

Caraterização do reforço de alvenaria de solo-cimento com reboco armado

Ana Luiza Mendes Trentini

Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia da Construção no âmbito da dupla diplomação com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Esta dissertação inclui as críticas feitas pelo Júri

Bragança

2021/04

Caraterização do reforço de alvenaria de solo-cimento com reboco armado

Ana Luiza Mendes Trentini

Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia da Construção no âmbito da dupla diplomação com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Orientado por

Doutora Eduarda Cristina Pires Luso (IPB)

Doutor Rui André Martins da Silva (U. Minho)

Doutor Arthur Medeiros (UTFPR)

Esta dissertação inclui as críticas feitas pelo Júri

Bragança

2021/04

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente aos meus pais, Paula e Renata e à minha irmã, Ana Carolina, por sempre terem me incentivado, dado todo o suporte além de serem meu porto seguro e inspiração.

Agradeço também aos meus amigos e colegas, companheiros de percurso desde o início da graduação pelo incentivo e aprendizados.

Aos meus orientadores Professora Eduarda Luso, Professor Rui Silva pelo incentivo, confiança e auxílio. Ao meu orientador Professor Arthur Medeiros que sempre me incentivou e auxílio ao longo da minha formação e neste trabalho.

Aos técnicos e responsáveis pelo laboratório de Materiais de Construção e laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais do IPB: Hermínia, Luísa, Sr. Otávio e Sr. João.

Agradeço também à Universidade Tecnológica Federal do Paraná por todo o aprendizado e por proporcionar esta oportunidade de crescimento profissional e pessoal através do Programa de Dupla Diplomação. Ao Instituto Politécnico de Bragança por propiciar esta oportunidade de ser aluna e de utilizar toda a estrutura e docentes. À Universidade do Minho por disponibilizar de equipamento.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho e desta etapa.

RESUMO

Os edifícios em alvenaria possuem uma baixa resistência quanto à ação sísmica, o esforço ao corte, por isso é necessário desenvolver técnicas para melhorar esta característica em construções novas e em antigas de tal forma que não prejudique a identidade cultural. No presente trabalho procedeu-se ao estudo de reforço estrutural de blocos de solo cimento com reboco armado utilizando malha de fibra de poliéster entre uma argamassa de revestimento à base de terra. A técnica TRM (*Textile reinforced mortar*) foi estudada, pois além de poder ser utilizada em construções novas, também pode ser aplicada em estruturas já existentes, preservando-as. Esta técnica foi utilizada com argamassa de terra afim de buscar uma similaridade de composição com o bloco e por não ser tão prejudicial ao meio ambiente em comparação com as argamassas convencionais. Para a definição desta argamassa, os materiais e suas respectivas proporções foram determinados a partir de estudos anteriores e ensaios empíricos, os quais serviram de base para selecionar três composições estudadas. Com a finalidade de analisar a eficiência do reforço, os materiais foram caracterizados separadamente e depois em conjunto. Com o bloco foi feita a análise de resistência à compressão para verificação do efeito do confinamento e molhagem/secagem, além de determinar suas características geométricas. A malha de poliéster utilizada é a GX35/35 a qual possui uma dimensão de grelha de 25x25 mm e é caracterizado previamente pelo fabricante. A fim de determinar as composições da argamassa foram realizados testes empíricos e visuais. Todas as composições eram compostas por solo, areia 0/2, areia 0/4, cal em pasta e estabilizantes: 14% de adição de cal hidráulica, 5% de adição de cimento ou com 25% de adição de cimento. Com isso definido, foram preparados os provetes para a caracterização dessas argamassas no estado endurecido (ensaio de flexão em três pontos e de compressão). Posteriormente, foram preparados os provetes para o ensaio de interação bloco-argamassa através do ensaio de *Pull-Off*, no qual também foi possível analisar a interferência do uso do chapisco. Ao final, o ensaio de interação bloco-argamassa-malha através do ensaio de corte do tipo *single-lap shear test*. Neste último ensaio foi feita a variante de comprimento da malha de fibra de poliéster aplicada no bloco para analisar a interferência do comprimento na resistência, foram utilizados os comprimentos de 250 mm que corresponde a aplicação ao longo de todo o bloco, 125 mm (1/2 do bloco) e 83 mm (1/3 do bloco). Em todos os ensaios realizados, as amostras preparadas com 25% de adição de cimento obtiveram um maior resultado.

Palavras-chave: argamassa de terra, bloco solo-cimento, fibra de poliéster, reforço, reboco armado.

ABSTRACT

Brickwork buildings have a low resistance to seismic action, cutting effort, so it is necessary to develop techniques to improve this feature in new and old constructions in such a way that it does not harm cultural identity. In the present work, we proceeded to the structural reinforcement study of cement soil blocks with reinforced plaster using polyester fiber mesh between an earth-based coating mortar. The TRM (Textile reinforced mortar) technique was studied, because in addition to being able to be used in new constructions, it can also be applied to existing structures, preserving them. This technique was used with earth mortar in order to seek a similar composition with the block and because it is not so harmful to the environment in comparison with conventional mortars. For the definition of this mortar, the materials and their respective proportions were determined from previous studies and empirical tests, which served as a basis for selecting three studied compositions. In order to analyze the reinforcement efficiency, the materials were characterized separately and then together. Compressive strength analysis was performed with the block to verify the effect of confinement and wetting / drying, in addition to determining its geometric characteristics. The polyester mesh used is the GX35 / 35 which has a grid size of 25x25 mm and is previously characterized by the manufacturer. In order to determine the mortar compositions, empirical and visual tests were carried out. All compositions were composed of soil, sand 0/2, sand 0/4, lime in paste and stabilizers: 14% addition of hydraulic lime, 5% addition of cement or with 25% addition of cement. With that defined, specimens were prepared for the characterization of these mortars in the hardened state (three-point flexion and compression test). Subsequently, the test pieces were prepared for the block-mortar interaction test using the Pull-Off test, in which it was also possible to analyze the interference from the use of roughcast. At the end, the block-mortar-mesh interaction test using the single-lap shear test. In this last test, the length variation of the polyester fiber mesh applied to the block was made to analyze the interference of the length in the resistance, the lengths of 250 mm were used, which corresponds to the application throughout the entire block, 125 mm (1 / 2 of the block) and 83 mm (1/3 of the block). In all tests performed, samples prepared with 25% cement addition obtained a higher result.

Keywords: earth mortar, soil-cement block, polyester fiber, reinforcement, reinforced plaster.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	II
ABSTRACT	III
ÍNDICE GERAL	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE TABELAS	IX
ÍNDICE DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	XI
1. Introdução	1
1.1 Enquadramento e motivação	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Organização da dissertação	2
2. Estado da Arte	3
2.1 Considerações iniciais	3
2.2 Construção em terra	3
2.3 Construção com bloco solo-cimento	4
2.3.1 Enquadramento histórico.....	4
2.3.2 Estabilização.....	7
2.3.3 Requisitos dos materiais e dos blocos.....	7
2.3.4 Processo de produção.....	9
2.3.5 Características da alvenaria de bloco solo-cimento.....	10
2.4 Vulnerabilidade sísmica da construção.....	11
2.5 Argamassas de revestimento para alvenarias de terra	12
2.5.1 Características das argamassas.....	14
2.6 Reboco armado.....	14
2.6.1 Descrição da solução de reforço armado	14
2.6.2 Propriedades e métodos de ensaio	16
3. Programa Experimental	23
3.1 Considerações iniciais	23
3.2 Caracterização do Solo e Areia.....	23
3.3 Bloco solo-cimento.....	30

3.4	Caracterização da malha de poliéster.....	34
3.5	Argamassas de reboco	35
3.5.1	Definição das composições	36
3.5.2	Amassadura.....	39
3.5.3	Caracterização da argamassa no estado fresco	40
3.5.4	Moldagem.....	41
3.5.5	Cura.....	46
3.6	Caracterização da argamassa no estado endurecido	47
3.7	Interação Bloco-Argamassa	49
3.8	Interação Bloco–Argamassa-Malha	51
4.	Resultado e Discussões.....	53
4.1	Características da argamassa no estado endurecido	53
4.2	Interação Bloco – Argamassa	55
4.3	Interação Bloco - Argamassa - Malha.....	58
5.	Conclusões e Trabalhos Futuros	61
5.1	Considerações finais.....	61
5.2	Trabalhos futuros	62
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Castelo de Paderne, Algarve, construído em taipa militar	5
Figura 2- A preparação do solo e a moldagem de adobes em Bichinho, Estado de Minas Gerais	5
Figura 3- Esquema do sistema de travagem e contraforte em alvenaria	6
Figura 4- Exemplos de construção empregando o sistema construtivo modular em bloco solo-cimento	6
Figura 5- Dimensões do bloco vazado de solo-cimento de acordo com a norma ABNT NBR 8491	8
Figura 6- Reforço das estruturas em blocos de solo-cimento: (a) varões de aço embebidos; (b) rebocos reforçados com malhas.....	12
Figura 7- Pormenor de um cordão da malha de poliéster	15
Figura 8- Curva de resposta tensão-deformação típica de sistemas TRM sob carga de tração no ensaio de interação argamassa-malha.....	19
Figura 9- Modos de rotura do ensaio Pull-Off: (a) coesiva da argamassa, (b) na interface substrato argamassa e (c) coesiva do substrato	20
Figura 10- Modos de rotura possíveis em testes de cisalhamento em sistemas de reforço TRM: rotura coesiva do substrato (A), rotura entre da interface matriz-substrato (B), rotura da interface matriz-malha (C), rotura por deslizamento da malha dentro da matriz (D), rotura da malha fora da matriz (E) ou rotura no interior da matriz (F)	20
Figura 11- Curvas de força-deslizamento típicas observadas em testes de cisalhamento em sistemas de reforço com fibra ligados externamente relacionados aos modos de falha A, B e C (a), modo de falha D (b), modo de falha E (c) e modo de falha F (d).....	21
Figura 12- Solo (a), areia 0/2 (b) e areia 0/4 (c)	24
Figura 13- Realização do ensaio para determinação da densidade das partículas do solo.....	24
Figura 14- Equipamento para o ensaio de baridade do solo e das areias	25
Figura 15- Execução do ensaio equivalente de areia.....	25
Figura 16- Etapas do ensaio para determinação do limite de liquidez	26
Figura 17- Gráfico para definir o limite de liquidez	26
Figura 18- Execução do ensaio para determinação do limite de plasticidade ..	27
Figura 19- Curvas granulométricas da Areia 0/2 e Areia 0/4.....	28

Figura 20- Areia 0/2 e areia 0/4 utilizadas no ensaio de peneiração.....	28
Figura 21- Etapas da realização do ensaio de sedimentação: (a) solo separado em finos e grossos e (b) etapa final do ensaio de sedimentação.....	29
Figura 22- Curva granulométrica do solo por peneiração e por sedimentação	30
Figura 23- Dimensões do bloco.....	31
Figura 24- Esquema e execução do ensaio de molhagem e secagem do bloco	31
Figura 25- Esquema para o ensaio para verificação do efeito de confinamento dos blocos	32
Figura 26- Ensaio de compressão dos blocos (a) altura de 1 bloco, (b) altura de 2 blocos, (c) altura de 3 blocos.....	32
Figura 27- Aspecto final dos blocos após o ensaio de compressão: (a) altura de 1 bloco rompido, (b) altura de 2 blocos rompidos e (c) altura de 3 blocos rompidos	33
Figura 28- Relação entre a resistência e a altura no ensaio para análise do efeito de confinamento do bloco	33
Figura 29- Malha de poliéster GX 35/35.....	34
Figura 30- Cal em pasta utilizada.....	35
Figura 31- (a) Cal hidráulica e (b) cimento utilizados	36
Figura 32- Curva Granulométrica da mistura de 65% de solo, 10% de areia 0/2 e 25% de areia 0/4	36
Figura 33- Argamassas iniciais aplicadas sob um bloco	37
Figura 34- Tronco de cone utilizado para o ensaio de padronização da consistência das argamassas	37
Figura 35- Etapas do ensaio para determinação da consistência da argamassa	38
Figura 36- Etapas do processo de amassadura.....	40
Figura 37- Etapas do ensaio de consistência por Flow Table: (a) equipamento; (b) argamassa no molde tronco-cônico; (c) após 15 pancadas da mesa e (d) medição do diâmetro de espalhamento	40
Figura 38- Etapas do processo de moldagem: (a) preenchimento de 50% do molde, (b) preenchimento do restante do molde e (c) rasamento do molde	42
Figura 39- Meio-blocos na câmara úmida	42
Figura 40- Meio-blocos com chapisco.....	43

Figura 41- Molde para a aplicação da argamassa para o ensaio de aderência bloco-argamassa.....	43
Figura 42- Etapas do processo de moldagem do provete para o ensaio de aderência bloco-argamassa: (a) argamassa aplicada no bloco e marcação metálica e (b) estado final do provete após a moldagem	44
Figura 43- (a) Aplicação da argamassa no substrato, (b) aplicação da malha na argamassa a 1/3 do comprimento, (c) aplicação da malha na argamassa na metade comprimento, (d) aplicação da malha na argamassa ao longo de todo comprimento e (e) aplicação da última camada de argamassa.	45
Figura 44- Provete no processo de cura após moldagem em cima da bancada do laboratório	46
Figura 45- Provetes de argamassa em processo de cura na câmara úmida ...	46
Figura 46- Blocos com argamassa para o ensaio de Pull-Off em processo de cura: (a) blocos com argamassa em cura em cima da bancada nivelada no laboratório e (b) blocos com argamassa dentro da câmara úmida.....	47
Figura 47- Blocos moldados para o ensaio do reforço estrutural em cura em cima da bancada do laboratório.....	47
Figura 48- Blocos moldados para o ensaio do reforço estrutural em cura na câmara úmida.....	47
Figura 49- Aspecto final do provete no ensaio de flexão em três pontos	48
Figura 50- Ensaio Pull-Off: (a) preparação dos provetes, (b) provetes com as peças metálicas 50x50 mm	50
Figura 51- Ensaio de aderência Bloco-Argamassa	50
Figura 52- Ensaio de interação Bloco-Argamassa-Malha	51
Figura 53- Tipos de ruptura no ensaio Pull-Off: (a) Argamassa-Chapisco, (b) Argamassa-Bloco, (c) Argamassa, (d) Bloco.....	56
Figura 54- Gráfico da resistência ao arrancamento para cada composição	57
Figura 55- Ruptura dos provetes no ensaio de corte do tipo single-lap shear test: (a) CH14 com destacamento da malha e argamassa, (b) CEM5 destacamento da malha e argamassa e (c) CEM25 rompimento pela malha.....	58
Figura 56- Gráfico de comprimento de amarração (cm) por força máxima linear (kN/m)	59

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1- Requisitos dos solos para produção de bloco solo-cimento segundo ABNT	8
Tabela 2- Requisitos geométricos dos blocos de terra comprimida de acordo com normas NTC 5324 [15] e ABNT NBR 8491 [16]	9
Tabela 3- Requerimentos de resistência à compressão e absorção da água do bloco solo-cimento	9
Tabela 4- Comparação da adição de estabilizantes na argamassa de terra....	13
Tabela 5- Caracterização mecânica de argamassas de terra	14
Tabela 6- Comparação das propriedades típicas dos materiais utilizados no reforço de reboco armado	15
Tabela 7- Características dos diferentes tipos de fibras do sistema TRM	16
Tabela 8- Possíveis ensaios para a caracterização mecânica dos materiais componentes da solução de reforço de TRM.....	17
Tabela 9- Possíveis ensaios para a caracterização da interação mecânica dos diferentes componentes da solução de reforço de TRM	17
Tabela 10- Resistência à aderência de argamassas de terra obtidas de ensaios Pull-Off	19
Tabela 11- Força linear máxima dos ensaios de corte do tipo "single-lap shear test"	21
Tabela 12- Densidade do solo.....	24
Tabela 13- Valores de baridade dos materiais estudados	25
Tabela 14- Análise granulométrica da areia 0/2 e da areia 0/4 pelo percentual de passados.....	29
Tabela 15- Resultados dos ensaios de compressão dos blocos.....	33
Tabela 16- Traço em massa determinadas para a verificação da consistência	38
Tabela 17- Quantidades dos materiais utilizados na amassadura para cada traço	39
Tabela 18- Diâmetro de espalhamento das argamassas pelo teste de consistência da Flow Table	41
Tabela 19- Quantidade de provetes para o ensaio de interação Bloco-Argamassa- Malha	45
Tabela 20- Retração linear e volumétrica dos provetes 40x40x160 mm	53

Tabela 21- Média e coeficiente de variação da carga máxima (N) e da resistência à flexão (MPa)	54
Tabela 22- Média e coeficiente de variação da carga máxima (N) e da resistência à compressão (MPa)	54
Tabela 23- Tipos de ruptura no ensaio de Pull-Off.....	55
Tabela 24- Média e coeficiente de variação da carga máxima (N) e da resistência ao arrancamento (MPa)	56
Tabela 25- Força linear máxima do ensaio corte do tipo single-lap shear test.	59

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

ESTIG – Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Bragança

TRM - *Textile reinforced mortar* IPB – Instituto Politécnico de Bragança

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

NBR – Norma Técnica Brasileira

NP – Norma Portuguesa

SC - Areia argilosa

UNE – Norma Técnica Espanhola

Capítulo 1

1. Introdução

1.1 Enquadramento e motivação

Muitas regiões do mundo são afetadas severamente pela ocorrência de sismos, nomeadamente quando as construções existentes não se encontram preparadas para estas ações estruturais. A construção moderna veio mitigar este problema com a introdução de regulamentos que preveem atividades sísmicas das novas construções e o reforço sísmico das edificações existentes.

A fim de evitar que estas construções colapsem e causem danos histórico-culturais (dependendo do valor do edifício), materiais e humanos, é necessário reforçar as estruturas com soluções compatíveis e eficientes.

Neste contexto, esta dissertação usa a construção com bloco solo-cimento como caso de estudo. Esta é uma solução a qual possui um potencial socioeconômico elevado, uma vez que permite a utilização de trabalhadores locais para fabricação dos blocos e construção de edifícios; é mais econômica por utilizar recursos locais, diminuindo o custo com transporte e importação; é mais sustentável por dispensar o processo de cozedura na fabricação não emitindo poluentes no ar, além do solo ser de fácil obtenção e manuseio. Portanto, favorece uma construção sustentável, rápida e com custo reduzido [1].

Como alternativa ao reforço com aço, que é provavelmente o material mais utilizado atualmente no reforço de estruturas, será estudado o uso de malhas de fibra de poliéster aplicadas em reboco armados. Esta abordagem permite contornar algumas limitações dos reforços de aço, como de o aço possuir elevado peso próprio, ser facilmente corroído e apresentar elevado custo de manutenção em ambientes mais agressivos tais como regiões litorâneas, industriais e obras hidráulicas. Já as malhas de fibra de diversos materiais são mais leves e flexíveis. A solução de reforço de alvenaria com reboco armado tem sido uma solução em evidência na redução da vulnerabilidade sísmica destes edifícios, sobretudo na Itália [2].

Assim, este estudo procura analisar o reforço de paredes de alvenaria de bloco solo-cimento com rebocos armados com malha de fibra de poliéster, considerando a sua utilização tanto em construções novas como em existentes. Apesar da alvenaria de blocos solo-cimento apresentar em geral bom comportamento a esforços de compressão, a aplicação de rebocos armados permite dotar estas paredes de maior resistência à tração e ao corte, promovida pela malha de fibra de poliéster. Para que o sistema de reforço seja funcional e eficiente é necessário analisar e caracterizar a malha de fibra de poliéster, desenvolver argamassas compatíveis com os blocos de solo-cimento bem como,

analisar o comportamento de interação do sistema nomeadamente: bloco-argamassa, argamassa-fibra e bloco-argamassa-fibra.

1.2 Objetivos

Afim de reforçar estruturas de forma eficiente, econômica e sustentável, mantendo a identidade cultural das construções antigas, esta dissertação tem por objetivo principal o desenvolvimento de uma solução de reforço para paredes de alvenaria de blocos de solo-cimento com rebocos armados, focando-se a caracterização dos componentes (bloco solo-cimento, malha de fibra de poliéster e argamassa) e o seu comportamento de interação. Para isso, será ainda necessário estudar argamassas de reboco compatíveis de forma a garantir a funcionalidade e eficiência da solução. Então, será estudada a utilização de argamassa de terra, utilizando o mesmo solo constituinte do bloco com objetivo que buscar uma maior compatibilidade entre os elementos do reforço.

1.3 Organização da dissertação

Esta dissertação foi dividida em 5 capítulos. No Capítulo 1 apresenta-se uma breve introdução do tema, justificativa e objetivos do trabalho, bem como a sua estruturação. No Capítulo 2 foi exposta a bibliografia a qual apresenta estudos anteriores acerca do tema abordado. No Capítulo 3 detalha-se os procedimentos e ensaios realizados a fim de atingir o objetivo da dissertação. No Capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos. Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões finais deste trabalho assim como um breve indicativo de possíveis trabalhos futuros.

Capítulo 2

2. Estado da Arte

2.1 Considerações iniciais

Neste capítulo serão apresentados estudos que darão embasamento teórico para realização da dissertação, como o histórico da construção em terra bem como suas características físicas, vantagens e desvantagens de cada material que compõe o reforço estrutural. Além de expor ensaios relevantes realizados em trabalhos anteriores.

2.2 Construção em terra

A construção em terra é uma atividade que o homem desempenha desde o início da civilização e sua eficiência é comprovada visto que há construções de séculos passados como igrejas, templos, pirâmides e cidades inteiras que ainda podem ser observados. A construção em terra possui um potencial arquitetônico elevado como é observado nas construções antigas citadas que são apreciadas até hoje e proporciona que novas identidades culturais sejam criadas.

Este tipo de construção em Portugal data há centenas de anos, mas no início do século XX a construção em tijolo de barro cozido aumentou significativamente. Porém, logo no final deste século houve um aumento nas construções ao sul de Portugal retomando a construção em terra [2]. Atualmente, ainda são observados vários edifícios antigos que ilustram diversas técnicas tradicionais da construção em terra apesar de ainda existirem muitas dúvidas por parte da população quanto à sua qualidade. Entretanto, o que mais motiva o crescente desenvolvimento deste tipo de construção é a sustentabilidade, além do solo trazer vantagens técnicas, econômicas, culturais e sociais.

Quanto à sustentabilidade, a construção em terra possui baixa energia incorporada por não necessitar de cozedura ao longo do processo produtivo, usa solo, que é um material em abundância e pode resultar do aproveitamento do sobranço das escavações além de incorporar resíduos (cinza volante, resíduo da celulose, calcário, serragem, casca de arroz, escória de alto forno, entre outros materiais) para melhorar suas características como: resistência mecânica, resistência à água e resistência à abrasão [3]. Se faz necessário o uso desses tipos de estabilizantes, principalmente, pelas duas últimas características citadas.

A construção em terra não emite poluentes e é facilmente reciclável por ser um material natural, exceto quando são incorporados aditivos como cimento. Outro ponto é que o solo é um material presente em todos locais, então há pouca poluição pelo transporte do material, favorecendo também o aspecto econômico, pois além de diminuir o custo da construção, movimenta a economia e a mão de obra local, já que não precisa de mão de obra especializada nem de equipamentos específicos.

Lima [1] comenta algumas vantagens da construção em terra:

- Resistente ao fogo;
- Bom isolante térmico-acústico;
- Auto regulação da umidade do ambiente interior;
- Sustentável;
- Movimenta a economia local;
- Econômico;
- Processo construtivo simples;
- Mão de obra local;
- Potencial arquitetônico.

Como desvantagens Lima [1] comenta:

- Vulnerabilidade sísmica;
- Matéria-prima não homogênea;
- Elevada permeabilidade;
- Alta retração;
- Necessidade de manutenção frequente.

2.3 Construção com bloco solo-cimento

2.3.1 Enquadramento histórico

O homem, desde a pré-história, usufruía de materiais na natureza (pedra, madeira e barro) com técnicas primitivas para construir um lugar de resguardo. Com a necessidade de cada comunidade foram desenvolvendo métodos construtivos que mais se adequavam para proporcionar proteção e conforto.

A taipa é uma técnica construtiva que consiste na compactação do solo úmido a qual requer baixa quantidade de água e quando a terra não possui as propriedades desejadas incorporam-se outros materiais para reforço como pedras [4]. A compactação pode ser manual com pilões de madeira ou automática com um compactador pneumático. Ambos os casos são feitos in loco colocando terra úmida no interior de taipais (cofragem) os quais vão se deslocando conforme o andamento da construção. O desmolde ocorre com o solo ainda no estado fresco e depois é seco ao sol, não precisando de cozimento. Na Figura 1 observa-se uma construção em taipa.



Figura 1- Castelo de Paderne, Algarve, construído em taipa militar
Fonte: [4]

Outra técnica de construção em terra consiste na utilização de blocos de adobe feitos a partir da moldagem à mão com auxílio de um molde. Este método também não precisa de nenhum processo de cozedura e são desmoldados ainda no estado fresco e secados ao sol como apresentado na Figura 2. Fernandes [5] comenta que os primeiros adobes moldados foram retangulares com cerca de 80 cm de comprimento, posteriormente quando começaram a utilizar contrafortes que são ancoragens das paredes durante o processo construtivo e travagem que é a forma intercalada como são empilhados os blocos afim de evitar uma junta contínua, os blocos diminuíram de dimensão, sistemas os quais estão representados na Figura 3. Há registro de cidades que datam de 3.000 a.C. construídas com adobe e por vezes com betume misturado.



Figura 2- A preparação do solo e a moldagem de adobes em Bichinho, Estado de Minas Gerais
Fonte: [5]

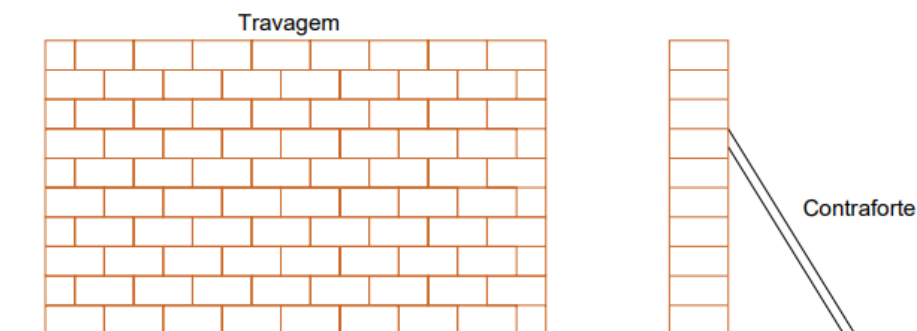


Figura 3- Esquema do sistema de travagem e contraforte em alvenaria

A produção do adobe segue as seguintes etapas: extração da terra, preparação da terra, adição de estabilizadores como cal, mistura da terra com água, moldagem manual, secagem, armazenamento e construção [5].

A técnica mais utilizada atualmente é a do bloco de terra compactada (BTC), mas devido à baixa resistência à água e à abrasão faz-se necessário o uso de ligantes para estabilização do solo, sendo o cimento o mais comum devido à sua disponibilidade e adequabilidade a uma maior variedade de solos [6]. Por isso, é comum que os BTCs também sejam chamados de blocos solo-cimento.

O bloco solo-cimento foi utilizado pela primeira vez em 1915 nos Estados Unidos, porém, só em 1935 iniciaram estudos sobre esse novo método e em 1936 foi normatizada esta técnica no Brasil. Em 1952 foi inventada a primeira prensa por um engenheiro na Colômbia e devido à compactação do solo, os blocos solo-cimento podem ser considerados como a evolução do adobe, pois, diferentemente do adobe, a coesão deste bloco não depende somente da quantidade de argila presente na terra, mas sim da pressão de compactação na produção [1, 7]. Na Figura 4 é possível observar exemplos de construção utilizando o bloco solo-cimento.



Figura 4- Exemplos de construção empregando o sistema construtivo modular em bloco solo-cimento
Fonte: [1]

2.3.2 Estabilização

A terra tem algumas limitações como baixa resistência à compressão, resistência à água e resistência à abrasão como já mencionado na seção 2.2 deste trabalho. Logo, Berge [2] comenta sobre a utilização de alguns estabilizantes como cimento Portland, cimento natural, cal e fibras naturais para aumentar a ligação entre as partículas de terra, diminuir a penetração da água e diminuir a retração do bloco.

Os benefícios da adição de cimento na composição dos blocos solo-cimento dependem de fatores como: solo, compactação, umidade e teor de cimento, sendo na maior parte dos casos incorporada uma quantidade entre 4% e 10% da massa de solo seco [8].

Ingles e Metcalf [10] comentam que ao utilizar o cimento para estabilizar o solo, o bloco deixa de ter uma variação volumétrica significativa devido à perda ou absorção de água, não se deteriora quando submerso na água, aumenta a resistência mecânica, aumenta a resistência à tração e a durabilidade por ter menor permeabilidade. Durante o processo de hidratação do cimento, o silicato reage formando um gel coloidal de silicatos de cálcio que é o principal agente aglomerante entre as partículas dos blocos. Entretanto, é necessário ter cuidado neste processo de estabilização, pois quando cimento é adicionado em excesso, o bloco fica mais propício a fissurar devido à retração do material na secagem.

Berge [2] acrescenta que a cal e o cimento são bons para estabilizar terra argilosa já que agem como aglutinantes. Entretanto, essas adições não são benéficas ao meio ambiente, pois aumentam a energia incorporada e complicam uma futura reciclagem.

Como solução ecológica Berge [2] apresenta a fibra natural a qual obtém bons resultados na redução da retração, no aumento do isolamento térmico e no aumento da resistência mecânica. Alguns exemplos são: palha cortada de aveia ou cevada, agulhas de pinheiro, caules de milho, linho, raízes secas, galhos, serragem e folhas secas. Alguns produtos minerais como vermiculita e argila expandida também podem ser incorporados afim de melhorar as características do solo, porém, exigem uma maior energia para extração do que as fibras naturais e emitem uma maior quantidade de dióxido de carbono.

2.3.3 Requisitos dos materiais e dos blocos

Com o aumento de interesse para esse tipo de construção na atualidade devido ao seu caráter sustentável, há necessidade de normas que regulamentem esta técnica. Em Portugal ainda não há norma sobre este processo, mas Silva [7] comenta que em outros países como Brasil, Alemanha, França, Estados Unidos, entre outros, já existem e há divergências entre as normas, o que dificulta a difusão deste método.

O Brasil possui 13 normas sobre o bloco solo-cimento, no mundo todo são 91 documentos normativos, sendo que 27% destes consideram a utilização da

terra somente com estabilizante (cimento). A maioria das normas classificam os blocos quanto à função, à geometria e à resistência mecânica baseada em valores de resistência à compressão [7].

A baixa aceitação nacional é atribuída por Silva [7] devido a Portugal não ter essa técnica normatizada. Além da necessidade da regulamentação, será fundamental incluir recomendações para zonas sísmicas por esta construção ser vulnerável a este esforço, dado isso faz-se necessária a utilização de reforços.

Antes de fabricar os blocos, o solo é caracterizado pela classificação unificada da norma ASTM D2487 [11], é feito a análise granulométrica de acordo com a especificação LNEC E239 [12] e é determinado o índice de plasticidade. Este índice é obtido pela diferença entre o limite de liquidez que é o teor de água para ocorrer a transição do estado plástico para o estado líquido e o limite de plasticidade que é o teor de água para ocorrer a transição do estado plástico para o sólido. Os requisitos para estas propriedades segundo a norma brasileira ABNT NBR 10833 [14] estão na Tabela 1.

Tabela 1- Requisitos dos solos para produção de bloco solo-cimento segundo ABNT
Fonte: adaptado de [14]

Requerimento	Valor
Passados na peneira ABNT 4,8 mm	100%
Passados na peneira ABNT 0,075 mm	10 a 50%
Limite de Liquidez	$\leq 45\%$
Índice de Plasticidade	$\leq 18\%$

Pela norma brasileira ABNT NBR 8491 [16], o bloco solo-cimento é classificado como tijolo maciço ou tijolo vazado. Se for vazado, os furos devem ser perpendiculares ao assentamento com pelo menos 50 mm de espaçamento entre os furos e 25 mm das bordas como mostrado na Figura 5.

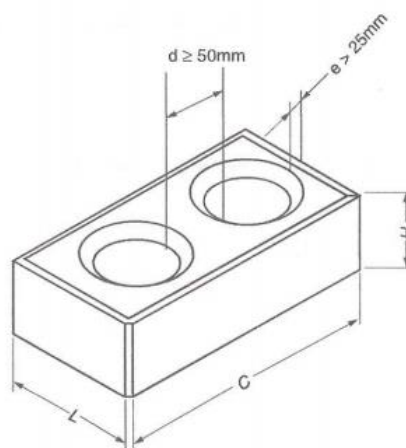


Figura 5- Dimensões do bloco vazado de solo-cimento de acordo com a norma ABNT NBR 8491
Fonte [16]

As dimensões estão indicadas na Tabela 2 de acordo com norma colombiana NTC 5324 [15] e brasileira ABNT NBR 8491 [16], visto que a norma europeia UNE 41410 [17] não especifica as dimensões.

Tabela 2- Requisitos geométricos dos blocos de terra comprimida de acordo com normas NTC 5324 [15] e ABNT NBR 8491 [16]

Norma	NTC 5324	ABNT NBR 8491
Dimensões	140 x 95 x 295	100 x 50 x 200
	220 x 95 x 220	120 x 70 x 240

Quanto a massa volúmica, a norma alemã DIN 18945 [18] determina que deve ser entre 0,4 e 2,2 kg/dm³. A ABNT NBR 8491 [16] acrescenta que os blocos devem ter pelo menos 14 dias antes da aplicação e a média da resistência à compressão aos 7 dias não deve ser inferior a 2 MPa. Esta norma também diz respeito à capacidade de absorção de água do bloco, a qual verifica a capacidade total de absorção de água pela diferença percentual entre a massa saturada e a massa seca. Os valores recomendados por esta norma estão na Tabela 3.

Tabela 3- Requerimentos de resistência à compressão e absorção da água do bloco solo-cimento
Fonte [16]

Propriedade	Valor Individual	Valores médios	Unidade
Resistência à Compressão	≥ 1,7	≥ 2,0	MPa
Absorção de água	≤ 22	≤ 20	%

A partir dos dados apresentados é possível concluir que há uma variedade de valores entre as normas e que algumas não possuem as classificações de todas as propriedades.

2.3.4 Processo de produção

Para a produção do bloco solo-cimento, inicialmente, a terra é coletada e espalhada para secar, os grandes torrões são desagregados, as pedras maiores e a matéria orgânica visível são retiradas manualmente. Na etapa de mistura dos materiais pode-se usar uma betoneira, onde primeiro são inseridos os materiais secos e depois é colocada a água e misturado até ficar homogêneo e neste processo deve-se ter o controle do peso de cada constituinte [7].

Com a mistura ainda fresca é feito o processo de moldagem, compactando a mistura em uma prensa. Para esta etapa pode-se utilizar uma prensa manual ou uma prensa hidráulica, que proporciona uma tensão de compactação entre 1 a 4 MPa [7]. Os blocos são posteriormente submetidos a cura, etapa importante para apresentarem um bom desempenho, são desmoldados e armazenados em local coberto com molhagens sucessivas por 7 dias e depois são submetidos a cura seca por mais 21 dias. A cura úmida é importante para garantir que o bloco tenha uma umidade adequada para ocorrer as reações de estabilização quando se utilizam ligantes hidráulicos. Enquanto que a cura seca permite uma secagem lenta do bloco aumentando a sua coesão. Observa-se no processo de fabricação que o bloco não passa por uma etapa de cozedura, tornando-se assim mais sustentável.

2.3.5 Características da alvenaria de bloco solo-cimento

Anteriormente foram tratadas as características do bloco e seus componentes, porém, há a necessidade de entender como o bloco se aplica em uma técnica construtiva. As alvenarias de bloco são elementos, normalmente, construídos a partir do empilhamento de blocos unidos uns aos outros por *interlocking* ou por argamassa de assentamento. Richter [19] comenta os dois tipos de alvenaria que podem ser estruturais ou de vedação, o que as diferenciam é que esta última possui a função de fechamento suportando somente o peso próprio e as cargas das janelas e das portas enquanto que a primeira possui além da função estrutural a de vedação.

Uma alvenaria está sujeita a esforços de compressão, tração e cisalhamento, sendo o esforço de compressão o mais expressivo. As alvenarias possuem baixa resistência à tração, logo, em projetos, busca-se minimizar esta solicitação [19].

Para alvenarias em que é utilizada argamassa de assentamento, esta deve ser adequada ao bloco devido às interações físico-químicas entre os componentes. Esta argamassa exerce o importante papel de regularizar a superfície de modo a distribuir os esforços uniformemente e absorver as deformações da alvenaria além de apresentar aderência ao suporte, resistência mecânica, ter durabilidade, eficácia produtiva e ser econômica. Uma prática comum no caso das alvenarias de bloco-cimento é utilizar uma argamassa feita com a mesma terra que se usou para produzir o bloco, a fim de garantir a mesma durabilidade, comportamento e compatibilidade entre os componentes da alvenaria [19, 20].

A influência desta argamassa de assentamento está relacionada com a espessura da junta e com a resistência do material:

- Se a espessura for pequena e ocorrer erro na execução, os blocos podem se juntar, prejudicando a resistência da parede pela concentração de tensões;
- Queiroga [21] apresenta um estudo que a cada aumento de 0,3 cm na espessura da argamassa, há uma diminuição de 14% na resistência à compressão da parede;
- Queiroga [21] acrescenta que se a resistência à compressão da argamassa for inferior a 30-40% da resistência do bloco, terá mais influência na resistência à compressão da parede.

No caso dos blocos com encaixe *interlocking*, o qual será utilizado nesta tese, o encaixe e os furos possibilitam a passagem de armaduras e redes. Desse modo não há preocupação com a influência da argamassa de assentamento. Sturm [22] comenta sobre o projeto HiLoTec apresentando uma vantagem deste tipo de ligação entre os blocos. Este projeto trata-se de um estudo do sistema construtivo com bloco solo-cimento que possui junta *interlocking* para implementar em países em desenvolvimento já que a terra é encontrada em todo

o mundo e é de fácil manuseio, porque os materiais mais modernos são mais caros e precisam de uma maior técnica durante o processo construtivo.

2.4 Vulnerabilidade sísmica da construção

Como já comentado na Secção 2.2, a vulnerabilidade sísmica é uma desvantagem da construção em terra, pois apresenta baixa resistência à tração e elevada fragilidade dos materiais à ação sísmica [20]. Por isso é necessário fazer reforços a estas estruturas em regiões que possuem atividades sísmica. A falta de cuidado com a construção em terra devido aos sismos pode causar danos humanos, econômicos e culturais, sendo esta última devido a inúmeras construções antigas com grande relevância cultural.

Afim de evitar colapsos da construção, a cobertura deve ser bem ligada às paredes, através de reforços se necessário, para que na ocorrência do sismo tudo funcione como um elemento único capaz de resistir a essas forças em todas as direções sem ocorrerem deformações excessivas. Para isso, os edifícios devem ter elevada capacidade de deformação, pois desta forma as forças de inércia se dissipam nas paredes e não provocam danos [23].

As fissuras por tração estão relacionadas com a separação vertical entre as paredes perpendiculares, causadas pela não transferência de carga sendo os cunhais os mais solicitados nesta situação. As fissuras por corte ocorrem devido ao caráter cíclico da ação sísmica diminuindo significativamente a rigidez. As fissuras de flexão são resultado de solicitações perpendiculares ao plano da parede [24]. Houben e Guillard [25] comentam que isto pode ser evitado introduzindo elementos horizontais em madeira, pedra ou aço.

Este reforço também pode ser interno da alvenaria de bloco solo-cimento segundo Houben e Guillard [25] introduzindo varões de diversos materiais como madeira, nylon, metal, entre outros. Estes varões devem ser amarrados à viga de coroamento e de fundação do edifício e envolvidas por uma argamassa como mostrada na Figura 6. Ribeiro [20] acrescenta que outra maneira de fazer o reforço é através do uso de malhas ou tela de aço no interior e exterior da construção apresentado na Figura 6b.

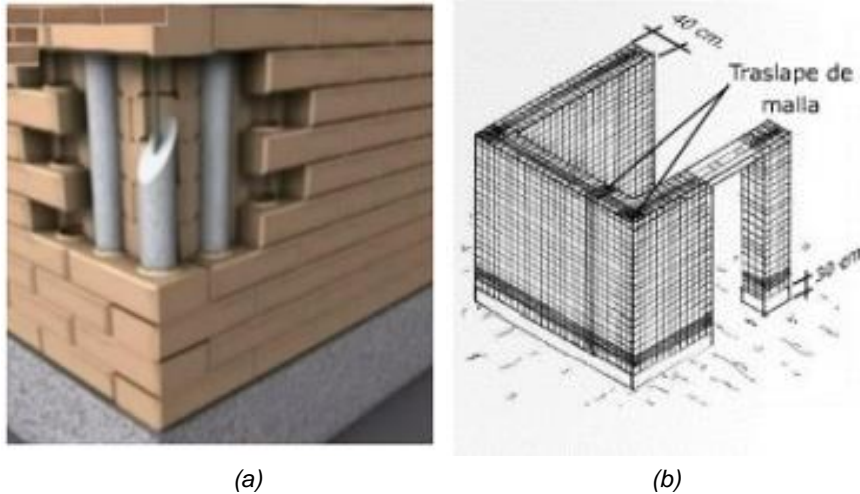


Figura 6- Reforço das estruturas em blocos de solo-cimento: (a) varões de aço embebidos; (b) rebocos reforçados com malhas
Fonte [20]

Apesar do conhecimento de que há necessidade de reforços, principalmente, em áreas com risco sísmico, ainda não há uma técnica empregada e difundida no mundo todo. A comunidade científica tem buscado encontrar uma técnica mais eficiente, econômica e sustentável.

2.5 Argamassas de revestimento para alvenarias de terra

As argamassas de revestimento têm como principal objetivo proporcionar uma superfície mais uniforme e estável. Também possui a função de melhorar a resistência à compressão e proteger a estrutura de intempéries permitindo uma impermeabilização, resistência a erosão e durabilidade. Ribeiro [20] comenta que os sistemas de revestimento, normalmente, são constituídos pela aplicação de camadas finas de argamassas, sendo: chapisco (tem a função de dar aderência entre o suporte e próxima camada), camada de base (função de impermeabilizar e regularizar a superfície) e camada de acabamento – reboco (função estética e barreira da água).

Os materiais constituintes destas argamassas podem ser argamassas de terra que são ecológicas e existem em abundância, exceto quando utilizado ligantes não sustentáveis, pois assim como o bloco solo-cimento, há uma baixa energia incorporada devido ao uso da argila crua como ligante principal. Quando não são estabilizadas com químicos podem facilmente ser recicladas ao final da vida útil utilizando um baixo consumo de energia e um pouco de água para amassadura. O uso da terra argilosa também não emite poluente, não exige mão de obra especializada, absorve poluentes, reduz o uso de energia, armazena calor e equilibra a umidade do ar, permitindo uma estabilidade do clima interno e melhorando a qualidade de vida dos utentes. No entanto, sem estabilizante possui retração volumétrica significativa, não é um material homogêneo e também não é resistente a água [23].

Segundo Gomes *et al.* [9], as argamassas estabilizadas com 15% em peso com cal aérea, cal hidráulica, cimento natural e cimento Portland apresentaram muitas fissuras e ao adicionar fibras apresenta uma quantidade inferior de fissuras. No entanto, deve-se considerar a retração volumétrica aplicada em um suporte para avaliar efetivamente o comportamento da argamassa. Gomes *et al.* [9] acrescenta o estudo feito em relação ao substrato o qual indica que quando este é mais arenoso há uma menor aderência da argamassa.

Faria e Lima [26] fez um estudo sobre argamassa de terra com os mesmos ligantes (cimento Portland, cimento natural, cal aérea e cal hidráulica), mas com proporções de 5%, 10%, 15% e 15%, respectivamente, em relação a massa de terra. Os resultados comparativos em relação à adição destes estabilizantes estão resumidos na Tabela 4.

Tabela 4- Comparação da adição de estabilizantes na argamassa de terra
Fonte [26]

	Cimento Natural	Cimento Portland	Cal aérea	Cal Hidráulica
Resistência à tração	+	+	-50%	+
Resistência à compressão	+	+	-50%	+
Resistência à água	++	++	++	++
pH	=	=	++	=

= sem alteração; + aumento; ++ aumento significativo; -50% redução de 50%

O aumento do pH observado com a adição de cal aérea faz inibir o desenvolvimento de fungos mesmo em situações de elevado teor de umidade e fraca ventilação. Nesse mesmo estudo pode-se ainda concluir que as argamassas estabilizadas tiveram uma secagem mais lenta, fazendo com que aparecessem menos fissuras por retração durante o processo de cura.

Lima *et al.* [27] fez um estudo com a incorporação 5%, 10% e 15% de gesso hemihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$) na argamassa composta por terra e areia na proporção de 1:3. Estas argamassas obtiveram uma retração linear reduzida em todas as variantes de argamassa, sendo que a com 15% de adição de gesso apresentou uma retração linear inferior, sugerindo que a expansibilidade do gesso conseguiu compensar a capacidade de retração da terra argilosa. Para os ensaios de resistência mecânica, a adição de gesso melhorou significativamente ambas resistências, à compressão em 30% e à flexão a 15%. Este fato foi justificado por Lima *et al.* [27] pela argamassa de gesso obter resistência mecânica superior à argamassa de terra. Quanto à aderência ao suporte, não houve alteração com a adição de gesso. Como desvantagem, esta adição não proporcionou uma melhoria nos ciclos de molhagem e secagem.

2.5.1 Características das argamassas

A análise da retração é importante para a qualidade da argamassa, pois a retração excessiva gera fissuras que podem ocasionar em patologias. A quantificação desta característica se dá pela medição da variação do volume.

A argamassa de terra no processo de secagem perde quase toda água de mistura, ocasionando a perda do volume. Dessa forma, Gomes [28] comenta que o nível de retração da argamassa de terra depende da relação da água com o material seco, da mineralogia e da percentagem das partículas de argila.

Gomes [28] acrescenta que a maioria dos autores, os quais referenciam a argamassa de terra, admitem valores de retração linear de até 2%. Valor o qual Barroso [29] obteve em seu estudo cuja caracterização mecânica dessas argamassas estão indicadas na Tabela 5.

*Tabela 5- Caracterização mecânica de argamassas de terra
Fonte: adaptado de [29]*

Argamassas	Resistência à flexão (MPa)	Resistência à compressão (MPa)	Teor em água (%)
EM	1,1	2,3	2,1
EM2.0	0,5	0,9	0,9
S10EM2.0	0,6	0,8	0,9
CEM	0,3	0,6	0,6

EM: argamassa com terra natural;

EM2.0: argamassa 1:2 (terra: areia);

S10EM2.0: argamassa 1:2 (terra: areia) com adição de 10% de cal hidráulica;

CEM: argamassa de terra comercial (não estabilizada).

2.6 Reboco armado

2.6.1 Descrição da solução de reforço armado

Os materiais para reparar e melhorar as estruturas podem dividir-se em dois grupos: as argamassas de reparação e as resinas que possuem a função de envolver a estrutura para que o material de reforço seja submetido a esforço de tração além de resistir à compressão, envolver e proteger as armaduras; e os outros materiais possuem a função de resistir à tração como o aço ou as fibras de diversos materiais [30].

Existem diversos materiais de fibra para esta solução, a qual passou a ser incorporada na alvenaria e consiste no reforço por adição de malhas de polímeros externos. Nesta dissertação foi usada a malha de fibra de poliéster com sucesso.

Os compósitos poliméricos são materiais constituídos por uma matriz, que pode ser de resina epóxi ou poliéster e pelas fibras de reforço, conforme representado na Figura 7, as quais podem ser: carbono, vidro, aramida, basalto, poliéster entre outros materiais. As fibras são responsáveis pela resistência e rigidez, e têm elevada resistência à tração e módulo de elasticidade. A matriz

polimérica é dúctil e termo-endurecível, possui baixa absorção da água, boa resistência química, baixa retração e boa adesão. Além disso, a matriz também exerce a função de envolver e proteger as fibras de intempéries, garantindo a transferência de esforços para o suporte e impedindo deslocamentos [29, 31].

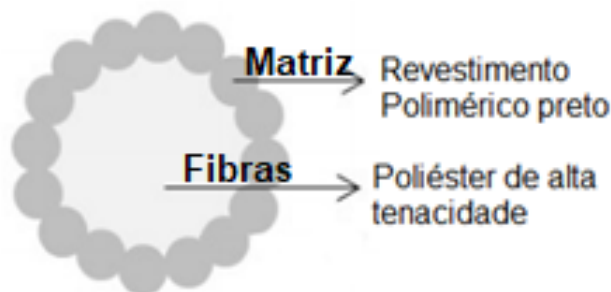


Figura 7- Pormenor de um cordão da malha de poliéster

Martins [32] considera como as principais características de malha de fibra com resina epoxídica, carbono, vidro e poliéster as apresentadas, resumidamente, na Tabela 6.

Tabela 6- Comparação das propriedades típicas dos materiais utilizados no reforço de reboco armado
Fonte: Adaptado [30, 32]

Propriedade (20°C)	Resina Epoxídica	Fibra de Carbono	Fibra de Vidro	Fibra de Poliéster
Módulo de elasticidade (GPa)	0,5 - 20	350 - 500	70	3,6 - 4,1
Resistência à tração (MPa)	19 - 30	2500 - 3100	1900 - 3000	55 - 70
Peso específico (kN/m ³)	11 - 17	18,1	25,5	-

A técnica TRM (“Textile reinforced mortar”) para reforço de alvenaria consiste na aplicação das malhas de fibra colocadas na superfície do substrato por meio de uma argamassa. Segundo Barroso [29], esta técnica é particularmente interessante para reforçar alvenarias de terra devido a sua vulnerabilidade sísmica elevada. Este reforço é composto por dois componentes: a argamassa e a fibra. A argamassa possui a função de envolver e proteger a fibra de tal forma que consiga transferir esforços entre a malha e o suporte. Então, a qualidade do reforço está diretamente relacionada com a composição da argamassa. Enquanto que a malha tem a função de melhorar a resistência à tração da alvenaria.

Maurício [33] comenta sobre três tipos de fibra que podem ser utilizados na solução TRM: vidro, basalto e carbono. A comparação entre estes três materiais está indicada na Tabela 7, sendo a fibra de vidro do tipo AR álcali resistente a qual recebe tratamento anterior para proteção álcali e a do tipo E que é a mais barata por não receber este tratamento, necessitando de cuidados posteriores.

Tabela 7- Características dos diferentes tipos de fibras do sistema TRM
 Fonte: Adaptado [33]

Material na rede	Resistência			
	Altas temperaturas	Ambiente alcalino	Rotura	Fadiga
Fibra de Carbono	+	++	++	++
Fibra de Vidro do tipo E	-	-	-	-
Fibra de Vidro do tipo AR	-	-	-	-
Fibra de basalto	++	++	+	+

Nível de desempenho: ++ Bom, + Normal, - Baixo, -- Mau

Nesta tabela estão indicados os comportamentos de três malhas quando comparadas as propriedades entre elas.

Em comparação com a Tabela 6, a fibra de poliéster apresenta uma boa flexibilidade e é quimicamente inerte, não necessitando de tratamento prévio para a sua utilização [32], diferentemente da fibra de vidro.

2.6.2 Propriedades e métodos de ensaio

Barroso [29] comenta como vantagens da utilização do reboco armado:

- Elevada resistência à tração;
- Leveza;
- Elevada resistência a corrosão e a produtos químicos;
- Resistência biológica;
- Bom comportamento à fadiga (importante característica para zonas sísmicas);
- Facilidade de aplicação.

Como desvantagens este autor comenta:

- Elevado custo;
- Baixa resistência ao fogo;
- Depende da interação com a argamassa para um bom desempenho.

O comportamento desta solução é influenciado pela resistência à tração da fibra, pelas características individuais dos componentes e pela resistência ao corte da interação substrato-argamassa-malha [29].

Ao utilizar o reforço malha de fibra de poliéster em estruturas de terra, deve-se tomar cuidado com a argamassa a utilizar. Por exemplo, argamassas à base de cimento devem ser evitadas devida a baixa compatibilidade com os blocos de terra, exceto quando estes possuem cimento como estabilizante. Ainda há necessidade de estudos acerca da eficácia deste sistema em alvenaria de terra, pois melhorará a capacidade resistente, mas o efeito sobre a capacidade de deformação ainda não é claro. Devido a isso é necessário fazer uma série de ensaios para caracterizar todos os componentes do reforço separadamente como indicado na Tabela 8 e depois caracterizar o

comportamento de interação entre esses componentes como mostrado na Tabela 9.

Tabela 8- Possíveis ensaios para a caracterização mecânica dos materiais componentes da solução de reforço de TRM
Fonte: Adaptado [29, 32]




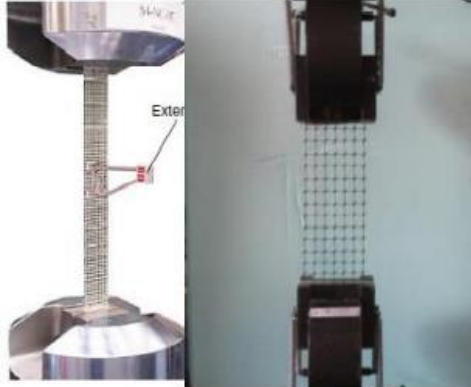
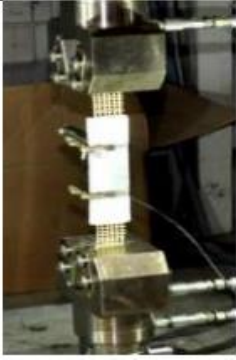



Material	Ensaio	
Substrato	<p data-bbox="485 434 874 495">Compressão em meio-blocos sobrepostos</p> 	
Argamassa	<p data-bbox="549 781 810 815">Flexão em 3 pontos</p> 	<p data-bbox="1075 781 1241 815">Compressão</p> 
Malha	<p data-bbox="596 1301 762 1335">Tração direta</p> 	

Tabela 9- Possíveis ensaios para a caracterização da interação mecânica dos diferentes componentes da solução de reforço de TRM
Fonte: Adaptado [29, 32]

Ensaio	Interação	Ilustração
Tração direta	Argamassa-malha (faixas)	
<i>Pull-Out</i>	Argamassa-malha	
<i>Pull-Off</i>	Substrato-argamassa	
Corte do tipo <i>single-lap shear test</i>	Substrato-argamassa-malha	

Ascione *et al.* [34] realizou o ensaio de aderência da malha com a argamassa de tração direta. A caracterização da malha é feita em três estágios sob carga de tração: não fissurado (I), desenvolvimento de fissura (II) e fissurado (III) como mostrado na Figura 8.

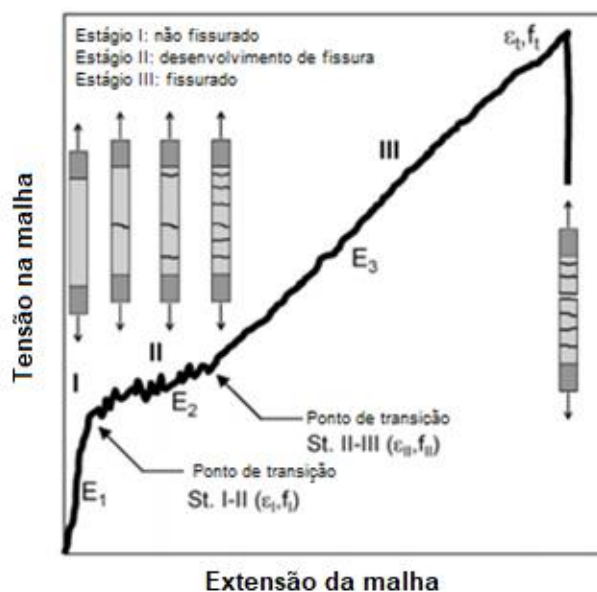


Figura 8- Curva de resposta tensão-deformação típica de sistemas TRM sob carga de tração no ensaio de interação argamassa-malha
Fonte: Adaptado [34]

A interação da argamassa com a malha também foi avaliada por Barroso [29] através de ensaios de tração direta, permitindo verificar que a força linear máxima da interação é semelhante à da malha quando ensaiada sozinha, este valor variou de 16,4 a 16,8 kN/m. Romanazzi *et al.* [35] justificou este fato pela baixa contribuição da argamassa para o comportamento em tração do sistema. Contudo, observou-se um incremento da rigidez inicial e a dissipação de energia pelo desenvolvimento de fissuras.

Através do ensaio de *Pull-Out* é possível verificar a aderência da malha com a argamassa. Este ensaio consiste em colocar a malha em um provete cilíndrico e enchê-lo com argamassa e, então, é feito o ensaio de arranque e observado o modo de rotura e a força linear.

A aderência da argamassa ao substrato pode ser caracterizada através do ensaio *Pull-Off*, o qual é importante, pois o sucesso do reforço é diretamente influenciado pela interação da argamassa com o substrato. Barroso [29] realizou este ensaio e obteve os valores indicados na Tabela 10.

Tabela 10- Resistência à aderência de argamassas de terra obtidas de ensaios *Pull-Off*
Fonte: adaptado de [29]

Argamassas	Resistência à aderência (kPa)
EM2.0	63,9
S10EM2.0	60,5
CEM	33,9

EM2.0: argamassa 1:2 (terra: areia);

S10EM2.0: argamassa 1:2 (terra: areia) com adição de 10% de cal hidráulica;

CEM: argamassa de terra comercial.

Neste ensaio ocorreram 3 modos de roturas: coesiva da argamassa (Figura 9a), na interface substrato argamassa (Figura 9b) e coesiva do substrato (Figura 9c).

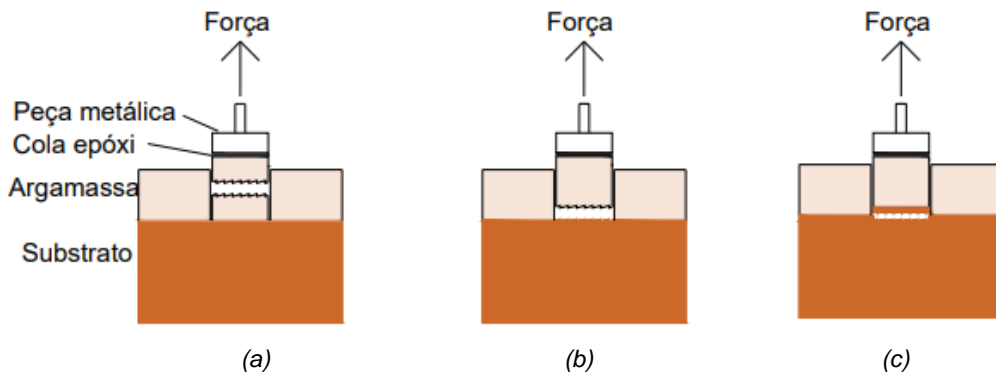


Figura 9- Modos de ruptura do ensaio Pull-Off: (a) coesiva da argamassa, (b) na interface substrato argamassa e (c) coesiva do substrato

Ascione *et al.* [34] também fez o ensaio de corte, o qual é importante para verificar a qualidade da interação entre os componentes do reforço e analisar a eficácia da transferência de carga do sistema de reforço. Este ensaio é realizado aplicando uma camada de argamassa em um substrato, colocando a malha e mais uma camada de argamassa. Neste procedimento diferentes roturas podem ocorrer dependendo das propriedades do substrato como: resistência ao cisalhamento da argamassa, resistência à tração malha e a interação da substrato-argamassa-malha-argamassa. Essas roturas, conforme ilustrado na Figura 10, podem ser: ruptura coesiva do substrato (A), ruptura entre a interface matriz-substrato (B), ruptura da interface matriz-malha (C), ruptura por deslizamento da malha dentro da matriz (D), ruptura da malha fora da matriz (E) ou ruptura no interior da matriz (F).

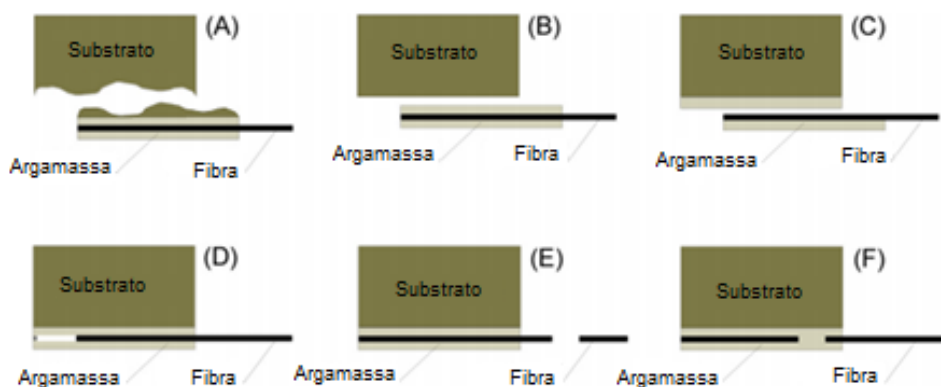


Figura 10- Modos de ruptura possíveis em testes de cisalhamento em sistemas de reforço TRM: ruptura coesiva do substrato (A), ruptura entre da interface matriz-substrato (B), ruptura da interface matriz-malha (C), ruptura por deslizamento da malha dentro da matriz (D), ruptura da malha fora da matriz (E) ou ruptura no interior da matriz (F)

Fonte: Adaptado de [34]

Essas 6 formas de ruptura dão origem a várias curvas genéricas de força-deslizamento como mostrado na Figura 11.

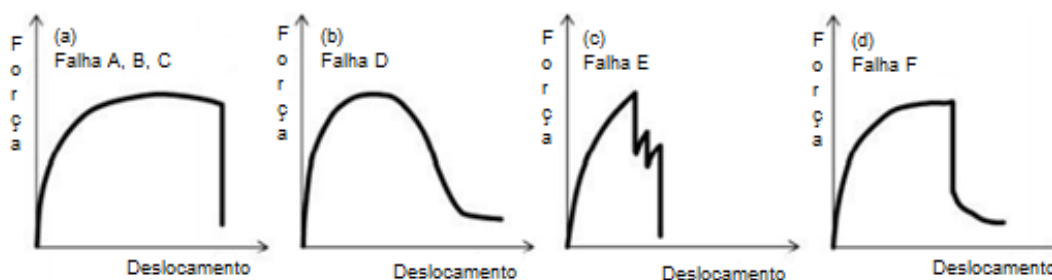


Figura 11- Curvas de força-deslizamento típicas observadas em testes de cisalhamento em sistemas de reforço com fibra ligados externamente relacionados aos modos de falha A, B e C (a), modo de falha D (b), modo de falha E (c) e modo de falha F (d)
Fonte: Adaptado de [34]

Os três primeiros modos de rotura estão representados na curva da Figura 11a, a qual apresenta um comportamento não linear seguido de rotura frágil. O modo de rotura D apresenta uma diminuição da carga suavemente devido à perda progressiva de fricção do deslizamento da malha dentro da argamassa (Figura 11b). Já o modo de rotura E está relacionado a reduções instantâneas de carga (Figura 11c). E por fim a falha F onde há uma redução repentina de carga, esta ruptura é ativada pela ruptura telescópica dos feixes de fios e ao final ocorre o deslocamento da primeira porção da malha para fora da argamassa (Figura 11d) [34].

O ensaio de aderência do substrato-argamassa-malha foi realizado por Romanazzi *et al.* [35] com malha de fibra de vidro e malha de nylon para reforço estrutural de taipa usando argamassa de terra. Ao fazer o ensaio de interação entre os três constituintes do reforço estrutural pelo ensaio de corte do tipo “*single-lap shear test*”, analisou três modos de rotura: deslizamento da malha, destacamento da argamassa do suporte e rotura mista por destacamento da argamassa do suporte e destacamento da segunda camada de argamassa. Em geral, a resposta inicial é elástica seguida por um comportamento não linear e rotura frágil. Durante a fase elástica, a transferência de carga é governada pela adesão da malha à matriz e depois da matriz ao suporte até que seja atingida a tensão de cisalhamento máxima. Na fase não linear desenvolvem-se microfissuras no sistema.

Para realizar o ensaio com a malha de fibra de vidro, Romanazzi *et al.* [35], estudou 4 comprimentos de amarração da malha no suporte (30, 60, 90 e 120 mm). Os resultados de força linear máxima atingida estão indicados na Tabela 11.

Tabela 11- Força linear máxima dos ensaios de corte do tipo “*single-lap shear test*”
Fonte: Adaptado de [35]

Comprimento de amarração (mm)	Força Linear Máxima (kN/m)
30	2,58
60	3,90
90	5,24
120	6,69

No comprimento de 30 mm Romanazzi *et al.* [35] observou que houve ruptura devido ao deslizamento da malha. Neste caso, o atrito gerado entre a malha e a argamassa permite a transferência de carga da malha para a argamassa e, então, para o suporte. Nos demais comprimentos, a ruptura ocorreu por tração da malha dentro da porção embutida. De forma geral, a fraqueza deste reforço foi na aderência da argamassa com a malha.

Para a fibra de nylon, Romanazzi *et al.* [35] estudou um único comprimento de amarração de 30 mm, o qual pode-se observar que os valores da força linear máxima foram semelhantes à força linear máxima da malha. A ruptura nesta situação ocorreu sempre em uma seção livre da malha. Logo, o ponto fraco desta solução não foi a aderência da argamassa ao suporte.

Capítulo 3

3. Programa Experimental

3.1 Considerações iniciais

Considerando os estudos apresentados no capítulo anterior e para atingir os objetivos desta dissertação, os ensaios foram realizados através da caracterização individual de cada material utilizado.

Para a argamassa foram caracterizados o solo, a areia 0/2 e a areia 0/4. O solo, mesmo material do bloco, foi caracterizado quanto à densidade, baridade, índice de plasticidade e granulometria. As areias quanto à baridade e granulometria. Com o bloco foi feita análise visual, molhagem e secagem, caracterização geométrica e mecânica. Com a malha não foi realizado nenhum ensaio de caracterização individual, pois está possui ficha técnica controlada pelo fabricante. Posteriormente, foi realizada a caracterização da argamassa no estado fresco (espalhamento por *Flow Table*) e no endurecido (flexão em três pontos e compressão).

Em uma segunda fase, foi estudada a interação entre os elementos. Para caracterizar a interação bloco-argamassa foi realizado o ensaio de *Pull-Off* e para a interação entre todos os elementos foi realizado o ensaio de corte do tipo *single-lap shear test*.

3.2 Caracterização do Solo e Areia

A fim de buscar uma argamassa de revestimento com composição e comportamento semelhante ao substrato, dispôs-se do solo que constitui o bloco solo-cimento. O solo foi recolhido diretamente do produtor dos blocos, sendo a sua proveniência o terreno do estaleiro localizado em Santiago do Cacém (Alentejo, Portugal).

Para a elaboração das argamassas, para além do solo, foram utilizadas duas areias com granulometrias complementares, nomeadamente uma areia 0/2 e areia 0/4 com o objetivo de buscar uma curva granulométrica contínua.

Os aspectos dos três materiais usados estão apresentados na Figura 12.

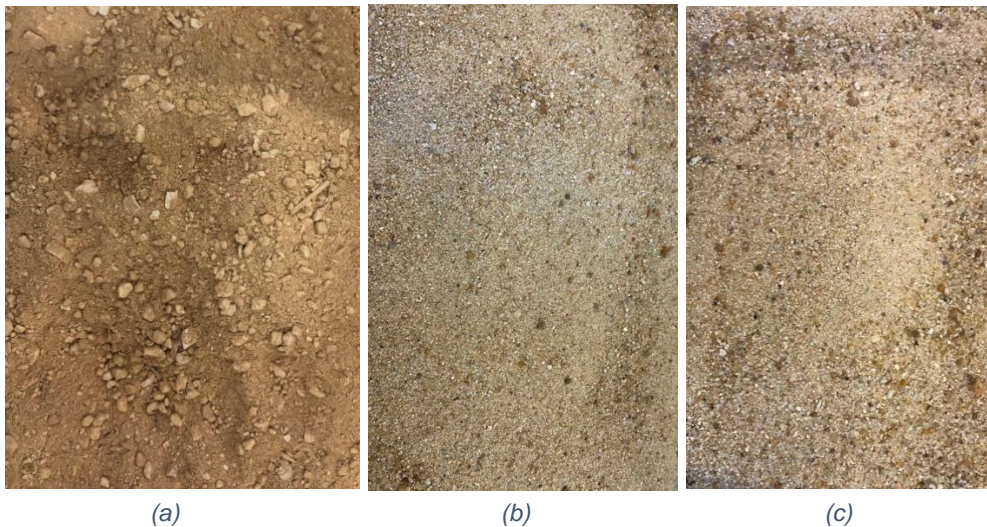


Figura 12- Solo (a), areia 0/2 (b) e areia 0/4 (c)

Relativamente ao solo, foram realizados os ensaios de densidade, de baridade, de índice de plasticidade e da granulometria. Em relação as areias, foram realizados os ensaios de baridade e granulometria.

Para o ensaio de densidade das partículas do solo foi utilizada a norma NP-83 [36] e uma das etapas deste ensaio está representado na Figura 13.



Figura 13- Realização do ensaio para determinação da densidade das partículas do solo

12. Ao analisar duas amostras obteve-se os valores apresentados na Tabela

Tabela 12- Densidade do solo

	Amostra 1	Amostra 2	Média
Densidade do solo (g/cm³)	2,74	2,80	2,77

De acordo com a densidade obtida, a classificação é solo comum (valores entre 2,65 e 2,90 g/cm³).

O ensaio de baridade foi realizado de acordo com a norma NP EN 1097-3 [37] a qual define a baridade como sendo o “quociente entre a massa do

agregado seco preenchendo sem compactação um dado recipiente pela capacidade do recipiente”. O equipamento utilizado para o ensaio está indicado na Figura 14.

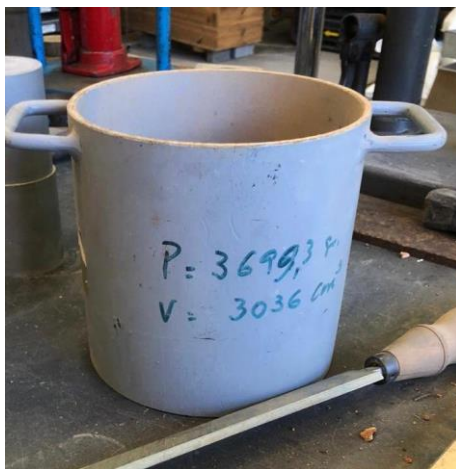


Figura 14- Equipamento para o ensaio de baridade do solo e das areias

Conforme determinado pela norma obtém-se os valores médios indicados na Tabela 13.

Tabela 13- Valores de baridade dos materiais estudados

	Baridade (g/cm ³)
Solo	1,365
Areia 0/2	1,410
Areia 0/4	1,513

O ensaio de equivalente de areia foi realizado com o solo segundo a especificação LNEC E 199-1967 [38] e possui o objetivo de determinar o equivalente de areia, característica a qual exprime a quantidade de elementos finos plásticos no solo. Na Figura 15 estão apresentadas etapas de sua realização.

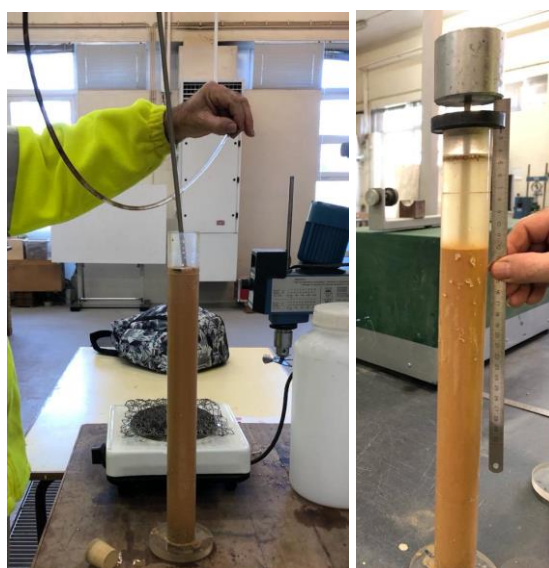


Figura 15- Execução do ensaio equivalente de areia

Este ensaio consiste em medir a altura da base ao nível superior do floculante e a altura entre a face superior da peça guia e a face inferior do peso do pistão, ao fazer a divisão do primeiro valor pelo segundo obteve-se 4,18% de elementos finos plásticos no solo.

O índice de plasticidade é a diferença entre os limites de liquidez e de plasticidade. A plasticidade do solo pode ser definida como sendo a capacidade do solo em ser moldado sob certa umidade. Portanto, para determinar este valor é necessário fazer os ensaios comentados abaixo para obter os valores dos limites segundo a norma NP-143 [13].

a) Limite de liquidez

As etapas deste ensaio estão indicadas na Figura 16 e, segundo a norma, o “limite de liquidez de uma amostra de solo o teor em água correspondente a 25 pancadas, obtido por interpolação numa curva”, a qual está representada na Figura 17.



Figura 16- Etapas do ensaio para determinação do limite de liquidez

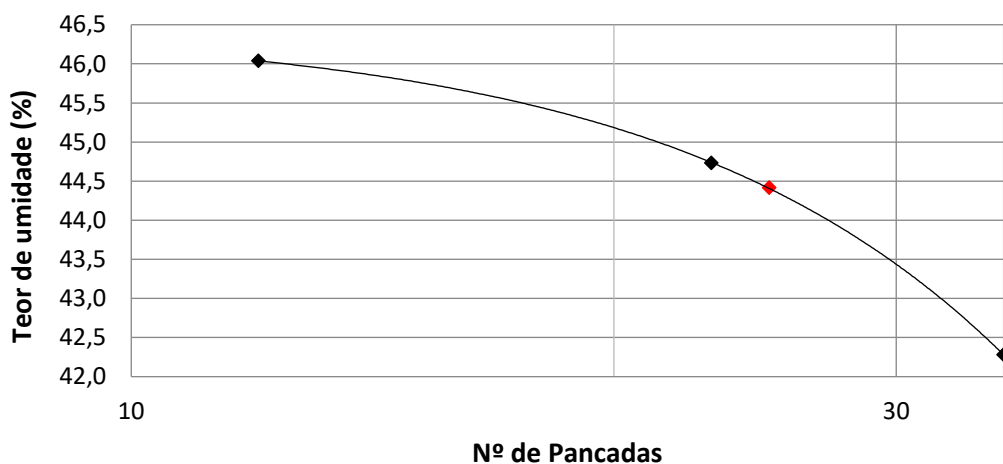


Figura 17- Gráfico para definir o limite de liquidez

A partir da Figura 17 determina-se o teor de umidade correspondente a 25 golpes, concluindo que o limite de liquidez é de 44,4%. A norma ABNT NBR 10833 [14] indica que este valor deve ser inferior à 45% para a produção de bloco solo-cimento. Como este solo é o mesmo utilizado para a fabricação dos blocos que serão reforçados neste estudo, eles se adequam a esta norma.

b) Limite de plasticidade

Este ensaio consiste em fazer um filamento com cerca de 3 mm de diâmetro por rolagem entre a palma da mão e uma placa de vidro como mostrado na Figura 18 com uma amostra de solo passante na peneira 420 μm .

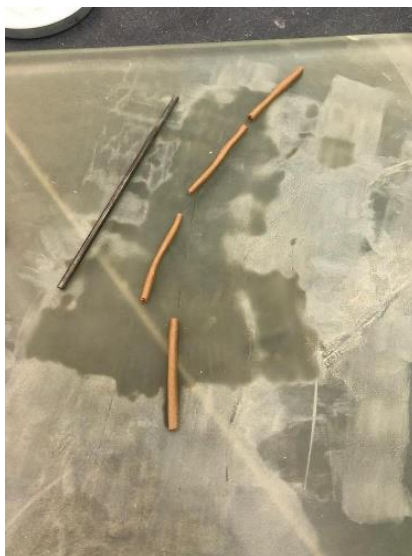


Figura 18- Execução do ensaio para determinação do limite de plasticidade

Após este procedimento, o solo é colocado na estufa para verificar a umidade, obtendo, assim, o valor de 25,8% o qual corresponde ao teor de umidade.

A partir dos resultados anteriores faz-se a diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade obtendo o valor 18,6% para o índice de plasticidade. Este valor indica a máxima quantidade de água que pode ser adicionada de modo que o solo mantenha a sua consistência plástica. A norma ABNT NBR 10833 [14] indica que o índice de plasticidade deve ser inferior à 18%, logo, os blocos solo-cimento desse estudo não se adequam a esta norma.

Portanto, é possível classificar o solo segundo a classificação unificada ASTM D2487 [11] como argila orgânica arenosa. As características deste tipo de solo são: semipermeável a impermeável quando compactado, resistência ao corte fraca quando compactado e saturado, compressibilidade média quando compactado e saturado e trabalhabilidade razoável como material de construção.

Para complementar a caracterização do solo e das areias foi realizada a análise granulométrica a qual consiste em determinar os diâmetros das partículas que compõe o material. Para isso foi utilizado o método da peneiração para os três materiais e adicionalmente o da sedimentação para o solo.

a) Método da peneiração

A norma para este ensaio é a EN 1015-1 [39] a qual determina que o material precisa ser seco em estufa a $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ por 24 horas e peneirado conforme indica a norma. As curvas granulométricas das areias, areia 0/2 e areia 0/4, estão representadas na Figura 19 e o material está representado na Figura 20.

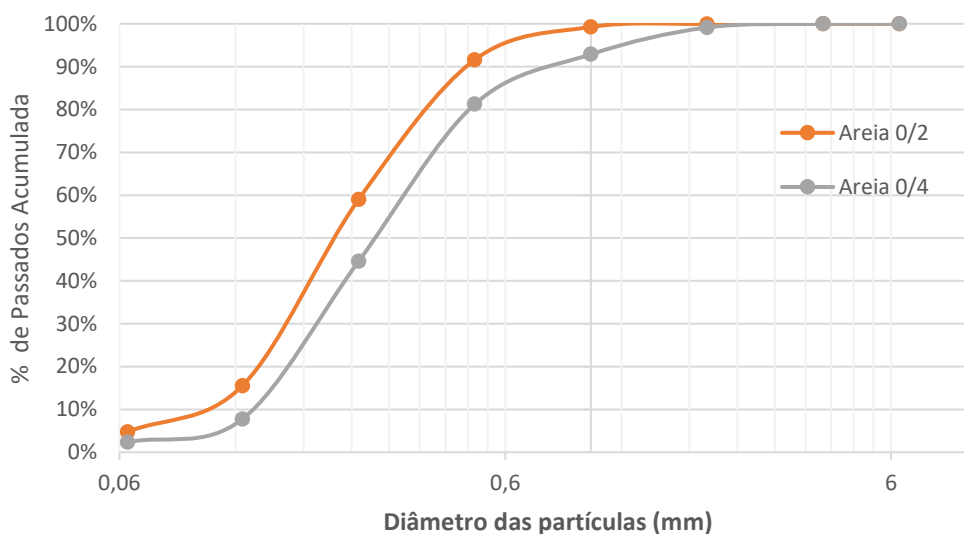


Figura 19- Curvas granulométricas da Areia 0/2 e Areia 0/4



Figura 20- Areia 0/2 e areia 0/4 utilizadas no ensaio de peneiração

A partir das curvas granulométricas é possível fazer as análises presentes nas Tabela 14.

Tabela 14- Análise granulométrica da areia 0/2 e da areia 0/4 pelo percentual de passados

	Areia 0/2	Areia 0/4
Grossos (2,0 - 4,0 mm)	0,0%	0,9%
Médios (0,5 - 2,0 mm)	41,4%	55,0%
Finos	58,6%	44,1%

b) Método da sedimentação

Este método é baseado na lei de Stokes com o objetivo de determinar o tamanho das partículas finas do solo com base na sua velocidade de sedimentação numa proveta com uma solução antifloculante. Este ensaio foi realizado segundo a especificação LNEC E 196 – 1966 [40]. O solo e a etapa final deste ensaio estão apresentados na Figura 21.

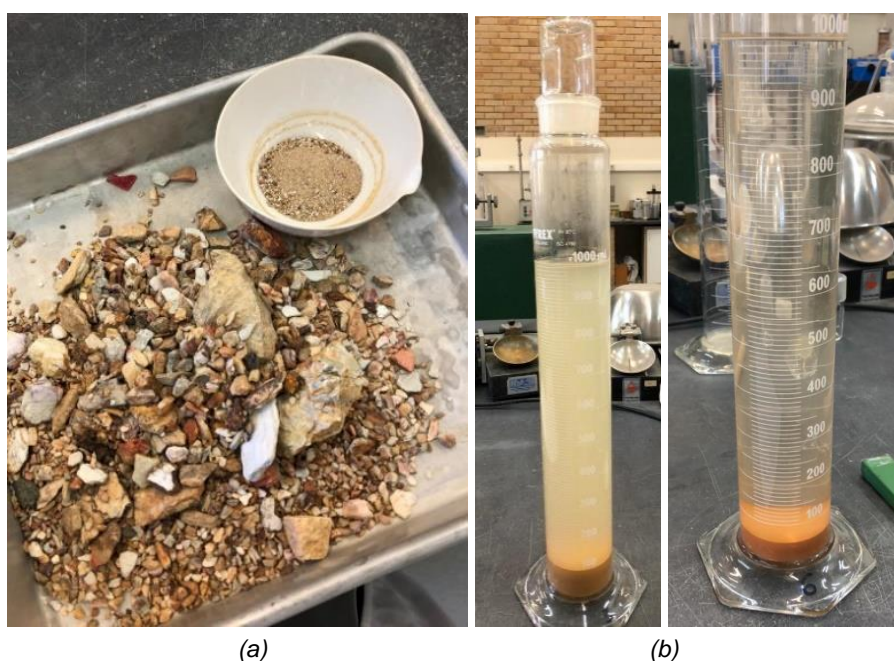


Figura 21- Etapas da realização do ensaio de sedimentação: (a) solo separado em finos e grossos e (b) etapa final do ensaio de sedimentação

A partir destes dois ensaios é possível obter uma única curva granulométrica para o material que está representada na Figura 22.

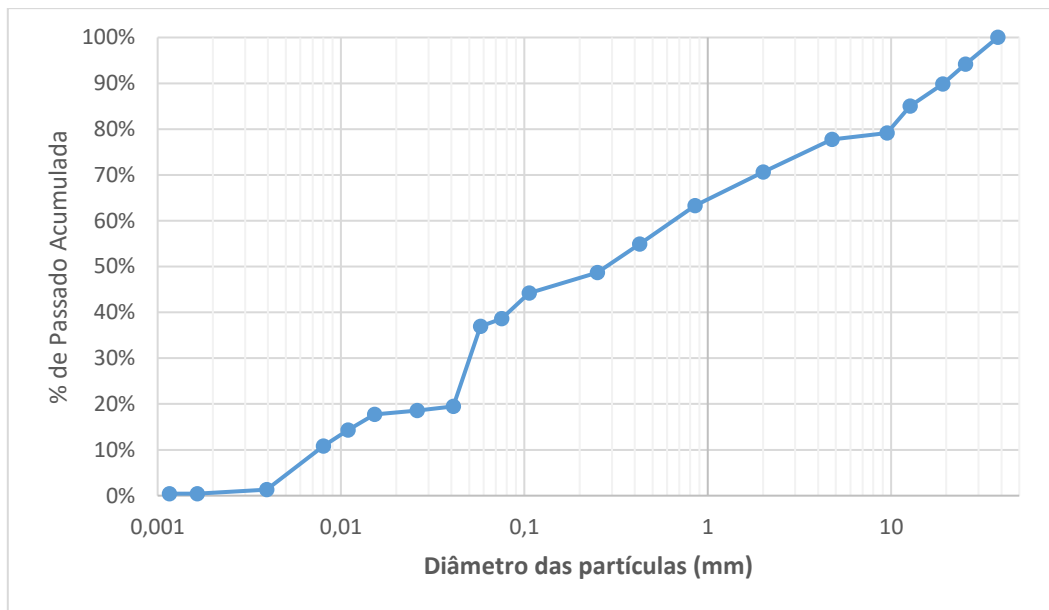


Figura 22- Curva granulométrica do solo por peneiração e por sedimentação

A partir do gráfico é possível observar que o solo não é bem graduado. Destaca-se que um solo com limites de liquidez e de plasticidade elevados tendem a ter porcentagens elevadas de argila (acima de 10%) e neste caso não há presença de argila, partículas inferiores a 0,002 mm, apresentando uma incoerência. Então, o ensaio de sedimentação não será levado em consideração.

3.3 Bloco solo-cimento

Os blocos foram disponibilizados para ensaios no laboratório de Materiais de Construção da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança pela empresa Terracrua Construções Ecológicas. Estes blocos são constituídos pelo solo já caracterizado anteriormente peneirado para remover as partículas maiores que 5 mm e estabilizado com 5% de cimento. Note-se que no processo de produção a percentagem de água foi controlada de acordo com a experiência dos trabalhadores através do aspecto da mistura e do ensaio da bola. Este ensaio consiste em analisar o teor de umidade através de uma bola de solo úmido solta no chão da altura dos ombros, com isso interpreta-se a maneira como a bola quebra no impacto, o ideal é se partir em 3 a 6 pedaços iguais para ser considerado o teor de umidade ótimo.

Os ensaios efetuados permitiram obter características quer mecânicas, através de ensaios à compressão, quer físicas e geométricas através da determinação da massa volúmica, análise visual e da durabilidade em ciclos de molhagem e de secagem. Além das características do solo obtidas anteriormente.

O bloco foi pesado em uma balança com precisão de 0,1 g, seco em estufa e medido com auxílio de um paquímetro. As dimensões estão apresentadas na Figura 23 e o volume é de 1.847,58 cm³. A variação destas dimensões entre os blocos é desprezível.

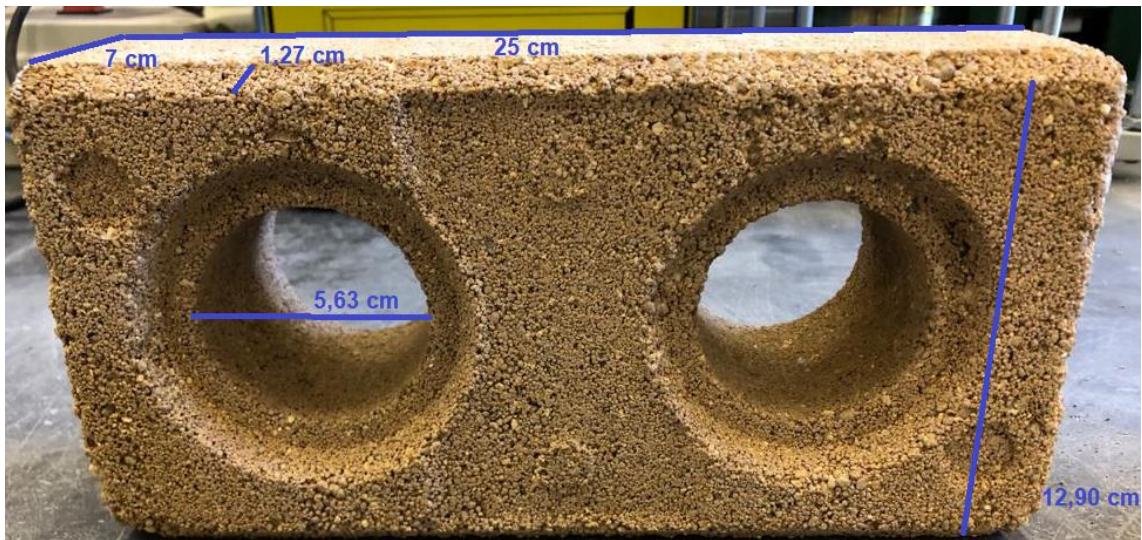


Figura 23- Dimensões do bloco

O seu peso médio quando seco totalmente em estufa é de 3.349,61 g, portanto, sua massa volúmica é $1,81 \text{ kg/dm}^3$, valor que está dentro do intervalo 0,4 a $2,2 \text{ kg/dm}^3$ indicado pela norma alemã DIN 18945 [18]. Em comparação com a norma brasileira norma ABNT NBR 8491 [16] e a norma colombiana NTC 5324 [15], este bloco possui dimensões superiores, ou seja, não atende a estas normas. Esta comparação foi realizada com a norma brasileira e a colombiana por elas apresentarem valores recomendados das dimensões dos blocos.

O bloco também foi analisado conforme a norma UNE-41410 [17] a qual indica fazer uma análise visual do bloco quanto a fissuras e defeitos. Foi possível observar desagregação de partículas na superfície do bloco.

A UNE-41410 [17] também faz referência a um ensaio de secagem e molhagem o qual consiste em colocar 10 mm do bloco em contato com a água, como mostrado no esquema da Figura 24, por 30 segundos e esperar secar em ambiente laboratorial até o bloco ficar na sua cor inicial.

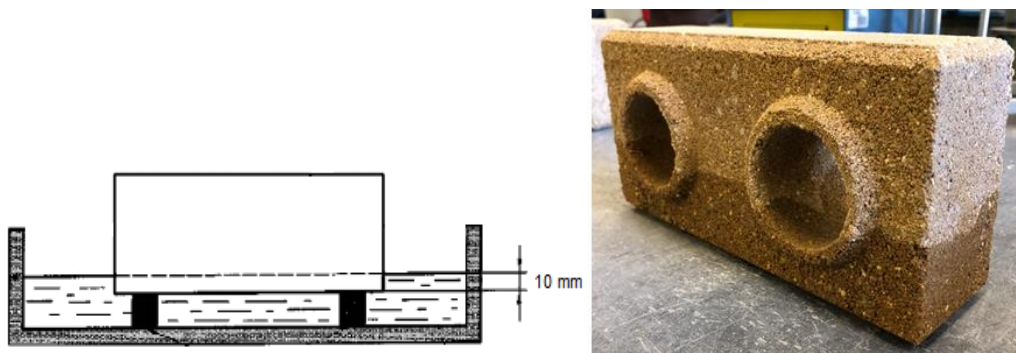


Figura 24- Esquema e execução do ensaio de molhagem e secagem do bloco

Este ciclo deve-se repetir 6 vezes e ao final fazer uma análise visual para verificar se o bloco apresenta fissuras, inchamento, perda local ou geral das camadas do solo, penetração da água em mais de 70% da altura do bloco, perda

de fragmentos maiores que 50 mm e eflorescência. Logo, como o bloco só apresentou pouca fragmentação e de dimensões inferiores ao determinado, está adequado.

Relativamente à determinação da resistência mecânica dos blocos optou-se por estudar simultaneamente o efeito do confinamento, de modo a obter uma relação entre a altura do bloco ou blocos e a resistência à compressão. Este efeito foi estudado, pois ao aplicar a força de compressão no bloco ocorre a tendência em se expandir lateralmente, mas devido ao atrito das faces com os pratos da prensa, essa expansão fica confinada, ocasionando um aumento na força aparente de compressão.

Para tal, realizaram-se seis ensaios à compressão com o bloco unitário cortado ao meio, mais seis ensaios com dois meios blocos sobrepostos e seis ensaios com três meios blocos, usando nestes dois últimos casos a junta *interlocking*. Os blocos foram lavados e armazenados por 3 dias no laboratório a fim de adquirir a umidade ambiente. O esquema destes ensaios pode ser observado na Figura 25. Cada conjunto foi nivelado no topo para ajustar aos pratos da prensa.



Figura 25- Esquema para o ensaio para verificação do efeito de confinamento dos blocos

A velocidade usada no ensaio foi 13 kN/s e foram colocados na prensa conforme a Figura 26. Os blocos ficaram com o aspecto final conforme a indicado na Figura 27, na altura de 1 bloco a fissura deu-se nos cantos e nas alturas de 2 e 3 blocos a fissura deu-se no meio bloco.

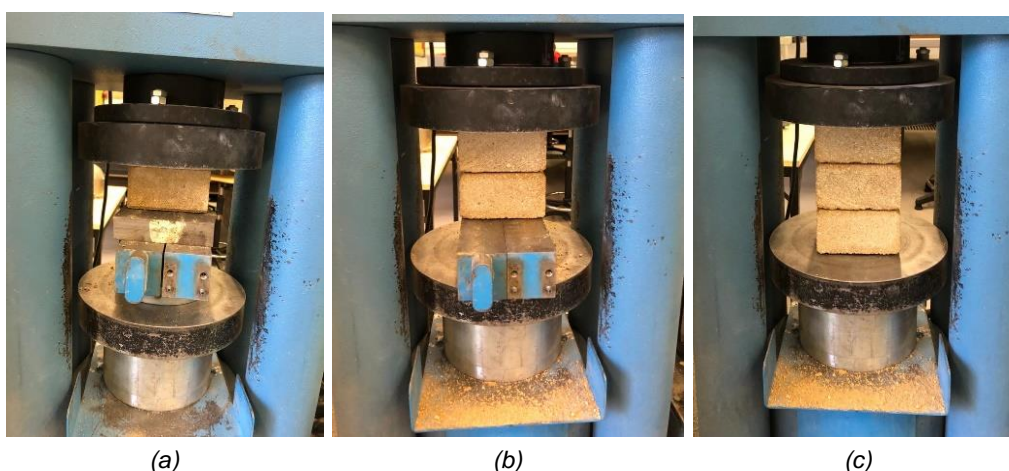


Figura 26- Ensaio de compressão dos blocos (a) altura de 1 bloco, (b) altura de 2 blocos, (c) altura de 3 blocos

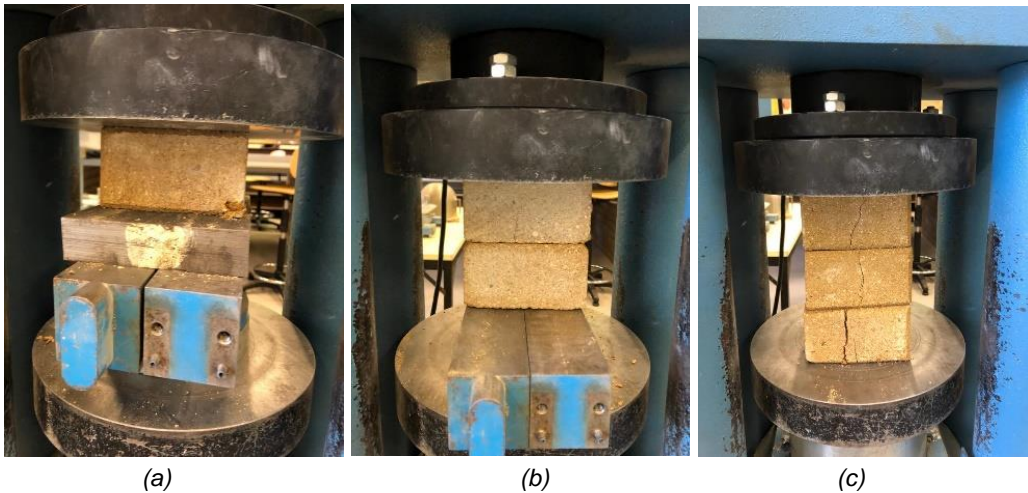


Figura 27- Aspecto final dos blocos após o ensaio de compressão: (a) altura de 1 bloco rompido, (b) altura de 2 blocos rompidos e (c) altura de 3 blocos rompidos

A partir destes dados foi possível calcular os valores indicados na Tabela 15 e os resultados individuais estão apresentados através do gráfico Figura 28. Sendo a média dos seis valores a média entre os seis ensaios realizados a cada altura, o coeficiente de variação é a dispersão do conjunto de dados e, então, é calculado o intervalo o qual exclui os valores que extrapolam a média dos seis valores \pm o desvio padrão, com isso obtém-se a resistência média.

Tabela 15- Resultados dos ensaios de compressão dos blocos

	1 bloco	2 blocos	3 blocos
Altura do bloco	7 cm	14 cm	21 cm
Média dos 6 valores (MPa)	2,30	1,36	1,02
Coeficiente de variação	19,9%	21,5%	15,2%
Intervalo	2,76	1,66	1,18
	1,84	1,07	0,87
Resistência média (MPa)	2,50	1,39	1,01

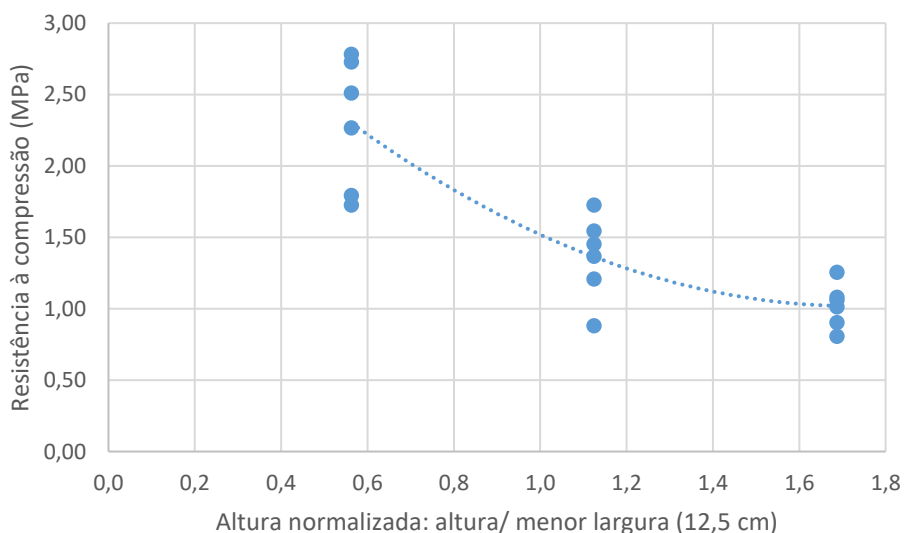


Figura 28- Relação entre a resistência e a altura no ensaio para análise do efeito de confinamento do bloco

Segundo a norma brasileira ABNT NBR 8491 [16], os blocos devem ser ensaiados com dois meio-bloco sobrepostos com uma camada fina de pasta de cimento (2 a 3 mm) e os blocos devem estar saturados. O resultado obtido deve apresentar a média dos valores da resistência à compressão superior a 2,0 MPa e o valor individual desta resistência superior a 1,7 MPa. Portanto, dos seis provetes ensaiados a altura de 2 blocos, somente um verificou este requisito relativamente ao valor individual. Quanto à resistência média, os valores obtidos foram significativamente inferiores. Vale ressaltar que o ensaio não foi feito conforme a ABNT NBR 8491 [16], pois quando o bloco era submerso em água se desfazia.

Como se pode observar, há uma grande variação na resistência à compressão dos blocos, isto pode ser atribuído devido à heterogeneidade do solo. A diminuição da resistência com o aumento da relação altura/ largura pode ser justificado pela diminuição do efeito de confinamento proporcionado pelos pratos da prensa. Aubert *et. al* [41] afirma que os resultados de diversos autores também indicam essa tendência de diminuição da força à compressão com o aumento da razão altura/ largura.

3.4 Caracterização da malha de poliéster

A malha de poliéster utilizada não foi caracterizada em laboratório, pois é caracterizada pelo fabricante. A malha em questão é a GX 35/35 a qual possui uma dimensão da grelha de 25x25 mm e força à tração de 38 kN/m. Sua composição é de poliéster de alta tenacidade revestida por um polímero de proteção conforme o esquema mostrado na Figura 7. Esta é comercializada em um rolo de 100x5,2 m e possui o aspecto como indicado na Figura 29.

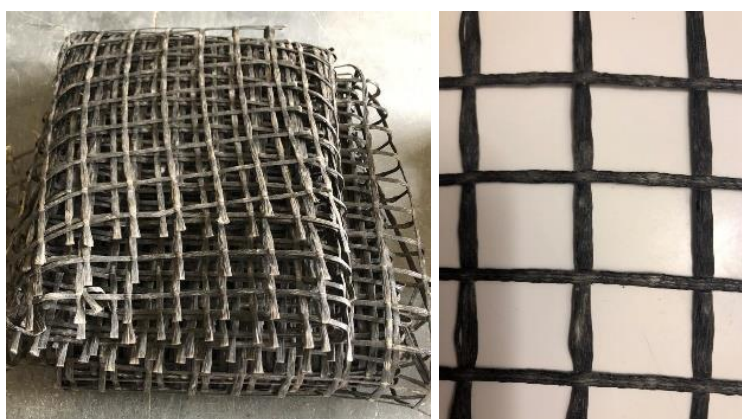


Figura 29- Malha de poliéster GX 35/35

A malha foi cortada com auxílio de uma tesoura para o ensaio de interação entre o bloco, a argamassa e a malha no sentido em que é enrolada no rolo comercializado. Este sentido foi optado, pois no outro há um deslizamento entre as tiras da malha quando tracionada.

Os comprimentos de corte foram de acordo com o comprimento aplicado no bloco (8,2 cm, 12,5 cm e 25 cm) adicionando-se 10 cm que corresponde a porção que ficou para fora do bloco e preso na amarra do equipamento.

3.5 Argamassas de reboco

A fim de atingir uma boa aderência da argamassa ao substrato, buscou-se utilizar composições de argamassas com características semelhantes ao bloco. Para isso foi produzida argamassas de terra com areia 0/2, areia 0/4, cal em pasta e estabilizantes. O solo utilizado é o mesmo solo da fabricação do bloco, a cal em pasta se deve ao fato de ser facilmente encontrada, manipulada e para melhorar a trabalhabilidade e plasticidade, as areias com o intuito de ajustar a granulometria do solo e para evitar retração por secagem da cal, pois a areia envolve as partículas da cal proporcionando a carbonatação em simultâneo com a secagem. Como estabilizantes foram usados a cal hidráulica e o cimento afim de melhorar as características comentadas por Faria e Lima [26] tais como: resistência à tração, à compressão e à água. Além do cimento também ser um dos componentes constituintes do bloco e ter fácil manuseio.

Utilizou-se neste estudo cal em pasta classificada segundo a NP EN 459-1: 2015 [42] como CL 80 da empresa Calcidrata S.A., ver Figura 30.



Figura 30- Cal em pasta utilizada

A cal hidráulica, classificada segundo a NP EN 459-1:2015 [42] como HL5 e o cimento CEM II/ B-L - 32,5 N classificado segundo a norma NP EN 197-1: 2012 [43] foram fornecidos da empresa Secil, ver Figura 31.



Figura 31- (a) Cal hidráulica e (b) cimento utilizados

3.5.1 Definição das composições

As proporções entre os materiais utilizados para o fabrico das argamassas foram determinadas de forma empírica analisando a consistência de 25 variadas proporções dos materiais. Das 25 composições, 13 foram com proporções variadas de areias e solo e 12 foram com uma proporção em peso de terra, areia 0/2 e areia 0/4, respectivamente, 65%, 10% e 25%, porcentagens as quais foram determinadas traçando uma única curva granulométrica e fazendo ajustes para se aproximar de uma granulometria contínua, como mostrado na Figura 32, considerando somente o solo passante na peneira 4,76 mm e ponderando um possível erro no ensaio de sedimentação que indica a curva do solo passante na peneira de 0,075 mm.

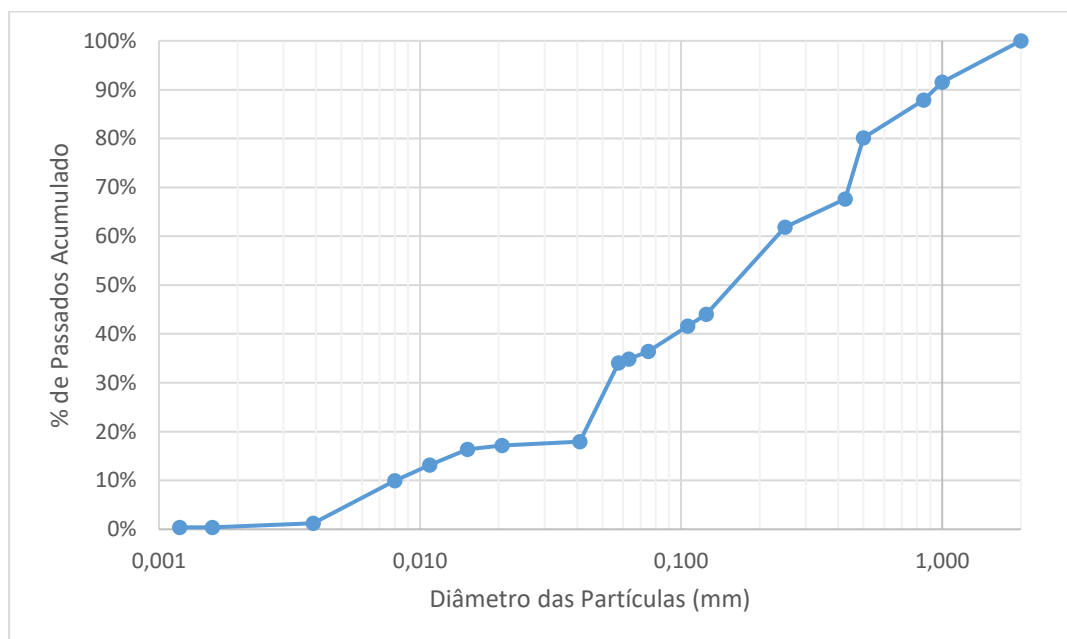


Figura 32- Curva Granulométrica da mistura de 65% de solo, 10% de areia 0/2 e 25% de areia 0/4

Em uma primeira fase, as 25 composições iniciais foram misturadas a mão com o auxílio de uma espátula e foram aplicados em cima de um suporte cerâmico pré-molhado como mostrado na Figura 33. Este teste foi para uma análise empírica de cor, consistência e aplicabilidade. O processo de cura deu-se cima da bancada do laboratório por 1 dia e depois por mais 6 dias em câmara úmida.



Figura 33- Argamassas iniciais aplicadas sob um bloco

Após o período de uma semana as argamassas foram analisadas visualmente e, então, foram selecionadas onze composições, as quais apresentaram ausência de fissuras, aparente boa aderência ao substrato, facilidade na aplicação, além de uma cor que se assemelha ao bloco solo-cimento.

Posteriormente, ainda nesta primeira fase de ensaios, afinou-se a quantidade de água a ser utilizada para as onze composições escolhidas, através de uma adaptação do ensaio descrito na norma ABNT NBR 7215 [44] com o objetivo de padronizar a consistência e trabalhabilidade das argamassas. As quais foram moldadas num molde tronco-cônico (Figura 34) em três camadas aproximadamente iguais com 20 golpes em cada uma.



Figura 34- Tronco de cone utilizado para o ensaio de padronização da consistência das argamassas

O ensaio apresentado na Figura 35 inicia-se com o processo de amassadura que será detalhado na seção 3.5.2. O molde foi colocado num adensador automático e retirado verticalmente. Aplicaram-se 4 golpes na mesa

de adensamento automático. Para a padronização das argamassas, determinou-se uma abertura de $15 \pm 0,5$ cm como medida padrão com o auxílio de uma régua metálica de precisão 0,01 cm.



Figura 35- Etapas do ensaio para determinação da consistência da argamassa

As composições foram nomeadas conforme suas composições sendo: AT1 e AT2 duas argamassas sem cal hidráulica nem cimento; CH indica a utilização de cal hidráulica e CEM a adição de cimento, os números indicam a porcentagem de adição de cal hidráulica ou de cimento em relação a massa total (cal em pasta, areia 0/2, areia 0/4, solo, cal hidráulica/cimento). Os traços bem como as aberturas das argamassas estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16- Traço em massa determinadas para a verificação da consistência

Composição	Cal em pasta	Cal hidráulica	Areia 0/2	Areia 0/4	Solo	Cimento	Água	Abertura (cm)
AT1	1,0	0,0	1,2	1,3	1,0	0,0	0,6	15,10
AT2	1,0	0,0	0,4	0,4	0,4	0,0	0,1	15,75
CH14	1,0	0,5	0,2	0,5	1,3	0,0	0,6	14,70
CH16	1,0	0,5	0,1	0,3	1,1	0,0	0,5	14,80
CH18	1,0	1,0	0,0	2,4	1,2	0,0	0,9	15,00
CH20	1,0	1,0	0,3	0,7	1,9	0,0	1,0	15,00
CH25	1,0	1,0	0,2	0,5	1,3	0,0	0,8	14,95
CEM5	1,0	0,0	0,1	0,3	0,8	0,1	0,4	14,90
CEM9	1,0	0,0	0,1	0,3	0,8	0,2	0,4	14,80
CEM14	1,0	0,0	0,2	0,5	1,3	0,5	0,7	14,60
CEM25	1,0	0,0	0,2	0,5	1,3	1,0	0,9	14,70

Como se pode observar, a composição AT2 não obteve a abertura dentro do intervalo padronizado, pois ao adicionar mais água para melhorar a trabalhabilidade apresentou uma abertura de 15,75 cm, então, já foi descartada.

Posteriormente, as demais argamassas foram moldadas em provetes de 40x40x160 mm, deixadas 3 dias em cima da bancada para secagem e após este período foram colocados na câmara úmida por mais 18 dias.

Após 21 dias da moldagem dessas dez composições, os provetes armazenados na câmara úmida foram analisados visualmente para uma seleção dos traços. Os selecionados foram os CH14, CEM5 e CEM25, os demais foram descartados por apresentarem fissuras.

3.5.2 Amassadura

O processo de amassadura das argamassas ocorreu da mesma forma para todos as composições e provetes a serem moldados, diferenciando apenas a moldagem. Foi utilizada uma misturadora automática para a realização da amassadura (Figura 36) nas quantidades indicadas na Tabela 17. Como a capacidade da misturadora é baixa, foi necessário repetir o procedimento mais de uma vez para preencher todos os provetes a serem ensaiados.

Tabela 17- Quantidades dos materiais utilizados na amassadura para cada traço

Composição	Cal em pasta (g)	Areia 0/2 (g)	Areia 0/4 (g)	Solo (g)	Cal hidráulica (g)	Cimento (g)	Água (ml)
CH14	202,4	121,4	303,6	789,3	303,6	0,00	460,7
CEM5	900,2	115,5	288,8	750,2	0,00	102,7	316,2
CEM25	520,9	104,2	260,4	677,1	0,00	520,9	438,5

Inicialmente os materiais foram pesados em uma balança com precisão de 0,1g. Depois o procedimento seguiu os seguintes passos:

- Os materiais secos (areia 0/2, areia 0/4, cimento e cal hidráulica) foram colocados na cuba metálica e misturados com uma espátula manualmente até ficarem com uma aparência homogênea;
- Acrescentou-se a cal em pasta e 90% da água;
- Ligou-se a misturadora em seu modo automático, a qual mistura na velocidade baixa por 15 segundos e depois na alta por 75 segundos;
- Quando o equipamento parou, a cuba metálica foi solta do equipamento e foi feita a raspagem manual da cuba metálica e da espátula e adicionado o restante da água, este processo deu-se dentro de 60 segundos;
- A cuba metálica foi colocada novamente no equipamento e a misturadora ligou por mais 90 segundos e, então, terminou a amassadura, totalizando 4 minutos.



Figura 36- Etapas do processo de amassadura

A misturadora automática funciona de acordo com a metodologia indicada na norma europeia EN 1015-2 [45].

3.5.3 Caracterização da argamassa no estado fresco

Para as três composições escolhidas para a segunda fase do estudo, procedeu-se à determinação da consistência através do ensaio de espalhamento com a *Flow Table* de acordo com a norma EN 1015-3 [46].



Figura 37- Etapas do ensaio de consistência por *Flow Table*: (a) equipamento; (b) argamassa no molde tronco-cônico; (c) após 15 pancadas da mesa e (d) medição do diâmetro de espalhamento

Inicialmente, passa-se descofrante na mesa (Figura 37a) e no molde tronco-cônico, coloca-se a argamassa no molde conforme a norma (Figura 37b), retira-se o molde, aplica-se 15 pancadas na mesa (Figura 37c) e mede-se em duas direções perpendiculares com o auxílio de uma régua (Figura 37d). O ensaio foi realizado uma vez para cada composição conforme indica a norma EN 1015-3 [46].

Ao final, o resultado é obtido pela média entre as duas medições, valores os quais estão indicados na Tabela 18.

Tabela 18- Diâmetro de espalhamento das argamassas pelo teste de consistência da Flow Table

Composição	Abertura (cm)
CH14	15,7
CEM5	16,1
CEM25	16,1

Pode-se observar que as composições atendem o intervalo de diâmetro de espalhamento de $16 \pm 0,5$ cm.

De acordo com Gomes [28], uma argamassa apresenta boa trabalhabilidade quando o diâmetro resultante deste ensaio é entre 15,2 - 17,7 cm e excelente trabalhabilidade quando está entre 16,0 - 17,6 cm. Logo, o traço CH14 apresenta uma boa trabalhabilidade enquanto que os demais possuem uma excelente trabalhabilidade.

3.5.4 Moldagem

As moldagens dos provetes ocorreram de forma diferente para cada ensaio realizado as quais serão detalhadas na sequência.

a) Provetes para caracterização da argamassa no estado endurecido

A argamassa foi caracterizada no estado endurecido quanto as retrações linear e volumétrica e quanto as resistências à flexão em três pontos e à compressão. Para isso, foram moldados seis provetes para cada composição com dimensões 40x40x160 mm segundo a EN 1015-2 [45]. A Figura 38 indica as etapas de moldagem, sendo que, anteriormente, foi aplicado o descofrante nos moldes.

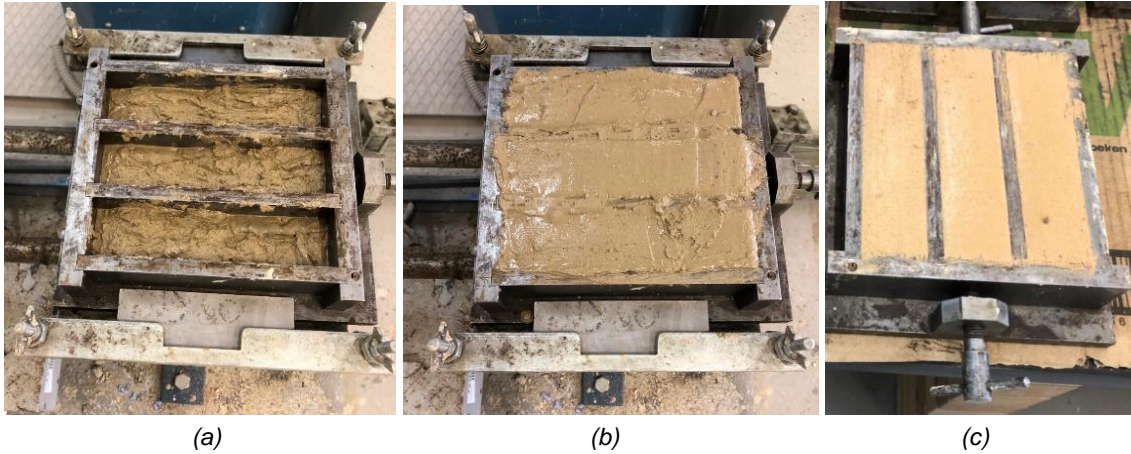


Figura 38- Etapas do processo de moldagem: (a) preenchimento de 50% do molde, (b) preenchimento do restante do molde e (c) rasamento do molde

b) Provetes para avaliação da aderência da argamassa no bloco solo-cimento

Para a verificação da aderência das argamassas ao bloco solo-cimento, através de ensaios de arranque *Pull-Off* foi necessário preparar o bloco. Os blocos foram cortados ao meio através de um disco elétrico e lavados com água corrente a fim de remover as impurezas da superfície. Em seguida foram saturados com água e, então, deixados na câmara úmida (T= 20°C e HR~90%) até a utilização, como mostrado na Figura 39.



Figura 39- Meio-blocos na câmara úmida

Neste ensaio foram utilizados 36 meio-blocos, sendo que em metade destes foi aplicado um chapisco padrão no traço 1:3 (cimento: areia) com 1 cm de espessura conforme mostrado na Figura 40, totalizando 6 meio-blocos com chapisco e 6 meio-blocos sem chapisco para cada composição.



Figura 40- Meio-blocos com chapisco

O chapisco foi aplicado com o objeto de analisar a interferência da aderência da argamassa ao substrato visto que aumenta a rugosidade da superfície que estará em contato com a argamassa. Assim como no bloco sem chapisco, este também foi umedecido antes da aplicação da argamassa.

Para ter uma aplicação homogênea da argamassa em todos os meio-blocos, usou-se um molde confeccionado em madeira para envolver as laterais como uma caixa conforme mostrado na Figura 41.

A moldagem ocorreu da mesma forma para todos os meio-blocos independentemente da utilização de chapisco. O molde de madeira foi umedecido com água e colocou-se dois meio-blocos dentro do molde apoiado em cima da bancada nivelada.



Figura 41- Molde para a aplicação da argamassa para o ensaio de aderência bloco-argamassa

A argamassa foi aplicada com o auxílio de uma espátula, como mostrado na Figura 42a. Quando o nível do molde foi atingido (5 cm de altura do reboco) rasou-se a argamassa e alisou-se a superfície o melhor possível. Pode-se

observar um espaço entre o bloco e o molde na Figura 42a, isso se deve ao fato do bloco ter o encaixe *interlocking*.

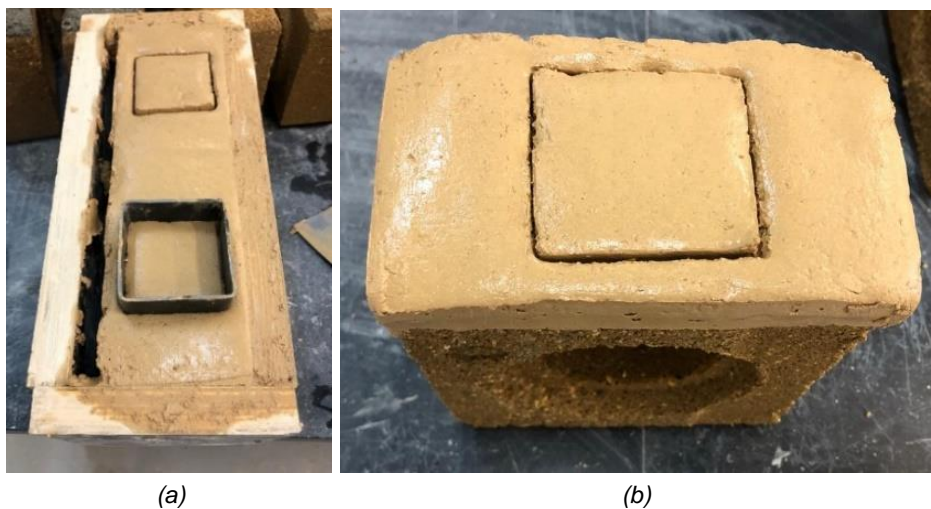


Figura 42- Etapas do processo de moldagem do provete para o ensaio de aderência bloco-argamassa: (a) argamassa aplicada no bloco e marcação metálica e (b) estado final do provete após a moldagem

Neste processo também foi realizada uma marcação com um quadrado metálico nas dimensões 50x50 mm (Figura 42b) em cada meio-bloco afim de delimitar o espaço de colagem das peças metálicas de arrancamento e não ser necessário sua marcação através do corte com serra após o período de cura. Essa marcação deu-se pressionando o quadro metálico cuidadosamente no centro do meio-bloco até atingir o substrato. Ao final de cada moldagem o molde foi retirado e passou-se a espátula nas bordas das argamassas sobre o bloco quando necessário.

c) Provetes para avaliação da interação Bloco-Argamassa-Malha

Finalmente pretendeu-se avaliar a capacidade de aderência bloco-argamassa-malha pelo que 15 provetes foram preparados, não foi possível realizar a moldagem de mais provetes por questão de tempo de recurso. A argamassa foi aplicada no bloco solo-cimento com o auxílio do molde em madeira de forma semelhante à moldagem para o ensaio *Pull-Off*. Com o bloco umedecido, foi colocado no molde para aplicar a primeira camada de argamassa (Figura 43a), colocou-se uma base nivelada em baixo do bloco afim de ser possível nivelar uma espessura de meia camada em comparação ao ensaio anterior (2,5 cm de reboco). Aplicou-se a malha já cortada no bloco pressionando-a levemente (Figura 43b, c, d), retirou-se o bloco do molde para remover a base provisória. Para a moldagem da segunda camada colocou-se o bloco novamente no molde sem base em baixo, aplicou a argamassa e rasou a superfície (Figura 43e). No final, o molde foi retirado e passou-se a espátula nas bordas das argamassas sobre o bloco quando necessário.

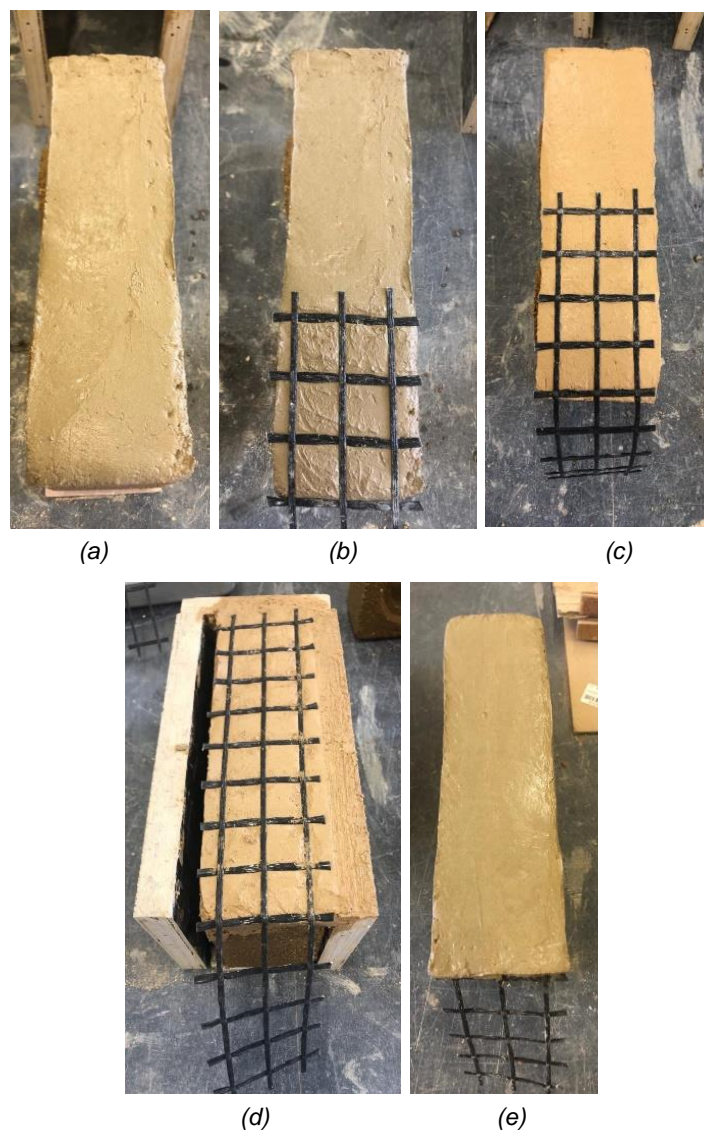


Figura 43- (a) Aplicação da argamassa no substrato, (b) aplicação da malha na argamassa a 1/3 do comprimento, (c) aplicação da malha na argamassa na metade comprimento, (d) aplicação da malha na argamassa ao longo de todo comprimento e (e) aplicação da última camada de argamassa.

As malhas foram colocadas variando o comprimento de amarração em 1/3 do comprimento total que corresponde a 8,3 cm indicado na Figura 43b, 1/2 do comprimento total (12,5 cm) na Figura 43c e ao longo de todo o comprimento, (25 cm) na Figura 43d. A quantidade de provetes está indicada na Tabela 19.

Tabela 19- Quantidade de provetes para o ensaio de interação Bloco- Argamassa- Malha

Posição da malha ao longo do comprimento do bloco	Composição		
	CH14	CEM5	CEM25
8,3 cm	1	1	1
12,5 cm	2	2	2
25 cm	2	2	2

Estas variações no comprimento de amarração foram feitas com o objetivo de analisar a influência deste comprimento na força máxima suportada pelo reforço.

3.5.5 Cura

O processo de cura foi o mesmo para todos os tipos de provete. Devido ao uso de cal hidráulica, optou-se por efetuar todos os ensaios desta fase com o tempo de cura de 60 dias. Todos os provetes ficaram na mesma bancada nivelada do laboratório e depois na câmara úmida a uma temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ com umidade de $95 \pm 5\%$.

a) Provetes para caracterização da argamassa no estado endurecido

Após a moldagem, os provetes $40 \times 40 \times 160$ mm foram armazenados em cima da bancada como indicado na Figura 44 por 4 dias. Na sequência foram desmoldados e colocados na câmara úmida como mostrado na Figura 45 onde ficaram armazenados por mais 54 dias, totalizando os 60 dias de cura.



Figura 44- Provede no processo de cura após moldagem em cima da bancada do laboratório



Figura 45- Provetes de argamassa em processo de cura na câmara úmida

b) Provetes para avaliação da aderência da argamassa no bloco solo-cimento

Os blocos foram armazenados em cima da bancada para secagem durante 24 horas e depois colocados na câmara úmida por mais 59 dias de cura, completando os 60 dias de cura. Este processo está mostrado na Figura 46.



Figura 46- Blocos com argamassa para o ensaio de Pull-Off em processo de cura: (a) blocos com argamassa em cura em cima da bancada nivelada no laboratório e (b) blocos com argamassa dentro da câmara úmida

c) Provete para interação Bloco-Argamassa-Malha

O processo de cura se deu de forma similar aos demais ensaios: 1 dia em cima da bancada nivelada do laboratório (Figura 47) e depois mais 59 dias na câmara úmida (Figura 48).

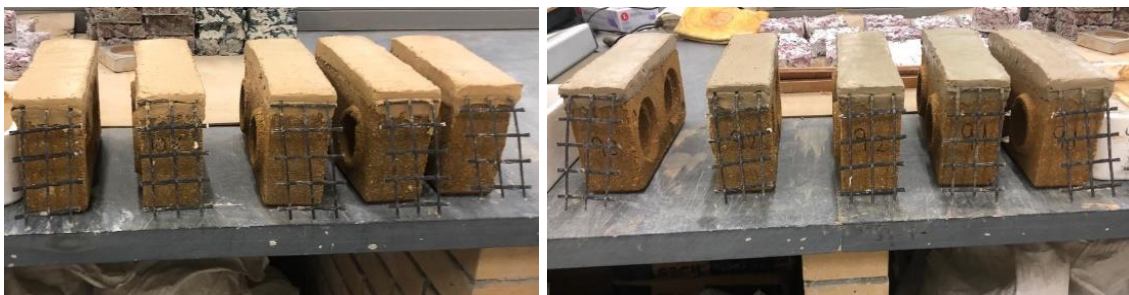


Figura 47- Blocos moldados para o ensaio do reforço estrutural em cura em cima da bancada do laboratório



Figura 48- Blocos moldados para o ensaio do reforço estrutural em cura na câmara úmida

3.6 Caracterização da argamassa no estado endurecido

Ao final do período de cura das argamassas, essas foram submetidas à ensaios de retração, resistência à flexão em três pontos e à compressão.

a) Retração linear e volumétrica

Neste ensaio verificou-se a variação das dimensões dos provetes 40x40x160 mm, os mesmos que, posteriormente, foram ensaiados a resistência à flexão em três pontos e à compressão.

Com o auxílio de um paquímetro, as dimensões foram medidas após a desmolde (4 dias) e ao final do período de cura (60 dias) e, então, foi calculada a variação desses valores.

b) Resistência à flexão em três pontos

Para o ensaio de flexão em três pontos que visa a obtenção da resistência através de uma força de flexão aplicada perpendicularmente no meio do provete, seguiu a norma EN 1015-11 [47]. Foram utilizados seis prismas com dimensão de 40x40x160 mm para cada composição.

O equipamento utilizado foi uma prensa hidráulica automática com velocidade de carregamento de 3 mm/min. Antes do ensaio, foi marcado com um lápis o meio dos provetes e a distância entre os apoios de tal forma que o vão fosse de 100 mm para o correto posicionamento no equipamento. Com isso, deu-se o início do ensaio o qual finalizou com o rompimento do provete conforme indicado na Figura 49.



Figura 49- Aspecto final do provete no ensaio de flexão em três pontos

Com a força máxima suportada pela argamassa, calculou-se a resistência máxima à flexão em N/mm² pela equação 1.

$$R_f = 1,5 \frac{F \cdot l}{b \cdot d^2} \quad (1)$$

Sendo:

F: carga máxima aplicada (N);

l: distância entre os dois apoios (mm)

b, d: dimensões inferiores do provete (mm).

c) Resistência à compressão

Este ensaio foi realizado conforme a norma EN 1015-11 [47] e visa a obtenção da resistência através de uma força de compressão aplicada paralelamente ao eixo. Os provetes utilizados foram os rompidos no ensaio de flexão, totalizando 12 de cada composição.

O equipamento usado foi uma prensa hidráulica. Os provetes foram posicionados no meio da prensa e então iniciou-se o ensaio o qual finalizou com o rompimento dele. Com a força máxima suportada pela argamassa, calculou-se a resistência máxima à compressão em N/mm² pela equação 2.

$$R_c = \frac{F}{A} \quad (2)$$

Sendo:

F: carga máxima aplicada (N);

A: área de aplicação da força (mm²)

3.7 Interação Bloco-Argamassa

O ensaio realizado para a verificação da interação bloco-argamassa foi o de *Pull-Off* de acordo com a metodologia indicada na norma EN 1015-12 [48], que consiste em verificar a aderência da argamassa ao substrato, caracterização importante para o bom desempenho da solução de reforço. Foram ensaiados 12 provetes de cada composição, sendo que em metade houve a aplicação de chapisco. O ensaio se deu em uma prensa hidráulica com célula de carga que aplicou carga a uma velocidade de 1 mm/min.

Após os 59 dias de cura, os provetes foram retirados da câmara úmida e dispostos na bancada do laboratório. A superfície de ensaio foi lixada e limpa (para eliminar completamente o pó) afim de melhorar o nivelamento da superfície e ter uma colagem das peças metálicas de 50x50 mm mais eficiente. Foi aplicada uma camada de cola epóxi na área de ensaio delimitada e a peça metálica foi pressionada por alguns segundos contra o bloco. Durante o processo de secagem foram dispostas outras peças em cima com a função de fazer pressão e garantir uma boa colagem como indicado na Figura 50a e b.



Figura 50- Ensaio Pull-Off: (a) preparação dos provetes, (b) provetes com as peças metálicas 50x50 mm

Após um dia de secagem, os provetes foram ensaiados um a um. Uma outra peça metálica foi rosqueada no furo da peça colada e esta foi encaixada na prensa e o bloco fixo com auxílio de grampos conforme a Figura 51.

O ensaio foi finalizado quando ocorreu o arrancamento anotando-se a carga máxima suportada e o modo de ruptura.

Para obter a resistência ao arrancamento aplica-se a equação 3.

$$f_u = \frac{F_u}{A} \quad (3)$$

Sendo:

F_u : carga máxima aplicada (N)

A : área da placa metálica (mm²)

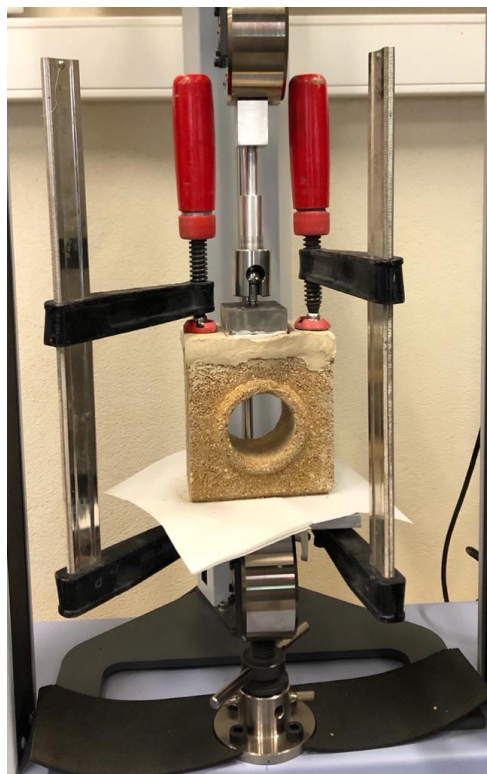


Figura 51- Ensaio de aderência Bloco-Argamassa

3.8 Interação Bloco–Argamassa-Malha

O objetivo deste ensaio é verificar o comportamento dos três componentes do reforço estrutural (bloco, argamassa e malha). Antes da realização do ensaio, os provetes foram retirados e armazenados em cima da bancada do laboratório por um dia, pois na câmara úmida apresentavam gotículas de água na superfície e como o laboratório estava com umidade relativa do ar elevada, as argamassas não perderam muita umidade para o ambiente.

Este ensaio foi realizado conforme Romanazzi *et al.* [35] apresentou afim de obter resultados comparáveis. Os provetes foram ensaiados um a um e fixos na base da máquina com o auxílio de um varão, uma placa metálica e parafusos como mostrado na Figura 52. A amarra da máquina foi fechada prendendo a malha. Ao ligar o equipamento, a amarra tencionou a malha na velocidade de 0,1 mm/s até o rompimento da malha ou destacamento da malha na argamassa ou destacamento da argamassa no substrato.

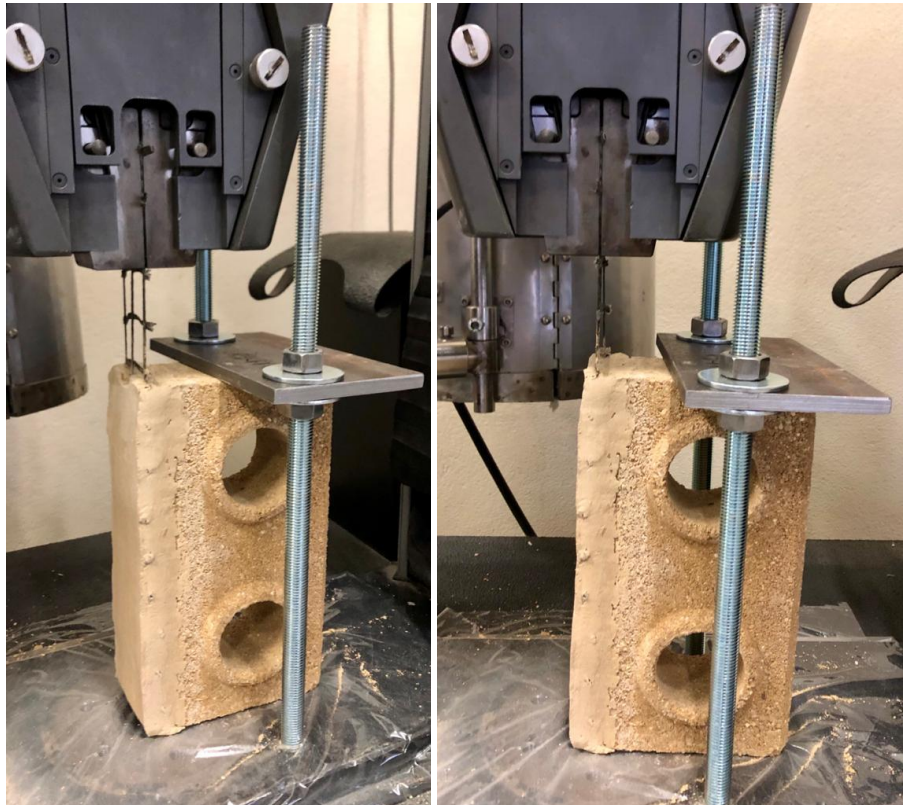


Figura 52- Ensaio de interação Bloco-Argamassa-Malha

Ao final foi anotada a carga máxima suportada e o modo de ruptura de cada provete. O resultado final foi obtido pela equação 4 a qual obtém a força linear máxima em kN/m que relaciona a carga máxima aplicada com a largura da malha (5 cm), dessa forma foi possível comparar os resultados com a força máxima linear da malha quando submetida à esforço de tração que é de 38 kN/m.

$$f_l = \frac{F}{l} \quad (4)$$

Sendo:

F: carga máxima aplicada (kN)

l: largura total da malha (m)

Capítulo 4

4. Resultado e Discussões

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios comentados no Capítulo 3 bem como sua análise e discussão. Para todos os ensaios foi considerado o tempo de cura de 60 dias, tempo o qual foi definido devido à utilização de cal na composição, material que exige mais tempo de cura para a análise de suas características na argamassa.

4.1 Características da argamassa no estado endurecido

As três composições foram caracterizadas no estado endurecido quanto a retração linear e volumétrica e quanto as resistências à flexão e compressão.

a) Retração linear e volumétrica

Após as medições com paquímetro foram calculadas as médias aritméticas da dimensão do lado de maior comprimento do provete e seu volume. A partir disso, foi possível obter as retrações em porcentagem as quais estão indicadas na Tabela 20.

Tabela 20- Retração linear e volumétrica dos provetes 40x40x160 mm

Composição	Retração Linear	Retração Volumétrica
CH14	3,02%	9,39%
CEM5	2,50%	5,32%
CEM25	0,31%	0,52%

Pode-se observar que a adição de cimento diminui a retração linear e volumétrica e quanto maior o teor de cimento, menor foi a retração. Gomes [28] admite o valor máximo de 2% de retração linear para argamassa de terra e a partir disso somente a argamassa CEM25 se adequa, as demais argamassas apresentaram valores superiores apesar de não apresentarem fissuras.

Este autor ainda ressalta que se deve observar a retração das argamassas junto ao substrato. Nesta análise, as composições CEM5 e CEM25 continuaram rentes ao bloco e não apresentaram fissuras, diferentemente da argamassa CH14 em que foi possível observar fissuras por retração em volta da área delimitada para o ensaio, não prejudicando o ensaio *Pull-Off*, mas indicando uma retração inadequada.

b) Resistência à flexão em três pontos

A partir do ensaio de flexão em três pontos obteve-se os valores médios de carga máxima e os coeficientes de variação, bem como a resistência à flexão a partir da equação 1. Esses valores estão apresentados na Tabela 21.

Tabela 21- Média e coeficiente de variação da carga máxima (N) e da resistência à flexão (MPa)

Composição	Carga máxima		Resistência à flexão	
	Média (N)	Coef. Variação	Média (MPa)	Coef. Variação
CH14	159,55	1,78%	0,10	1,69%
CEM5	99,31	3,71%	0,06	3,71%
CEM25	735,66	0,27%	0,44	1,02%

É possível observar que a composição CEM25 (25% de adição de cimento) obteve resistência à flexão média superior comparada com as demais composições. A resistência média das composições CH14 e CEM5 são semelhantes.

Ribeiro [20] utilizando argamassa de terra com adição de 18,6% de cimento em massa obteve resistência à flexão de 1,2 MPa, valor superior aos obtidos. A composição feita por Ribeiro [20] não utilizou cal em pasta, material que pode justificar a menor resistência à flexão mesmo com maior porcentagem de cimento na argamassa CEM25.

Barroso [29] fez o estudo com uma argamassa de terra comercial (sem estabilizante) que apresentou uma resistência à flexão de 0,3 MPa. Isso indica que a adição de 14% de cal hidráulica e a adição de 5% de cimento prejudicou a resistência à flexão em comparação com a argamassa de terra sem estabilizante.

c) Resistência à compressão

Após o ensaio de compressão, obteve-se os valores médios e os coeficientes de variação indicados na Tabela 22.

Tabela 22- Média e coeficiente de variação da carga máxima (N) e da resistência à compressão (MPa)

Composição	Carga máxima (N)		Resistência à compressão (MPa)	
	Média	Coef. Variação	Média	Coef. Variação
CH14	1588,00	0,02%	0,52	6,14%
CEM5	1,96	9,49%	2,53	9,49%
CEM25	9,45	2,17%	11,83	1,73%

Observa-se que a composição com 25% de cimento obteve resistência à compressão superior e a composição com 14% de cal hidráulica a inferior.

Ribeiro [20] apresenta valor de 3,6 MPa no ensaio à compressão para a argamassa de terra estabilizada com 18,6% de cimento, valor intermediário entre as composições com 5% e 25% de adição de cimento, indicando que quanto mais adiciona cimento na composição, maior é a resistência à compressão, diferentemente do que ocorreu no ensaio à flexão.

Barroso [29] com o estudo da argamassa de terra comercial apresentou uma resistência à compressão de 0,6 MPa, valor comparável com a argamassa estabilizada com 14% de cal hidráulica, mais ainda sim um valor inferior à argamassa estabilizada com 25% de cimento.

Outra comparação que se pode fazer é com a resistência à compressão do bloco solo-cimento que é de 2,50 MPa. Este valor é semelhante à resistência à compressão da composição com 5% de adição de cimento. A argamassa CEM25 atingiu uma resistência 473% maior e a CH14 uma resistência de 80% menor que a resistência do bloco. Logo, essas duas argamassas não seriam ideais para a solução de reforço com este bloco, já que estudos anteriores indicam que para um melhor desempenho do sistema, o ideal é buscar uma argamassa com características semelhantes ao do bloco.

4.2 Interação Bloco – Argamassa

Este ensaio foi realizado com o objetivo de observar a aderência da argamassa com o substrato assim como os modos de ruptura e a interferência do uso do chapisco. Os provetes foram nomeados com o final S ou C para os casos sem chapisco e com chapisco, respectivamente.

No ensaio de *Pull-Off* a ruptura deu-se de quatro maneiras: ruptura entre a argamassa e o chapisco (Figura 53a), entre argamassa e o bloco (Figura 53b), na argamassa (Figura 53c), no bloco (Figura 53d). Cada composição teve um tipo de ruptura característico os quais estão especificados na Tabela 23. No caso do provete CH14S e do CEM5S obtiveram predominantemente as rupturas, respectivas, na argamassa e entre a argamassa e o bloco. As demais composições apresentaram uniformidade em suas rupturas

Tabela 23- Tipos de ruptura no ensaio de *Pull-Off*

Composição	Tipos de ruptura			
	Bloco	Argamassa	Argamassa- Chapisco	Argamassa-Bloco
CH14S		X		X
CH14C			X	
CEM5S		X		X
CEM5C			X	
CEM25S	X			
CEM25C			X	

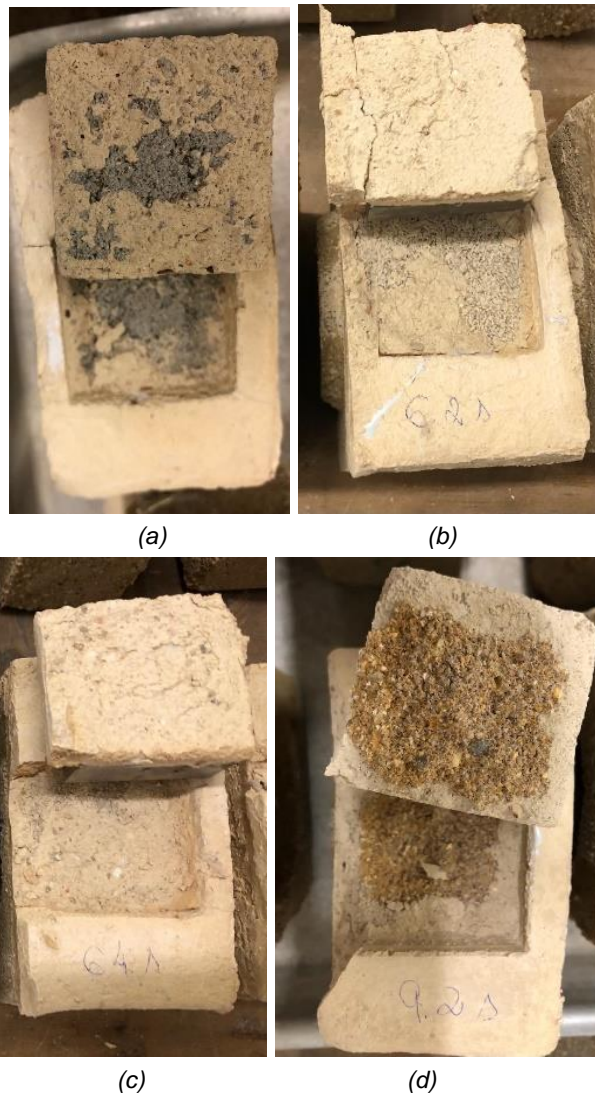


Figura 53- Tipos de ruptura no ensaio Pull-Off: (a) Argamassa-Chapisco, (b) Argamassa-Bloco, (c) Argamassa, (d) Bloco

Após o ensaio, a máquina fornece os dados de carga máxima de ruptura, o valor é aplicado na equação 3 para obtenção da resistência ao arrancamento. Os valores resumidos estão indicados na Tabela 24 e na Figura 54.

Tabela 24- Média e coeficiente de variação da carga máxima (N) e da resistência ao arrancamento (MPa)

Composição	Carga máxima (N)	Resistência ao arrancamento (MPa)	
	Média	Média	Coef. Variação
CH14S	234,02	0,09	0,01
CH14C	143,35	0,06	0,04
CEM5S	276,17	0,11	0,03
CEM5C	252,85	0,10	0,02
CEM25S	1106,85	0,44	0,00
CEM25C	676,08	0,27	0,01

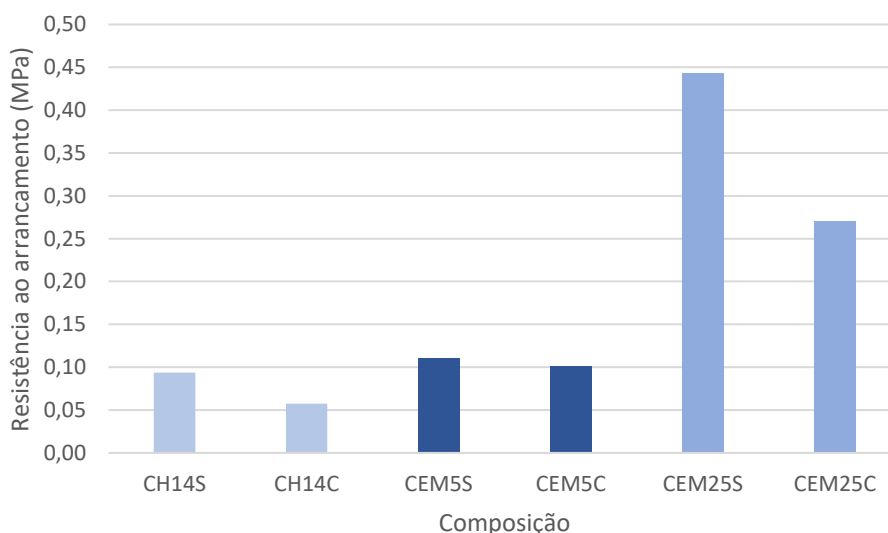


Figura 54- Gráfico da resistência ao arrancamento para cada composição

A resistência foi superior na composição com adição de 25% de cimento sem chapisco e inferior na composição com adição de 14% de cal hidráulica com chapisco. Em todas as composições ensaiadas o chapisco influenciou negativamente quanto a resistência ao arrancamento, diminuindo em 63% a resistência na composição CH14, 9% na CEM5 e 64% na CEM25.

A partir destes resultados e comparando com o modo de rotura (adesiva entre o chapisco e a argamassa) nos provetes em que foram aplicados o chapisco, pode-se dizer que houve uma limitação de adesão devido a este elemento. Portanto, o uso do chapisco influenciou diminuindo a resistência ao arrancamento, não atingindo o objetivo de sua utilização que seria para melhorar a aderência da argamassa ao substrato devido ao aumento de rugosidade na superfície. Este fato pode ter ocorrido devido à maior diferença de composição entre a argamassa e o chapisco, logo, características diferentes, diminuindo a aderência entre estes elementos.

Em comparação com a argamassa comercial estudada por Barroso [29], esta apresentou uma aderência ao arrancamento 64%, 69% e 92% inferior as composições respectivas de CH14S, CEM5S e CEM25S, indicando que as argamassas em estudos possuem uma melhor aderência.

A composição CH14S teve resistência ao arrancamento 33% maior em comparação com o estudo feito por Barroso [29] com 10% de adição de cal hidráulica. Então, uma maior adição de cal hidráulica apresentou uma melhora na aderência, porém, como a ruptura sem o uso do chapisco deu-se majoritariamente na argamassa, a fraqueza deste sistema bloco-argamassa está na argamassa. Esta fragilidade do provete CH14S ocorreu pela resistência da argamassa ser 80% inferior em relação ao bloco solo-cimento.

A ruptura no provete com a argamassa CEM5S deu-se de forma adesiva entre a argamassa e o bloco. Este modo de ruptura pode ser atribuído ao fato da argamassa CEM5 e o bloco solo-cimento possuírem resistências semelhantes,

então a fraqueza deste sistema é atribuída à aderência entre os elementos. Em oposição ao provete com a argamassa CEM25S que a ruptura ocorreu de forma coesiva no bloco já que a resistência da argamassa CEM25 foi significativamente superior (473%) à do bloco, indicando uma fraqueza no bloco.

4.3 Interação Bloco - Argamassa - Malha

Com o objetivo de analisar a interação entre os três componentes do sistema (bloco, argamassa e malha), foram analisados os valores de força máxima suportada pelo provete no ensaio de corte do tipo *single-lap shear test*.

Neste ensaio foi possível observar a ruptura na interface argamassa-malha nos provetes das composições CH14 (Figura 55a) e CEM5 (Figura 55b) e ruptura da malha fora da argamassa nos provetes da composição CEM25 (Figura 55c).

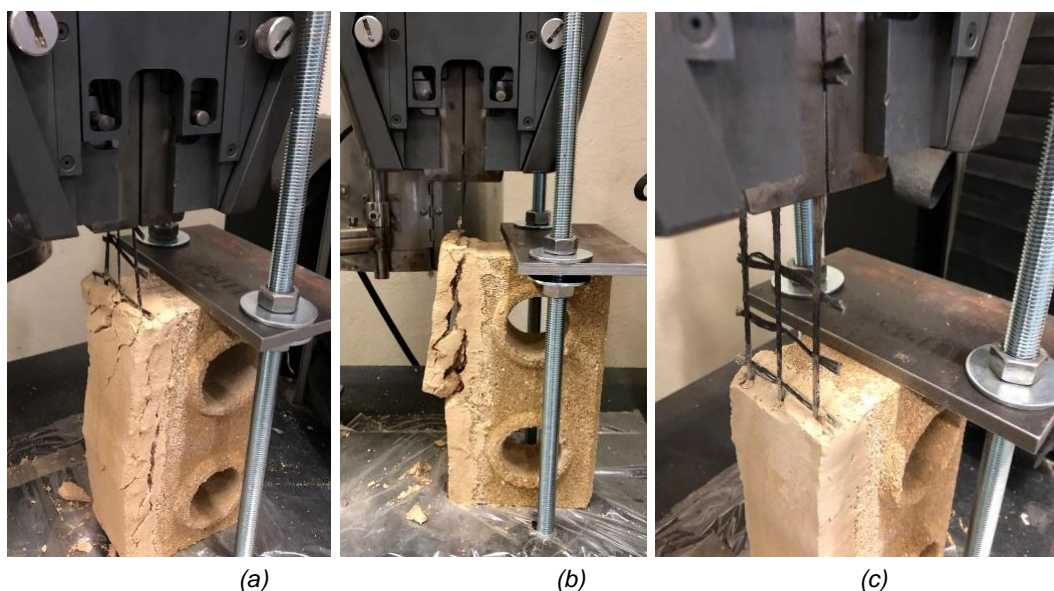


Figura 55- Ruptura dos provetes no ensaio de corte do tipo single-lap shear test: (a) CH14 com destacamento da malha e argamassa, (b) CEM5 destacamento da malha e argamassa e (c) CEM25 rompimento pela malha

Os modos de ruptura ocorreram de forma uniforme para todos os provetes com a mesma argamassa independente do comprimento de amarração da malha. Pelo estudo feito por Ascione *et al.* [34], pode-se concluir que os provetes com as argamassas CH14 e CEM5 tiveram um comportamento não linear seguido por ruptura frágil e nos provetes com a argamassa CEM25 pode-se atribuir um comportamento elástico seguido de uma redução instantânea de carga.

Pela análise visual ao final do ensaio, além da ruptura na malha, foi possível observar que não houve fissuras na argamassa CEM25. Enquanto que nos demais houve o destacamento da argamassa na interface argamassa-malha, indicando a fraqueza do sistema.

A máquina fornece a força máxima de ruptura que ao aplicar os valores na equação 4 tem-se a força linear máxima em relação à largura da malha indicada

na Tabela 25 e na Figura 56. Sendo os comprimentos de amarração da malha 83, 125 e 250 mm que estão indicados na nomenclatura dos provetes.

Tabela 25- Força linear máxima do ensaio corte do tipo single-lap shear test

Tipo de provete	Carga máxima (kN)	Força linear máxima (kN/m)
CH14/ 250	0,53	11,81
CH14/ 125	0,59	10,63
CH14/ 83	0,52	10,42
CEM5/ 250	0,33	10,52
CEM5/ 125	0,53	6,55
CEM5/ 83	0,18	3,65
CEM25/ 250	0,80	17,40
CEM25/ 125	0,87	16,00
CEM25/ 83	0,83	16,54

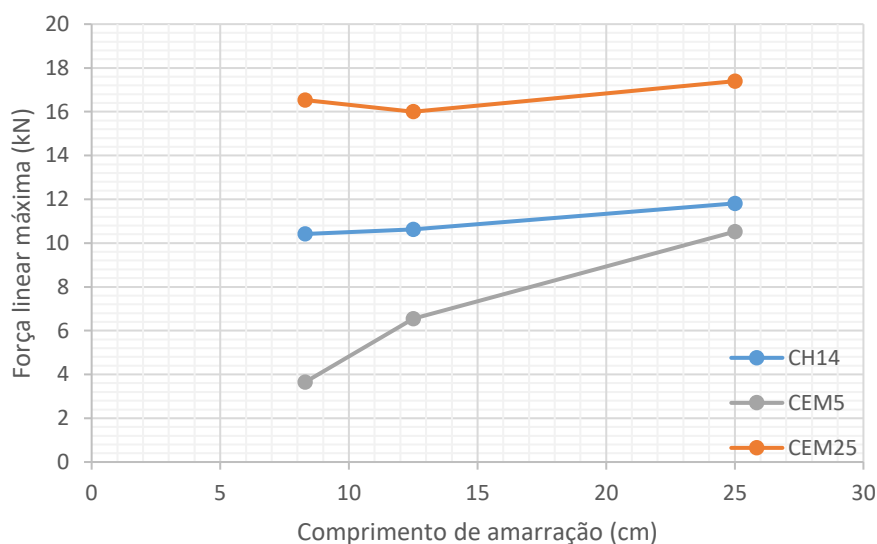


Figura 56- Gráfico de comprimento de amarração (cm) por força máxima linear (kN/m)

Os provetes com a composição CEM25 suportaram uma maior força aplicada, enquanto que os provetes com a composição CEM5 apresentam resultados inferiores. Quando o comprimento da malha aplicada foi de um bloco (250 mm), a solução de reforço apresentou resultados de tensão máxima superiores aos demais comprimentos. Destaca-se que a resistência da malha de poliéster quando submetida a ensaio de tração é de 38 kN/m, valor acima da força linear máxima obtida neste ensaio para todas as situações. Como o rompimento do provete com a composição CEM25 foi pela rotura da malha, era de se esperar que a resistência fosse semelhante à 38 kN/m, o que não ocorreu. Este fato pode ser atribuído a danos causado na malha pela amarra. Nos demais provetes essas falhas de ensaio não podem ser atribuídas, pois a fraqueza da solução foi a argamassa.

Comparando com o estudo realizado por Romanazzi *et al.* [35] utilizando malha de fibra de vidro aplicada no bloco em comprimentos de 30, 60, 90 e 120 mm, o autor obteve valores crescentes de força linear máxima com o aumento

do comprimento. Este fato também foi observado, visto que o menor comprimento de aplicação da malha (83 mm) foi o que apresentou menor força e o comprimento de 250 mm a maior força. Exceto no provete CEM25/ 83 que obteve uma força intermediária, porém, como só tinha um provete de amostra por questão de tempo e recurso, não foi possível tirar uma média de valor para eliminar possíveis erros de moldagem.

Capítulo 5

5. Conclusões e Trabalhos Futuros

5.1 Considerações finais

Este trabalho visou estudar a solução TRM que consiste na utilização de reboco armado afim de reforçar as estruturas de forma eficiente, econômica e sustentável, principalmente, quando submetidas à esforços sísmicos. Para isso foram analisadas diferentes composições de argamassa as quais possibilitaram a análise da influência da cal hidráulica e do cimento na argamassa de terra e a interação deste componente com os demais elementos da solução, malha de fibra de poliéster e bloco solo-cimento.

Foram selecionadas três argamassas para realização dos ensaios por análise visual. Em todos os ensaios, a argamassa com adição de 25% de cimento foi a que obteve maiores resistências.

Quanto às características da argamassa no estado endurecido, retração linear e volumétrica e resistências à flexão em três pontos e à compressão, é possível concluir que o cimento foi o material que mais influenciou para uma baixa retração e um aumento das resistências. Ao comparar com outros estudos, percebe-se que as argamassas com adição de 14% de cal hidráulica e 5% de cimento obtiveram uma retração superior ao recomendado. A resistência à flexão das composições CH14 e CEM5 foram inferiores a argamassa de terra comercial, em oposição à composição CEM25. Quanto à resistência à compressão, a argamassa CH14 teve valor semelhante a argamassa de terra sem estabilizante, a CEM5 obteve valor semelhante à resistência do bloco solo-cimento e a argamassa CEM25 obteve um valor demasiado alto (473%) em relação ao bloco, sugerindo um superdimensionamento da argamassa.

No ensaio de aderência entre o bloco e a argamassa, foi possível observar que a fraqueza do sistema com a composição CH14S foi na argamassa, da CEM5S foi na aderência com o bloco e da CEM25S foi no bloco devido à alta resistência da argamassa. Neste ensaio também foi possível analisar a influência do uso do chapisco, o qual não apresentou resultados satisfatórios, pois a resistência ao arrancamento diminuiu ao aplicar o chapisco no bloco. Atribui-se a esse fato pela maior diferença de composição entre a argamassa e o chapisco, diminuindo a aderência.

Quanto ao comportamento conjunto de todos os elementos do reforço (bloco, argamassa, malha), a força máxima linear foi inferior à força da malha quando esta é ensaiada à tração, devido à possível dano causado na malha pela

amarra na hora do ensaio. Também foi possível verificar o aumento da força linear máxima com o aumento do comprimento de amarração da malha.

Quanto ao modo de rotura no ensaio de corte houve um destacamento da argamassa nas mais frágeis (CH14 e CEM5) e a rotura da malha na argamassa mais resistência (CEM25).

Portanto, ao analisar a solução de reforço conclui-se que a argamassa CH14 não obteve um bom desempenho nos ensaios. A argamassa CEM5 é a que mais se assemelha ao bloco, porém, é preciso realizar ensaios de interação desta argamassa com a malha, já esta foi a fraqueza do ensaio de corte do tipo *single-lap shear test*. Já a argamassa CEM25 obteve as maiores resistências em comparação com as outras duas estudadas, entretanto, tem uma resistência à compressão demasiada alta em relação ao bloco e no ensaio de interação entre os três componentes, observou-se a rotura na malha, indicando que possui uma maior aderência com a malha em comparação com as demais argamassas, mas isso só pode ser afirmado com a execução dos ensaios de *Pull-Out* e tração direta, já que é possível que tenha ocorrido um dano na malha e, então, não foi possível concluir se a real fraqueza do sistema foi a resistência da malha.

5.2 Trabalhos futuros

A partir dos resultados obtidos e das observações no decorrer deste trabalho, sugere-se para trabalhos futuros:

- Analisar as composições com outras proporções de cal em pasta, afim de estudar a sua influência nas resistências e aderência com a argamassa, pois esta foi uma fraqueza das argamassas estudadas;
- Analisar outras proporções de areia nas composições das argamassas variando a porcentagem de argila afim de verificar o comportamento de aderência entre os componentes;
- Analisar outros tipos de malha tais como fibra de vidro e carbono para verificar a aderência com a argamassa de terra, também pelo motivo desta aderência ter sido a fraqueza de duas composições, além de realizar ensaios com a malha nos dois sentidos;
- Analisar variações de comprimentos de amarração da malha no bloco entre 125 e 250 mm, com o objetivo de obter um comprimento efetivo que indica o menor comprimento necessário para obter a força máxima;
- Realizar ensaios de tração direta e *Pull-Out* para analisar a real interação entre a argamassa e a malha;
- Analisar o comportamento do reforço aplicado na alvenaria.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LIMA, F. X. R. F., “Blocos de terra compactada de solo-cimento com resíduo de argamassa de assentamento e revestimento: caracterização para uso em edificações”. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de Brasília, 2013.
- [2] BERGE, B., “The ecology of building materials”, 2 ed. Elsevier, 2009.
- [3] RAUT, S. P., RALEGAONKAR, R. V., MANDAVGANE, S. A. “Development of sustainable construction material using industrial and agricultural solid waste: A review of waste-create bricks”. Elsevier, Construction and Building Materials. Vol. 25, 2011.
- [4] JALALI, Said; EIRES, Rute M. G. e TORRAL, F. P., “Inovações científicas de construção em terra crua”. Conferência Int. - Angola Ensino, Investigação e Desenvolvimento, 2008.
- [5] FERNANDES, M. C. L. A., “A cultura construtiva do adobe em Portugal”. Dissertação para Grau de Doutoramento em Arquitetura - Universidade de Coimbra, 2013.
- [6] NEPOMUCENO, E. C., “Use of Municipal Waste to Build Ecological Blocks”. Polytechnic Institute of Bragança, 2018.
- [7] SILVA, M. F. C. G., “Blocos de terra compactada com e sem materiais cimentícios”. Dissertação (Grau de mestre em Engenharia Civil) - Técnico Lisboa, 2015.
- [8] BARBOSA, N. P. e GHAVANI, K., “Materiais de Construção Sustentáveis”, Congr. Luso Brasileiro Mater. Construção Sustentáveis, vol. 1, pp. 29–42, 2014.
- [9] GOMES, M. I.; FARIA, P.; GONÇALVES, T. D., “Characterization of earth-based mortars for rammed earth repair”, Lisboa, 2015.
- [10] INGLES, O. G.; METCALF, J. B., “Soil stabilization: Principle and practice”. Melbourne Butterworths, 1972.
- [11] ASTM D2487, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), 2011.
- [12] LNEC, E 239: Solos - análise granulométrica por peneiração húmida. Lisboa, Portugal, 1970.
- [13] NP, EN 143: Determinação dos limites de consistência. Lisboa, Portugal, 1969.

- [14] ABNT, NBR 10833: Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica - Procedimento. Rio de Janeiro, Brasil, 2012.
- [15] NTC 5324: Bloques de suelo cemento para muros y divisiones, definiciones, especificaciones, métodos de ensayo, condiciones de entrega. Bogotá, Colombia, 2004.
- [16] ABNT, NBR 8491: Tijolo de Solo Cimentos - Requisitos. Rio de Janeiro, Brasil, 2012.
- [17] AENOR, UNE 41410: Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques - Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo. Madrid, España, 2008.
- [18] DIN 18945: Earth blocks - Terms and definitions, requirements, test methods. Alemanha, 2013.
- [19] RICHTER, C., "Alvenaria estrutural: processo construtivo racionalizado". Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2007.
- [20] RIBEIRO, A. M. F., "Análise experimental do comportamento ao corte de paredes reforçadas em alvenaria de BTC", Universidade do Minho, 2015.
- [21] QUEIROGA, M.S., "Resistência à compressão de painéis reduzidos de alvenaria de BTC", Universidade Federal da Paraíba, 2016.
- [22] STURM, T., "Poderão os blocos de terra compactada com estabilização fazer parte de um sistema sismo-resistente? ", 5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, p. 1-16, 2014.
- [23] MINKE, G., "Building with Earth, Design and Technology of a Sustainable Architecture". Basel: Berlin: Birkhäuser - Publishers for Architecture, 2006.
- [24] NUNES, U. F. "Caracterização do comportamento estrutural de uma casa em BTC". Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) - Universidade de Aveiro, 2013.
- [25] HOUBEN, H., GUILLAUD, H. Earth Constructions. "A comprehensive guide" (4th ed.). North Yorkshire: J e L Composition Ltd, 2008.
- [26] FARIA, P.; LIMA, J., "Rebocos de terra". 1. ed. Lisboa: Argumentum, 2018.
- [27] LIMA, J.; CORREIA, D.; FARIA, P., "Rebocos de terra: Influência da adição de gesso e da granulometria da areia". II Simpósio de Argamassas e Soluções Térmicas de Revestimento, 2016
- [28] GOMES, M. I., "Conservação de Construção de Taipa: argamassas de reparação". Tese de Doutoramento, Universidade Nova de Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, 2013.

- [29] BARROSO, C. A. J., “Reforço Sísmico Inovador de Construção de Taipa”. Dissertação (Grau de mestre em Engenharia Civil) - Universidade do Minho, 2016.
- [30] CHASTRE, C. “Materiais e tecnologias de reforço de estrutura de betão - potencialidade e limitações”. Rehabend 2014, Santander, Espanha, p. 1-10, 2014.
- [31] ROQUE, J. C. A., “Reabilitação estrutural de paredes antigas de alvenaria”. Dissertação (Grau de mestre em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia da Universidade do Minho, 2002.
- [32] MARTINS, A., “Soluções De Reforço Sísmico De Paredes De Alvenaria De Enchimento”. Mestrado. Universidade do Minho, 2013.
- [33] MAURÍCIO, T. G. G., “Rebocos Armados Aplicados em Paredes de Edifícios Antigos e Novos: Levantamento de Soluções, Técnicas de Aplicação e Características”. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) - Universidade Nova de Lisboa, 2012.
- [34] ASCIONE, L.; FELICE, G.; SANTIS, S., “A qualification method for externally bonded Fibre Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) strengthening systems”. Elsevier, p. 1-11, 2015.
- [35] ROMANAZZI, A.; OLIVEIRA, D. V. e SILVA, R. A., “Experimental Investigation on the Bond Behavior of a Compatible TRM-based Solution for Rammed Earth Heritage”. International Journal of Architectural Heritage, <https://doi.org/10.1080/15583058.2019.1619881>, 2019.
- [36] NP-83: Solos; Determinação da densidade das partículas, 1965.
- [37] NP EN 1097-3: Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados; Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios. Lisboa, Portugal, 2002.
- [38] LNEC, E 199: Solos. Determinação do equivalente de areia. Lisboa, Portugal, 1967.
- [39] EN 1015-1: Methods of test for mortar for masonry Part 1: Determination of particle size distribution, London, 1999.
- [40] LNEC E 196: Solos. Análise granulométrica, Lisboa, Portugal, 1966.
- [41] AUBERT, J. E.; MAILLARD, P.; MOREL, J. C.; RAFII, AI. M., “Towards a simple compressive strength test for earth bricks? ”. Materials and Structures p. 1641–1654, 2016.
- [42] NP EN 459-1: Cal de construção; Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade, 2015.
- [43] NP EN 197-1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes, 2012.

[44] ABNT, NBR 7215: Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos, Rio de Janeiro, Brasil, 2019.

[45] EN 1015-2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars, London, 1999.

[46] EN 1015-3: Determination of consistency of fresh mortars, Brussels, 2004.

[47] EN 1015-11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar, Brussels, 1999.

[48] EN 1015-12: Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates, 2000.