taipa executada através de compactação manual.



Figura 2 – Construção de parede em taipa.  
Fonte: [17].

### 2.3.2. Adobe

O adobe é um bloco feito a partir da moldagem de uma mistura de terra em estado plástico, que pode ser confeccionado à mão ou com auxílio de um molde. Adobes não necessitam de nenhum processo de cozadura em sua fabricação, são desmoldados ainda em seu estado fresco e colocados para secar ao sol (Figura 3). No método mais convencional utilizam-se moldes de madeira, usualmente retangulares, que possibilitam a fabricação de dois ou mais blocos simultaneamente. Como a técnica de construção em adobe requer o uso de um solo argiloso com alto teor de água, durante a secagem dos blocos podem aparecer fissuras devido a retração do material, sendo de prática comum a incorporação de palha ou outras fibras na mistura dos blocos para reforça-los e evitar a fissuração [15], [18].



Figura 3 – Desmolde e secagem de blocos de adobe.  
Fonte: [19].

O assentamento de adobes para a execução de uma alvenaria deve ser feito com a utilização de uma argamassa que tenha a composição semelhante ao próprio bloco, para garantir uma boa ligação entre os materiais e manter o mesmo grau de retração, evitando a fissuração e o possível destacamento de material [2].

### **2.3.3. Blocos de Terra Compactada, BTC**

Os blocos de terra compactada (BTC) são elementos de alvenaria com dimensões regulares, produzidos através da compactação de terra num estado húmido, com o auxílio de prensas manuais ou automatizadas. Após a compactação da terra, os BTC são imediatamente desmoldados e não requerem nenhum processo de cozedura. Portanto, a coesão e resistência do BTC depende da pressão de compactação exercida na sua produção [20].

Dentre as técnicas de construção em terra a alvenaria em BTC é a mais utilizada nos dias de hoje, sendo vista como uma evolução do adobe. Isto porque, diferentemente do adobe, na fabricação dos BTC a terra deixa de ser regularizada à mão e passa a ser comprimida dentro do molde pelo uso de prensas. Essa compactação reduz o número de vazios, diminui a porosidade e atribui ao bloco um aumento considerável de sua resistência mecânica [21].

O solo utilizado na fabricação dos BTC apresenta uma consistência húmida, semelhante ao da taipa, possibilitando a formação de blocos com boa resistência, porém mais pesados que os adobes [2]. Na Figura 4 pode ser observado o uso da técnica de construção em BTC para as alvenarias de vedação de uma residência em Portugal.



Figura 4 – Residência com alvenarias em BTC, Alentejo, Portugal.  
Fonte: [2].

O método de construção de alvenarias em BTC é bem mais recente se comparado com as técnicas tradicionais de construção em terra já apresentadas. A utilização de prensas específicas na fabricação dos BTC, sejam elas mecânicas ou hidráulicas, concedeu a esta técnica um grau de industrialização na produção de materiais em terra, gerando um produto com dimensões e formas mais padronizadas e com menor variabilidade do material. A utilização destas prensas permite a produção de diferentes tipos de blocos, sendo de uso mais comum os blocos maciços, os vazados com furos verticais e os de encaixe, do tipo *interlocking*. As dimensões dos BTC variam muito de país para país, pelo que, são em função dos requisitos normativos que regulamentam o uso dos blocos e também dos moldes da prensa utilizada. Apesar de ser uma técnica mais recente, construções em BTC podem ser facilmente encontradas em países como França, Zimbábue, Brasil, Austrália e Alemanha, onde esse método tem sido usado como uma alternativa de construção sustentável [20], [22].

## 2.4. Estabilização do solo para a fabricação dos BTC

Devido à grande heterogeneidade entre os diversos tipos de solos existentes, podem-se encontrar com frequência solos naturais que não possuem os requisitos necessários para cumprir adequadamente uma função como material de construção. Nesses casos torna-se necessário recorrer a técnicas de estabilização do solo, de modo a alterar suas características e melhorar seu comportamento, tornando o solo capaz de responder de forma satisfatória as solicitações previstas. A estabilização dos solos tem como principal objetivo promover a melhoria das suas propriedades mecânicas e de durabilidade [6].

Com o intuito de gerar melhorias nas propriedades físico-químicas do material, conferindo aos BTC ganhos em resistência mecânica, impermeabilidade e durabilidade, a terra pode passar por processos de estabilização granulométrica e química. A estabilização granulométrica se dá através da mistura de solos em diferentes proporções, enquanto a estabilização química é feita com a adição de algum aglomerante, geralmente cimento ou cal [23]. No caso do BTC, o solo passa também por uma estabilização mecânica promovida pela compactação dos blocos, o que altera a estrutura do solo afetando sua densidade, porosidade, permeabilidade e resistência [24].

A estabilização química do solo através da incorporação de cimento é uma prática bastante comum que mostra bons resultados relacionados aos BTC. Essa prática aumenta a estabilidade dimensional, a resistência à água e a resistência mecânica do material. Os benefícios gerados pela adição de cimento dependem de fatores como a composição do solo, o grau de compactação, a humidade e o teor de cimento incorporado. Na maior parte dos casos práticos, o teor de cimento incorporado nos BTC fica entre 4% e 10% da massa do solo seco [13].

Dos diversos produtos químicos utilizados para a estabilização do solo, o cimento é o de utilização mais generalizada, devido à sua maior disponibilidade e adequabilidade a uma maior variedade de solos [7]. Esse é o motivo pelo qual é comum que os BTC sejam também chamados de blocos de solo-cimento.

Os blocos de solo-cimento podem apresentar resistência e durabilidade muito maiores do que os BTC não estabilizados. Este aumento do desempenho do material, devido a estabilização do solo, permite a adição de resíduos na composição dos blocos sem interferir nas suas condições de uso. Isto faz dos blocos de solo-cimento um material ainda mais ecológico, visto que reduz os danos causados ao meio ambiente quando possibilita a reutilização de materiais descartáveis. Contudo, vale ressaltar que a incorporação de diferentes resíduos nas composições dos blocos, alteram as suas propriedades e geram a necessidade verificar se os blocos ainda cumprem os requisitos necessários[6].

## **2.5. Requisitos normativos para os blocos de solo-cimento**

O crescente interesse na utilização da terra em técnicas construtivas sustentáveis gera a necessidade de documentos normativos que regulem o uso desse material, agregando

confiabilidade aos blocos de solo-cimento. Portugal ainda não possui normas que regulamentem o uso destes blocos, contudo, já existem normas em curso em vários outros países, nomeadamente Brasil, Alemanha, França, Austrália, Espanha, entre outros. A existência de documentos regulamentares é essencial para a melhor aceitação do material, porém, as divergências nos critérios utilizados nas regulamentações em vigor ainda são uma barreira para difusão do uso dos blocos de solo-cimento [20].

Nesta seção serão apresentados alguns requisitos mínimos para a formulação e utilização de blocos de solo-cimento, citando as prescrições normativas feitas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e, como objeto de comparação, também serão referidos alguns dos requisitos da norma espanhola regida pela Associação Espanhola de Normalização e Certificação (AENOR).

### 2.5.1. Normas brasileiras

O primeiro requisito a ser estabelecido para a produção de blocos de solo-cimento é a caracterização do solo utilizado. Os critérios mais importantes para essa caracterização são a granulometria e os limites de consistência do solo, como o limite de liquidez e limite de plasticidade [17].

A análise granulométrica consiste na determinação da percentagem por tamanho de partículas presentes em uma amostra de solo, sendo realizada através do peneiramento do material em peneiras com diferentes tamanhos de abertura de malha. Quanto aos limites de consistência, o limite de liquidez corresponde ao teor de água relacionado a transição do estado plástico para o estado líquido da amostra de solo e o limite de plasticidade corresponde ao teor de água relacionado a transição do estado plástico para o sólido [12].

Os requisitos quanto a granulometria, limite de liquidez e índice de plasticidade que um solo utilizado na fabricação de blocos de solo-cimento deve atender encontram-se resumidos na Tabela 1, segundo o prescrito pela norma brasileira NBR 10833 [25].

**Tabela 1 – Recomendações ABNT para o solo de blocos de solo-cimento.**

Requisito	Valor
Material passante na peneira de 4,75 mm	100%
Material passante na peneira de 0,075 mm	10% a 50%
Limite de liquidez	≤ 45%
Índice de Plasticidade	≤ 18%

Fonte: Adaptado de [25].

Segundo as recomendações da NBR 8491 [5], os blocos de solo-cimento utilizados na execução de alvenarias sem função estrutural devem ainda atender alguns requisitos mínimos de resistência à compressão e à absorção de água. Esses requisitos devem ser considerados para blocos com o mínimo de sete dias de idade e as amostras ensaiadas devem atender os valores apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2 – Requisitos ABNT para resistência à compressão e absorção de água de blocos de solo-cimento.**

Critério	Individual	Média	Unidade
Resistência à compressão	$\geq 1,7$	$\geq 2,0$	MPa
Absorção de água	$\leq 22$	$\leq 20$	%

Fonte: Adaptado de [5].

Quanto à geometria dos blocos de solo-cimento, estes podem ser maciços ou vazados com furos verticais. Segundo as recomendações da NBR 8491 [5], as dimensões que os blocos devem atender são as apresentadas na Tabela 3, entretanto, a norma estabelece que podem ser utilizados blocos com dimensões diferentes, desde que o bloco permaneça com altura menor do que a sua largura e por largura entende-se a menor dimensão da face de assentamento do bloco. As arestas dos blocos devem ser bem definidas, sem quaisquer deformações que possam comprometer o assentamento, a durabilidade e a resistência das alvenarias.

**Tabela 3 – Dimensões correntes dos blocos de solo-cimento em [mm].**

Comprimento	Largura	Altura
200	100	50
240	120	70

Fonte: Adaptado de [5].

## 2.5.2. Norma espanhola

A norma espanhola UNE 41410 [8] estabelece requisitos e procedimentos de ensaio para BTC estabilizados e não estabilizados quimicamente. No caso de solos estabilizados com cimento, cal ou gesso, a norma limita a quantidade máxima destes materiais em 15% da massa seca do BTC.

Segundo a UNE 41410 [8], as principais características dos solos utilizados na fabricação de BTC são a sua granulometria, sua plasticidade e o tipo de argila. A classificação do solo pode ser feita em intervalos de acordo com a sua granulometria. Os solos cuja granulometria e consistência se enquadram dentro das áreas sombreadas da Figura

5 e da Figura 6, são os de uso mais recomendado, pois são os que apresentam os resultados mais satisfatórios para a maioria dos casos. A norma ainda especifica que solos com percentagem de argila inferior a 10% não são permitidos.

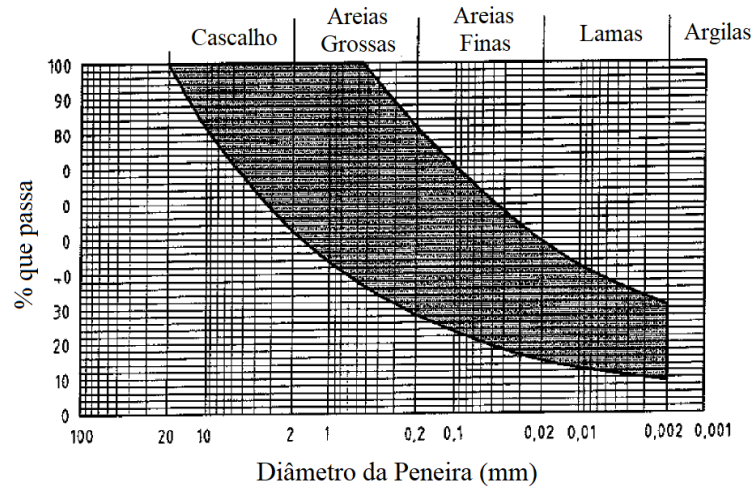


Figura 5 – Diagrama da granulometria do solo.  
Fonte: Adaptado de [8].

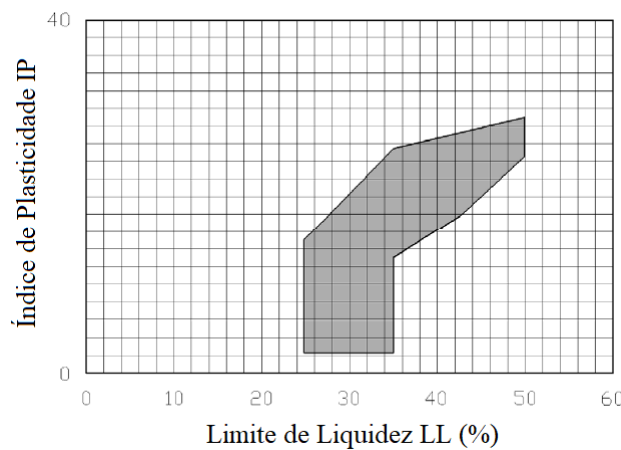


Figura 6 – Zona recomendada para limites de consistência do solo.  
Fonte: Adaptado de [8].

Quanto a resistência à compressão, a UNE 41410 [8] permite classificar os blocos em 3 classes distintas, nomeadamente BTC 1, BTC 2 e BTC 3. A resistência à compressão dos BTC deve atender aos valores médios apresentados na Tabela 4 e não se pode admitir qualquer BTC com resistência inferior a 0,8 vezes os valores apresentados.

**Tabela 4 – Classificação de BTC em função da sua resistência à compressão.**

Classificação	Resistência à Compressão (MPa)
BTC 1	1,3
BTC 2	3,0
BTC 3	5,0

Fonte: Adaptado de [8]

## 2.6. Composições e a caracterização dos blocos de solo-cimento

O presente trabalho de investigação sucedeu a outros trabalhos previamente realizados, onde a composição dos blocos de solo-cimento foi estudada. Esta seção aborda o atual estado do conhecimento em relação à composição e à caracterização das misturas usadas na fabricação dos blocos.

Nepomuceno [7], avaliou as características mecânicas, de durabilidade e de resistência a altas temperaturas de blocos de solo-cimento, utilizando corpos de prova cilíndricos confeccionados em composições distintas. As composições estudadas serviram para considerar os efeitos da adição de resíduos orgânicos em uma delas, em comparação com outra que não possuía a adição de resíduos orgânicos, contendo apenas solo e cimento e usada como referência. A Tabela 5 apresenta um resumo dos resultados obtidos, onde o termo SC<sub>10</sub> representa a composição de referência e o termo SC<sub>10</sub>R<sub>20</sub> representa a composição de solo-cimento com adição de resíduos orgânicos. A resistência à compressão foi avaliada para a temperatura ambiente e para diferentes patamares de temperatura.

**Tabela 5 – Resumo de resultados obtidos no trabalho já realizado.**

Composição	Ensaio	Média	Unidade	
SC <sub>10</sub>	Absorção de água	9,15	%	
	Resistência à compressão		7,38	MPa
		100°C	7,60	MPa
		200°C	11,82	MPa
		400°C	17,89	MPa
		600°C	18,88	MPa
SC <sub>10</sub> R <sub>20</sub>	Absorção de água	12,31	%	
	Resistência à compressão		4,09	MPa
		100°C	3,45	MPa
		200°C	5,64	MPa
		400°C	6,28	MPa
		600°C	11,90	MPa

Nota: Todos os valores supracitados referem-se aos ensaios realizados com provetes que já possuíam 28 dias de cura.

Fonte: Adaptado de [7].

Além da comparação das composições entre si, usando a mistura sem adição de resíduos como referência, Nepomuceno [7] comparou os resultados obtidos em sua pesquisa

com os parâmetros normativos de três países, Brasil, Alemanha e Espanha, em provetes cilíndricos. Todas as composições obtiveram bons resultados, e apesar da composição com resíduo orgânico apresentar perda de resistência em relação à sem resíduo, ambas atenderam aos padrões recomendados quanto à resistência à compressão e à absorção de água por imersão. A autora ainda destaca que quando submetidos a altas temperaturas, os provetes tiveram um aumento da sua resistência à compressão.

### 2.6.1. Materiais que compõem os blocos

Os blocos de solo-cimento são resultantes da compactação de uma mistura homogênea de solo, cimento, água e, neste caso, resíduos orgânicos. Com o objetivo de avaliar o potencial de recuperação dos resíduos orgânicos e minimizar os fatores que poderiam influenciar os resultados finais, dada a heterogeneidade dos solos naturais, optou-se pela utilização de um solo artificial. A mistura de solo adotada é composta por areia e caulino nas proporções de 70% e 30%, respectivamente, escolhidas com o cuidado de se aproximar a composição de solos naturais encontrados na região norte de Portugal, onde predominam os solos residuais graníticos [7].

- Solo

Com a junção de areia e caulino, para a fabricação do solo artificial, obteve-se uma Areia Argilosa (SC), segundo a classificação unificada proposta pela norma da ASTM D2487 [26]. A análise granulométrica do solo foi feita de acordo com a especificação do LNEC E239 [27], com a qual foi obtida a curva granulométrica apresentada na Figura 7. Foram ainda determinados os limites de consistência desse solo, segundo a norma portuguesa NP 143 [28], que estão expostos na Tabela 6.

**Tabela 6 – Limites de consistência do solo.**

Propriedade	Valor	Unidade
Limite de Liquidez	43,5	%
Limite de Plasticidade	25,8	%
Índice de Plasticidade	17,7	%

Fonte: Adaptado de [7]

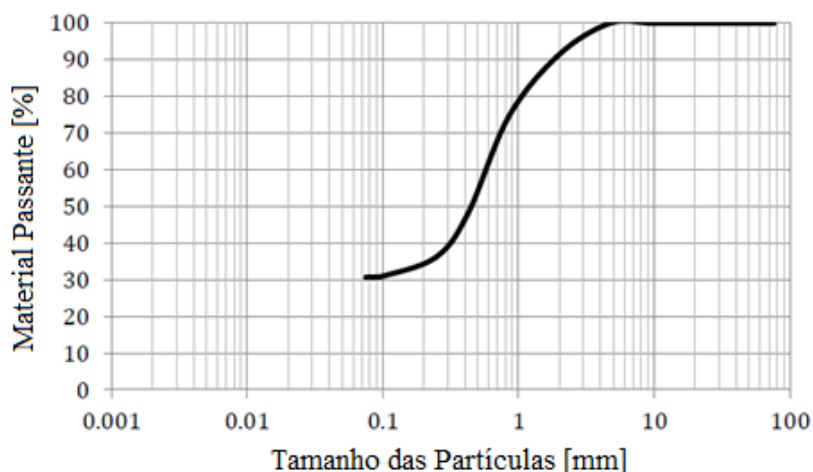


Figura 7 – Curva granulométrica do solo.  
Fonte: Adaptado de [7].

A areia utilizada na mistura de solo foi adquirida na região de Bragança, passou um processo de secagem e foi armazenada, protegida contra a humidade. Foi realizado um ensaio para a determinação da massa volúmica das partículas secas desta areia, seguindo os procedimentos da norma portuguesa NP 954 [29], com o qual obteve-se o valor de 2,58 g/cm<sup>3</sup>.

O caulino é um material de textura muito fina, que apresenta uma notável reatividade com a água, assim como qualquer mineral de argila. O caulino utilizado na mistura de solo dos blocos foi o Mibal-A, das minas de Barqueiros, que é um caulino do tipo seco, fornecido em sacos de 20 Kg. As propriedades físicas deste material, segundo a ficha técnica do produto [30], estão apresentadas na Tabela 7.

**Tabela 7 – Propriedades físicas do caulino.**

Propriedade	Valor	Unidade
Humidade	< 2	%
Densidade	2,4 a 2,7	g/cm <sup>3</sup>
Granulometria		
< 30 µm	99 ± 3	%
< 10 µm	92 ± 5	%
< 5 µm	81 ± 5	%
< 2 µm	68 ± 6	%

Fonte: Adaptado de [30].

- Cimento

A escolha do cimento, utilizado na estabilização da mistura de solo para os blocos, foi feita de acordo com a disponibilidade local. Foi escolhido o cimento Portland de Calcário do tipo CEM II/B-L 32,5N, embalado em sacos de 25 Kg, que é utilizado para obras gerais da construção civil. As características desse material, fornecidas por seu fabricante, encontram-se na Tabela 8.

**Tabela 8 – Características do cimento.**

	Especificação	Unidade
Composição		
Clínquer Portland	65 a 79	%
Calcário	21 a 35	%
Outros constituintes	0 a 5	%
Propriedades Químicas		
Teor de Sulfatos (SO <sub>3</sub> )	≤ 3,50	%
Teor de Cloretos	≤ 0,10	%
Propriedades Físicas		
Princípio de presa	≥ 75	minutos
Expansibilidade	≤ 10	mm

Fonte: Adaptado de [31].

Além das informações apresentadas na Tabela 8, o fabricante também adverte que a resistência característica à compressão (resistência de referência) adquirida pela utilização desse cimento é garantida a partir dos 28 dias de cura [31].

- Resíduo Orgânico

O resíduo orgânico, incorporado na mistura dos blocos de solo-cimento, é proveniente da recolha e tratamento de resíduos sólidos urbanos e foi fornecido pela empresa Resíduos do Nordeste, localizada em Mirandela. Juntamente com o material, a empresa forneceu uma ficha técnica [32] da composição e algumas propriedades do resíduo já tratado, estas informações são apresentadas na Tabela 9. Os resíduos foram usados da mesma maneira que foram recebidos, sem passar por nenhuma seleção ou controle granulométrico [7].

Tabela 9 – Composição e características do resíduo orgânico.

Elemento/Propriedade	Valor	Unidade
Matéria orgânica	48,8	%
Carbono orgânico total	27,1	%
Azoto total (N)	1,3	%
Fósforo total (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	1,1	%
Potássio total (K <sub>2</sub> O)	1,4	%
Cálcio total (Ca)	4,9	%
Magnésio total (Mg)	0,8	%
Enxofre total (S)	06	%
Boro total (B)	43,4	mg/Kg
Cádmio total (Cd)	0,9	mg/Kg
Crómio total (Cr)	130	mg/Kg
Cobre total (Cu)	209,7	mg/Kg
Mercúrio total (Hg)	0,4	mg/Kg
Níquel total (Ni)	49	mg/Kg
Chumbo total (Pb)	110	mg/Kg
Zinco total (Zn)	453	mg/Kg
<i>Escherichia coli</i> (nº/g de matéria fresca)	460	-
Inertes antropogênicos	0,7	%
Densidade	0,45	g/cm <sup>3</sup>
Condutividade elétrica	2,5	mS/cm
pH	8,0	-

Fonte: Adaptado de [32].

A empresa Resíduos do Nordeste está localizada em Mirandela, mas engloba a recolha de resíduos em mais de 10 municípios, que representam cerca de 143.777 habitantes e que têm uma produção de resíduos estimada em 140 toneladas por dia, o que equivale a mais de 50 mil toneladas por ano [33].

- Água

A água é um componente essencial das misturas de solo-cimento, uma vez que o cimento é um aglomerante hidráulico, que precisa dela em seu processo de hidratação. A água utilizada nas composições estudadas foi a fornecida pela rede pública de Bragança [7].

## 2.6.2. Proporções dos materiais nas composições dos blocos

Após a escolha e caracterização dos materiais, definir a proporção ótima das suas quantidades para a confecção dos blocos de solo-cimento é uma peça fundamental para um

bom resultado final. A nomenclatura das composições usadas foi escolhida de modo a facilitar sua identificação, por exemplo, na composição SC<sub>10</sub>R<sub>20</sub>, S representa a parcela de solo, C<sub>10</sub> o cimento e sua respectiva percentagem (10%) e R<sub>20</sub> o resíduo e sua respectiva percentagem (20%). O teor de cimento foi fixado em 10% em relação a massa seca de solo, ou solo mais resíduo. Já a incorporação de resíduo orgânico foi feita substituindo 20% do volume de areia, da mistura de solo, pelo resíduo [7]. Assim, para a confecção de provetes cilíndricos, com 7 cm de diâmetro, aproximadamente 14 cm de altura e peso em média de 1,1Kg, as proporções em massa dos materiais utilizados são as apresentadas na Tabela 10.

**Tabela 10 – Proporções em massa dos blocos de solo-cimento.**

Composição	Solo		Resíduo Orgânico	Cimento	Unidade
	Areia	Caulino			
SC <sub>10</sub>	70,00	30,00	-	10,00	%
SC <sub>10</sub> R <sub>20</sub>	63,32	33,92	2,76	10,00	%

Fonte: Adaptado de [7].

O teor de água, incorporado nas composições para a fabricação dos blocos foi obtido através do ensaio de compactação Proctor, usando a compactação pesada, segundo a especificação do LNEC E197 [34]. Os valores encontrados estão na Tabela 11 e são referentes ao teor de água ótimo ( $\omega_{otm}$ ) para cada composição, representando a percentagem de água em relação à massa seca de cada bloco.

**Tabela 11 – Teor de água ótimo das composições.**

Composição	$\omega_{otm}$ (%)
SC <sub>10</sub>	10,20
SC <sub>10</sub> R <sub>20</sub>	9,30

Fonte: Adaptado de [7].

Em todas as etapas deste estudo prévio e em virtude da adição de resíduo orgânico com a incorporação de água na composição SC<sub>10</sub>R<sub>20</sub>, Nepomuceno [7] notou que os provetes feitos com essa composição, apresentavam frequentemente um odor desagradável, pelo que, sendo um fator bastante negativo pelo facto de ser um material com possível uso em blocos no interior das habitações, considerou-se ser da maior importância, antes de qualquer ensaio mecânico, o estudo da qualidade do ar num ambiente com a presença dos blocos.

## 2.7. Qualidade do ar no interior de edificações

Quando se trata de qualidade do ar, associada a saúde humana, geralmente pensa-se na poluição atmosférica existente no exterior das edificações. Entretanto, o número de poluentes, bem como sua concentração, pode ser mais elevado em ambientes internos do que no ar exterior. Isso ocorre devido a existência de fontes poluentes associadas aos materiais utilizados na construção das edificações. Tais materiais podem provocar uma alteração da qualidade do ar interior (QAI) e, quando presentes em alta concentração, têm efeitos nocivos na saúde dos utilizadores [2], [35].

De um modo geral, a construção em BTC não está associada a efeitos nocivos em termos de toxicidade do ar interior das edificações, visto que esses efeitos estão relacionados ao uso de materiais sintéticos [2]. Por outro lado, como constatado por Nepomuceno [7], os blocos de solo-cimento com incorporação de resíduos orgânicos podem apresentar um odor desagradável. A verificação se esse odor está, ou não, relacionado com a emissão de gases com efeito prejudicial à saúde humana, só pode ser feita através uma análise da QAI em ambientes feitos com esse material. No presente trabalho, esta análise foi feita com foco em quatro gases, nomeadamente, Amônia ( $\text{NH}_3$ ), Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ), Metano ( $\text{CH}_4$ ) e Óxido Nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ).

A QAI é um fenômeno complexo, pois trata-se de um fenômeno multidisciplinar, no qual contaminantes de origem física, química e biológica podem estar associados simultaneamente à composição do ar interior [36]. A análise da QAI pode ser feita através da monitorização da concentração de gases e de parâmetros ambientais, como a temperatura e humidade relativa, de forma contínua e em tempo real. Atualmente já existem vários equipamentos de monitorização da concentração de gases e partículas no mercado. Esses equipamentos apresentam alto grau de precisão, com uma extensa gama de medição de gases, mesmo em quantidades muito pequenas [37].

As concentrações dos gases são apresentadas, regra geral, em partes por milhão (ppm) ou até mesmo em partes por bilhão de ar (ppb), de acordo com o volume. A obtenção e análise desses dados, torna possível a comparação dos valores obtidos com os limites de exposição máxima do ser humano a esses gases. Com foco nos gases que serão analisados durante o programa experimental deste trabalho, na Tabela 12 estão apresentados os valores

limites de exposição profissional a agentes químicos existentes no ar em ambientes de trabalho, conforme os requisitos fixados na norma portuguesa EN1796 [38].

**Tabela 12 – Limites de exposição humana a agentes químicos presentes no ar.**

Substância	Valores Limite de Exposição	
	MP (*)	CD (**)
Amônia (NH <sub>3</sub> )	25 ppm	35 ppm
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	5000 ppm	-
Metano (CH <sub>4</sub> )	1000 ppm	-
Óxido Nitroso (N <sub>2</sub> O)	50 ppm	-

Notas: (\*) Média Ponderada de tempo em 8h de trabalho.  
(\*\*) Curta Duração referente a 15 minutos de exposição.

Fonte: Adaptado de [38]

A norma ainda expõe que os valores limites de exposição aos gases apresentados na Tabela 12 foram determinados em função dos danos que os indivíduos podem sofrer, quando expostos a concentrações superiores às apresentadas. Ou seja, tratam-se de limites de tolerância, que quando não respeitados podem acarretar irritação dos olhos, irritação das vias aéreas superiores e até mesmo afecção ao sistema nervoso central do indivíduo exposto [38].

## 2.8. Caracterização mecânica de alvenarias

Nas seções anteriores foram tratadas as características e requisitos normativos que blocos de solo-cimento devem apresentar, de modo a se estabelecer um grau de conhecimento acerca deste material. Contudo, além de conhecer bem o material, surge a necessidade de se entender como ele é utilizado numa técnica construtiva, ou seja, na execução de alvenarias. Sendo assim, nesta seção serão apresentadas algumas características de alvenarias e seus componentes, e também como se determina a resistência à compressão de alvenarias.

As alvenarias são elementos geralmente constituídos por unidades de blocos, unidos uns aos outros através de juntas de argamassa. Essa união entre dois materiais é feita para formar um elemento coeso e resistente, com capacidade de suportar esforços horizontais e verticais. Uma alvenaria pode ter função tanto estrutural como apenas de vedação [39].

Alvenarias são chamadas de vedação quando têm seu papel limitado de dividir os ambientes de uma edificação e protegê-los contra a ação de intempéries externos, sem possuir função estrutural, a não ser a de resistir ao seu peso próprio. Já uma alvenaria estrutural tem a função adicional de resistir aos carregamentos a ela impostos, transmitidos por outros elementos de uma edificação [40].

Segundo Richter [40], durante sua vida útil, uma alvenaria pode sofrer ação de esforços solicitantes de compressão, tração, flexão e cisalhamento. De um modo geral, o carregamento vertical sob uma alvenaria é muito mais intenso que o horizontal, o que faz da resistência à compressão a sua propriedade mecânica mais importante. Além disso, alvenarias possuem uma baixa resistência à tração, sendo que em projetos, busca-se minimizar ao máximo essa solicitação.

### 2.8.1. Ensaio de resistência à compressão

O ensaio para determinar a resistência à compressão de alvenarias consiste na aplicação de um carregamento vertical, uniformemente distribuído, sobre toda a seção da alvenaria, até que ocorra a sua ruptura. A norma portuguesa NP EN1052-1 [1] recomenda que este carregamento seja aplicado em controle de força, de modo que a ruptura da alvenaria ocorra entre 15 a 30 minutos de ensaio. A norma ainda recomenda que, para a determinação da resistência à compressão, sejam ensaiadas pelo menos três paredes. A resistência característica à compressão da alvenaria é obtida a partir das resistências individuais dos três provetes, que por sua vez podem ser obtidas através da Equação (1):

$$f_i = \frac{F_{i,máx}}{A_i} \quad (1)$$

- $F_{i,máx}$  é a carga máxima, em Newtons (N), atingida durante o ensaio do provete  $i$
- $A_i$  é a área da seção transversal, em  $\text{mm}^2$ , do provete  $i$
- $f_i$  resistência à compressão, em Megapascal (MPa), do provete  $i$

Quanto à dimensão das paredes a serem ensaiadas, esta varia em função das dimensões dos blocos utilizados. Para blocos com comprimento inferior a 300 mm e com altura inferior a 150 mm, devem ser ensaiadas à compressão paredes com uma altura mínima equivalente a 5 fiadas de blocos e com um comprimento mínimo de 2 blocos por fiada [1].

Para a medição das deformações sofridas pela alvenaria durante o ensaio de compressão, é recomendável o uso de transdutores de medição de deslocamento linear (LVDTs). Conforme prescrito na norma NP EN1052-1 [1], é recomendada a fixação de dois LVDTs verticais em cada face principal da alvenaria, que devem medir o deslocamento vertical entre um terço da altura da parede e devem ser espaçados horizontalmente em cerca de metade do comprimento da parede. Na Figura 8 pode-se observar o esquema da instrumentação dos LVDTs proposto pela norma mencionada.

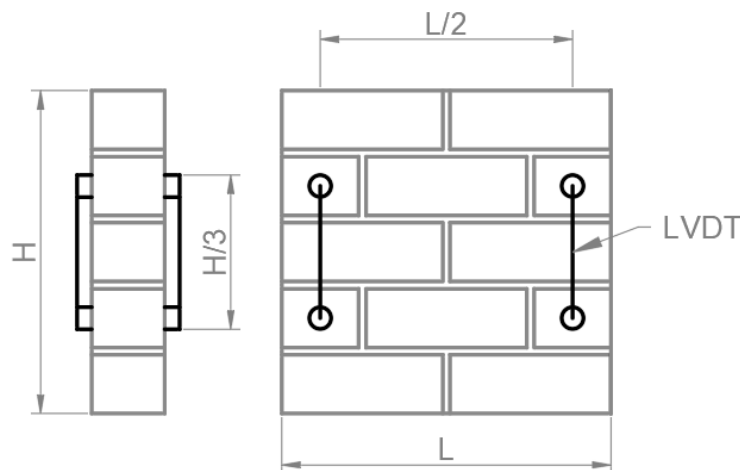


Figura 8 – Instrumentação de alvenaria para ensaio à compressão.  
Fonte: Adaptado de [1]

No caso de alvenarias com juntas argamassadas, a NP EN1052-1 [1] recomenda que, durante a execução das paredes, sejam retiradas amostras de argamassa para possibilitar a determinação da sua trabalhabilidade, resistência à compressão e à flexão. A trabalhabilidade da argamassa é determinada ainda em seu estado fresco, através do ensaio de espalhamento. Já a resistência à compressão e à flexão é determinada no seu estado endurecido, com o ensaio em prismas de argamassa.

### 2.8.2. Influência da argamassa de assentamento

Apesar da resistência dos blocos se mostrar como o fator dominante para uma boa resistência à compressão da alvenaria [41], o comportamento mecânico desta depende da interação entre os materiais que a compõem, nomeadamente, a interação físico-química entre os blocos e as juntas de argamassa que os unem [40].

A argamassa de assentamento é o componente responsável pela união dos blocos da alvenaria e contribui na absorção de pequenas deformações, o que permite uma transmissão de esforços de maneira mais uniforme. No caso de alvenarias em blocos de solo-

cimento, habitualmente, as argamassas de assentamento são produzidas com o mesmo solo utilizado na fabricação dos blocos. Essa prática comum tem como objetivo garantir comportamentos e durabilidade semelhantes, devido a boa compatibilidade entre os materiais [42].

A relação altura do bloco pela espessura da junta de argamassa é um dos fatores que influencia a resistência à compressão de uma alvenaria, sendo que quanto maior essa relação, maior será a resistência [40]. Pode-se afirmar que a influência da argamassa na resistência à compressão de alvenarias está diretamente ligada a dois fatores principais: a espessura da junta de assentamento e a resistência do material. Juntas muito largas levam à diminuição da resistência da parede, gerando um ponto mais suscetível a ruptura. Por outro lado, juntas muito finas podem levar a concentração de tensões, principalmente se os blocos se tocarem durante o carregamento [43].

A resistência da argamassa, desde que não seja inferior a 30% da resistência do bloco utilizado na alvenaria, tem pouca influência na resistência à compressão da alvenaria. Em casos de argamassas com resistências exageradas a resistência à compressão da alvenaria pode até sofrer uma diminuição, pois pode levar a fissuração local dos blocos muito antes da fissuração da argamassa [43]. Estas conclusões podem ser obtidas através da observação do modo de ruptura das alvenarias, quando submetidas à compressão.

### **2.8.3. Modos de ruptura de alvenarias**

O primeiro sintoma da ruptura de uma alvenaria é o aparecimento de fissuras, sendo que a identificação da causa que levou a fissuração só é possível através da análise da configuração, abertura, espaçamento e, quando possível, da altura em que a fissura aparece [44]. Devido a diferença entre as propriedades mecânicas dos materiais que compõem uma alvenaria, quando esta é submetida a sobrecargas de compressão, as fissuras podem ocorrer nas juntas de assentamento, tanto verticais quanto horizontais, ou até mesmo seccionar os blocos da alvenaria [45].

Alvenarias submetidas ao ensaio de compressão axial geralmente apresentam um estado de fissuração em trechos contínuos e verticais, como pode ser observado na Figura 9. Esse estado de fissuração só é alcançado devido ao carregamento excessivo, quando este é uniformemente distribuído sobre a alvenaria, que leva a deformação transversal da argamassa e eventual fissuração dos blocos por flexão local [44].

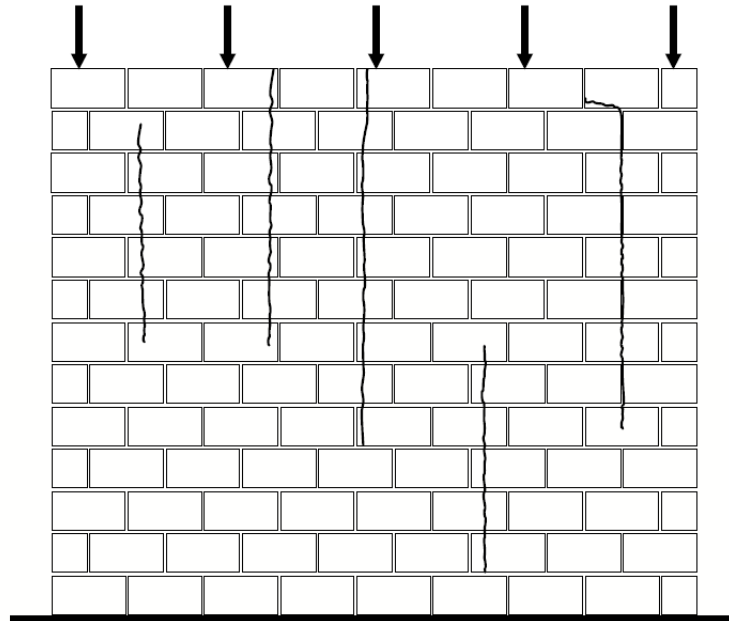


Figura 9 – Estado de fissuração de alvenaria submetida a carregamento uniformemente distribuído.  
Fonte: [44]

Em geral, as alvenarias apresentam pouca ductilidade, em consequência um modo de ruptura frágil. Além disso, as alvenarias possuem baixa resistência à tração na interface entre os blocos e a argamassa de assentamento. Desta maneira, ao se submeter uma alvenaria ao carregamento excessivo, a argamassa é comprimida deformando-se mais que os blocos e transmitindo esforços laterais de tração, que ocasionam as fissuras verticais [46]. Na Figura 10(a) observa-se a fissuração característica de uma alvenaria na qual os blocos apresentam resistência à tração superior à resistência à tração da argamassa. Já na Figura 10(b) pode-se observar a situação contrária, onde a resistência à tração da argamassa é igual ou superior à dos blocos.

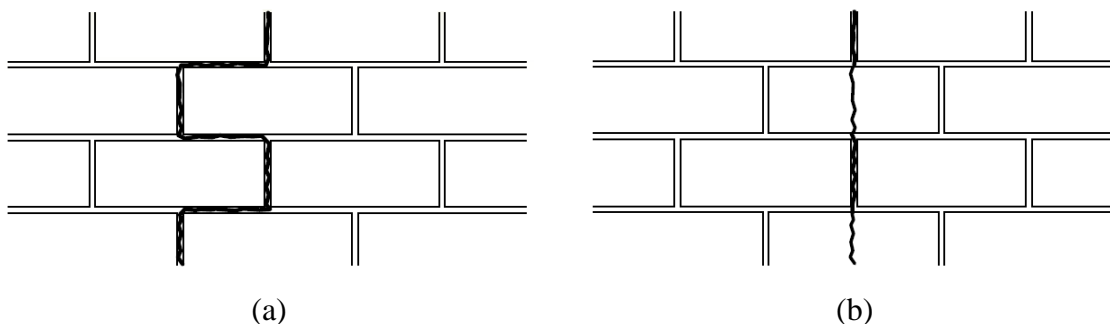


Figura 10 – Tipos de fissuração de alvenaria por aparecimento de esforços à tração.  
Fonte: [44]

## 2.9. Alvenarias de blocos de solo-cimento

De modo a proporcionar uma base de conhecimento acerca da resistência à compressão de alvenarias construídas com BTC, ou blocos de solo-cimento, nesta seção serão apresentados estudos já realizados por diferentes autores. Os resultados obtidos por estes autores servirão como fonte de comparação para os resultados obtidos durante o programa experimental deste trabalho.

Oliveira [21] realizou trabalhos de investigação sobre BTC ativados alcalinamente, com blocos compostos por uma mistura de solo residual granítico, classificado como uma areia siltosa, estabilizado com 15% de cinzas volantes. Os blocos foram usados para a construção de provetes de alvenaria, que posteriormente foram ensaiados à compressão. A autora realizou o ensaio para 3 tipos de alvenarias, sendo um deles alvenarias de junta seca e os outros dois com alvenarias de junta argamassa, diferindo o tipo de argamassa entre elas (AGP1 e AGP5 conforme nomeadas pela autora). Quanto a dimensão das paredes ensaiadas, estas tinham cerca de 840x800x100 mm e possuíam 8 fiadas de blocos com 3 blocos por fiada. Os resultados obtidos pela autora, assim como os resultados obtidos pelos demais autores que serão apresentados na sequência, estão resumidos na Tabela 13.

Neiva [47] também realizou ensaios de compressão de pequenas paredes com e sem junta argamassada, de modo a aferir a contribuição da argamassa no comportamento mecânico da alvenaria. Os BTC utilizados pela autora eram compostos por um solo estabilizado com 7,5% de cimento e 5% de cal. As alvenarias eram aproximadamente quadradas com dimensões de 560x500x90 mm, com 2 blocos de comprimento por 5 fiadas de altura.

Carvalho [16] propôs um trabalho no qual estudou o comportamento mecânico de alvenarias de BTC com e sem reforço estrutural. Foram analisadas alvenarias com reforços estruturais de dois tipos, uma com um varão vertical de aço e outra com um reboco armado com uma tela. Os BTC utilizados pelo autor eram compostos de um solo arenoso, com baixo teor de argila, estabilizado com 10% de cimento e 5% de caulino. As paredes ensaiadas possuíam forma quadrangular com dimensões de 700x700 mm, o que equivale a uma altura de 7 fiadas de BTC e uma de largura de 2,5 BTC.

Na Tabela 13, podem ser observados os resultados obtidos pelos três autores supracitados.

**Tabela 13 – Resistência à compressão de alvenarias de BTC estudadas por diferentes autores.**

Autor(a)	Tipo de Alvenaria (*)	Resistência à Compressão (MPa)
Oliveira [21]	JS	0,93
	JA (AGP1)	2,91
	JA (AGP5)	3,23
Neiva [47]	JS	3,74
	JA	4,41
Carvalho [16]	JS sem reforço	1,46
	JS varão de aço	2,00
	JS reboco armado	1,86
	JA sem reforço	2,04
	JA varão de aço	2,74
	JA reboco armado	2,45

Nota (\*): JS refere-se a Junta Seca e JA a Junta Argamassada.

Fonte: Autoria própria.

Através da análise de seus resultados, os três autores citados na Tabela 13, chegaram a conclusões similares. Os resultados obtidos mostram que as paredes com junta seca são as que apresentam menor resistência à compressão, enquanto que nas paredes com junta argamassada, a resistência à compressão aumenta consideravelmente. Em contrapartida, para as paredes com junta seca, Oliveira [21] verificou que o comportamento pós-pico é mais longo do que o observado para paredes com junta argamassada. Isso significa que as paredes de junta seca apresentam um comportamento mais dúctil que as paredes com argamassa de assentamento, que foram de um caráter mais frágil. Além disso, os autores também apontam que a resistência à compressão das alvenarias é significativamente menor do que a resistência individual dos BTC que as compõem.

Se comparados entre si, os resultados obtidos por Oliveira [21], Neiva [47] e Carvalho [16] confirmam que quanto maior a dimensão das alvenarias ensaiadas, menor será sua resistência à compressão. Isso fica ainda mais evidente através de estudos com alvenarias de maior dimensão. É o caso de Queiroga [43], que realizou um estudo sobre a resistência à compressão de painéis de alvenaria em BTC, onde utilizou blocos de solo-cimento compostos por um solo classificado como areia argilosa, estabilizado com 12% de cimento em relação a

massa do solo. Os painéis de alvenaria estudados possuíam 1260 mm de comprimento, equivalente a 5 blocos e 1280 mm de altura, que equivalem a 16 fiadas. Esses painéis de alvenaria continham juntas argamassadas e apresentaram uma resistência média à compressão de 1,30 MPa, um resultado inferior aos resultados apresentados anteriormente para paredes com argamassa.

# Capítulo 3

## Programa Experimental

### 3.1. Considerações Iniciais

Com base nos conceitos e estudos apresentados no capítulo anterior e, para se atingir os objetivos gerais e específicos propostos, o programa experimental deste trabalho foi dividido em quatro etapas, sendo elas:

- A fabricação de blocos de solo-cimento com incorporação de resíduos orgânicos, para construção de alvenarias;
- A análise da qualidade do ar interior em ambientes construídos com blocos de solo-cimento com incorporação de resíduo orgânico;
- Construção e análise do comportamento mecânico de paredes de alvenaria realizadas à escala reduzida. Esta análise foi feita através da determinação da resistência à compressão das alvenarias, bem como da argamassa de assentamento utilizada.

### 3.2. Produção dos blocos de solo-cimento

Os blocos de solo-cimento foram produzidos nos laboratórios de Materiais de Construção e de Estruturas e Resistência dos Materiais, localizados Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTiG) do IPB. No processo de produção dos blocos utilizou-se a máquina universal Instron® série 4485, Figura 11(a), que foi adaptada para promover a

compactação da mistura de solo-cimento no interior de um molde metálico, Figura 11(b) e Figura 11(c).

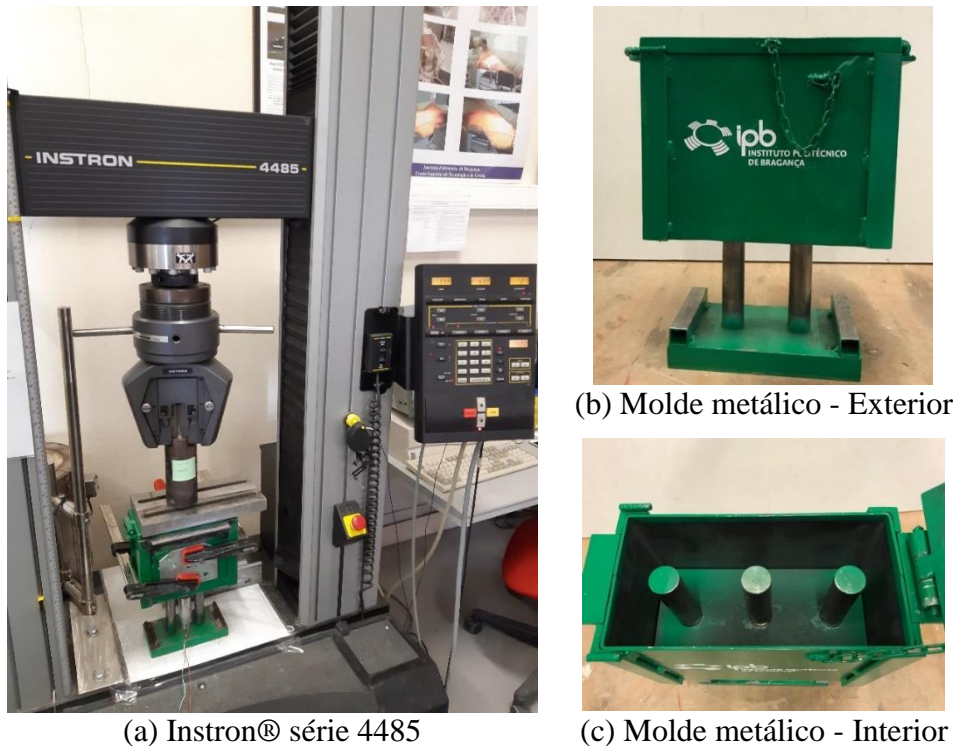


Figura 11 – Equipamento utilizado na produção dos blocos de solo-cimento.  
 Fonte: Autoria própria.

O uso do molde metálico apresentado, possibilitou a confecção de um bloco de solo-cimento vazado, com furos verticais, cuja geometria respeita as recomendações da NBR 8491 [5] e permite a sua aplicação na construção de alvenarias de paredes divisórias. As dimensões em milímetros deste bloco podem ser observadas na Figura 12.

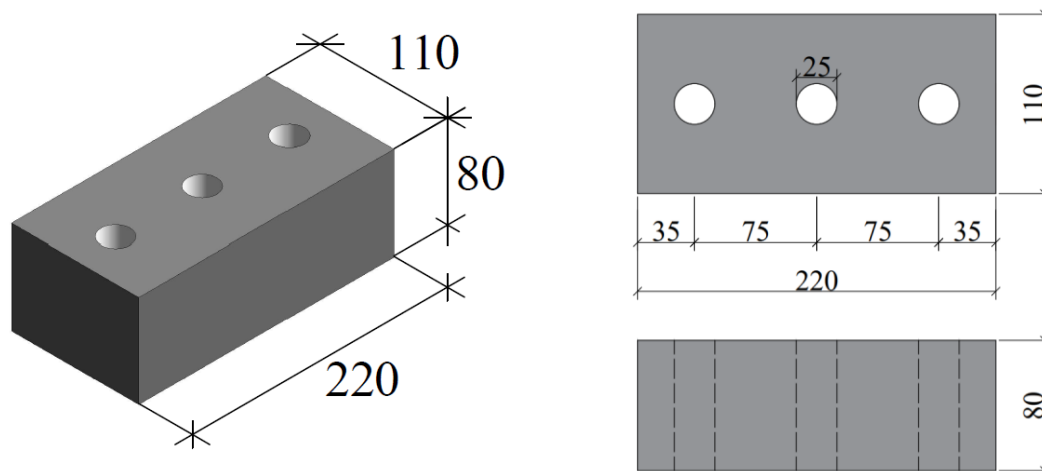


Figura 12 – Dimensões em milímetros do bloco de solo-cimento fabricado.  
 Fonte: Autoria própria.

Quanto à composição dos blocos produzidos, utilizou-se os mesmos materiais, nas mesmas proporções, das composições já estudadas por Nepomuceno [7], conforme apresentado na seção 2.6 deste trabalho. Sendo assim, foram confeccionados dois tipos de bloco: um com incorporação de resíduos orgânicos e outro sem. Na Tabela 14 estão apresentadas as quantidades, em massa, de cada material necessário para se produzir um bloco de solo-cimento, conforme sua composição. A composição SC<sub>10</sub>R<sub>20</sub> representa os blocos com adição de resíduo orgânico e a composição SC<sub>10</sub> representa os blocos sem resíduo.

**Tabela 14 – Quantidades de cada material necessário para a produção de 1 bloco**

Composição	Areia (g)	Caulino (g)	Resíduo Orgânico (g)	Cimento (g)	Água (g)
SC <sub>10</sub>	2364,75	1013,45	-	337,87	379,04
SC <sub>10</sub> R <sub>20</sub>	2003,46	1073,29	87,37	316,40	323,79

Fonte: Autoria própria.

Determinadas as quantidades de cada material que compõe a mistura dos blocos de solo-cimento, deu-se início ao processo de produção. Este processo foi dividido em três etapas: preparação, compactação e cura. Na preparação, com o uso de uma balança, realizou-se a pesagem do solo (areia e caulino), do cimento e do resíduo orgânico, de acordo com as quantidades necessárias para cada composição. Na Figura 13 pode-se observar a balança utilizada e na Figura 14 a pesagem de cada material individualmente.



Figura 13 – Balança Precisa® 30000D SCS.  
Fonte: Autoria própria.

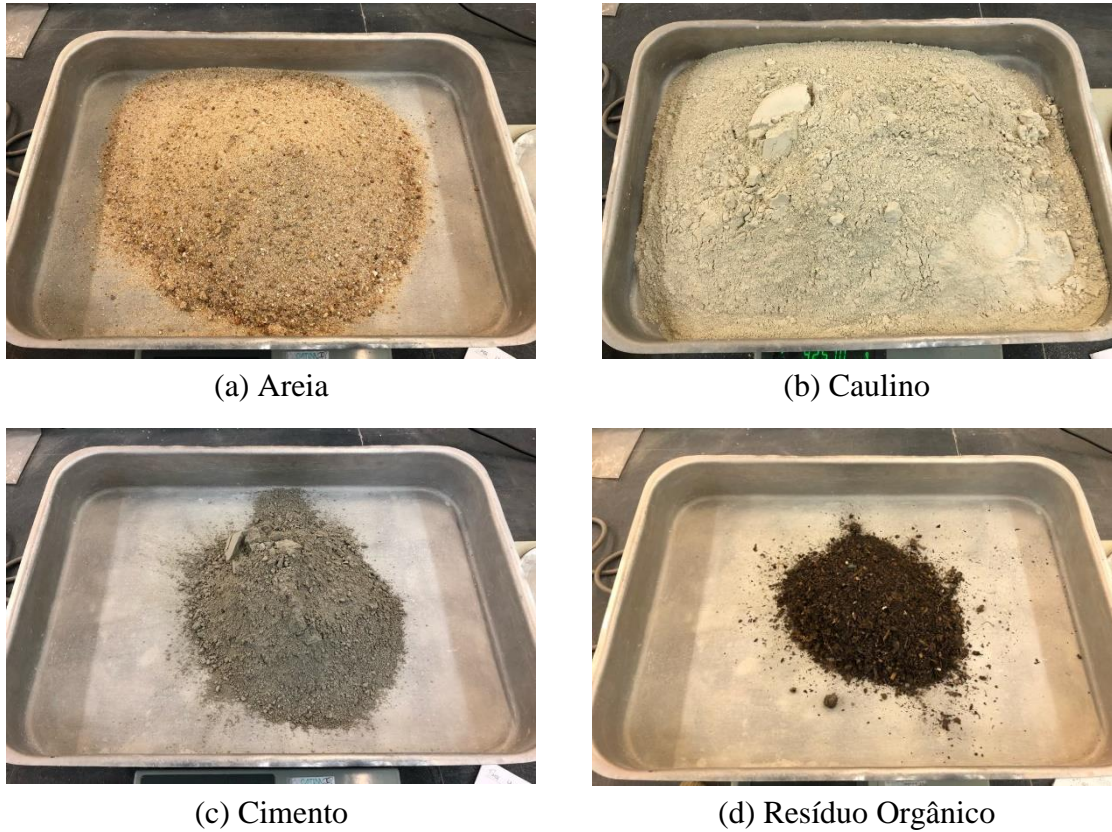
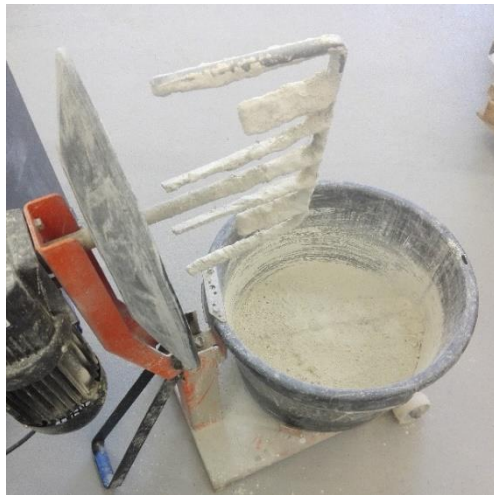


Figura 14 – Pesagem individual dos materiais.  
Fonte: Autoria própria.

Após a pesagem de cada material, estes foram depositados num único tabuleiro e realizou-se a mistura a seco dos materiais, até que sua junção apresentasse um aspeto homogêneo. Em seguida foi acrescentada a água, na medida exata, obtendo-se a mistura húmida. Todos os processos de mistura foram feitos de forma mecânica com o uso de uma batedeira. Ao final deste processo a composição está pronta para compactação e num tabuleiro é pesada a quantidade de material necessário para o fabrico de um bloco. O resumo deste processo pode ser observado na Figura 15.



(a) Mistura seca



(b) Mistura húmida



(c) Mistura pronta para compactar

Figura 15 – Preparação final da mistura dos materiais para um bloco de solo-cimento.  
Fonte: Autoria própria.

Com a mistura dos materiais já homogeneizada, logo de seguida, deu-se início ao processo de compactação dos blocos, para evitar a perda de humidade do material. Os blocos foram compactados um a um, colocando primeiro a mistura dentro do molde metálico, Figura 16(a), o qual é fechado e posicionado logo abaixo do êmbolo da Instron®. Na sequência, aproxima-se o êmbolo até o topo do molde, como na Figura 16(b), e inicia-se a compactação do bloco, a uma velocidade constante de 15 mm/min, que termina quando o bloco atinge a altura de 80 mm, Figura 16(c). Para todos os blocos produzidos, quando esta altura foi atingida, a carga de compactação da máquina estava a volta de 100 kN, ou seja, a compactação dos blocos se deu por completa para valores de tensão de aproximadamente 4,0 MPa. Imediatamente após a compactação, o bloco pode ser desmoldado conforme apresentado na Figura 16(e). O desmolde foi feito ainda com auxílio da Instron®, deslocando o embolo para baixo com a mesma velocidade de deslocamento utilizada na compactação do bloco.



(a) Mistura húmida no interior do molde



(b) Início da compactação do bloco



(c) Final da compactação do bloco



(d) Preparação para desmolde do bloco



(e) Desmolde do bloco em andamento



(f) Bloco recém desmoldado

Figura 16 – Processo de compactação e desmolde de um bloco de solo-cimento.  
Fonte: Autoria própria.

Após o desmolde de cada bloco, estes foram numerados e marcados com as iniciais de sua composição, para facilitar a distinção entre blocos com a incorporação de resíduos orgânicos e blocos convencionais. Assim que um bloco era marcado, ele era levado até a

câmara húmida, onde permanecia durante todo seu processo de cura, ou seja, pelo menos 28 dias. A câmara húmida promove um ambiente controlado, que mantém a temperatura média de 20°C e humidade relativa de 95%. Ao todo, foram produzidos 160 blocos, sendo que 80 blocos foram feitos com a composição SC<sub>10</sub>R<sub>20</sub> e os restantes 80 com a composição SC<sub>10</sub>. A Figura 17 mostra os blocos de solo-cimento produzidos, já dispostos na câmara húmida.



Figura 17 – Blocos de solo-cimento em câmara húmida  
Fonte: Autoria própria.

### 3.3. Análise da qualidade do ar

Em virtude da adição de resíduos orgânicos em uma das composições de bloco de solo-cimento estudadas neste trabalho, foram realizadas medições de gases no interior de um ambiente controlado. Essas medições foram feitas separadamente tanto para blocos com resíduo orgânico, quanto para os blocos sem o resíduo. Além de variar o tipo de bloco em cada análise, variou-se também a idade dos blocos, sendo realizado as medições de gases emitidos por blocos recém-fabricados, com 1 dia, e para blocos com 28 dias de idade.

Todos os ensaios de medição de gases foram realizados na Escola Superior Agrária, localizada no Instituto Politécnico de Bragança. A medição dos gases foi feita com a utilização do analisador de gases *Gasera One Pulse*, um equipamento disponível no mercado, que oferece uma detecção precisa de gases em partículas por milhão (ppm) e até mesmo em partículas por bilhão (ppb). Este equipamento é muito utilizado no

monitoramento de emissões de gases de efeito estufa e em análises de saúde e segurança ocupacional de ambientes. O esquema de ensaio realizado foi o mesmo utilizado por Delgado [37], o que permitiu a análise de quatro gases em um ambiente controlado, nomeadamente os gases amônia ( $\text{NH}_3$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) e óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ).

Para promover o ambiente controlado para medição de gases, em cada ensaio realizado foram dispostos 4 blocos de solo-cimento no interior de uma caixa. A medição da concentração de gases no interior dessa caixa foi feita com o uso do *Gasera One Pulse*, que foi acoplado à caixa por meio de um tubo de Teflon de ¼ de polegada. Este esquema de ensaio pode ser observado na Figura 18.



(a) Disposição dos blocos na caixa



(b) Analisador de gases Gasera One Pulse



(c) Esquema de ensaio: Gasera One Pulse acoplada a caixa com os blocos.

Figura 18 – Equipamentos utilizados para realização dos ensaios de qualidade do ar.

Fonte: Aatoria própria.

Através deste tubo de Teflon, os gases são aspirados de dentro da caixa para dentro do equipamento, que é capaz de determinar a concentração (em ppm) de Amônia ( $\text{NH}_3$ ), Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ), Metano ( $\text{CH}_4$ ) e Óxido Nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) para cada amostra de ar recolhida do interior da caixa. Essas amostras são extraídas pelo analisador de gases a cada

3 minutos, continuamente durante todo o tempo de ensaio. A duração total de cada ensaio realizado será apresentada na Tabela 15.

Para cada ensaio realizado, após os 4 blocos serem colocados dentro da caixa, o equipamento era posto em funcionamento e era iniciada a medição de gases com a caixa ainda destapada, durante um período de 20 a 30 minutos. Esse tempo inicial com a caixa aberta é necessário para se considerar as concentrações dos gases no ambiente arejado, sem grande interferência dos blocos. Após esse período inicial, a caixa era tapada e as medições continuavam por ciclos de 60 a 90 minutos com a caixa fechada, intercalados com ciclos de 20 minutos com caixa aberta. A variação entre caixa aberta e caixa fechada serve para verificar se há o aumento da concentração de algum gás durante os períodos de caixa fechada, visto que nesses períodos o único material emissor de gases no interior da caixa são os blocos.

Durante os ciclos de caixa fechada, a partir do momento em que esta é tapada, observou-se continuamente, pelo ecrã da *Gasera One Pulse*, a concentração de cada gás em tempo real, conforme as medições eram feitas. Dessa forma foi possível observar que 60 minutos com a caixa fechada era um tempo suficiente para que a concentração de cada gás captado se estabilizasse. A única exceção foi para os blocos com resíduos orgânicos com apenas 1 dia idade, nesse caso foram necessários ciclos de caixa fechada de 90 minutos.

Para os dois tipos de bloco submetidos ao ensaio de qualidade do ar, nos casos em que os blocos possuíam apenas 1 dia de cura, a medição de gases se iniciou com a caixa vazia e somente depois de 20 minutos os blocos foram colocados na caixa. Tomou-se este cuidado para que não fossem atribuídos aos blocos uma concentração de gases residuais que poderiam estar na caixa antes do início do ensaio.

Em resumo, foram então realizados 4 ensaios de medição de gases conforme apresentado na Tabela 15.

**Tabela 15 – Resumo das medições de gases realizadas.**

Medição	Material Ensaiado	Duração
Ensaio I	Blocos da composição SC <sub>10</sub> R <sub>20</sub> com 1 dia de idade	4h e 20min
Ensaio II	Blocos da composição SC <sub>10</sub> R <sub>20</sub> com 28 dias de idade	3h e 20min
Ensaio III	Blocos da composição SC <sub>10</sub> com 1 dia de idade	4h e 50min
Ensaio IV	Blocos da composição SC <sub>10</sub> com 28 dias de idade	4h e 40min

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 19 é mostrada a sequência de acontecimentos para as medições do ensaio com blocos de solo-cimento da composição SC<sub>10</sub>R<sub>20</sub> com apenas 1 dia de cura.

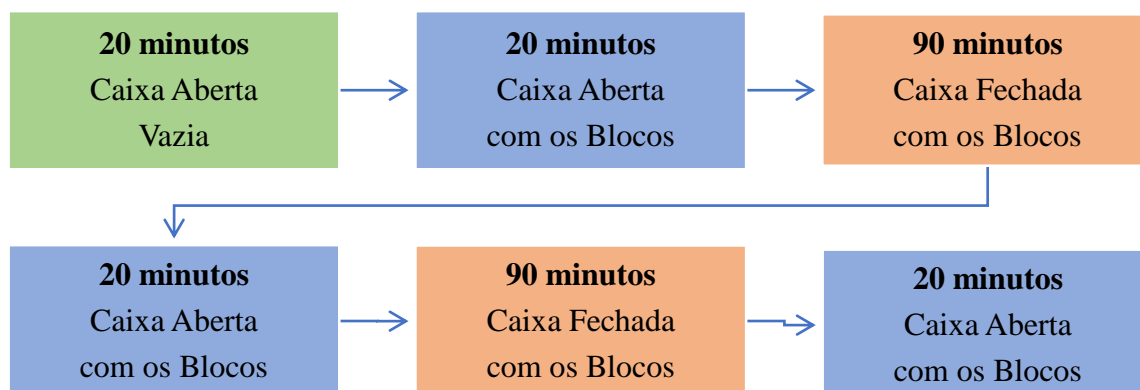


Figura 19 – Etapas do ensaio de qualidade do ar: Bloco SC<sub>10</sub>R<sub>20</sub> com 1 dia de cura.  
Fonte: Autoria própria.

Para o ensaio com blocos da composição SC<sub>10</sub>R<sub>20</sub> já com 28 dias de idade, ou seja, prontos para utilização, a sequência das etapas de medição realizadas podem ser observadas na Figura 20.

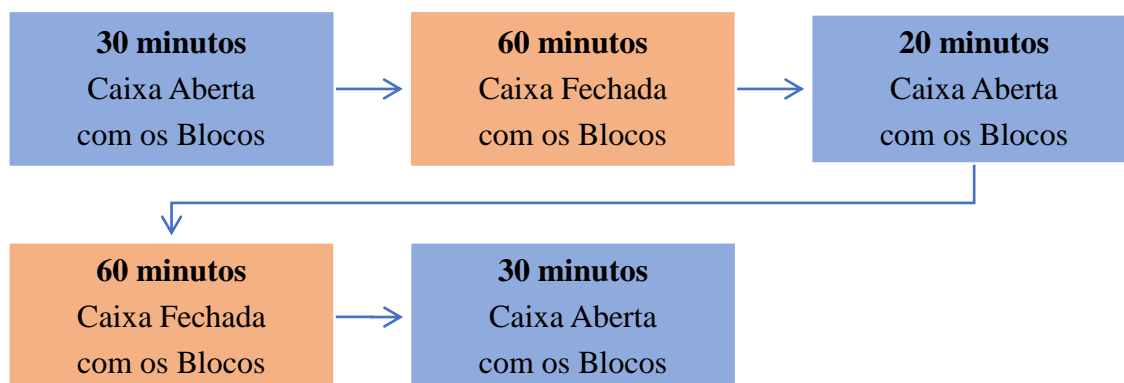


Figura 20 – Etapas do ensaio de qualidade do ar: Bloco SC<sub>10</sub>R<sub>20</sub> com 28 dias de cura.  
Fonte: Autoria própria.

Analogamente, na Figura 21 pode observar-se a sequência de acontecimentos para os ensaios com blocos convencionais, ou seja, blocos da composição SC<sub>10</sub> com 1 dia de cura. Logo em seguida, na Figura 22, é possível verificar as etapas de medições para os blocos SC<sub>10</sub> com 28 dias de idade.

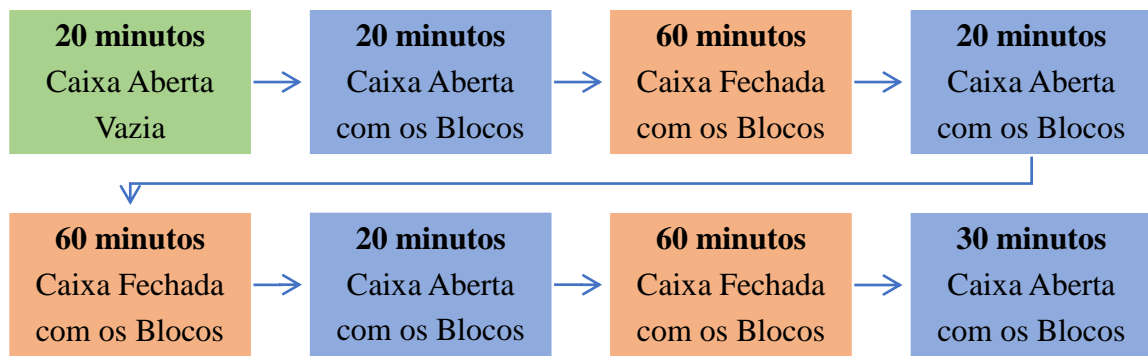


Figura 21 – Etapas do ensaio de qualidade do ar: Bloco SC<sub>10</sub> com 1 dia de cura.  
Fonte: Autoria própria.

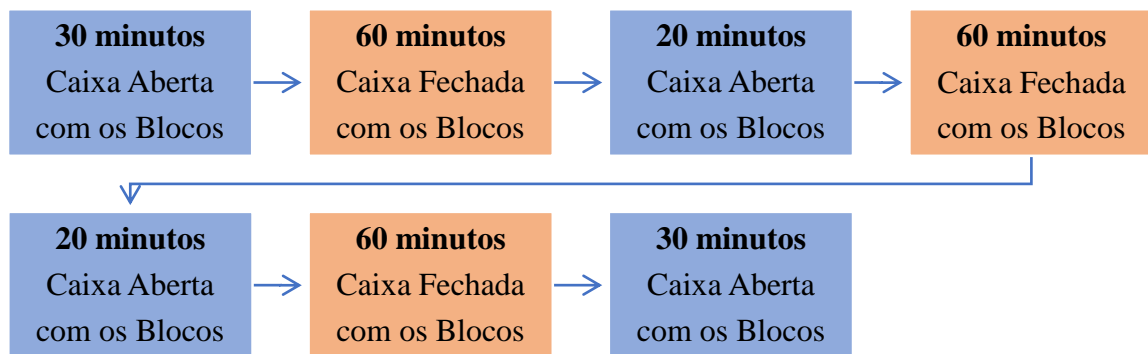


Figura 22 – Etapas do ensaio de qualidade do ar: Bloco SC<sub>10</sub> com 28 dias de cura.  
Fonte: Autoria própria.

Após a realização dos quatro ensaios, obteve-se para cada um deles as concentrações dos gases NH<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O em função do tempo de duração do ensaio. Com estes dados, verificou-se qual foi a concentração máxima que cada gás atingiu em cada um dos quatro ensaios. Estes valores foram comparados com os limites de exposição apontados pela NP EN1796 [38], conforme apresentado na Seção 2.7 deste trabalho.

### **3.4. Construção e caracterização mecânica das alvenarias de blocos de solo-cimento**

De forma a analisar o comportamento mecânico dos blocos de solo-cimento com incorporação de resíduos orgânicos em uma aplicação prática, nesta seção será apresentado o processo de construção e de ensaio à compressão axial de alvenarias construídas com estes blocos. Foram construídas, à escala reduzida, paredes de alvenaria, aproximadamente quadrangulares, com cerca de 730x680 mm<sup>2</sup>, as quais foram submetidas ao ensaio de compressão axial, tomando como base os procedimentos normativos apresentados no capítulo 2.

Para que se possa observar a influência do resíduo orgânico no comportamento mecânico das alvenarias, foram ensaiados dois tipos de provetes: alvenarias feitas com os blocos SC<sub>10</sub>R<sub>20</sub>, chamadas neste trabalho de Provetes SCR; e alvenarias feitas com os blocos SC<sub>10</sub>, nomeadas como Provetes SC.

#### **3.4.1. Construção dos provetes de alvenaria**

A construção das paredes de alvenaria de BTC bem como o seu posterior ensaio foi realizado no Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho, em Guimarães. Ao todo foram construídas 6 porções de paredes de BTC, sendo 3 delas com blocos com incorporação de resíduos orgânicos (Provetes SCR) e as outras 3 com blocos sem adição de resíduos (Provetes SC). Visto que estes provetes serão submetidos ao ensaio de compressão, suas dimensões foram pensadas de modo a cumprir os requisitos mínimos apresentados na NP EN1052-1 [1]. As porções de paredes construídas apresentam altura aproximada de 730 mm, equivalente a 8 fiadas, largura de cerca de 680 mm, equivalente a 3 blocos por fiada, e espessura de 80 mm. São paredes de pano simples. Na Figura 23 podem ser observadas as dimensões dos provetes construídos, bem como a disposição dos blocos de solo-cimento.

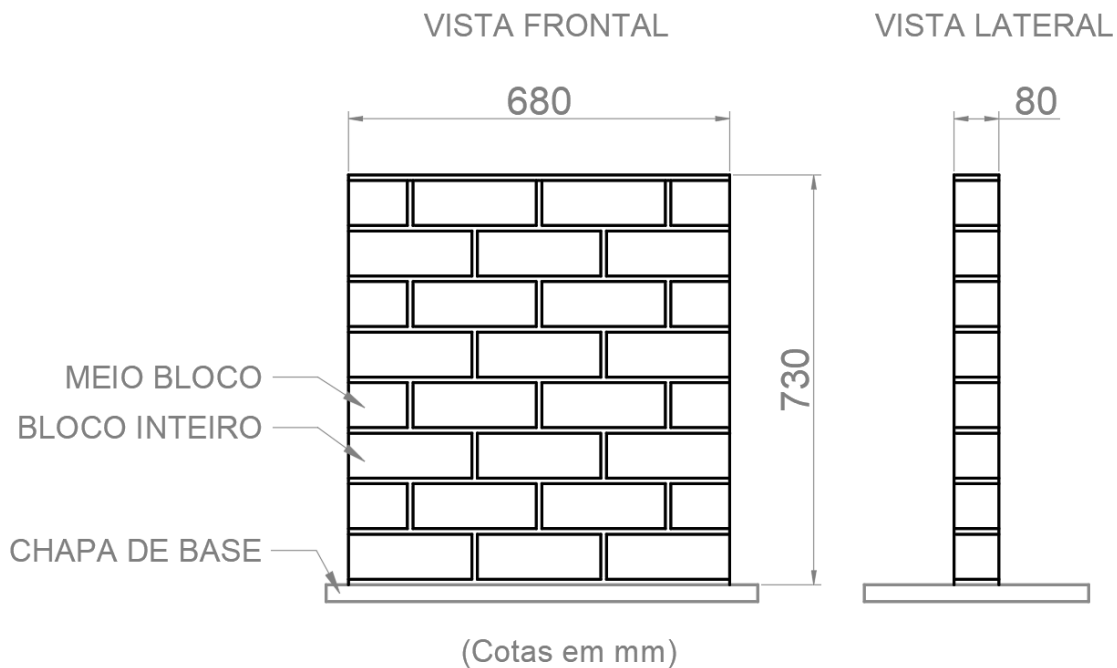


Figura 23 – Dimensões dos provetes de alvenaria construídos.  
Fonte: Autoria própria.

Como pode ser constatado na Figura 23, foram necessários 20 blocos inteiros e mais 8 metades de bloco para cada uma das porções de parede de BTC construídas. Assim, antes de tudo, foi realizado o corte ao meio dos blocos com o uso de uma serra elétrica, conforme apresentado na Figura 24.



(a) Serra elétrica utilizada



(b) Blocos cortados ao meio

Figura 24 – Corte dos blocos de solo-cimento.  
Fonte: Autoria própria.

Com os blocos já preparados, o primeiro passo para começar a construção das alvenarias é a preparação da argamassa. Neste caso optou-se por utilizar uma argamassa feita com os mesmos materiais dos blocos, para promover uma melhor interação entre os dois materiais. Assim, tanto para as paredes SCR quanto para as SC, foi utilizada a mesma argamassa de assentamento, que foi feita com base na composição SC<sub>10</sub> adicionado um teor de água maior, de modo a garantir a trabalhabilidade do material.

Para manter a argamassa de assentamento sempre fresca e com boa trabalhabilidade, esta foi preparada em pequenas porções, cerca de 5 KG de cada vez, ao longo da construção dos provetes de alvenaria. O traço da argamassa foi garantido através da pesagem dos materiais antes da mistura, sendo que para cada amassadura preparada, foram seguidas as quantidades de materiais apresentadas na Tabela 16.

A preparação da argamassa se deu de forma semelhante a preparação da mistura dos blocos, primeiramente cada material foi pesado separadamente e depois todos foram colocados em um mesmo tabuleiro, no qual efetuou-se a mistura dos materiais manualmente com auxílio de uma colher de pedreiro. Primeiro é feita a mistura a seco dos materiais, em seguida é adicionada a água e efetuada a mistura húmida, até a argamassa apresentar um aspeto homogêneo.

**Tabela 16 – Quantidades de cada material utilizado por amassadura de argamassa, em [g].**

Areia	Caulino	Cimento	Água
2343,94	1004,55	334,85	1250

Fonte: Autoria própria.

Com o objetivo de determinar a resistência à compressão da argamassa utilizada na construção dos provetes de alvenaria, durante o assentamento dos blocos procedeu-se à recolha de amostras de argamassa em moldes cilíndricos. Foram então confeccionados 3 provetes de argamassa, estes com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, para serem ensaiados à compressão posteriormente junto com as alvenarias.

Após a preparação da argamassa, foi dado início ao processo de construção das alvenarias. Cada parede foi construída sobre uma chapa feita de um plástico extremamente rígido, que serviu como base para as alvenarias. Primeiramente as chapas foram colocadas em um local de fácil acesso, com espaço suficiente para possibilitar o assentamento dos

blocos de maneira adequada. Estas chapas foram ainda colocadas sobre blocos maciços, de forma a não se assentarem diretamente ao chão, para que quando fosse necessário realizar seu transporte para o ensaio, fosse mais fácil de levantar os provetes. É importante também antes de proceder à montagem das paredes, verificar através de um nível se as chapas estão perfeitamente niveladas.

Antes de se proceder ao assentamento, cada bloco foi borrifado com água em toda a sua superfície, para evitar uma absorção excessiva da humidade da argamassa. De modo a garantir a adesão da primeira fiada da alvenaria na chapa utilizada como base, foi colocada sobre esta uma camada de argamassa com pelo menos 1cm de espessura, sobre a qual é assentada a primeira fiada de blocos. Esta camada inicial é fundamental para regularizar a base das paredes e também proporcionar uma boa distribuição de esforços durante os ensaios.

Depois de assente a primeira fiada de blocos, foi dada continuidade ao assentamento das demais fiadas utilizando sempre um martelo de borracha, com auxílio de um nível, para garantir que a construção de cada fiada da parede se mantenha sempre perfeitamente plana e vertical. O assentamento dos blocos foi feito de modo a garantir que as juntas de argamassa, tanto horizontais quanto verticais, tenham sempre cerca de 1cm de espessura. As paredes foram construídas em duas fases, numa primeira fase eram assentes blocos até metade da altura final da parede, Figura 25(a). Depois disso aguardava-se um tempo até que as juntas de argamassa apresentassem alguma resistência e só depois é que se avançava para a segunda fase de construção das fiadas superiores, Figura 25(b). Este cuidado previne que o elevado peso dos blocos promova o esmagamento das juntas de argamassa, expulsando o material e gerando juntas com menos de 1 cm de espessura.



(a) Assentamento das 4 primeiras fiadas de um provete de alvenaria



(b) Assentamento das 4 fiadas superiores do mesmo provete de alvenaria.

Figura 25 – Etapas do assentamento de blocos para um provete de alvenaria.  
Fonte: Autoria própria.

Quando terminadas, as paredes foram limpas com uma esponja húmida, de modo a retirar qualquer excesso de argamassa que tenha ficado acumulado. Depois os provetes permaneceram no mesmo local da sua construção até o dia em que foram ensaiados. Na Figura 26 podem ser observados os demais provetes de alvenaria construídos, já em seu aspeto final.



Figura 26 – Aspetto final dos demais provetes de alvenaria.  
 Fonte: Autoria própria.

### 3.4.2. Ensaio de compressão axial das alvenarias

Antes do início do ensaio dos provetes de alvenaria, primeiramente foi necessário proceder-se ao transporte das paredes, do local onde foram construídas, até ao pórtico onde foram ensaiadas. Este processo é trabalhoso e requer muito cuidado, para que as alvenarias não se danifiquem e nem coloquem em risco a integridade física humana. Como as paredes foram construídas ao lado do pórtico de ensaio, seu transporte foi realizado manualmente, erguendo-as e as pousando sobre o pórtico.

Uma vez colocada a parede sobre o pórtico de ensaio, com o uso de uma fita métrica e um fio de prumo ela foi devidamente centrada com a célula de carga. O objetivo era evitar qualquer excentricidade no carregamento. Além disso, foi necessário executar uma camada de regularização da superfície de topo da alvenaria, para eliminar possíveis desníveis entre os blocos. Essa camada foi feita com uma argamassa de presa rápida e, antes de sua execução, os furos verticais dos blocos foram tapados com fita adesiva, para evitar que os mesmos se enchessem de argamassa. Depois disso foram fixadas, com o auxílio de grampos de ferro, duas tábuas de madeira, uma em cada face da alvenaria, de forma a criar uma cofragem para a argamassa. Essas tábuas sobressaíam no topo da alvenaria em cerca de 10

mm, somente o necessário para garantir a regularização da camada. O passo seguinte foi, com o uso de um nível, garantir que as tábuas estavam niveladas e perfeitamente planas, visto que servem de molde para a posterior aplicação e alisamento da argamassa. Para facilitar o entendimento, este processo está ilustrado na Figura 27.



(a) Fechamento dos furos verticais e nivelamento das tábuas de madeira.



(b) Aplicação e alisamento da argamassa de presa rápida.

Figura 27 – Regularização do topo da alvenaria.  
Fonte: Autoria própria.

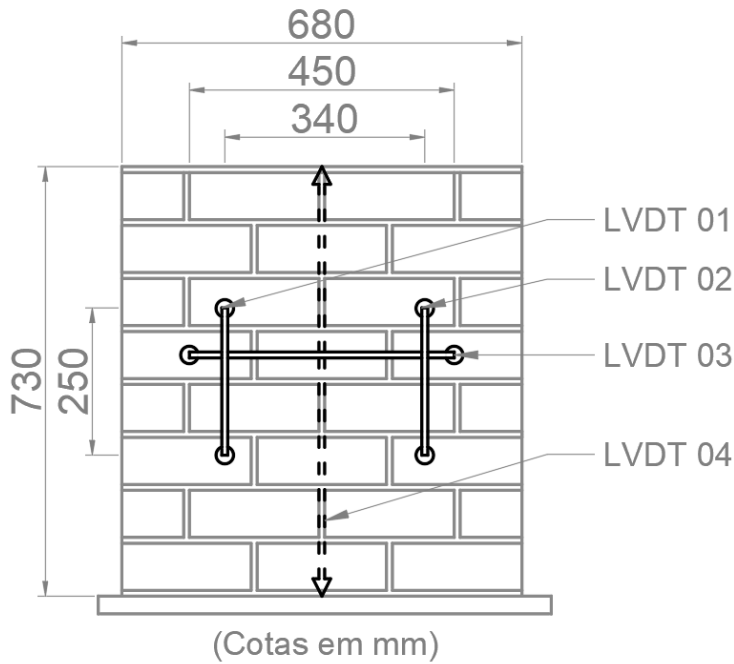
A argamassa, utilizada na camada de regularização de topo, foi preparada em um tableiro de plástico e consiste na mistura de areia, água e cimento de presa rápida. A mistura foi feita manualmente com o uso de uma colher, até que a argamassa apresentasse um aspeto homogêneo. Após a aplicação e alisamento da argamassa no topo da alvenaria, esperou-se até que a camada apresentasse alguma resistência e foram retiradas as tábuas de madeira.

Pelo fato de ter sido utilizado um cimento de presa rápida, o tempo de espera era bastante curto, cerca de 20 minutos. Na Figura 28 pode-se observar um provete de alvenaria ao final deste processo, totalmente regularizado e já centrado.



Figura 28 – Alvenaria já regularizada e centralizada no pórtilo de ensaio.  
Fonte: Autoria própria

A instrumentação das paredes foi realizada com LVDTs para medir as deformações lineares que a alvenaria apresentará durante o ensaio. Em virtude da quantidade de transdutores disponíveis, optou-se por medir os deslocamentos verticais e horizontais em apenas uma das faces da alvenaria. No total foram utilizados 4 LVDTs, sendo dois para medir os deslocamentos verticais (LVDT 01 e LVDT 02), um para medir o deslocamento horizontal (LVDT 03) e outro para medir o deslocamento total entre pratos da alvenaria (LVDT 04), ou seja, da base ao topo da parede. Os transdutores verticais foram posicionados de acordo com as recomendações da norma EN 1052-1 [1], apresentadas no capítulo 2, e o transdutor horizontal foi posicionado na quinta fiada, de modo a passar por duas juntas verticais de argamassa. O desenho esquemático da instrumentação dos LVDTs e a sua aplicação em um dos provetes de alvenaria ensaiados, podem ser observados na Figura 29.



(a) Desenho esquemático dos LVDTs



(b) Aplicação em uma das paredes

Figura 29 – Instrumentação dos LVDTs.  
Fonte: Autoria própria.

A fixação dos LVDTs nos provetes de alvenaria foi feita com o auxílio de parafusos, que por sua vez foram colados na face da alvenaria nos locais estipulados no desenho esquemático da Figura 29(a). A cola foi aplicada com o auxílio de uma pistola termofusível, de maneira a garantir que os LDVTs não descolassem durante o ensaio.

Após o posicionamento e fixação dos LVDTs, com uma fita métrica, foram medidas todas as dimensões do provete de alvenaria, assim como, as distâncias entre os eixos dos parafusos onde estavam fixados os transdutores. Isso é necessário para que, posteriormente na análise de resultados, seja possível calcular a área da seção de carregamento, bem como as deformações específicas referentes a cada LVDT.

Depois de toda instrumentação feita, foram colocados dois perfis metálicos sobre a parede de alvenaria, de modo a garantir rigidez ao sistema e garantir uma distribuição uniforme da carga aplicada sobre o provete. Sobre os dois perfis metálicos, foi ainda colocada uma rótula, com função de dar ao carregamento um certo grau de liberdade, evitando que pequenas deformações interferissem no modo de ruptura da parede. Por motivos de segurança, foram utilizadas correntes para prender as extremidades dos perfis metálicos ao êmbolo da célula de carga, visto que a parede poderia colapsar bruscamente. A

Figura 30 mostra um provete de alvenaria já com as chapas metálicas, com a rótula e com os LVDTs, pronto para ser ensaiado.

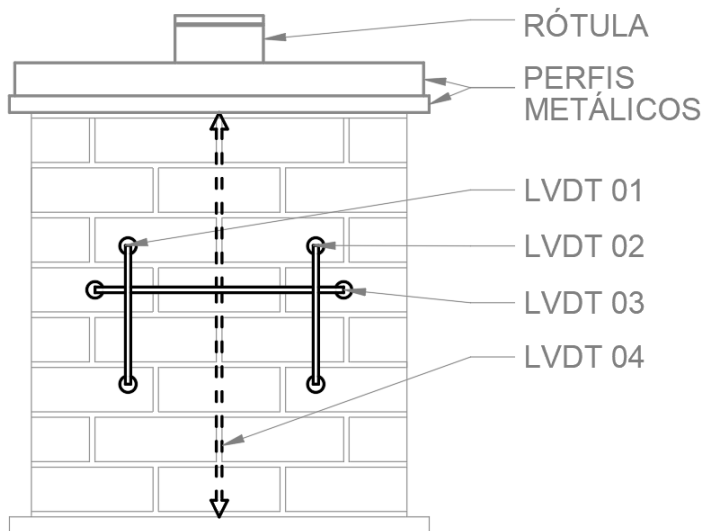


Figura 30 – Provete de alvenaria pronto para ser ensaiado.  
Fonte: Autoria própria.

Para o carregamento das alvenarias, foi utilizada uma célula de carga com capacidade de 2000 KN. Os ensaios foram realizados por controle de deslocamento a uma velocidade constante de 0,013 mm/s. A duração do ensaio foi cerca de 20 minutos, respeitando a recomendação da NP EN1052-1 [1].

O carregamento da alvenaria foi parado após ser notado que a carga aplicada já estava cerca de 30 kN a 40 kN mais baixa que a carga de pico atingida. Tomou-se esse cuidado para que o ensaio durasse o tempo necessário para possibilitar a análise do comportamento pós pico da alvenaria, sem que a mesma chegasse ao colapso total. Isso foi feito com o intuito de poder reutilizar as paredes em futuros trabalhos de reforço, evitando a geração de resíduos desnecessários e aproveitando ao máximo todo material utilizado no fábrico das paredes.

Durante o ensaio foi registrada a carga referente ao surgimento das primeiras fissuras de cada provete de alvenaria e o padrão de fendilhação referente aos danos e esmagamento dos blocos. Com esta informação foi identificado o modo de ruptura de cada provete, para posterior apresentação na discussão dos resultados.

Após a realização dos ensaios, a resistência à compressão de cada provete de alvenaria foi calculada conforme já apresentado anteriormente, no capítulo 2. Os ensaios foram realizados para as paredes com idade de 28 dias, ou superior, para garantir que a argamassa já estivesse totalmente curada. Além desse cuidado, outro fator que influenciou a data dos ensaios foi a disponibilidade dos equipamentos utilizados. Na Tabela 17 podem ser observadas as idades com que cada provete foi ensaiado.

**Tabela 17 – Idade com a qual os provetes de alvenaria foram ensaiados.**

Provete de Alvenaria	Idade (dias)
SCR 01	49
SCR 02	50
SCR 03	48
SC 01	48
SC 02	47
SC 03	46

Fonte: Autoria própria.

### 3.4.3. Ensaio de compressão da argamassa de assentamento

Para caracterizar a argamassa de assentamento utilizada na construção dos provetes de alvenaria, as amostras de argamassa recolhidas durante o assentamento dos blocos foram ensaiadas à compressão. Antes da realização do ensaio, foi efetuada a retificação do topo dos 3 provetes cilíndricos. Essa retificação foi feita com a mesma argamassa de presa rápida utilizada na retificação de topo das paredes, e consiste numa camada extremamente fina, necessária apenas para eliminar possíveis desníveis que poderiam interferir nos resultados do ensaio. A Figura 31 ilustra os 3 provetes de argamassa já retificados.



Figura 31 – Retificação de topo dos cilindros de argamassa.

Fonte: Autoria própria.

Assim que a camada de retificação já apresentava alguma resistência, com o uso de um paquímetro digital, foram medidas as dimensões (altura e diâmetro) dos 3 provetes de argamassa. Foi então calculada a área da seção de carregamento de cada provete.

Os provetes cilíndricos foram centrados na da célula de carga e sobre eles foram colocadas uma chapa de aço e uma pequena rótula, para se atribuir rigidez e garantir uma distribuição uniforme do carregamento durante o ensaio. Aproximou-se o êmbolo da máquina até o topo da rótula e iniciou-se a compressão do provete, por controle de deslocamento, a uma velocidade constante de  $5 \mu\text{m/s}$ , até à sua ruptura. O esquema de ensaio pode ser observado na Figura 32.

Os provetes cilíndricos de argamassa foram ensaiados à compressão no mesmo dia em que o último provete de alvenaria foi ensaiado. Portanto, no momento do ensaio, os provetes de argamassa já apresentavam 50 dias de idade.



Figura 32 – Ensaio de compressão de um provete de argamassa.  
Fonte: Autoria própria.

## Capítulo 4

# Resultados e Discussões

### 4.1. Análise da qualidade do ar para os blocos de solo-cimento

Nos ensaios de qualidade do ar foram quantificadas as concentrações dos gases amônia ( $\text{NH}_3$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) e óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), em um ambiente controlado, sujeito a presença dos blocos de solo-cimento fabricados. Os resultados obtidos com estes ensaios serão apresentados nesta seção de forma separada para cada gás, de maneira a identificar os diferentes comportamentos entre os blocos com adição de resíduos orgânicos (composição  $\text{SC}_{10}\text{R}_{20}$ ) e os blocos sem resíduos (composição  $\text{SC}_{10}$ ).

#### 4.1.1. Amônia ( $\text{NH}_3$ )

As sequências temporais das concentrações de amônia, obtidas através do analisador de gases *Gasera One Pulse*, para cada um dos quatro ensaios realizados, estão ilustradas na Figura 33. Ao analisar a Figura 33(a) nota-se que, no ensaio com blocos  $\text{SC}_{10}\text{R}_{20}$  com apenas 1 dia de cura, a concentração de amônia apresentou um aumento considerável nos períodos em que a caixa estava fechada, nos quais atingiu o valor máximo de 28 ppm. Isto indica que houve a emissão de  $\text{NH}_3$  por parte destes blocos. Este comportamento não se repetiu no ensaio realizado com o mesmo tipo de bloco aos 28 dias de cura, como pode-se observar na Figura 33(b). No ensaio dos blocos  $\text{SC}_{10}\text{R}_{20}$  com 28 dias de idade, a concentração de amônia permaneceu baixa, praticamente constante durante todo o tempo de ensaio e não ultrapassou o valor de 2 ppm. Este facto confirma que o tempo de

cura dos blocos solo-cimento com resíduo orgânico é fundamental para que a mistura se estabilize em relação à amônia.

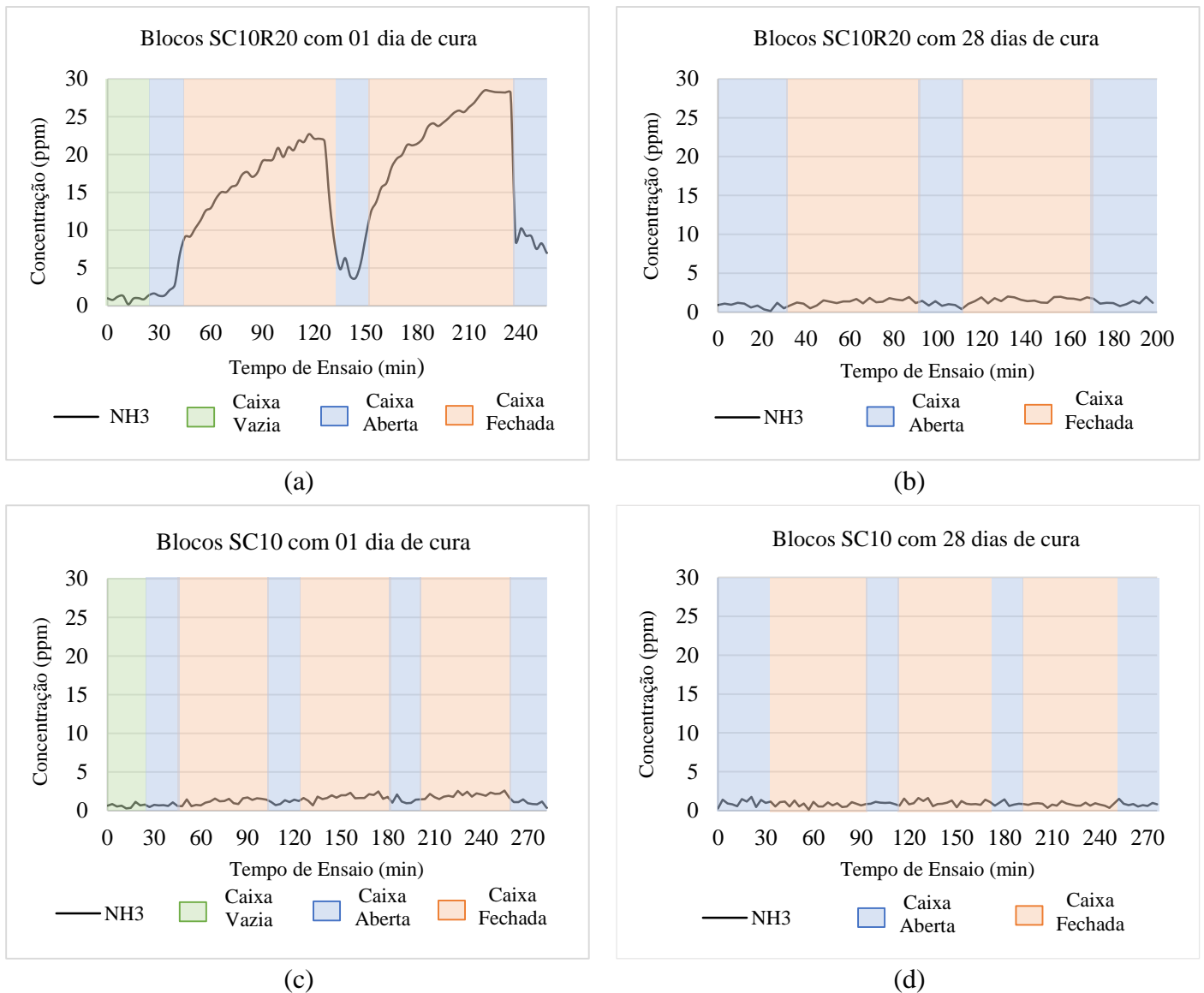


Figura 33 – Resultados dos ensaios de qualidade do ar: Amônia (NH<sub>3</sub>).

Fonte: Autoria própria.

Os blocos sem resíduos orgânicos apresentaram baixíssimas emissões NH<sub>3</sub>, inclusive para os blocos com 1 dia de cura, o que mostra que a emissão de amônia foi alta apenas no caso dos blocos com adição de resíduos orgânicos e com 1 dia de idade. Comparando a Figura 33(b) com a Figura 33(c) e Figura 33(d), nota-se que o comportamento dos blocos SC<sub>10</sub>R<sub>20</sub> aos 28 dias de cura foi extremamente semelhante ao comportamento dos blocos da composição SC<sub>10</sub>.

Ao se comparar os resultados obtidos para as concentrações de NH<sub>3</sub> com os limites de exposição aos agentes químicos estabelecidos pela NP EN1796 [38], citados na seção 2.7

deste trabalho, verificou-se que tanto para os dois ensaios com blocos SC<sub>10</sub>, como para o ensaio com blocos SC<sub>10</sub>R<sub>20</sub> aos 28 dias de idade, o limite de exposição ficou longe do seu limite máximo. Porém, para os blocos SC<sub>10</sub>R<sub>20</sub> recém fabricados, a concentração de amônia foi superior ao limite de exposição (média ponderada) de 25 ppm. Estes dados estão resumidos na Figura 34.

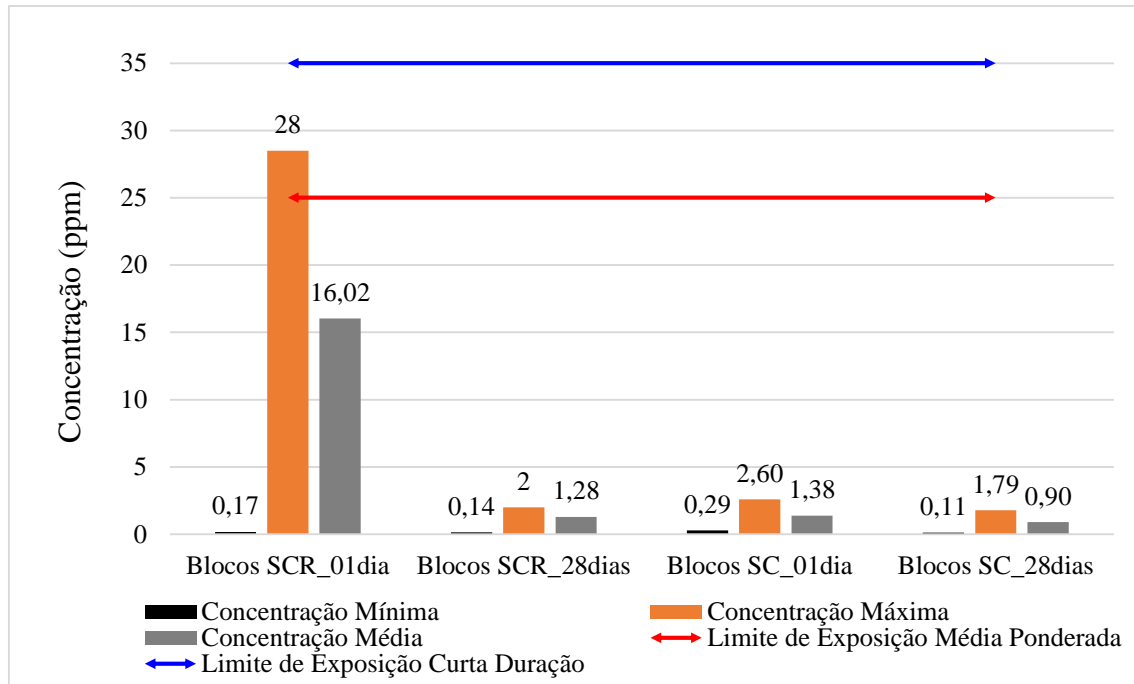


Figura 34 – Concentrações obtidas para o NH<sub>3</sub> e seus limites de exposição segundo a EN 1796 [38].  
Fonte: Autoria própria.

Segundo o *National Cancer Institute* (NCI) [48], a amônia é um composto inorgânico, incolor e de odor extremamente forte, capaz de causar irritação aos olhos, pele, nariz, garganta e língua. Sendo assim, o odor desagradável constatado por Nepomuceno [7], na fabricação de blocos da composição SC<sub>10</sub>R<sub>20</sub>, pode ter sido resultado da emissão de a amônia por parte destes blocos. Contudo, os resultados dos ensaios de qualidade do ar apontam que aos 28 dias de idade, tempo no qual os blocos estão prontos para a utilização, os blocos SC<sub>10</sub>R<sub>20</sub> não apresentaram emissões significativas de amônia.

#### 4.1.2. Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)

Quanto ao dióxido de carbono, as sequências temporais das medições da concentração deste gás, obtidas nos quatro ensaios de qualidade do ar realizados, são apresentadas na Figura 35. Tanto para os blocos da composição SC<sub>10</sub>R<sub>20</sub>, quanto para os da

SC<sub>10</sub>, observou-se que nos períodos de caixa aberta, a concentração de CO<sub>2</sub> se manteve entre 500 e 700 ppm, o que se justifica pela presença deste gás no ar atmosférico. Entretanto, nos períodos em que a caixa estava fechada, a concentração de CO<sub>2</sub> diminuiu drasticamente em todos os casos, chegando a atingir valores inferiores a 100 ppm.

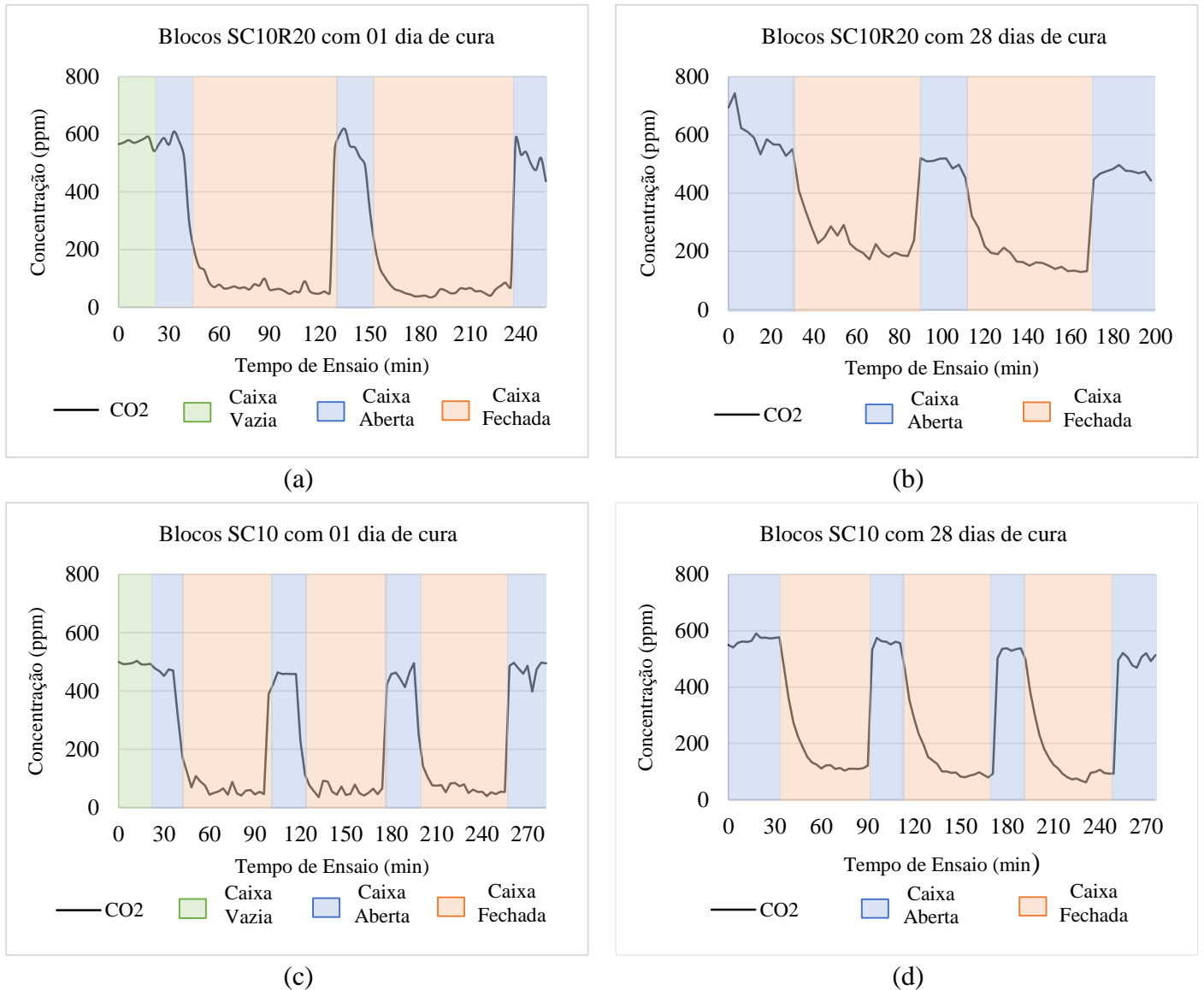


Figura 35 – Resultados dos ensaios de qualidade do ar: Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>).  
Fonte: Autoria própria.

A diminuição da concentração de CO<sub>2</sub>, durante os intervalos em que a caixa se encontrava fechada, indica a possível absorção deste gás por parte dos blocos. Ao se abrir a caixa a concentração de CO<sub>2</sub> voltou a subir, devido a ventilação natural e troca de ares que ocorrem com a caixa destapada. Como apresentado na figura anterior (Figura 35), nota-se que a absorção do dióxido de carbono ocorreu tanto para os blocos com o resíduo orgânico,

como para os sem adição de resíduo. Também aos 28 dias de cura os blocos continuaram a apresentar a absorção de CO<sub>2</sub> nos intervalos de caixa fechada.

Segundo a NP EN1796 [38], o limite de exposição para o dióxido de carbono é de 5000 ppm. Como os blocos de solo-cimento não apresentaram emissão de CO<sub>2</sub>, pelo contrário, indicam a absorção deste gás, as concentrações de dióxido de carbono obtidas durante os ensaios respeitam com folga o limite proposto pela norma. Na Figura 36 podem ser observadas as concentrações mínimas, máximas e médias de CO<sub>2</sub> para cada um dos ensaios realizados.

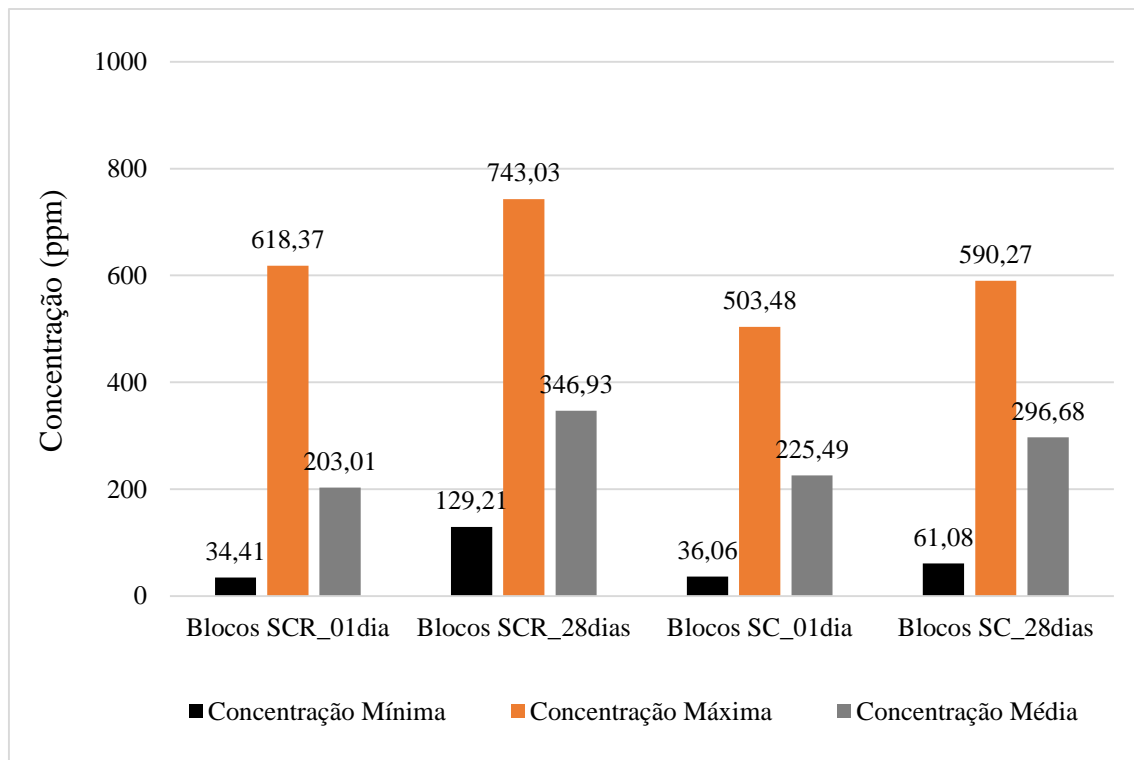


Figura 36 – Concentrações obtidas para o CO<sub>2</sub>.  
Fonte: Autoria própria.

Em todos os ensaios, a concentração máxima de dióxido de carbono foi atingida durante períodos em que a caixa se encontrava aberta. Em contrapartida, todas as concentrações mínimas do gás ocorreram durante ciclos de caixa fechada.

De entre as características que qualificam os blocos de solo-cimento como blocos ecológicos, está o facto de que este material não necessitar de nenhum processo de cozedura em sua fabricação, o que evita a geração de poluentes e reduz a emissão de dióxido de carbono na atmosfera [6], [49]. Nesta perspectiva, a capacidade de blocos de solo-cimento

absorverem CO<sub>2</sub> do ar atmosférico, torna-se uma característica ainda mais interessante do ponto de vista sustentável.

### 4.1.3. Metano (CH<sub>4</sub>)

Os resultados para as concentrações de metano, referentes aos ensaios de qualidade do ar para os blocos de solo-cimento, estão apresentados na Figura 37.

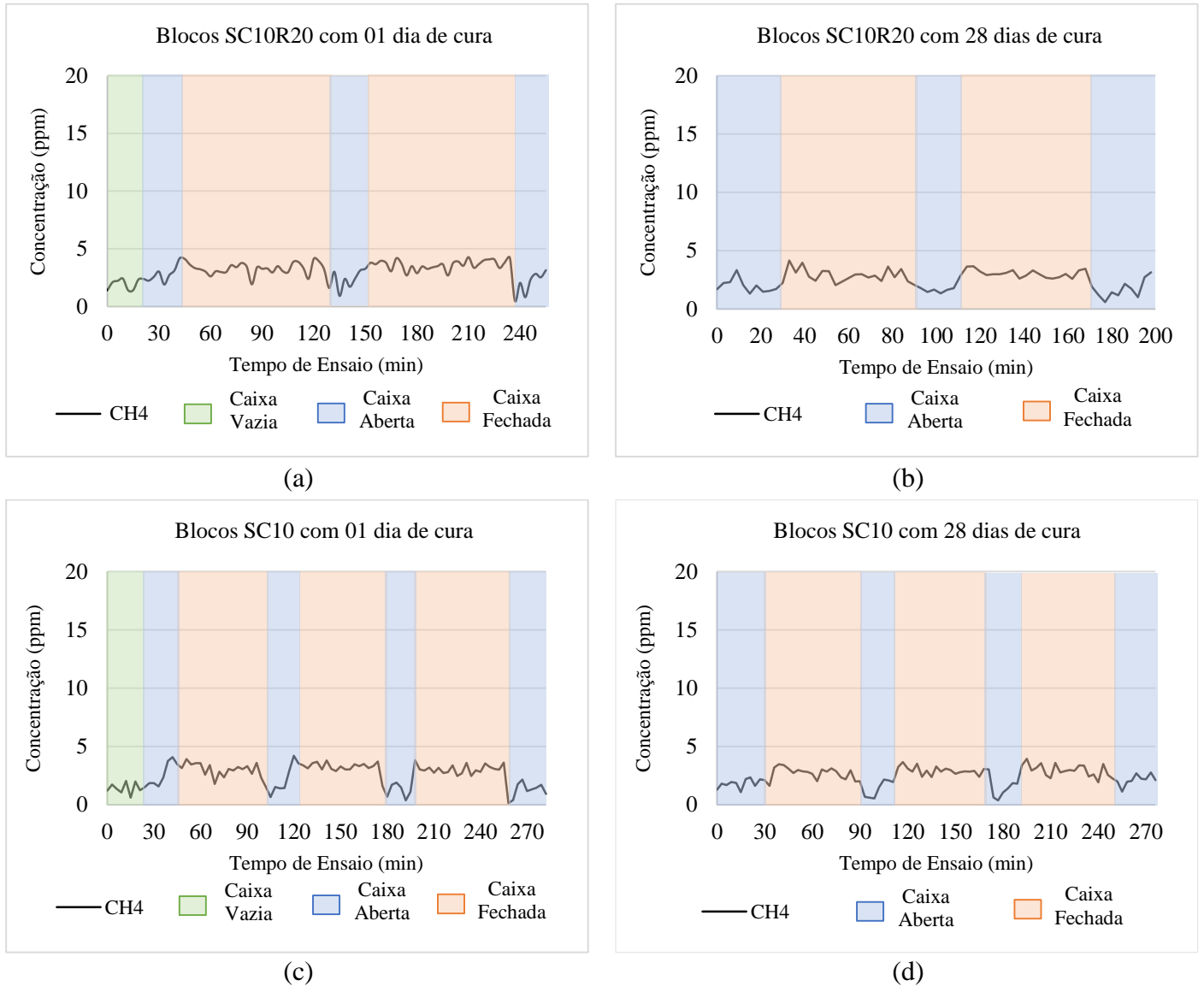


Figura 37 – Resultados dos ensaios de qualidade do ar: Metano (CH<sub>4</sub>).  
Fonte: Autoria própria.

Como pode ser observado na Figura 37, durante os 4 ensaios, a concentração de metano apresentou um pequeno aumento todas as vezes que a caixa foi fechada e chegou a atingir valores máximos na ordem de 4 ppm. O aumento da concentração de CH<sub>4</sub>, durante

ciclos de caixa fechada, denota uma pequena emissão deste gás por parte dos blocos. Contudo, pode-se afirmar que a emissão de metano não está relacionada com a adição do resíduo orgânico, uma vez que o mesmo comportamento foi observado nos blocos sem a adição de resíduo. Ao examinar as concentrações mínimas, máximas e médias de CH<sub>4</sub>, que são apresentadas na Figura 38, fica mais evidente que os resultados para o metano foram bastante próximos nos 4 ensaios.

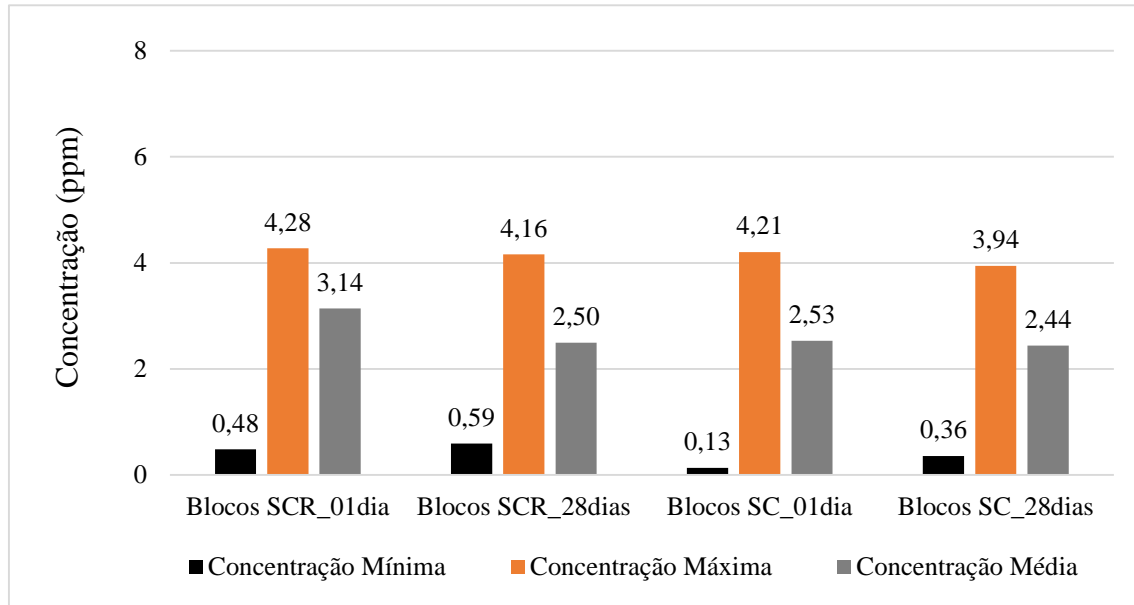


Figura 38 – Concentrações obtidas para o CH<sub>4</sub>.  
Fonte: Autoria própria.

Em altas concentrações o metano é um gás asfíxiante e com um potencial para o efeito estufa 20 vezes maior que o CO<sub>2</sub> [50]. O limite de exposição ao gás metano, segundo a NP EN1796 [38], é de 1000 ppm, portanto, tanto os blocos SC<sub>10</sub>R<sub>20</sub>, quanto os blocos SC<sub>10</sub>, respeitam este limite. A concentração máxima de metano, obtida durante os ensaios, atingiu apenas 0,43 % do valor limite de exposição proposto pela norma, o que confirma que foram emissões muito baixas.

#### 4.1.4. Óxido nitroso (N<sub>2</sub>O)

Relativamente ao óxido nitroso, em presença dos blocos de solo-cimento, sua concentração não apresentou variações significativas em nenhum dos ensaios realizados. Ao analisar os resultados apresentados na Figura 39, observou-se que a concentração de N<sub>2</sub>O se manteve próxima de zero em todos os casos, com valores máximos inferiores a 1 ppm.

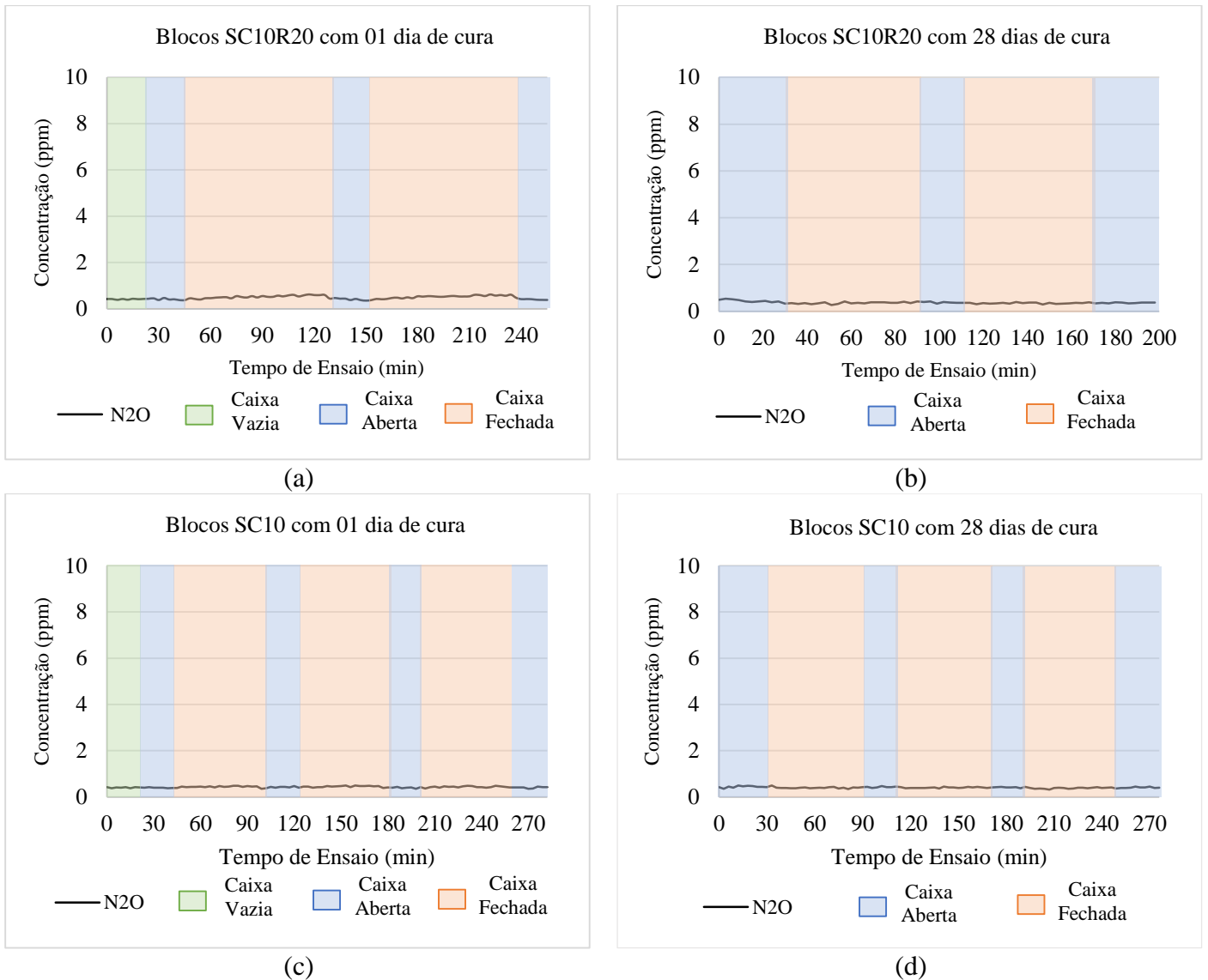


Figura 39 – Resultados dos ensaios de qualidade do ar: N<sub>2</sub>O.  
 Fonte: Autoria própria.

Como a concentração de N<sub>2</sub>O se manteve baixa em todos os ensaios, todos os blocos respeitaram com folga o limite de exposição ao óxido nitroso apresentado pela NP EN1796 [38]. O limite proposto pela norma é de 50 ppm e a concentração máxima obtida durante os ensaios foi de 0,62 ppm, o que equivale a apenas 1,24 % do limiar de exposição. Portanto, pode-se afirmar que o óxido nitroso não interfere na QAI em ambientes com a presença dos blocos de solo-cimento estudados neste trabalho.

## 4.2. Caracterização mecânica das alvenarias de blocos de solo-cimento

Nesta seção estão expostos todos os resultados obtidos pela análise do comportamento mecânico das alvenarias estudadas durante o programa experimental. Inicialmente, são feitos os apontamentos da caracterização da argamassa de assentamento utilizada, seguindo para os resultados obtidos pelos ensaios de compressão das paredes e, por fim, são apresentados e discutidos os modos de ruptura das 6 paredes ensaiadas.

### 4.2.1. Argamassa de assentamento

A resistência média à compressão, da argamassa utilizada na construção das paredes, está apresentada na Tabela 18.

**Tabela 18 – Resistência à compressão da argamassa de assentamento.**

Provete de Argamassa	Carga Máxima (KN)	Tensão Máxima (MPa)	Valor Médio (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
I	0,62	0,32	0,45	20,9
II	1,02	0,53		
III	0,98	0,51		

Fonte: Autoria própria.

A argamassa apresentou uma resistência média à compressão de 0,45 MPa, um valor muito baixo, cerca de 55% inferior à resistência obtida por Oliveira [21] para uma argamassa de terra com baixa resistência e flexibilidade. O baixo valor de resistência pode estar relacionada com a percentagem de estabilizante utilizado no traço da argamassa, visto que, é a mesma percentagem utilizada na composição dos blocos SC<sub>10</sub>, porém, os blocos passam pelo processo de compactação que lhes atribui uma estabilização mecânica e aumento de resistência, o que não acontece para a argamassa.

Convém ressaltar que os cilindros de argamassa foram confeccionados pela coleta de diferentes amassaduras, no decorrer da construção das paredes, correspondendo sempre a excedentes que restavam ao final da execução de uma junta. Sendo assim, a argamassa já apresentava menor trabalhabilidade, o que gerou amostras com maior porosidade e conseqüentemente com menor resistência. Desta forma, pode-se afirmar que a resistência à compressão, obtida para os cilindros destas amostras de argamassa, corresponde ao limite

inferior de sua resistência, ou seja, a resistência mais baixa que pode existir nas juntas das alvenarias, em caso de se usar a argamassa num estado pouco trabalhável.

#### 4.2.2. Resistência à compressão das alvenarias

Em termos de resistência à compressão, os resultados obtidos para as 6 alvenarias ensaiadas estão apresentados de forma resumida na Tabela 19.

**Tabela 19 – Resistência à compressão das alvenarias ensaiadas.**

Alvenaria		Carga Máxima (KN)	Tensão Máxima (MPa)	Valor Médio (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
Sem Resíduos Orgânicos (SC)	SC01	410,55	5,49	5,00	7,0
	SC02	359,20	4,77		
	SC03	353,99	4,73		
Com Resíduos Orgânicos (SCR)	SCR01	221,14	2,93	3,13	4,5
	SCR02	242,54	3,23		
	SCR03	243,65	3,23		

Fonte: Autoria própria.

Ao se analisar, separadamente, os resultados obtidos para os Provetes SC e SCR, nota-se que os valores individuais de tensão máxima foram bastante próximos, o que resultou em um baixo coeficiente de variação das amostras. Isso indica que, nos ensaios de compressão, as paredes tiveram um comportamento relativamente homogêneo, considerando que são provetes de difícil representatividade.

As paredes SCR apresentaram uma resistência à compressão média de 3,13 MPa, ou seja, cerca de 20 % menor do que a resistência dos blocos, com a mesma composição ( $SC_{10}R_{20}$ ) ensaiados por Nepomuceno [7]. Analogamente, as paredes SC apresentaram resistência à compressão média de 5,00 MPa, que é cerca de 30 % inferior à resistência obtida pela mesma autora, no caso de blocos  $SC_{10}$ . Esta diminuição da resistência das paredes, em relação a resistência dos blocos que as compõem, já era esperada, uma vez que, a resistência de um sistema de alvenaria é uma combinação complexa dos diferentes materiais utilizados, neste caso os blocos de solo-cimento e a argamassa de assentamento.

Como expectável, seguindo a tendência dos resultados dos blocos de solo-cimento estudados por Nepomuceno [7] e apresentados na seção 2.6 deste trabalho, as alvenarias com blocos  $SC_{10}R_{20}$  apresentaram menor resistência à compressão, em relação às paredes feitas com blocos  $SC_{10}$ . A resistência à compressão das paredes SCR foi 37,4% inferior à

resistência média das paredes SC. Mais uma vez, estes resultados demonstram que, a introdução do resíduo orgânico na composição dos blocos de solo-cimento, reduz a resistência à compressão destes elementos e conseqüentemente reduz a resistência das alvenarias.

Confrontando os resultados apresentados na Tabela 19, com os resultados obtidos por diferentes autores, apresentados na seção 2.9 deste trabalho, observou-se que as resistências à compressão das paredes SC e SCR foram superiores em quase todos os casos. Essa comparação encontra-se resumida na Tabela 20, sendo que foram feitas comparações apenas com paredes de juntas argamassadas, visto que são as com maiores resistências.

**Tabela 20 – Comparação dos resultados obtidos com os resultados de diferentes autores.**

Autor	Comparação
Oliveira [21]	As paredes SC apresentaram valores da resistência à compressão cerca de 55% superiores ao valor mais elevado encontrado nas alvenarias estudadas por Oliveira. Já as paredes SCR apresentaram uma resistência apenas 3% inferior ao maior valor encontrado pelo autor, o que mostra que o resultado foi muito próximo.
Neiva [47]	As paredes SC obtiveram resistência à compressão de aproximadamente 13% superior à resistência encontrada por Neiva. Enquanto as paredes SCR apresentaram resistência de cerca de 30% inferior à obtida pela autora, mas vale ressaltar que as paredes ensaiadas por Neiva eram de menor dimensão, se comparadas com as paredes SC e SCR.
Carvalho [16]	Tanto as paredes SC, quanto as paredes SCR apresentaram resistências à compressão superiores, em relação a maior resistência encontrada nas alvenarias estudadas por Carvalho. Os provetes SC apresentaram resistência à compressão cerca de 80% superior e os provetes SCR cerca de 14% superior.
Queiroga [43]	Por se tratar de paredes maiores, a resistência à compressão obtida para as paredes estudadas por Queiroga foi muito inferior às resistências obtidas para as paredes SC e SCR. Sendo 74% inferior à resistência dos provetes SC e 58% inferior aos provetes SCR.

Fonte: Autoria própria.

As curvas de tensão-deformação obtidas nos ensaios de compressão das 3 paredes SC, ou seja, das paredes com blocos sem a adição de resíduos orgânicos, são apresentadas na Figura 40. No eixo horizontal, na parte positiva dos gráficos, estão determinadas as extensões medidas pelo LVDT 01 e pelo LVDT 02 e, na parte negativa do eixo horizontal, a extensão medida pelo LVDT 03 (estes LVDTs foram representados anteriormente na

Figura 29 na página 50). Durante o ensaio de compressão da parede SC02, o LVDT 02 apresentou uma falha e as leituras desse transdutor não puderam ser aproveitadas para este provete.

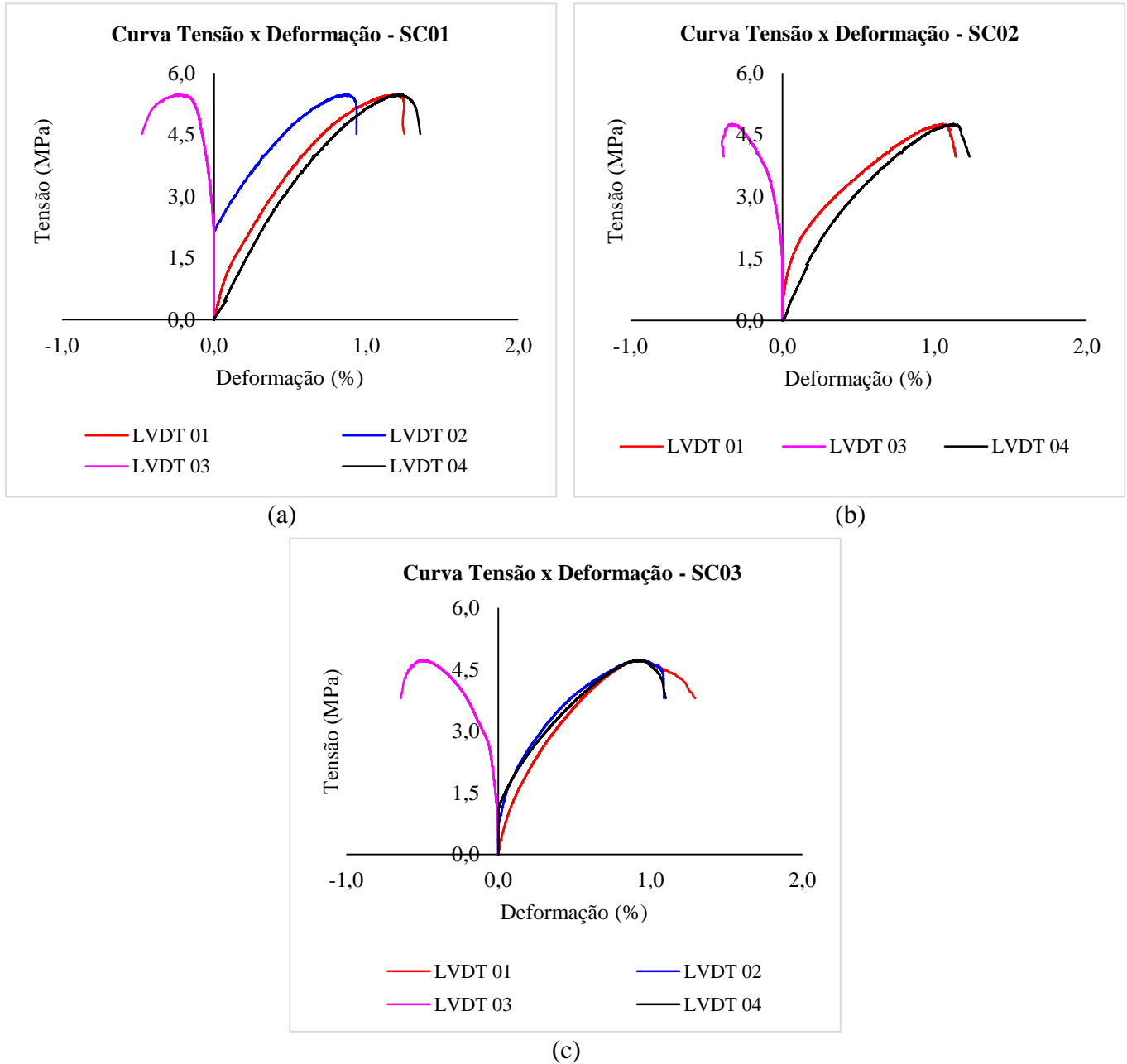


Figura 40 – Curvas de tensão-deformação obtidas nos ensaios de compressão das paredes SC.  
 Fonte: Autoria própria.

Na Figura 41 são apresentadas as curvas de tensão-deformação ao longo dos ensaios de compressão das 3 paredes SCR. Novamente, no eixo horizontal, na parte positiva dos gráficos, estão determinadas as extensões medidas pelo LVDT 01 e pelo LVDT 02 e, na parte negativa do eixo horizontal, a extensão medida pelo LVDT 03. O LVDT 02 voltou a

apresentar falhas durante o ensaio de compressão da parede SCR02 e as leituras desse transdutor não puderam ser aproveitadas.

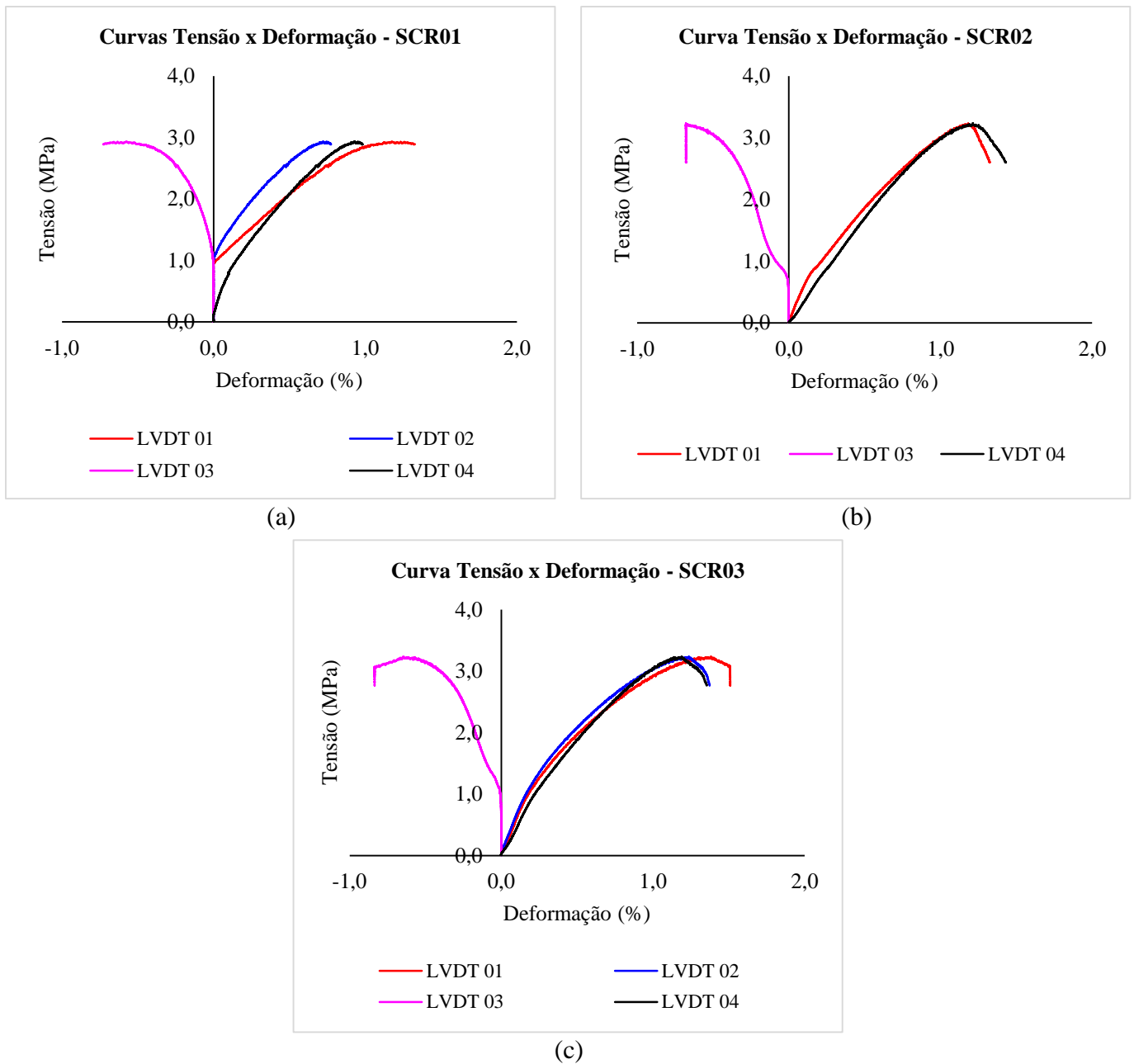


Figura 41 – Curvas de tensão-deformação obtidas nos ensaios de compressão das paredes SCR.  
 Fonte: Autoria própria.

Ao analisar as curvas de tensão-deformação das paredes SCR, apresentadas na Figura 41, observou-se, em todos os casos, que as paredes começaram a apresentar deformações mais acentuadas após a tensão aplicada atingir aproximadamente 1,0 MPa. Nota-se ainda que o trecho pós-pico das curvas da alvenaria SCR01, Figura 41(a), é bem mais reduzido que os trechos das curvas das paredes SCR02 e SCR03. A justificção para

isto é que, no ensaio da parede SC01, após notar-se que a curva atingiu seu patamar máximo, desligou-se a célula de carga, pois era esperado que a parede pudesse romper bruscamente e a intenção era de não a levar até a ruptura total. Contudo, isso prejudicou a análise do comportamento pós-pico da parede SCR01. Para evitar que este problema se repetisse nos demais ensaios, optou-se por aguardar que a carga aplicada sobre as paredes baixasse cerca de 30 kN a 40 kN em relação carga de pico atingida. Dessa maneira, foram obtidos comportamentos pós-pico mais bem definidos.

Nos ensaios das paredes SCR02 e SCR03, o transdutor que media os deslocamentos horizontais das alvenarias (LVDT 03) marcou uma deformação constante no trecho final da curva, como pode ser observado na Figura 41(b) e Figura 41(c). Este facto não significa que estas alvenarias estagnaram sua deformação horizontal, mas sim que a abertura de fissuras que ocorreu pelo excesso de carregamento, gerou extensões maiores que 4 mm (extensão máxima do LVDT utilizado).

De forma a possibilitar uma comparação entre as curvas de tensão-deformação das paredes SC com curvas das paredes SCR, na Figura 42 são expostas em conjunto, as curvas das 6 alvenarias ensaiadas à compressão. Cada curva representa as extensões medidas pelo transdutor posicionado na vertical, entre a base e topo de cada parede (LVDT 04).

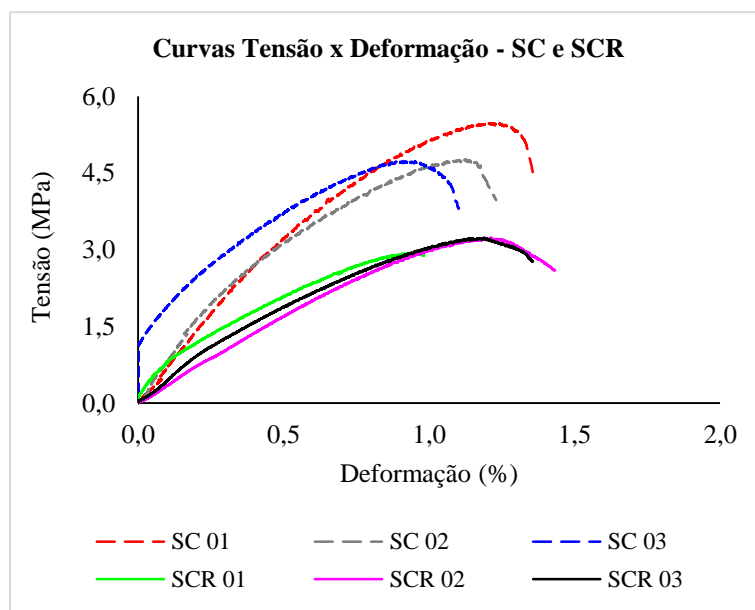


Figura 42 – Comparação das curvas de tensão-deformação das paredes SCR e SC.  
Fonte: Autoria própria.

Perante os ensaios de compressão axial, o comportamento das paredes SCR foi mais homogêneo que o comportamento das paredes SC, como pode ser observado na Figura 42. Como era esperado, tanto as paredes SCR quanto as paredes SC apresentaram pouca ductilidade, com deformações máximas entre cerca de 0,8% e 1,5% antes da ruptura. Analisando o comportamento pós-pico das curvas, verificou-se que as paredes SCR apresentaram um comportamento mais dúctil do que as paredes SC.

### **4.2.3. Modos de ruptura das paredes**

Relativamente ao seu modo de ruptura, observou-se que as paredes SCR apresentaram um comportamento semelhante ao comportamento das paredes SC. A compressão das alvenarias ocasionou inicialmente o esmagamento das juntas de argamassa, seguido pela fissuração e esmagamento dos blocos, até que se atingiu o ponto de ruptura das paredes. Quanto ao estado de fissuração, verificou-se o aparecimento predominante de fissuras verticais e contínuas, que se propagam, de modo geral, pelas juntas verticais de argamassa e pelos locais onde situam-se os furos verticais dos blocos.

No caso das paredes SCR, quando a carga aplicada sobre os provetes atingiu cerca de 150 kN, observou-se a abertura de pequenas fissuras horizontais, ao longo de várias juntas de argamassa, indicando a compressão destas juntas. Logo após a deformação das juntas, para valores de carga a volta de 180 KN, ou seja, cerca de 75% da resistência máxima atingida, surgiram as primeiras fissuras verticais nos blocos destas paredes. Após o aparecimento das primeiras fissuras nos blocos, as deformações se propagaram rapidamente, o que caracteriza o modo de ruptura frágil destas alvenarias.

O estado final das paredes SCR, após o ensaio de compressão, pode ser observado na Figura 43. O padrão de fendilhação horizontal indica que as juntas de argamassa sofreram esmagamento durante os ensaios, entretanto, a propagação de fissuras se deu predominantemente em linhas verticais e contínuas. Foi constatado uma tendência para ocorrer esmagamento dos blocos nos cantos superiores das paredes SCR, sendo que os demais blocos da primeira e da última fiada são pouco afetados, ficando praticamente intactos.



(a) Parede SCR01

(b) Parede SCR02



(c) Parede SCR03

Figura 43 – Modos de ruptura das paredes SCR após serem ensaiadas à compressão.  
Fonte: Autoria própria.

A parede SCR01, exposta na Figura 43(a), apresentou um estado de fissuração menos acentuado que as demais paredes, sendo que as fissuras ocorreram predominantemente no seu lado esquerdo, iniciando no canto superior esquerdo e se estendendo para as demais fiadas inferiores. A justificativa para esse comportamento é de

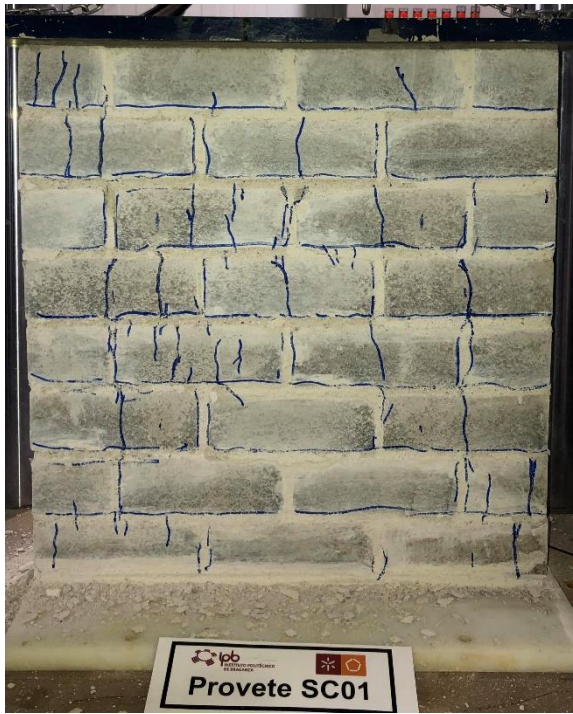
que, como já mencionado anteriormente, o carregamento da parede SCR01 foi interrompido logo após a carga máxima ser atingida. Isso inviabilizou uma propagação mais expressiva de fissuras, que geralmente aparecem após a resistência máxima da parede ser atingida.

Nos casos das paredes SCR02 e SCR03, expostas na Figura 43(b) e Figura 43(c) respectivamente, é notório uma ruptura total dos blocos na região central destas paredes. Através dos estados de fissuração apresentados, nota-se ainda uma tendência para as fendas verticais se propagarem ao nível das juntas verticais de argamassa, ou até ao nível dos furos verticais dos blocos. Isto denota uma maior instabilidade das paredes nestes pontos.

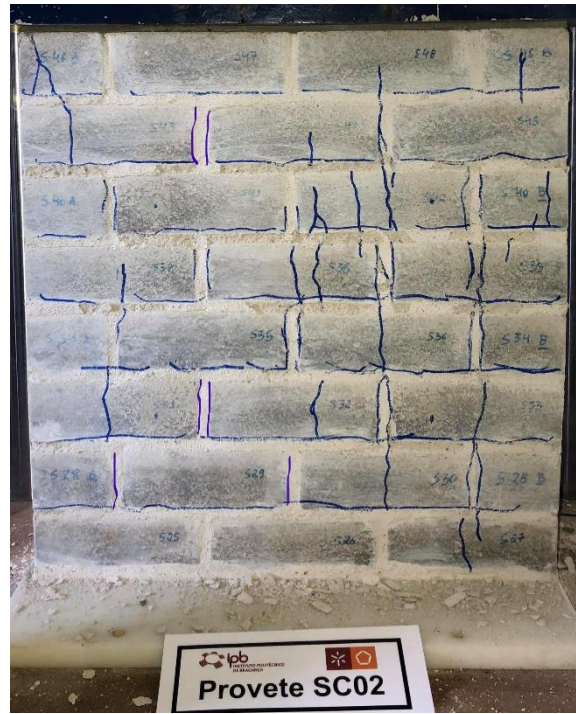
Para os provetes de alvenaria SC, as primeiras fissuras verticais nos blocos começaram a se abrir quando a carga aplicada sobre as paredes estava em cerca de 280 KN, o que representa aproximadamente 80% da resistência máxima destas paredes. Isto demonstra que estas paredes apresentaram um modo de ruptura ainda mais frágil que o das paredes SCR, pois a ruptura das paredes SC ocorreu de maneira ainda mais repentina, ligeiramente após a identificação das primeiras fissuras. O estado de fissuração final das paredes SC está apresentado na Figura 44.

Ao analisar as fissuras apresentadas na Figura 44(a) e Figura 44(b), verifica-se que as paredes SC01 e SC02 apresentaram estados de fissuração bastante semelhantes. A abertura de fissuras verticais iniciou-se pelos cantos superiores destas paredes e propagou-se de forma contínua até a base. Mais uma vez, ficou evidente que as fissuras se propagam alinhadas com os furos verticais dos blocos e com as juntas verticais de argamassa, que representam os pontos mais críticos das paredes.

No caso da parede SC03, apresentada na Figura 44(c), as fissuras verticais também se propagaram nos mesmo pontos de instabilidade, porém, neste caso as fendas não começaram nos cantos superiores da parede, sendo que a última fiada superior ficou intacta. As fissuras foram mais acentuadas no centro da alvenaria e permaneceram contínuas até a sua base, rompendo ao meio os três blocos da primeira fiada.



(a) Parede SC01



(b) Parede SC02



(c) Parede SC03

Figura 44 – Modos de ruptura das paredes SC após serem ensaiadas à compressão.  
Fonte: Autoria própria.

## Capítulo 5

# Conclusões e Trabalhos Futuros

### 5.1. Considerações finais

Visando contemplar os objetivos deste trabalho, foram fabricados blocos de solo-cimento em duas composições distintas, uma de blocos com adição de resíduos orgânicos e outra sem a adição de resíduos para comparação de resultados.

Em virtude da heterogeneidade do resíduo orgânico incorporado nos blocos de solo-cimento, surgiu a preocupação de que o resíduo pudesse reagir de forma instável com os demais materiais dos blocos, podendo assim, emitir algum gás prejudicial à saúde humana ou ao ambiente. Neste contexto, foram realizados ensaios de medição dos gases em um ambiente controlado, sujeito à presença dos blocos. Estes ensaios foram feitos para blocos de solo-cimento recém-fabricados, com 1 dia de cura, e também para blocos aos 28 dias de cura. Concluiu-se que a adição de resíduo orgânico aos blocos fez com que estes emitissem amônia em concentrações significativamente altas, quando recém-fabricados. Isto demonstra que a amônia, por ser um gás de odor forte, está relacionada ao mau odor detectado durante a fabricação destes blocos, porém, não se pode atribuir esta característica exclusivamente à amônia, visto que podem existir outros gases emitidos, que não foram analisados neste trabalho. Aos 28 dias de cura, os blocos não voltaram a apresentar emissões significativas de amônia, o que comprova que um maior tempo de cura foi suficiente para a estabilização do resíduo orgânico com os demais materiais dos blocos, em relação a este gás.

Através das medições de gases realizadas em presença dos blocos de solo-cimento concluiu-se também que os blocos fabricados têm a capacidade de absorver CO<sub>2</sub>, uma vez

que na presença dos blocos as concentrações deste gás sempre diminuiram, o que representa um fator positivo dos blocos. Estas constatações, assim como as constatações obtidas para a amônia, servem como um contributo inicial para a análise da qualidade do ar interior em ambientes sujeitos a presença dos blocos solo-cimento e demonstram a necessidade de um aprofundamento deste estudo.

Referente ao comportamento mecânico das alvenarias de blocos de solo-cimento, estas foram ensaiadas à compressão seguindo as recomendações da EN 1052-1 [1]. Constatou-se que a adição de resíduo orgânico aos blocos provocou uma diminuição da resistência à compressão das paredes, quando comparadas com as paredes de blocos sem resíduo orgânico. Todavia, os resultados de resistência obtidos para estas paredes, quando comparados com resultados de alvenarias de blocos de solo-cimento estudadas por diferentes autores, apresentam valores muito próximos, quando não superiores. Vale ainda ressaltar que a argamassa utilizada no assentamento dos blocos, durante a construção das alvenarias, apresentou valores de resistência muito baixos, o que pode ter reduzido a resistência global das paredes.

As paredes construídas com blocos com adição de resíduos orgânicos apresentaram modos de ruptura bastante semelhantes aos modos de ruptura das paredes feitas com blocos sem resíduos. De um modo geral, a abertura de fissuras ocorreu em linhas verticais e contínuas, normalmente acompanhando as juntas verticais de argamassa e os locais dos furos verticais dos blocos. Isto indica que estes pontos são os de maior instabilidade das paredes, quando submetidas ao excesso de carregamento.

Os blocos de solo-cimento com incorporação de resíduos orgânicos, estudados neste trabalho, foram idealizados para aplicação em alvenarias de vedação, que não possuem nenhuma função estrutural, a não ser a de resistir ao seu próprio peso. Além disto, considerando que o comportamento das paredes com resíduo foi muito semelhante ao comportamento das sem resíduo, conclui-se que o comportamento mecânico, nomeadamente a resistência à compressão, não seria um entrave à sua aplicação em construções em BTC.

## **5.2. Trabalhos futuros**

Constatada a importância da análise da qualidade do ar interior relacionada aos blocos de solo-cimento com adição de resíduos orgânicos e ainda, que as paredes construídas

durante o programa experimental deste trabalho não foram levadas a ruptura total, para evitar a geração de mais resíduos desnecessários, sugere-se como trabalhos futuros:

- Aprofundamento do estudo da análise da qualidade do ar, através da medição da concentração de outros gases, como os compostos orgânicos voláteis totais em ambientes sujeitos a presença dos blocos;
- Avaliação da resistência ao corte de paredes de blocos com e sem resíduo como característica mecânica complementar;
- Avaliação de técnicas de reparação ou reforço estrutural, como injeção de caldas ou rebocos armados, no reestabelecimento das características iniciais das alvenarias;
- Estudo da durabilidade através do estudo da degradação de pequenas paredes sujeitas a condições climáticas adversas.

## Referências bibliográficas

- [1] NP, *EN 1052-1: Métodos de ensaio de alvenarias - Parte 1: Determinação da resistência à compressão*. Caparica, Portugal, 1998.
- [2] P. Torgal, R. Eires, e S. Jalali, *Construção em Terra*. Guimarães: Universidade do Minho. TecMinho, 2009.
- [3] A. Murta, H. Varum, J. Pinto, I. Bentes, A. Paiva, e L. Ramos, “Benefícios económicos e ambientais inerentes ao uso de materiais estruturais naturais em habitações unifamiliares,” pp. 7–22, 2010, doi: 10.1590/S1678-86212010000300001.
- [4] V. Rocheta e F. Farinha, “Práticas de Projecto e Construtivas para a Construção Sustentável,” *Congr. Construção*, p. 11, 2007.
- [5] ABNT, *NBR 8491: Tijolo de solo-cimento - Requisitos*. Rio de Janeiro, Brasil, 2012.
- [6] D. Ferreira, E. Luso, e M. Cruz, “Blocos ecológicos de solo-cimento com incorporação de resíduos,” pp. 1–8, 2018.
- [7] E. da C. Nepomuceno, “*Use of Municipal Waste to Build Ecological Blocks*,” *Polytechnic Institute of Bragança*, 2018.
- [8] AENOR, *UNE 41410: Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques - Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo*. Madrid, España, 2008.
- [9] NABau, *DIN 18945: Lehmsteine – begriffe, anforderungen, prüfverfahren*. Berlin, Germany, 2013.
- [10] B. Berge, *The ecology of building materials.*, 2 ed. Elsevier, 2009.
- [11] A. Terra, “Muralha da China,” 2012. [Online]. Disponível: <https://arcatterablog.wordpress.com/arquitetura-de-terra/25-tapial-muralha-da-china/>. [Acesso: 30-Oct-2019].
- [12] E. A. Adam e A. R. A. Agib, *Compressed Stabilised Earth Block Manufacture in Sudan*. Paris: UNESCO, 2001.

- [13] N. P. Barbosa e K. Ghavani, “Materiais de Construção Sustentáveis,” *Congr. Luso-Brasileiro Mater. Construção Sustentáveis*, vol. 1, pp. 29–42, 2014.
- [14] S. Jalali e R. Eires, “Inovações científicas de construção em terra crua,” *Conferência Int. - Angola Ensino, Investig. e Desenvolv.*, p. 7, 2008.
- [15] J. M. Chumbinho, “Otimização de solos para a produção de blocos de terra compactada,” Universidade de Évora, 2017.
- [16] M. A. B. Carvalho, “Desenvolvimento e validação de uma solução construtiva em BTC,” Universidade do Minho, 2015.
- [17] M. Mendes, “Diário de campo - Curso de construção com terra e de formação de formadores.” Mumeno, 2006.
- [18] R. Rotondaro, “O Adobe,” em *Técnicas de construção com terra*, Bauru-SP, 2011, pp. 16–25.
- [19] M. de Caculé, “Construção em adobe,” 2016. [Online]. Disponível: <https://museudecacule.wordpress.com/2016/03/01/construcao-em-adobe/>. [Acesso: 06-Nov-2019].
- [20] M. F. C. G. da Silva, “Blocos de terra compactada com e sem materiais cimentícios,” IST - Técnico Lisboa, 2015.
- [21] J. V. Oliveira, “Comportamento mecânico de blocos de terra compactada ativados alcalinamente,” Universidade do Minho, 2014.
- [22] R. A. M. Silva, “*Repair of Earth Constructions by Means of Grout Injection*,” Universidade do Minho, 2013.
- [23] C. Neves e A. P. Milani, “Bloco de Terra Comprimida - BTC,” em *Técnicas de construção com terra*, Bauru-SP, 2011, pp. 35–45.
- [24] V. Rigassi, *Compressed Earth Blocks : Manual of Production*, vol. I. 1995.
- [25] ABNT, *NBR 10833: Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica - Procedimento*. Rio de Janeiro, Brasil, 2012.
- [26] ASTM, *D 2487: Classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system)*. West Conshohocken, USA, 2000.
- [27] LNEC, *E 239: Solos - análise granulométrica por peneiração húmida*. Lisboa, Portugal, 1970.

- [28] NP, *EN 143: Determinação dos limites de consistência*. Lisboa, Portugal, 1969.
- [29] NP, *EN 954: Inertes para argamassas e betões. Determinação das massas volúmicas e da absorção de água de areias*. Lisboa, Portugal, 1973.
- [30] MIBAL, “Caulino MIB-A.” 2018.
- [31] SECIL, “Declaração de desempenho C II/B-L 32,5N.” 2004.
- [32] “Boletim de Análise dos Resíduos.” Mirandela, Portugal, 2017.
- [33] “Resíduos do Nordeste.” [Online]. Disponível: [www.residuosdonordeste.pt/](http://www.residuosdonordeste.pt/). [Acesso: 28-Nov-2019].
- [34] LNEC, *E 197: Solos. Ensaios de compactação*. Lisboa, Portugal, 1966.
- [35] APA, “Agência Portuguesa do Ambiente - Qualidade do ar interior (QAI),” 2020. [Online]. Disponível: <http://apambiente.pt/>. [Acesso: 18-Jan-2020].
- [36] K. W. Tham, “*Indoor air quality and its effects on humans—A review of challenges and developments in the last 30 years*,” em *Energy and Buildings*, vol. 130, Elsevier B.V., 2016, pp. 637–650.
- [37] L. A. Delgado, “Qualidade do ar em instalações agropecuárias: construção e aplicação de um sistema de baixo custo,” Instituto Politécnico de Bragança, 2019.
- [38] NP, *EN 1796: Segurança e Saúde do Trabalho - Valores limite e índices biológicos de exposição profissional a agentes químicos*. Portugal, 2014.
- [39] C. A. Taulil e F. J. M. Nese, *Alvenaria Estrutural*. São Paulo: Pini, 2010.
- [40] C. Richter, “Alvenaria estrutural: processo construtivo racionalizado.” Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2007.
- [41] M. A. Ramalho and M. R. S. Corrêa, *Projeto de Edifícios de Alvenaria Estrutural*. São Paulo: Pini, 2003.
- [42] A. M. F. Ribeiro, “Análise experimental do comportamento ao corte de paredes reforçadas em alvenaria de BTC,” Universidade do Minho, 2015.
- [43] M. S. Queiroga, “Resistência à compressão de painéis reduzidos de alvenaria de BTC,” Universidade Federal da Paraíba, 2016.
- [44] R. J. F. Bauer, “Patologias em Alvenaria Estrutural de Blocos Vazados de Concreto,” *Revista Prisma - Caderno Técnico Alvenaria Estrutural*, São Paulo, pp. 33–38, 2007.

- [45] A. L. Eidt, “Manifestações Patológicas Provenientes De Movimentações Em Alvenaria Estrutural De Blocos: Dispositivos De Prevenção Utilizados Na Região Metropolitana De Porto Alegre,” Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.
- [46] G. Mohamad, “Construções em Alvenaria Estrutural: materiais, projeto e desempenho.” Blucher, São Paulo, 2015.
- [47] V. C. M. Neiva, “Caraterização Mecânica de Alvenaria de Blocos de Terra Comprimida ( BTC ),” Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 2018.
- [48] NCI, “*Terms & Properties of Ammonia*,” 2019. [Online]. Disponível: [https://ncit.nci.nih.gov/ncitbrowser/ConceptReport.jsp?dictionary=NCI\\_Thesaurus&version=19.08d&ns=ncit&code=C76698&key=923829251&b=1&n=null](https://ncit.nci.nih.gov/ncitbrowser/ConceptReport.jsp?dictionary=NCI_Thesaurus&version=19.08d&ns=ncit&code=C76698&key=923829251&b=1&n=null). [Acesso: 25-Jan-2020].
- [49] R. M. V. Domingues, “Avaliação do potencial económico de implementação da construção em BTC,” Universidade do Minho, 2015.
- [50] L. C. Furst, “Construção e aplicação de um sistema de baixo custo para a monitoração do gás metano na cidade de Bragança,” Instituto Politécnico de Bragança - IPB, 2017.

