



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE PAINÉIS REDUZIDOS DE
ALVENARIA DE BTC**

MATHEUS SILVA QUEIROGA

João Pessoa – PB
2016

MATHEUS SILVA QUEIROGA

**RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE PAINÉIS REDUZIDOS DE
ALVENARIA DE BTC**

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal da Paraíba como requisito parcial para a conclusão do curso de graduação.

Orientador: Professor Dr. Givanildo Alves de Azeredo

João Pessoa – PB
2016

Q383r Queiroga, Matheus Silva

Resistência à compressão de painéis reduzidos de alvenaria de
BTC./ Matheus Silva Queiroga./ - João Pessoa, 2016.

63.il.

Orientador: Prof. Dr. Givanildo Alves de Azeredo

Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Civil) CGEC./
Centro de Tecnologia / Campus I / Universidade Federal da Paraíba.

1. Tijolo ecológico. 2. Solo-cimento. 3. Desempenho mecânico. I.
Título.

BS/CT/UFPB

CDU: 2.ed 504 (043)

FOLHA DE APROVAÇÃO

MATHEUS SILVA QUEIROGA

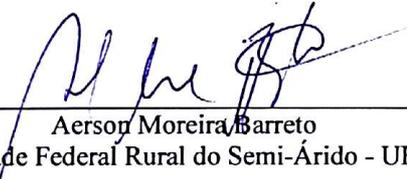
**RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE PAINÉIS REDUZIDOS DE ALVENARIA DE
BTC**

Trabalho de Conclusão de Curso em 25/11/2016 perante a seguinte Comissão Julgadora:



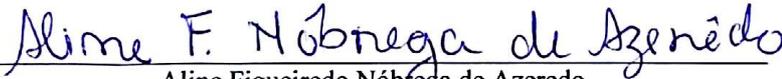
Givanildo Alves de Azeredo
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO



Aerson Moreira Barreto
Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA

APROVADO



Aline Figueiredo Nóbrega de Azeredo
Instituto Federal da Paraíba - IFPB

APROVADO

Profa. Ana Cláudia Fernandes Medeiros Braga
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, pelo dom da vida e por ter me abençoado com a oportunidade de aprender mais através deste trabalho.

Aos meus pais, Jucelio e Girlene, meu irmão, Hiago Queiroga, e minha amada, Rayane Pereira, por todas as formas de apoio e pelo incessável estímulo aos estudos.

Ao professor Givanildo Azeredo, pelas orientações, paciência e incentivos. Aos técnicos e funcionários do Laboratório de Ensaios em Materiais e Estruturas (LABEME) e do Laboratório de Geotecnia e Pavimentação (LAPAV) da UFPB.

E aos colegas de pesquisa que também ajudaram com os trabalhos pesados de produção e ensaios: Dimas Teixeira, Lucas Miranda e Philipe Alexandre.

Muito obrigado.

RESUMO

Neste trabalho, a resistência à compressão de painéis reduzidos de alvenaria de blocos de terra compactada (BTC) foi avaliada. Os painéis eram não armados e não grauteados, medindo aproximadamente 1,25 x 1,25 m. Empregou-se argamassa de terra para o assentamento dos blocos. A terra foi classificada como areia argilosa, sendo identificada a argila do tipo caulinita em baixa proporção (2%). Os blocos e a argamassa foram estabilizados com cimento Portland na proporção de 12% e 8% em massa, respectivamente. Os blocos foram ensaiados à compressão e absorção de água, apresentando resultados médios de 2,87 MPa e 16,68%, respectivamente, os quais atendem às especificações da NBR 10834:2012. Transdutores de deslocamento foram instrumentados para a obtenção do encurtamento dos painéis, os quais permitiram a análise estrutural. O rompimento dos painéis foi causado pelo esmagamento dos blocos, o que pôde ser explicado pela natureza frágil de seus materiais. Os painéis apresentaram valor médio de 1,30 MPa de resistência à compressão, o que implicou em uma eficiência painel-bloco de 0,45.

Palavras-chave: tijolo ecológico, solo-cimento, desempenho mecânico.

ABSTRACT

In this work, the compressive strength of reduced-size masonry panels made from compressed earth blocks (CEB) was assessed. The panels were not reinforced with steel bars nor filled up with concrete in the block voids and had dimensions of 1.25 by 1.25 meter. It was applied earth mortar for laying the blocks. The soil was classified as a clayey sand, in which the clay mineral was identified as of the family of kaolinite, in low proportion (2%). The blocks and the mortar were stabilized with Portland cement in the proportion of 12% and 8% in mass, respectively. The blocks were submitted to compressive strength and water absorption tests, showing mean values of 2.87 MPa and 16.68%, respectively, which complied with the NBR 10834:2012 standard specifications. Deflectometers were installed in order to obtain the shortening of the panels and that allowed a structural analysis to be made. The rupture of the panels was caused by the smashing of the blocks, which could be explained by the fragile nature of their materials. The panels showed an average compressive strength of 1.30 MPa, which corresponded to a panel-block efficiency of 0.45.

Key-words: compressed stabilized earth block, soil-cement, masonry mechanical performance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Construção em taipa de mão.....	15
Figura 2.2 – Construção em taipa de pilão.....	15
Figura 2.3 – Construção em adobe.	15
Figura 2.4 – Construção em BTC.....	16
Figura 2.5 – Prensa manual para BTC.....	17
Figura 2.6 – Prensa hidráulica automatizada + acessórios.....	17
Figura 2.7 – Terminologia do Sistema Unificado de classificação dos solos.	21
Figura 2.8 – Resultados apresentados por Walker (1997).	22
Figura 2.9 – Especificações para BTC.....	24
Figura 2.10 - Estados de hidratação do solo.....	25
Figura 2.11 - Teste prático de umidade ótima de solo para BTC.....	26
Figura 2.12 – Paredes de alvenaria de BTC.	28
Figura 2.13 – Espalhamento de carregamento de compressão em alvenaria.	31
Figura 2.14 – Fissuras por carregamento excessivo de compressão em alvenaria.....	31
Figura 2.15 - Resultados apresentados por Ferreira e Júnior (2011).	33
Figura 2.16 – Esquema para o ensaio de determinação da resistência à compressão de pequenas paredes.....	36
Figura 2.17 – Resultados apresentados por Aly e Sabatini (1994) apud Silva (2007).	37
Figura 2.18 - Comparativo de estudos com BTC.	38
Figura 2.19 – Resultados apresentados por Grande (2003) - BTC.....	39
Figura 2.20 – Resultados apresentados por Reddy e Gupta (2005).....	39
Figura 2.21 – Resultados apresentados por Grande (2003).	40
Figura 2.22 – Resultados apresentados por Grande (2003) - Comparativo.	40
Figura 2.23 – Resultados apresentados por Júnior, Willrich e Barbosa (2003).	41
Figura 3.1 – Granulometria da fração de finos do solo.....	43
Figura 3.2 – Curva granulométrica do solo.....	44
Figura 3.3 – Difratoograma de raios-x do solo.....	45
Figura 3.4 – Prensa utilizada para fabricação dos blocos.	47
Figura 3.5 – BTC produzido.....	47
Figura 3.6 – Preparo da mistura para BTC.....	48
Figura 3.7 – Prensagem e estocagem dos BTC's.	48
Figura 3.8 – Ensaio de compressão axial nos blocos.....	49

Figura 3.9 – Ensaio de resistência à compressão para argamassa de assentamento.....	50
Figura 3.10 – Produção dos painéis de alvenaria.	51
Figura 3.11 – Posicionamento dos transdutores de deslocamento nos painéis.	52
Figura 4.1 – Curvas tensão x deformação dos blocos.....	53
Figura 4.2 – Blocos rompidos à compressão.....	54
Figura 4.3 – Resultados do painel 1.....	56
Figura 4.4 – Resultados do painel 2.....	57
Figura 4.5 – Resultados do painel 3.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Tipos de BTC e suas aplicações.....	18
Tabela 2.2 – Características recomendadas para o solo segundo ABNT (2012).	19
Tabela 2.3 – Escala granulométrica usual dos solos.....	20
Tabela 3.1 - Composição química do solo.	46
Tabela 4.1 – Resistência à compressão dos blocos.....	54
Tabela 4.2 – Absorção de água dos blocos.	54
Tabela 4.3 – Resistência à compressão da argamassa de assentamento.	55
Tabela 4.4 – Momento das primeiras fissuras nos painéis.....	59
Tabela 4.5 – Resistência à compressão dos painéis.....	59

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	A CONSTRUÇÃO EM TERRA CRUA.....	14
2.1.1	Aplicação na construção de edificações	14
2.1.2	Tecnologia do BTC	16
2.1.3	Bloco de Terra Compactada.....	19
2.1.3.1	Terra.....	19
2.1.3.2	Teor de cimento.....	23
2.1.3.3	Umidade de compactação	24
2.1.3.4	Fabricação e cura	26
2.2	PAREDES DE ALVENARIA	27
2.2.1	Generalidades.....	28
2.2.2	Resistência à compressão.....	30
2.2.3	Influência dos componentes na resistência à compressão da alvenaria	31
2.2.3.1	Blocos	32
2.2.3.2	Argamassa de assentamento.....	32
2.2.4	Avaliação das resistências à compressão.....	34
2.2.4.1	Blocos	34
2.2.4.2	Argamassa	35
2.2.4.3	Paredes	35
2.3	ESTUDOS SOBRE ALVENARIA DE BTC	37
2.3.1	Propriedades do BTC.....	37
2.3.2	Resistência à compressão de paredes	39
3	MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1	ORIGEM DOS MATERIAIS	42
3.2	TERRA	42
3.2.1	Granulometria e limites de consistência.....	42
3.2.2	Argila.....	45
3.3	BLOCOS.....	46
3.3.1	Preparo da terra	46
3.3.2	Estudo preliminar da umidade de compactação.....	46
3.3.3	Produção e cura	47

3.3.4	Ensaio	49
3.3.4.1	Resistência à compressão	49
3.3.4.2	Absorção de água	49
3.4	ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO	50
3.5	PAINÉIS REDUZIDOS DE ALVENARIA	51
3.5.1	Produção	51
3.5.2	Ensaio de resistência à compressão	51
4	RESULTADOS	53
4.1	BLOCOS	53
4.2	ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO	55
4.3	PAINÉIS	56
5	CONCLUSÕES	60
6	REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

Muitos dos materiais e tecnologias abundantemente empregados na construção civil não levam em conta o conceito de desenvolvimento sustentável, sendo de altos custos energéticos, financeiros e ambientais. Com isso, os recursos naturais tendem a se esgotar e sofrer limitações de uso, o que torna a consciência ambiental necessária na engenharia (FREIRE e BERALDO, 2010, apud PINTO, 2013).

A terra crua, graças a sua grande abundância e facilidade de obtenção e manuseio à baixo custo, é apropriada para diversas aplicações na construção civil, sendo empregada há milhares de anos. No Brasil, sua aplicação como elemento construtivo de edificações (alvenaria) foi desestimulada com o surgimento de materiais mais industrializados, sendo mais empregada em obras de pavimentação (GRANDE, 2003). Por outro lado, nos dias atuais, a humanidade ainda assiste a um terço da sua população morando em casas feitas de terra crua. Quando se observa apenas os países emergentes essa proporção pode ultrapassar a metade. Nos locais onde os recursos para construção são escassos, a terra crua e as técnicas de construção simplificadas são alternativas para suprir demandas habitacionais (MINKE, 2006).

Este material permite o desenvolvimento sustentável na construção civil, apresentando vários pontos positivos. Dentre as diversas técnicas de construção em terra, a alvenaria de BTC (Bloco de Terra Compactada) se mostra como uma alternativa vantajosa quando se busca uma construção econômica, eficiente e ecologicamente correta. A aplicação desta técnica permite dispensar custos com aquisição e transporte da principal matéria-prima, pois é possível se utilizar o solo do próprio canteiro de obras em sua produção. Quanto ao viés sustentável, pode-se mencionar, além da abundância da terra crua, a baixíssima emissão de gases poluentes, já que o bloco não necessita ser queimado; daí também ser conhecido como bloco ou tijolo ecológico.

No entanto, segundo Pinto (2013), a principal desvantagem do BTC é a sua baixa resistência à ação da água, o que pode explicar a maioria das patologias. Logo, a terra necessita ser estabilizada para se melhorar a resistência às intempéries. Para a estabilização da argila presente no solo é constante a prática de se adicionar cimento Portland, conferindo ao produto melhorias em propriedades e desempenho. Por isso, o BTC é também conhecido como bloco de solo-cimento, sendo definido pela NBR 10833 (ABNT, 2012) como um componente de alvenaria constituído por uma mistura homogênea, compactada e endurecida de solo, cimento Portland e água.

Além da questão do material, o déficit habitacional e a busca por novas soluções construtivas que minimizem o desperdício nas obras também justificam a importância da pesquisa sobre alvenaria de BTC no contexto da construção civil. Os benefícios desta técnica estão além da praticidade de produção e execução; ela proporciona redução de custos em outras etapas da obra. A execução demanda muito menos argamassa de assentamento quando comparada com alvenaria de blocos tradicionais, além de poder ser utilizada sem a necessidade de revestimento, etapas que demandam grande quantidade de recursos na construção de edificações. Além disso, os equipamentos de produção são simples e a mão-de-obra para produção e assentamento dos blocos não necessita ser especializada (ABCP, 2000).

Portanto, o estudo do comportamento estrutural da alvenaria de BTC se mostra pertinente frente à crescente importância do uso de materiais sustentáveis e à busca pela maior confiabilidade do uso desse material na construção civil, principalmente no subsetor de edificações. Tendo em vista a diversidade de parâmetros considerados na fabricação do bloco (solo, teor de cimento, umidade, cura, dentre outros), novos estudos são relevantes para a descoberta de combinações desfavoráveis ou que proporcionem melhores desempenhos.

O objetivo geral deste trabalho foi o de avaliar a resistência à compressão simples de painéis reduzidos de alvenaria não armada de blocos de terra compactada, estabilizados com cimento Portland. Os objetivos específicos consistiram da avaliação da resistência à compressão e absorção de água dos blocos, a fim de determinar a eficiência painel-bloco quanto à resistência à compressão e a verificar o enquadramento do bloco nas especificações da NBR 10834: Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural: especificação (ABNT, 2012).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A CONSTRUÇÃO EM TERRA CRUA

2.1.1 Aplicação na construção de edificações

Segundo Minke (2006), o uso da terra na construção civil surgiu há mais de nove mil anos. Casas de adobe datam de 8000 a.C., enquanto que fundações de terra pisada surgiram por volta de três mil anos depois. Além de moradias, a terra foi também identificada na construção de prédios de pequeno porte na Alemanha, templos milenares no Egito e nos primórdios da Muralha da China.

Torgal e Jalali (2011) comentam que as técnicas de construção em alvenaria de terra são agrupadas em três sistemas principais:

- ***Construção por enchimento e revestimento***: a terra no estado plástico é usada para o preenchimento dos vazios de esqueletos de suporte de madeira, cana ou vime, servindo apenas como material de vedação; a taipa de mão é a técnica mais difundida desse sistema;
- ***Construção monolítica***: consiste no preenchimento de fôrmas de madeira com terra no estado plástico, podendo ou não ser compactada, a exemplo da taipa de pilão;
- ***Construção por unidades***: utiliza elementos pré-fabricados justapostos para a formação da alvenaria; o adobe é obtido através da moldagem manual da terra plástica em moldes de madeira, enquanto que o bloco de terra compactada (BTC) é produzido pela prensagem mecânica ou hidráulica da terra úmida. Além desses, também existem o bloco de terra recortada e a terra extrudida.

“Houben e Guillaud (1994) garantem que a terra é, sem dúvida, o material de construção mais utilizado no mundo, sendo difícil encontrar um país que não possua herança destas construções” (PINTO, 2013; p. 28). São inúmeros os exemplos de construções em terra crua.

Para citar alguns:

- Casa em taipa de mão - Figura 2.1.

Figura 2.1 – Construção em taipa de mão.



Fonte: professor Aerson Barreto (examinador).

- Em São Paulo, casas construídas em taipa de pilão datam de 260 anos – Figura 2.2.

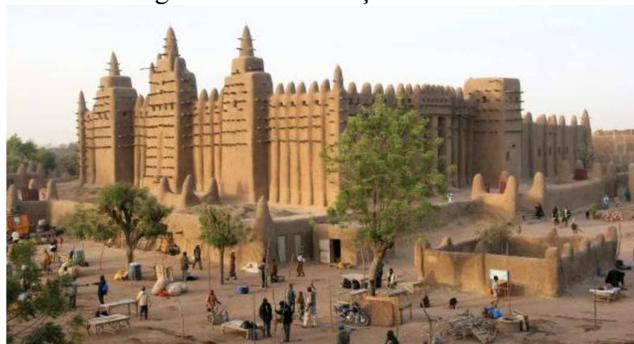
Figura 2.2 – Construção em taipa de pilão.



Fonte: Minke (2006).

- A mesquita de Djenna em Timbuktu no Mali é o maior edifício de adobe do mundo, no qual as paredes são estruturais, suportando todo peso sem necessidade de qualquer estrutura auxiliar – Figura 2.3.

Figura 2.3 – Construção em adobe.



Fonte: Recriar (2013) apud Pinto (2013).

- Na Índia existem mais de doze mil edificações construídas com BTC, muitas delas sendo de alvenaria estrutural – Figura 2.4.

Figura 2.4 – Construção em BTC.



Fonte: Reddy e Gupta (2005).

2.1.2 Tecnologia do BTC

O BTC surgiu como uma evolução da técnica dos tijolos de adobe. Através da compressão estática obteve-se melhorias nas propriedades mecânicas do componente construtivo, as quais se refletiram em maiores durabilidade e resistência à água (AZEREDO et al, 2016).

Guillaud (1995) conceitua que a ideia de compactar a terra surgiu na França, ainda no século 18, quando Francois Cointeraux inventou uma prensa manual em fôrmas de madeira, versão adaptada de prensas de vinho. Após o desenvolvimento de alguns projetos no início do século 20, a primeira prensa mecânica para a produção de BTC surgiu no Centro Interamericano de Vivienda y Planejamento (CINVA) em Bogotá, Colômbia no ano de 1954, criada pelo engenheiro Raul Ramirez e batizada de CINVA-Ram. A máquina comprimia a terra em estado úmido dentro de moldes metálicos, produzindo tijolos maciços ou furados. Segundo o autor, o cenário mundial de produção e aplicação de BTC se encontra aquecido graças ao surgimento de uma nova geração de prensas manuais, mecânicas e motorizadas nos anos 1970 e 80.

De acordo com Fiquerola (2004), no Brasil, após comprovada sua eficiência como constituinte de camadas de base e sub-base de rodovias, a terra estabilizada, ou melhor dizendo, o solo-cimento foi pioneiramente introduzido nos anos 1940 na construção de paredes monolíticas de residências em Petrópolis (RJ) e de um hospital em Manaus com mais de 10 mil m², ainda em bom estados de conservação atualmente. No final da década de 1970, fundos

federais e pesquisas constatando vantagens técnicas e econômicas desse material impulsionaram seu uso em construções habitacionais.

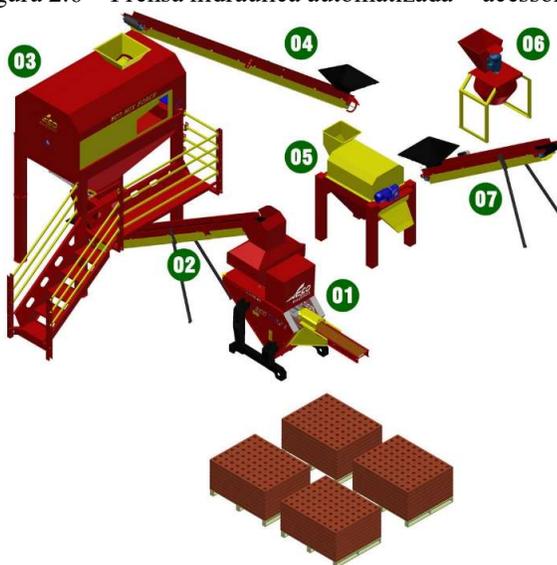
Segundo Reddy e Gupta (2005), existem mais de 100 tipos de prensas de BTC no mercado mundial atualmente. Permaq, Man, Gutward, Eco Máquinas, Andrade Gutierrez e Sahara são algumas das marcas que produzem uma enorme variedade de prensas no mercado brasileiro. Os modelos podem ser manuais ou mecânicos (hidráulicos), possibilitando a produção de diversos tamanhos e formas de blocos através de operação manual ou automatizada - Figura 2.5 e Figura 2.6. A produção pode variar de 100 a 1200 peças/h, dependendo da equipe, instalações e uso de acessórios misturadores e carregadores (FIQUEROLA, 2004).

Figura 2.5 – Prensa manual para BTC.



Fonte: Grande (2003).

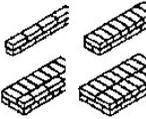
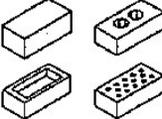
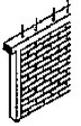
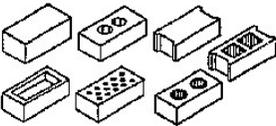
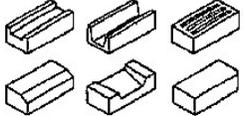
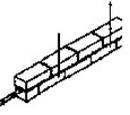
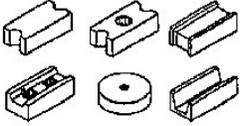
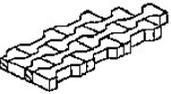
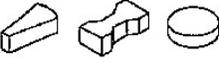
Figura 2.6 – Prensa hidráulica automatizada + acessórios.



Legenda: 1- prensa, 2, 4 e 7- esteiras, 3- misturador, 5- triturador e 6- peneira. Fonte: < ecomaquinas.com.br>. Acesso em agosto de 2016.

Segundo Rigassi (1995), os principais tipos de BTC são: sólido, canaleta, vazado e encaixável, mostrados na Tabela 2.1 e relacionados com as principais aplicações para cada tipo.

Tabela 2.1 - Tipos de BTC e suas aplicações.

6 PRINCIPAIS USOS DE BTC		
APLICAÇÃO		BLOCO REQUERIDO
alvenaria estrutural		
alvenaria de vedação		
aplicações especiais	<ul style="list-style-type: none"> - ventilação - canais de cabos - chanfros - decoração - abóbodas e arcos 	
alvenaria armada		
sistemas construtivos especiais: ligações justapostas		
sistemas construtivos especiais: assentamento à seco encaixável		

Fonte: Adaptado de Rigassi (1995).

2.1.3 Bloco de Terra Compactada

2.1.3.1 Terra

Granulometria e consistência

Conforme Minke (2006), solos de até 40 cm de profundidade podem ser inadequados para construções em terra devido ao alto teor de matéria orgânica formada pela decomposição de folhas. A matéria orgânica deve ser evitada na composição do BTC, pois é prejudicial ao processo de hidratação do cimento. Por outro lado, Rigassi (1995) conceitua que solos de grandes profundidades também podem ser impróprios devido à quantidade excessiva de pedregulhos ou até mesmo rochas maiores.

Minke (2006) percebeu que quando solos típicos para a produção de tijolos cerâmicos (altos teores de finos, da ordem de 24% de argila e 50% de silte) são usados na fabricação de BTC, o mesmo apresenta fissuras se exposto à chuva devido aos processos de expansão e retração por secagem. O autor também indica que o solo apropriado deve ser arenoso.

Mesmo sendo preferíveis solos arenosos para a produção de BTC, qualquer tipo de solo pode ser empregado desde que o mesmo seja corrigido com a adição de materiais inertes como areia, pó de pedra e resíduos de minérios, na busca de se reduzir a proporção de argila (REDDY e GUPTA, 2005). De acordo com ABCP (2000), solos arenosos são mais econômicos à medida em que requerem menores quantidades de cimento. Entretanto, a argila não deve ser evitada, ao passo em que ela confere coesão à mistura, propriedade essencial para a devida desmoldagem e manuseio dos blocos.

Segundo a recomendação da NBR 10833: Fabricação de tijolo maciço e bloco vazado de solo-cimento com utilização de prensa hidráulica: procedimento (ABNT, 2012), as características apropriadas para o solo empregado na produção de BTC são as apresentadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Características recomendadas para o solo segundo ABNT (2012).

Característica	Valor
% passando na peneira 4,8 mm (ABNT)	100%
% passando na peneira 0,075 mm (ABNT)	10 a 50%
Limite de liquidez	≤ 45%
Índice de plasticidade	≤ 18%

Fonte: própria.

Classificação

Sob o ponto de vista da engenharia, classificar um solo significa estimar o seu provável comportamento. Um solo pode ser classificado de diversas maneiras, como pela sua origem, evolução, presença de matéria orgânica, estrutura e preenchimento dos vazios. A classificação do solo de acordo com sua granulometria leva em consideração a proporção de cada partícula sólida referente ao seu tamanho. Existem diversas convenções para os limites de tamanho destas partículas, sendo a mais frequente a escala granulométrica apresentada na Tabela 2.3 (PINTO, 2006).

Tabela 2.3 – Escala granulométrica usual dos solos.

Fração	Tamanho (mm)
Pedregulho	76 a 2,0
Areia grossa	2,0 a 0,42
Areia fina	0,42 a 0,075
Silte	0,075 a 0,005
Argila	< 0,005

Fonte: própria.

Existem diversos sistemas de classificação, sendo os mais conhecidos os que se baseiam no tipo e no comportamento dos grãos, relacionando a distribuição granulométrica e os índices de consistência do solo. Dentre os mais empregados universalmente está o sistema de Classificação Unificada, que considera como primeiro aspecto de classificação a porcentagem de finos (material que passa na peneira nº 200). Solos de granulação grosseira (pedregulhos e areias) são os que tem porcentagem de finos menor que 50%, enquanto que solos de granulação fina (siltes e argilas) maior que 50%. A curva granulométrica e os índices de consistência são então empregados secundariamente para indicar dados complementares do solo, identificando-o pelo conjunto de duas letras, indicadas na Figura 2.7 (PINTO, 2006).

Figura 2.7 – Terminologia do Sistema Unificado de classificação dos solos.

G	pedregulho
S	areia
M	silte
C	argila
O	solo orgânico
W	bem graduado
P	mal graduado
H	alta compressibilidade
L	baixa compressibilidade
Pt	turfas

Fonte: Pinto (2006).

Argila

Rigassi (1995) conceitua que a tensão superficial da água adsorvida na superfície da argila supera seu peso próprio devido à partícula ser tão pequena. Esse filme de forte adesão é o que atribui à argila sua resistência mecânica e a propriedade de ligar as micropartículas do solo. Na mistura, a argila confere coesão e une os agregados de maiores diâmetros, formando o esqueleto do solo.

Os argilo-minerais também apresentam capacidade de troca de cátions, isto é, cargas negativas em sua superfície livres para reagir com o meio quando em presença de água. Graças à sua estrutura iônica, a caulinita tem a menor capacidade de troca catiônica, seguida da illita. A montmorillonita é, portanto, a mais instável, variando mais intensamente em volume quando absorve água (GRANDE, 2003).

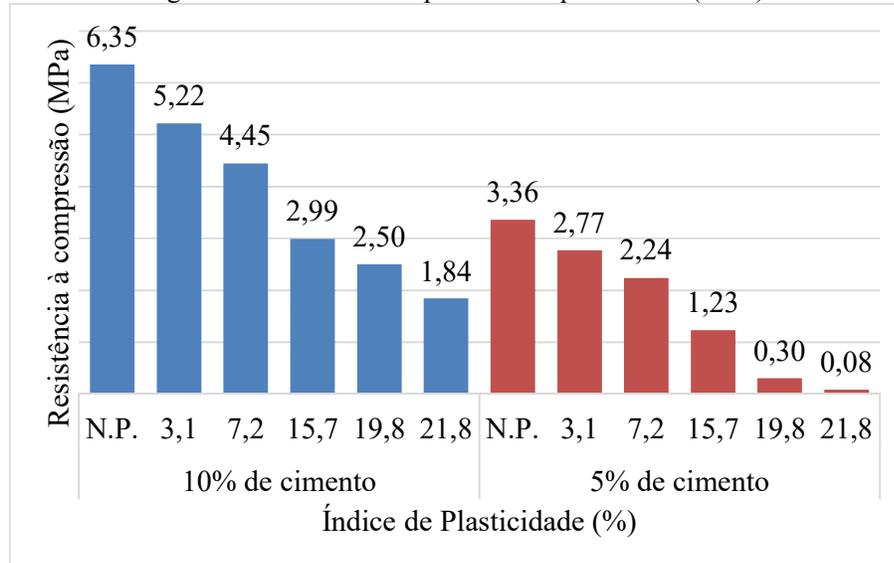
Reddy e Gupta (2005), indicam que solos contendo argilas pouco expansivas na presença de água, como é o caso da caulinita, são preferíveis para a produção de BTC. Por outro lado, a argila do tipo montmorillonita, por ser excessivamente expansiva, é menos indicada em comparação com a caulinita e a illita (BARBOSA et al, 1997 apud PINTO 2013).

Segundo Grande (2003), quando um solo que é misturado com cimento contém argila em excesso ou mesmo pequenas proporções de argilas muito instáveis, a pasta de cimento pode sofrer desagregações devido à excessiva expansão dos argilo-minerais. Reddy e Gupta (2005) comentam que BTC's produzidos com solo contendo altos teores de argila são mais suscetíveis à danos causados pela ação da chuva e apresentam pouca durabilidade.

Walker (1997) concluiu que o aumento no teor de argila no solo, representado pelo aumento no índice de plasticidade, prejudica o desempenho mecânico de BTC, pois o argilo-

mineral enfraquece a ligação entre a pasta de cimento e os agregados do solo. Os resultados apresentados pelo autor podem ser vistos na Figura 2.8.

Figura 2.8 – Resultados apresentados por Walker (1997).



Fonte: própria.

Estabilização

Segundo Rigassi (1995), a estabilização de um solo se dá quando suas propriedades são melhoradas modificando-se sua estrutura e/ou sua textura. Pode-se melhorar o desempenho mecânico quando se aumenta a força de ligação entre as partículas (aumento da resistência à compressão), reduzir expansão por molhagem e retração por secagem eliminando-se os vazios, e aumentar a resistência à abrasão e à água bloqueando-se os vazios que não podem ser eliminados.

Rigassi (1995) e Grande (2003) concordam que existem três processos de estabilização, os quais podem ser observados na produção de BTC:

- **Mecânica:** a estrutura do solo é modificada através da compressão, afetando densidade, resistência mecânica, compressibilidade, permeabilidade e porosidade.
- **Física:** modifica a textura pelo controle da mistura das frações de sólidos. Isso harmoniza a proporção entre os grãos, causando um melhor empacotamento (GRANDE, 2003).
- **Química:** “outros materiais são adicionados ao solo modificando suas propriedades ou por reação físico-química entre os grãos e o material, ou criando uma matriz que aglutina e cobre os grãos” (SILVA 2001, apud Grande 2003). Segundo Grande

(2003), os materiais mais utilizados para a estabilização química são: cimento Portland, cal, betume e fibras.

A compactação se dá pela expulsão dos vazios de ar existentes na estrutura de um solo, se utilizando normalmente de um processo mecânico. Com isso, por se tornar mais denso, o solo se configura mais homogêneo devido às partículas sólidas estarem mais próximas e com menos vazios entre si. A compactação é, portanto, uma busca pelo aumento da massa específica, o que traz melhorias em diversas propriedades e no desempenho do solo. A quantidade de água permanece constante, expulsando-se os vazios de ar (PINTO 2006).

De acordo com Milani (2005) apud Lima (2013): “Na estabilização do solo com cimento ocorrem reações de hidratação dos silicatos e aluminatos presentes no cimento, formando um gel que preenche parte dos vazios da massa e une os grãos adjacentes do solo, conferindo a ele resistência inicial [...]”. Grande (2003) complementa que os cátions cálcio advindos da hidratação do cimento se combinam com as cargas negativas livres nas superfícies dos argilo-minerais formando produtos hidratados estáveis. Com isso, o solo torna-se mais granular e a sensibilidade à variação de umidade e à variação volumétrica se tornam menores.

Por outro lado, Walker (1997) conceitua que embora o cimento tenha esse efeito na estabilização do argilo-mineral, a estrutura cimentícia coloidal formada não é tão forte quanto a ligação areia-pasta de cimento. Além disso, a estabilização química pelo cimento também pode ser limitada pelas agregações coesivas formadas durante a mistura úmida do solo.

2.1.3.2 Teor de cimento

A escolha do teor de cimento para a produção de BTC está condicionada ao atendimento de especificações normativas relacionadas às propriedades mecânica e de durabilidade do bloco. Um rigoroso processo de dosagem não garante, porém, um produto de boa qualidade, sendo de iguais importâncias o controle da umidade (no processo de mistura), da produção e da cura dos blocos (GRANDE, 2003).

Para se entender as recomendações normativas de dosagem devem ser observadas as especificações referentes à resistência à compressão e absorção de água. A NBR 10834: Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural: especificação (ABNT, 2012), apresenta as especificações para BTC sem função estrutural - Figura 2.9 **Error! Reference source not found.** Estes são os mesmo valores recomendados pela norma de tijolos estruturais - NBR 8491: Tijolo maciço de solo-cimento – Especificação (ABNT, 1984d).

Figura 2.9 – Especificações para BTC.

Valores-limite (aos 28 dias)	Média	Individual
Resistência à compressão (MPa)	$\geq 2,0$	$\geq 1,7$
Absorção de água (%)	≤ 20	≤ 22

Fonte: ABNT (1994).

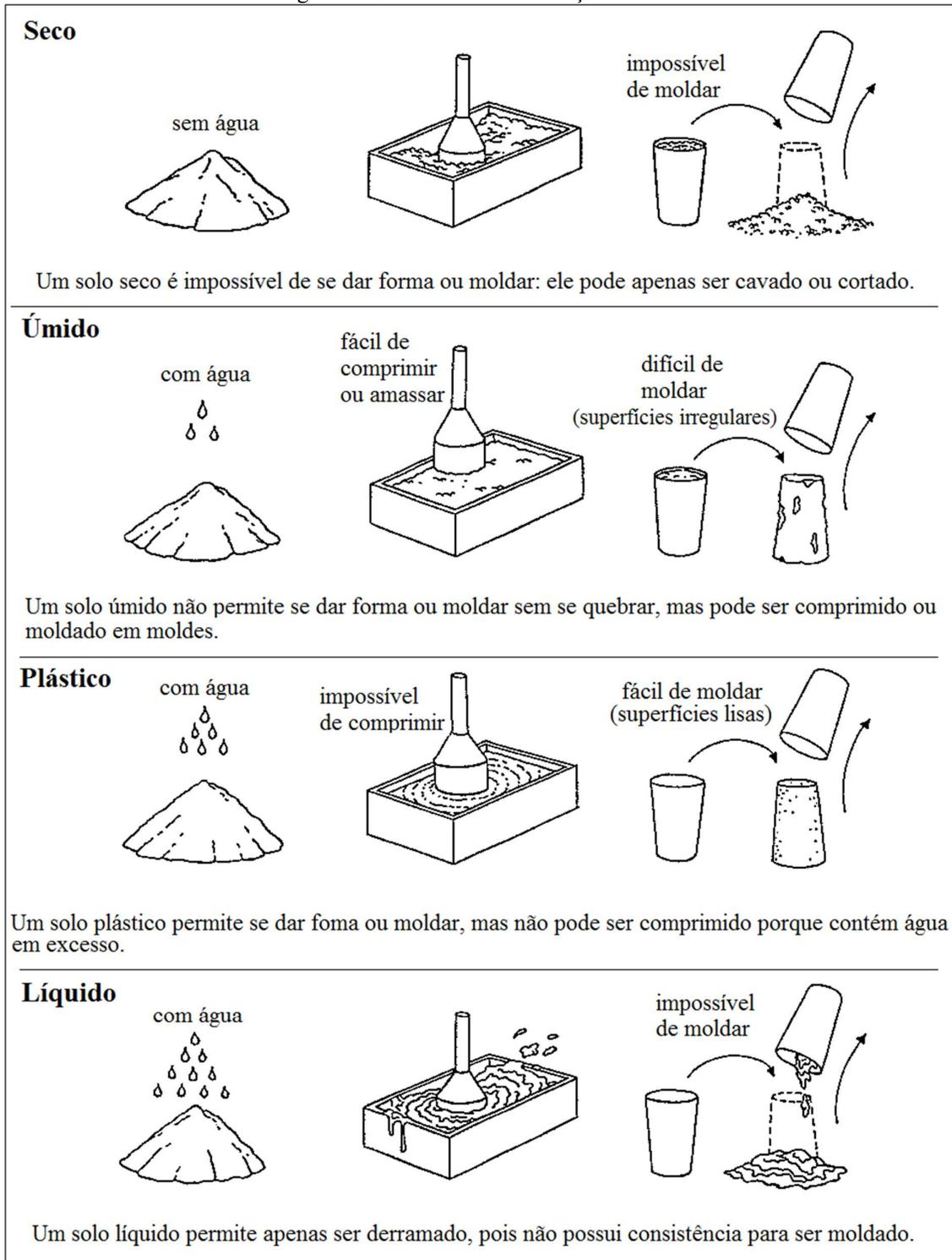
Para a dosagem, a NBR 10833 (ABNT, 2012) recomenda que sejam preparados três traços com diferentes teores de cimento e que seis blocos de cada traço sejam ensaiados à compressão e absorção de água (três para cada ensaio). Segundo a norma, deve-se escolher o traço mais econômico que atenda às especificações citadas acima. A ABCP (2000) sugere os traços em volume de 1:10, 1:12 e 1:14 (cimento:solo) para esse estudo preliminar.

Centros de pesquisa internacionais indicam que a eficácia da dosagem depende da textura e estrutura do solo a ser estabilizado. Alguns tipos de solos requerem apenas 3% em massa, enquanto que outros, com a mesma dosagem, se comportam melhor quando não estabilizados com cimento. Geralmente, um teor de pelo menos 6% é necessário para se obter resultados satisfatórios (CDI e CRATerre-EAG, 1998).

2.1.3.3 Umidade de compactação

A água, introduzindo forças mecânicas devido ao fenômeno da capilaridade e ativando as forças eletromagnéticas nos argilo-minerais, tem o poder de acentuar as reações e propriedades do solo. Dependendo da proporção relativa dos finos e da quantidade de água o solo irá se comportar de maneiras distintas, sendo que cada estado de hidratação (seco, úmido, plástico e líquido) possui uma aplicação apropriada. Rigassi (1995) conceitua que o melhor estado para a produção de BTC é o úmido, quando o solo não pode ser moldado manualmente sem se quebrar, mas permite sua correta compressão em moldes. A Figura 2.10 esquematiza essa ideia.

Figura 2.10 - Estados de hidratação do solo.



Fonte: Adaptado de Rigassi, (1995).

A maneira clássica de se determinar a umidade ótima de compactação de um solo se dá pelo ensaio de Proctor, de acordo com a NBR 7182:1986. De acordo com Pinto (2006), nesse

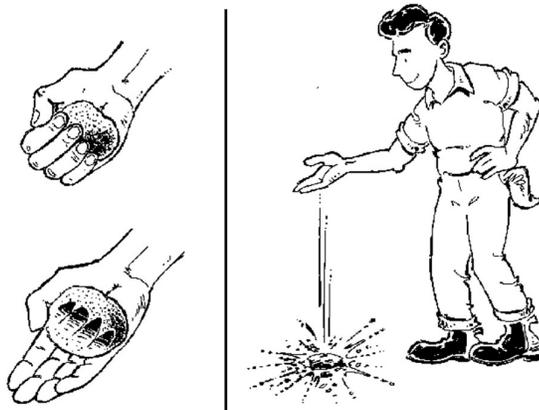
ensaio cada energia de compactação é empregada para uma aplicação específica do solo, mas todas podem ser denominadas compactações dinâmicas, as quais buscam representar a realidade da compactação de camadas do material, como por exemplo em obras de aterro e pavimentação.

Por outro lado, o processo de fabricação de blocos de terra compactada se utiliza de uma energia de compactação estática imprimida pela prensa. Portanto, a umidade ótima de compactação para BTC não é corretamente definida pelo ensaio de Proctor, pois o mesmo não representa a energia real aplicada ao solo nesse caso. Segundo Reddy e Gupta (2005), devido a essa diferença não é adequado se basear no ensaio Proctor na busca de se obter a massa específica seca máxima do BTC.

O ideal, portanto, seria a verificação da umidade adequada através da adição progressiva de água à mistura seca. Segundo a ABCP (2000), essa verificação pode ser feita de forma prática com razoável precisão, da seguinte forma:

- I. Toma-se um punhado da mistura e aperta-se energeticamente entre os dedos e a palma da mão; ao se abrir a mão, o bolo deverá ter a marca deixada pelos dedos.
- II. Deixando-se o bolo cair de uma altura aproximada de 1 m sobre uma superfície dura, ele deverá esfarelar-se ao chocar-se com a superfície; se isto não ocorrer, a mistura estará muito úmida.

Figura 2.11 - Teste prático de umidade ótima de solo para BTC.



Fonte: ABCP (2000).

2.1.3.4 *Fabricação e cura*

Conforme a ABCP (2000), quando o processo é totalmente manual, recomenda-se a fabricação de BTC de acordo com as seguintes etapas:

- I. Preparação do solo: o solo deve estar o mais seco possível, destorradado, e peneirado na peneira 4,8mm (ABNT);
- II. Preparação da mistura: a quantidade misturada deve permitir um funcionamento da prensa por no máximo 1 hora, seguindo os seguintes passos:
 - i. Espalha-se uma camada não superior a 20 cm de solo em superfície lisa e distribui-se o cimento sobre a camada. Com o uso de pás e enxadas, mistura-se até se obter uma coloração uniforme;
 - ii. Adiciona-se água gradualmente (quantidade previamente determinada), procedendo-se com a mistura;
- III. Fabricação dos blocos: a mistura é colocada no molde da prensa. Após a prensagem os blocos são retirados cuidadosamente e transportados para a área de cura.

O processo de cura deve ocorrer de forma lenta, com o intuito de garantir a adequada hidratação do cimento. Para isso, se utilizam de meios que previnam que a água da mistura evapore de forma rápida ou que reponha a parcela perdida naturalmente nos abrigos de cura. A ABCP (2000) recomenda que, quando abrigado em local coberto, a partir de seis horas após a moldagem, os blocos sejam umedecidos com regador provido de chuveiro por um período de 7 dias. No caso da inviabilidade dessa medida, deve-se cobrir os blocos com lona a fim de garantir a cura necessária.

Centros de pesquisa internacionais (CDI e CRA Terre-EAG, 1998) recomendam procedimento semelhante de fabricação. Quanto ao processo de cura, acrescentam que em ambientes quente cuidados devem ser tomados para se manter os blocos com alto grau de umidade relativa por pelo menos uma semana após a fabricação, enquanto que em ambientes frios deve-se buscar limitar a perda de calor. Segundo os autores, “no caso de estabilização com cimento, 14 dias de cura é absolutamente indispensável, e 28 dias é o recomendado” (p. 79).

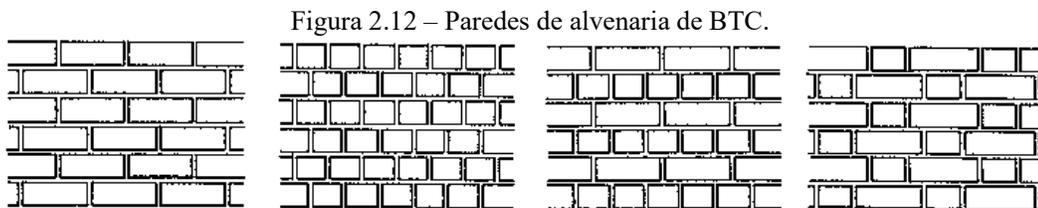
2.2 PAREDES DE ALVENARIA

Ramalho e Corrêa (2003) argumentam que embora uma norma seja voltada especificamente para certo tipo de alvenaria, não há nenhuma incoerência conceitual em estender sua aplicação para outros tipos de blocos ou materiais. A seguir apresentam-se os conceitos relacionados às paredes de alvenaria com base na literatura e nas normas de alvenaria de blocos tradicionais.

2.2.1 Generalidades

Segundo Guillaud (1995), quando blocos ou tijolos são assentados uns sobre os outros seguindo uma determinada ordem e unidos por argamassa, formam-se os elementos construtivos de boa resistência à compressão que compõem uma alvenaria, dentre eles: paredes, pilares, arcos e abóbadas. Richter (2007) define a parede de alvenaria como um elemento laminar vertical apoiado de modo contínuo em toda a sua base, com comprimento maior que cinco vezes sua espessura.

Em paredes, a maneira mais comum em que os blocos são superpostos é o padrão de fiadas alternadas traspassadas, o qual previne que as juntas verticais adjacentes se alinhem; isso dificulta a propagação de eventuais fissuras que venham a ocorrer na estrutura. Em alvenaria de BTC (Figura 2.12) a variedade no tamanho e forma dos blocos possibilita vários aspectos visuais, quando se opta pelo não uso de revestimento (GUILLAUD, 1995).



Fonte: Guillaud (1995).

Uma parede é dita de vedação quando seu papel se limita à proteger os ambientes internos da edificação contra a ação de intempéries e servir de suporte para os demais sistemas prediais, não possuindo função estrutural a não ser a de resistir ao seu peso próprio. Já a parede estrutural tem a função adicional de resistir aos carregamentos a ela impostos, verticalmente pelos pesos próprio e acidental da edificação. As paredes de contraventamento são as paredes estruturais projetadas para resistir às cargas horizontais impostas pelas ações do vento e do desaprumo, enquanto que as paredes estruturais enrijecedoras têm a função de enrijecer outras paredes contra a flambagem (RICHTER, 2007).

Os componentes são as entidades básicas que, quando combinadas, formam as paredes e os outros elementos de alvenaria, que são as partes suficientemente elaboradas da estrutura. De acordo com Ramalho e Corrêa (2003), os principais componentes da parede estrutural são:

- **Unidade:** componente básico da alvenaria estrutural, principal responsável pela resistência da estrutura. Quando maciça é denominada de tijolo, e quando vazada (área líquida menor que 75% da área bruta) é denominada bloco. Em relação ao

material componente, no Brasil, os tipos mais utilizados são, em ordem decrescente de utilização: unidades de concreto, unidades cerâmicas e unidades sílico-calcáreas;

- **Argamassa de assentamento:** proporciona a união das unidades em todas as direções e absorve pequenas deformações, permitindo que os esforços sejam transmitidos e uniformizados. Além disso, impermeabiliza a edificação contra as intempéries. Guillaud (1995) conceitua que a argamassa tradicional é a mistura de agregados com agentes ligantes (cimento e/ou cal); água é adicionada à mistura até que a mesma atinja um estado plástico, apresentando trabalhabilidade adequada à sua aplicação. Quando se trata de alvenaria de BTC, outros materiais são também empregados nesse componente. Segundo Ferreira e Júnior (2011), a argamassa de solo estabilizado com cimento pode apresentar maior trabalhabilidade graças à fração argilosa do solo. Colas à base de PVA (Acetato de Polivinila) ou PVAc (Polímero sintético) também são empregadas no assentamento de alvenaria de BTC, apresentando bom desempenho e facilidade de aplicação graças à regularidade das superfícies dos blocos;
- **Graute:** usado no preenchimento dos vazios de blocos. Proporciona o aumento da área da seção transversal das unidades e, no caso da presença de armadura, promove a solidarização desta com os blocos. Além disso, aumenta a capacidade portante à compressão da alvenaria. Consiste de um concreto de agregados de pequenas dimensões, mais fluido que o concreto convencional;
- **Armadura:** barras de aço semelhantes às usadas em concreto armado. Formando um conjunto que trabalha monoliticamente com o graute e as unidades, tem a função de combater as tensões de tração que a alvenaria por si só não teria condições de resistir.

Na alvenaria de vedação, como não há função estrutural, os componentes básicos são apenas as unidades (diferindo em forma e tamanho), e a argamassa de assentamento. De acordo com Richter (2007), a alvenaria estrutural pode ser subdividida segundo a função das armaduras empregadas, em:

- **Alvenaria estrutural não armada:** quando a finalidade da armadura é apenas construtiva, com a função de evitar fissurações em pontos de concentração de tensões. Neste caso, as armaduras não são consideradas na absorção dos esforços;
- **Alvenaria estrutural armada:** além de armaduras construtivas, também são empregadas armaduras com a função de absorver esforços calculados, as quais são colocadas nos vazados dos blocos, devidamente envolvidas por graute;

- *Alvenaria estrutural parcialmente armada*: quando parte das paredes recebem armadura para absorver esforços calculados e parte é considerada não armada;
- *Alvenaria estrutural protendida*: quando é empregada armadura pré-tensionada, que submete a alvenaria à esforços de compressão.

2.2.2 Resistência à compressão

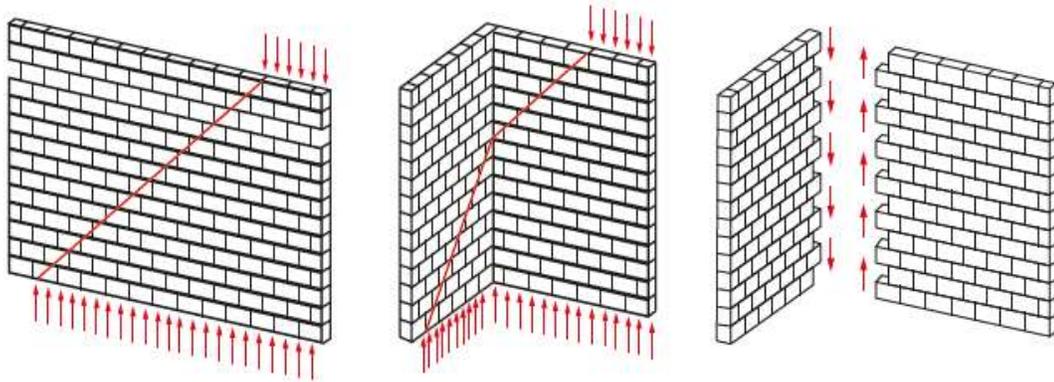
Quando se deseja utilizar alvenaria na concepção de um sistema estrutural, o comportamento crucial desejado é a transmissão das ações sobre os elementos através de tensões de compressão. Pequenas tensões de tração são aceitáveis em pontos isolados da estrutura. Caso contrário, se estas forem generalizadas ou de grande magnitudes, a estrutura pode até ser tecnicamente viável, mas dificilmente será atrativa economicamente (RAMALHO e CORRÊA, 2003).

A alvenaria tem seu comportamento dependente das interações físico-químicas entre seus componentes, os quais são materiais distintos, que demandam boa qualidade. Os esforços solicitantes que a parede deve resistir durante sua vida útil são de compressão, tração, flexão e cisalhamento. Devido ao carregamento vertical ser muito mais intenso que o horizontal, a resistência à compressão se mostra a propriedade mecânica mais importante a ser analisada. Além disso, por ser um material frágil, a resistência à tração da parede é precária, devendo-se minimizar ao máximo tal tensão em projeto (RICHTER, 2007).

Assis (2008) corrobora essa ideia quando aponta que a resistência à compressão de um elemento de alvenaria é a principal propriedade a ser analisada na busca de se conhecer sua qualidade para fins estruturais e de durabilidade. O autor complementa que a simples constatação de elevada resistência à compressão é um indicativo de que a parede apresentará bom desempenho, ao passo que baixos valores sugerem que os componentes são pouco resistentes e pouco duráveis.

Os ensaios de resistência à compressão em paredes consistem na aplicação de carregamento vertical uniformemente distribuído. No entanto, a realidade é que os carregamentos de compressão ocorrem de maneira não uniforme (AZEREDO et al, 2016). De acordo com Ramalho e Corrêa (2003), quando estes estão localizados apenas sobre um trecho de paredes contínuas, os esforços tendem a se espalhar ao longo da altura da alvenaria segundo um ângulo de 45°. Como mostra a Figura 2.13, em paredes de canto, esse efeito é também observado quando há uma devida interação entre as alvenarias, que são executadas com blocos traspassados, o que implica em tensões de cisalhamento ao longo da aresta do encontro.

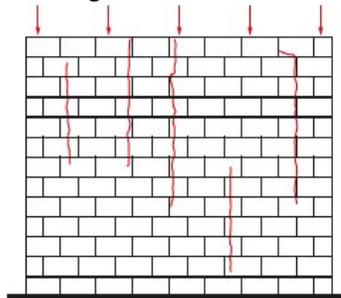
Figura 2.13 – Espalhamento de carregamento de compressão em alvenaria.



Fonte: Ramalho e Corrêa (2003).

Quando submetida à carregamento excessivo uniformemente distribuído, a deformação da argamassa de assentamento e a fissuração dos blocos por flexão local provocam um estado de fissuração em trechos contínuos e verticais da parede, de acordo com a Figura 2.14 (BAUER, 2007 apud AZEREDO et al, 2016).

Figura 2.14 – Fissuras por carregamento excessivo de compressão em alvenaria.



Fonte: Bauer (2007) apud Azeredo et al (2016).

2.2.3 Influência dos componentes na resistência à compressão da alvenaria

Richter (2007) afirma que certos fatores que influenciam na resistência à compressão da alvenaria vão além do controle de qualidade dos materiais empregados. A técnica construtiva e a qualidade da mão-de-obra tem grande influência: procedimentos construtivos inadequados (como ritmo de construção acelerado) e falta de treinamento (como o preenchimento inadequado das juntas) podem trazer prejuízos ao desenvolvimento dos serviços na obra. Outro fator é a concepção dos elementos da alvenaria na fase de projeto, como, por exemplo, a taxa de esbeltez, a excentricidade do carregamento, dentre outros. Do ponto de vista dos componentes, a seguir são discutidos os fatores que influenciam na resistência à compressão da alvenaria não armada, objeto deste estudo.

2.2.3.1 Blocos

Segundo Ramalho e Corrêa (2003), dentre os componentes, o bloco se mostra como fator dominante na resistência à compressão da alvenaria. Sua influência pode ser observada ao se analisar o conceito da “eficiência parede-bloco”, que relaciona a resistência da parede e a resistência do bloco - Equação (2.1). No geral, quanto maior a resistência do bloco, maior a da parede, porém menor será a eficiência. Segundo os autores, para alvenaria não-grauteada e argamassas convencionais, valores típicos de eficiência parede-bloco para blocos de concreto variam entre 0,40 e 0,60, enquanto que para blocos cerâmicos variam entre 0,20 e 0,50, quando a resistência do bloco for entre 4,5 e 20 MPa.

$$\eta = \frac{f_{\text{par}}}{f_b} \quad (2.1)$$

Em que,

η : eficiência parede-bloco;

f_{par} : resistência da parede;

f_b : resistência do bloco.

A resistência à compressão da parede também é influenciada pela relação altura do bloco/ espessura da junta. Em geral, quanto maior essa relação, maior a resistência. Outro fator é a heterogeneidade nas dimensões dos blocos, o que pode ocasionar juntas de concentração de tensões, as quais podem levar à ruptura da parede. Além disso, blocos com superfícies irregulares ou com fissuras também favorecem essas juntas (RICHTER, 2007).

2.2.3.2 Argamassa de assentamento

De acordo com Sinha (1983) apud Ferreira e Júnior (2011), a resistência às solicitações horizontais (flexão e cisalhamento) em paredes de alvenaria estão fortemente relacionadas com as propriedades mecânicas da argamassa. No entanto, Thomaz (1989) afirma que quando se trata da resistência à compressão, as propriedades da argamassa mostram pouca influência (FERREIRA e JÚNIOR, 2011).

Ramalho e Corrêa (2003) apontam que a influência da argamassa na resistência à compressão das paredes está relacionada a dois aspectos: a espessura da junta de assentamento e a resistência à compressão do material. Os autores destacam que:

- Se a espessura da junta for muito pequena e ocorra falha na execução, os blocos podem se tocar, prejudicando a resistência da parede devido à concentração de tensões. Por outro lado, se a espessura da junta é aumentada, há uma diminuição da

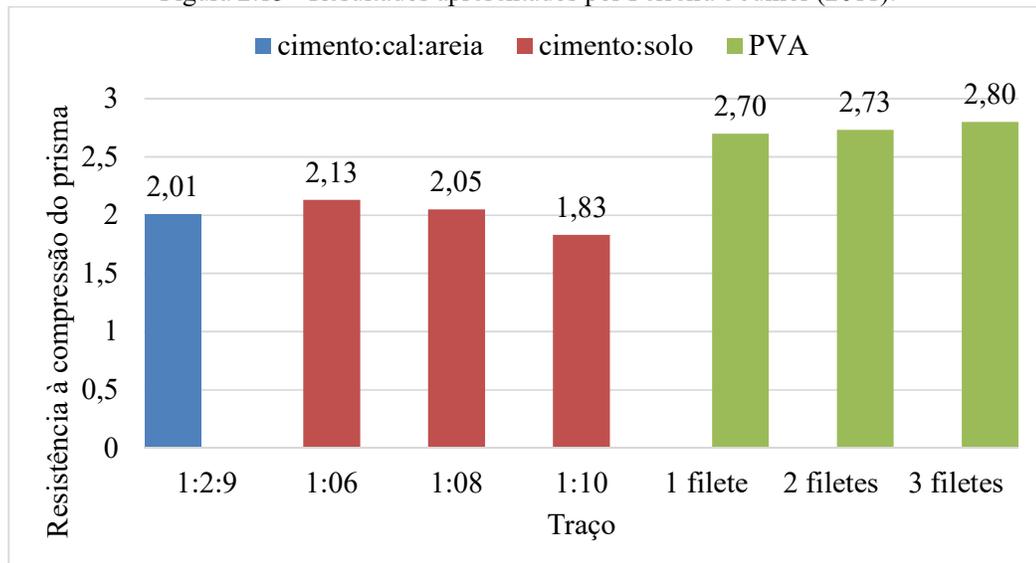
resistência da parede, pois isso diminui o confinamento da argamassa, o que a torna mais suscetível à ruptura;

- Segundo Sahlin (1971) apud Camacho (1995), a cada aumento de 0,3 cm na espessura da argamassa há uma redução de 15% na resistência à compressão da parede;
- Desde que a resistência à compressão da argamassa não seja inferior à 30 a 40% da resistência do bloco, a argamassa tem pouca influência na resistência à compressão da parede. Argamassa exageradamente resistente pode até mesmo reduzir a resistência da parede;
- Segundo Gomes (1983) e BS 5628, para blocos da ordem de 7,0 MPa, aumentando a resistência da argamassa em 135% e 255%, verificou-se acréscimo de resistência para as paredes de apenas 11,5% e 6%, respectivamente.

Ainda, quando a resistência à compressão da argamassa é maior que a da unidade, eventuais fissuras que venham a ocorrer acabam atingindo primeiramente os blocos, prejudicando a resistência da parede. Existe uma resistência ótima de argamassa de acordo com a resistência do bloco. Por isso o aumento na resistência da parede não é proporcional ao aumento na resistência da argamassa (RICHTER, 2007).

Ferreira e Júnior (2011) compararam a resistência à compressão de prismas de 4 tijolos (de solo-cimento) em função da variação do tipo de argamassa de assentamento empregado. Os autores verificaram um ganho em resistência quando filetes de PVA foram utilizados e à medida que o número de filetes foi aumentado, como pode ser visto na Figura 2.15.

Figura 2.15 - Resultados apresentados por Ferreira e Júnior (2011).



Fonte: própria.

2.2.4 Avaliação das resistências à compressão

2.2.4.1 Blocos

Devido aos vazados dos blocos, a tensão analisada pode ser referida tanto à área bruta, como se fosse uma unidade maciça, quanto à área líquida, descontando-se a área dos vazios. Para ser considerada alvenaria estrutural (considerando aplicação de revestimento), as respectivas normas indicam que a resistência à compressão mínima da unidade deve ser superior à 4,5 MPa para blocos de concreto e 4 MPa para blocos cerâmicos, referidas à área bruta (RAMALHO E CORRÊA, 2003).

Para o ensaio de resistência à compressão em BTC, a norma recomenda o preparo da unidade cortando-o ao meio e unindo as duas metades sobrepostas com pasta de cimento. Antes do ensaio, os corpos-de-prova devem ser imersos em água por 24h. Em seguida, são submetidos à uma carga de compressão axial uniforme à razão de 500 N/s (ABNT, 1984d).

Valores mínimos de resistência à compressão são comumente especificados para ensaios em blocos saturados em água, embora algumas literaturas recomendam testes sob condições secas. Walker (1997) conceitua que a saturação do bloco tipicamente reduz sua resistência à compressão em 40 a 50%, podendo chegar a 95% para certos teores de argila e cimento. Segundo o autor, essa perda em resistência pode estar associada com a tensão da água nos poros do material e a liquefação de argila não estabilizada. Por não haver uma relação direta entre os testes, não é seguro inferir o desempenho do bloco em condições saturadas se baseando em testes sob condições secas. Por outro lado, isto pode induzir no rejeite de lotes de blocos perfeitamente adequados para uso em ambientes livres de umidade.

De acordo com Rigassi (1995) a resistência à compressão do BTC é extremamente dependente do teor de cimento empregado, sendo necessário pelo menos de 5 a 6% para se obter resultados satisfatórios. Além da composição, Araújo (2003) apud Lima (2013) aponta outros fatores que influenciam nos resultados de ensaios mecânicos em BTC: condições de cura, forma de aplicação da carga (ensaio estático ou dinâmico), duração do carregamento, idade do componente, estado de tensões, formas e dimensões.

A capacidade de absorção de água está intimamente ligada à resistência mecânica do bloco, pois quanto maior for sua resistência à compressão, maior será o empacotamento das partículas e, conseqüentemente, menor será o volume de vazios por onde a água pode infiltrar. Com isso, um bloco mais resistente e, conseqüentemente, mais denso, tende a ser mais durável, pois dificulta a deterioração por penetração de água. Segundo Pinto (2013), a passagem de água

por entre os poros do BTC tem uma ação solvente, provocando a dissolução de solo não estabilizado e de partículas livres advindas da hidratação do cimento, o que enfraquece o bloco.

2.2.4.2 Argamassa

Segundo as normas NBR 15812-1 (ABNT, 2010a) e NBR 15961-1 (ABNT, 2011a), a resistência à compressão da argamassa de assentamento deve ter seu valor máximo limitado a 70% da resistência característica do bloco em relação à sua área líquida. Apenas a norma referente à alvenaria de blocos cerâmicos especifica um valor mínimo, de 1,5 MPa. O método de ensaio recomendado, segundo a NBR 13279 (ABNT, 2005), consiste na aplicação de carga de compressão axial em moldes prismáticos com seção transversal de 4 x 4 cm², a uma velocidade de 500 ± 50 N/s.

Ramalho e Corrêa (2003) citam o estudo de Gomes (1983), o qual recomenda que a resistência à compressão da argamassa deva apresentar valores da ordem de 70 a 100% da resistência dos blocos na alvenaria estrutural. Ainda, os autores apontam que dificilmente a resistência da parede terá uma queda significativa quando a resistência da argamassa for em torno de 50% da resistência dos blocos.

2.2.4.3 Paredes

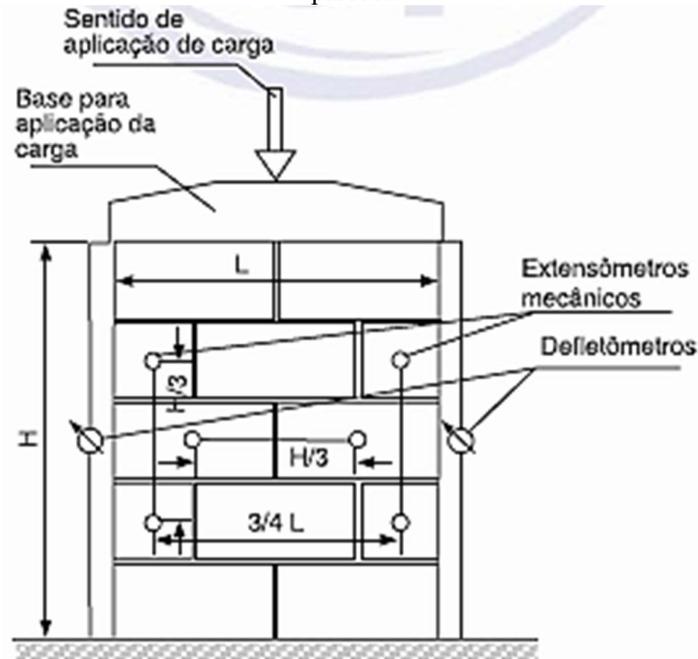
Quando um certo número de blocos, normalmente dois ou três, são superpostos e unidos por argamassa formam-se os prismas, os quais são elementos utilizados em ensaios de compressão axial. É importante que os mesmos sejam executados com as mesmas condições encontradas em obra (mão-de-obra e materiais) a fim de se obter resultados representativos da realidade (RAMALHO E CORRÊA, 2003).

Segundo as normas NBR 15812-1 (ABNT, 2010a) e NBR 15961-1 (ABNT, 2011a), para as alvenarias estruturais de blocos convencionais a resistência característica à compressão pode ser determinada com base no ensaio de paredes, segundo NBR 8949:1985, ou estimada como 70% da resistência de prismas de parede ou 85% da resistência de pequenas paredes (painéis reduzidos).

As pequenas paredes devem ter um comprimento (L) equivalente à pelo menos dois blocos e uma altura (H) equivalente a cinco vezes a espessura do bloco e não inferior à 70 cm. Extensômetros mecânicos ou alternativamente defletômetros (transdutores de deslocamento) podem ser usados na determinação do módulo de deformação, como mostra a Figura 2.16.

Recomenda-se que a tensão aplicada em relação à área bruta se eleve progressivamente à razão de no máximo $0,05 \pm 0,01$ MPa/s (ABNT, 2010b e ABNT 2011b).

Figura 2.16 – Esquema para o ensaio de determinação da resistência à compressão de pequenas paredes.

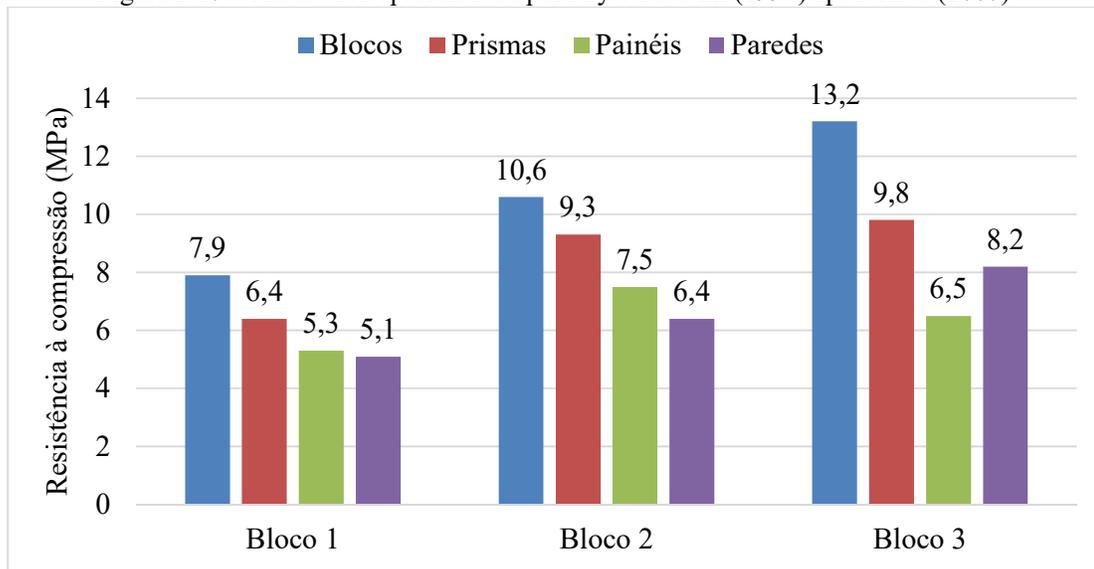


Fonte: ABNT (2011b).

É importante frisar que os ensaios à compressão realizados em laboratório não representam fielmente as reais situações de carregamento às quais a parede de alvenaria é submetida, não resultando, portanto, no seu verdadeiro valor de resistência. Isso ocorre devido o estado de tensão do ensaio ser modificado pelos efeitos da forma, esbelteza e condições de restrição ocasionadas pelos contatos entre as superfícies do corpo-de-prova e do dispositivo de prensagem (ASSIS, 2008).

O estudo de Aly e Sabatini (1994), citado por Silva (2007), analisou a resistência à compressão de quatro tipos de corpo-de-prova (a unidade, prismas de três blocos, painéis de 80 x 80 cm e paredes) confeccionados com três classes de bloco de concreto (B1, B2 e B3) – Figura 2.17.

Figura 2.17 – Resultados apresentados por Aly e Sabatini (1994) apud Silva (2007).



Fonte: adaptado de Aly e Sabatini (1994).

Observa-se que nos ensaios com prismas a resistência à compressão é sempre maior do que em ensaios com painéis, devido à influência do confinamento. Segundo Silva (2007), o aumento das juntas no corpo-de-prova diminui a resistência, o que torna os resultados obtidos por painéis de alvenaria mais próximos da realidade da estrutura.

2.3 ESTUDOS SOBRE ALVENARIA DE BTC

2.3.1 Propriedades do BTC

Empregando um solo de comportamento argiloso, com 37,3% de argila, 9,2% de silte e 53,5% de areia, Lima (2013) estudou BTC's produzidos com umidade em torno da umidade ótima de compactação. A autora atribuiu o baixo valor de resistência à compressão encontrado (inferior ao mínimo recomendado pela NBR 10834 (ABNT, 2012) ao método de ensaio escolhido (saturado), o que prejudicou o desempenho dos componentes, como comentado no item 2.2.4.1. Observou-se uma grande influência da umidade de compactação no desempenho dos blocos em ensaios de resistência. A absorção de água média dos blocos foi satisfatória à especificação da NBR 10834 (ABNT, 2012), que recomenda valores inferiores à 20%.

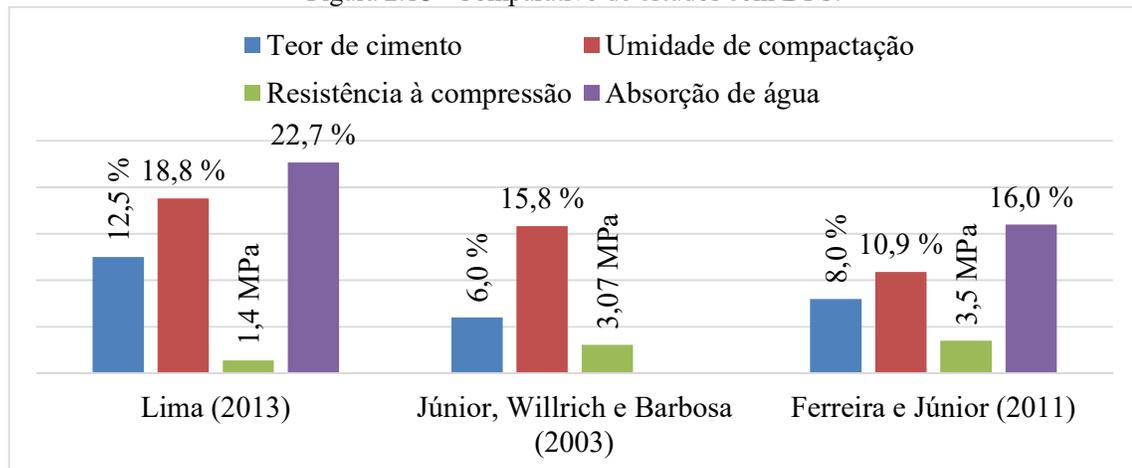
Júnior, Willrich e Barbosa (2003), utilizaram areia para correção de solo argiloso (obtendo 28% de argila, 8,1% de silte e 63,7% de areia) empregado na fabricação de BTC. Os autores observaram uma diminuição na resistência dos blocos quando comparados com corpos-de-prova cilíndricos (10x20cm), os quais apresentaram 4,8 MPa de resistência à compressão. Essa diminuição foi atribuída ao fato de a energia de compactação do corpo-de-prova cilíndrico

(dinâmica, em camadas) ser diferente da compressão do bloco (estática). Não foram apresentados resultados de absorção de água dos blocos.

Ferreira e Júnior (2011) confeccionaram BTC's com satisfatórios valores de resistência à compressão aos 28 dias. O solo (classificado como argilosilte arenoso) continha 20% de argila, 20% de silte e 60% de areia, apresentando umidade ótima de compactação de 10,9% (quando misturado com cimento). A absorção de água média dos blocos foi satisfatória quanto à recomendação da NBR 10834 (ABNT, 2012).

A Figura 2.18 apresenta o comparativo desses três estudos. Nota-se que, para solos de granulometrias e comportamento semelhantes, o teor de umidade de compactação tem grande influência na resistência à compressão do BTC. Observa-se também que maiores teores de cimento não garantem boa resistência, a qual pode estar condicionada à influência do tipo e proporção da argila no desempenho do bloco. Nota-se que a absorção de água se relaciona com a resistência à compressão do bloco, visto que quanto mais resistente, mais denso será o bloco e menor será a quantidade de poros por onde a água pode se infiltrar.

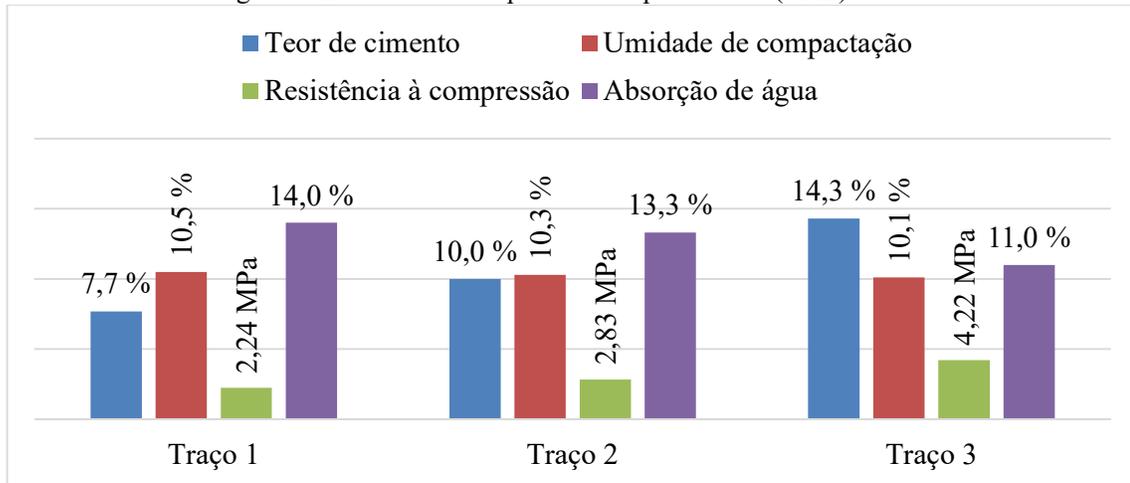
Figura 2.18 - Comparativo de estudos com BTC.



Fonte: própria.

Grande (2003) estudou BTC's estabilizados com diferentes teores de cimento, com satisfatórios valores de resistência à compressão aos 28 dias. O solo era arenoso e continha 10% de argila, apresentando umidade ótima de compactação em função do teor de cimento. A absorção de água média dos blocos aos 28 dias foi satisfatória para todos os traços. A Figura 2.19 representa o comparativo dos resultados apresentados pelo autor.

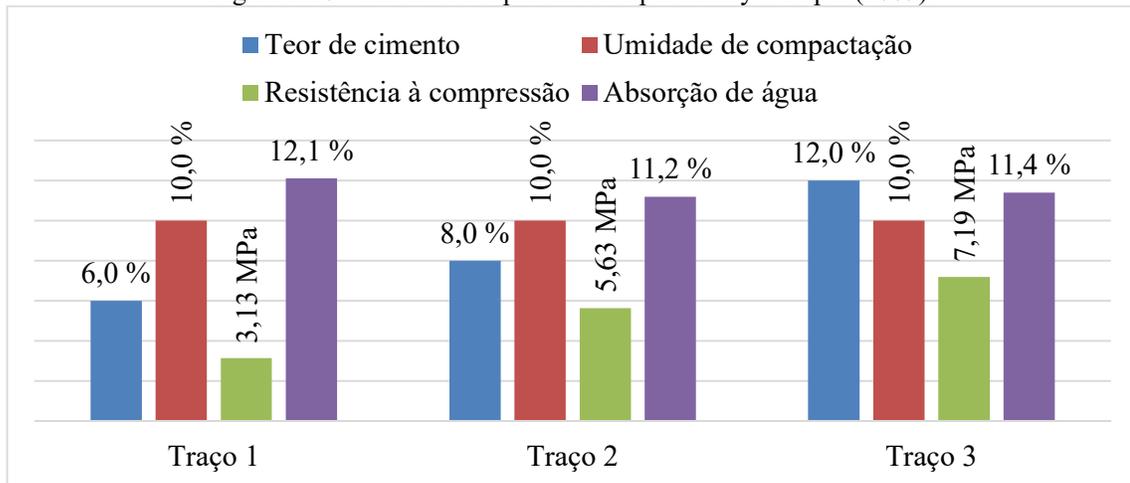
Figura 2.19 – Resultados apresentados por Grande (2003) - BTC.



Fonte: própria.

O estudo de Reddy e Gupta (2005) analisou um solo corrigido com pó de pedra, apresentando 9% de argila, 17,7% de silte e 73,3% de areia - Figura 2.20. Os autores concluíram que a resistência à compressão do BTC é altamente dependente do teor de cimento empregado e diretamente proporcional. A umidade de compactação foi mantida constante (~10%) para todos os traços estudados. Os blocos apresentaram satisfatórios valores de absorção de água segundo a NBR 10834 (ABNT, 2012).

Figura 2.20 – Resultados apresentados por Reddy e Gupta (2005).



Fonte: própria.

2.3.2 Resistência à compressão de paredes

Grande (2003) comparou valores de resistência à compressão de paredes (alvenaria de BTC não grauteada e não armada) e prismas em relação à resistência dos blocos (BTC vazado estabilizado com 14,3% de cimento). Os resultados são apresentados na Figura 2.21.

Figura 2.21 – Resultados apresentados por Grande (2003).

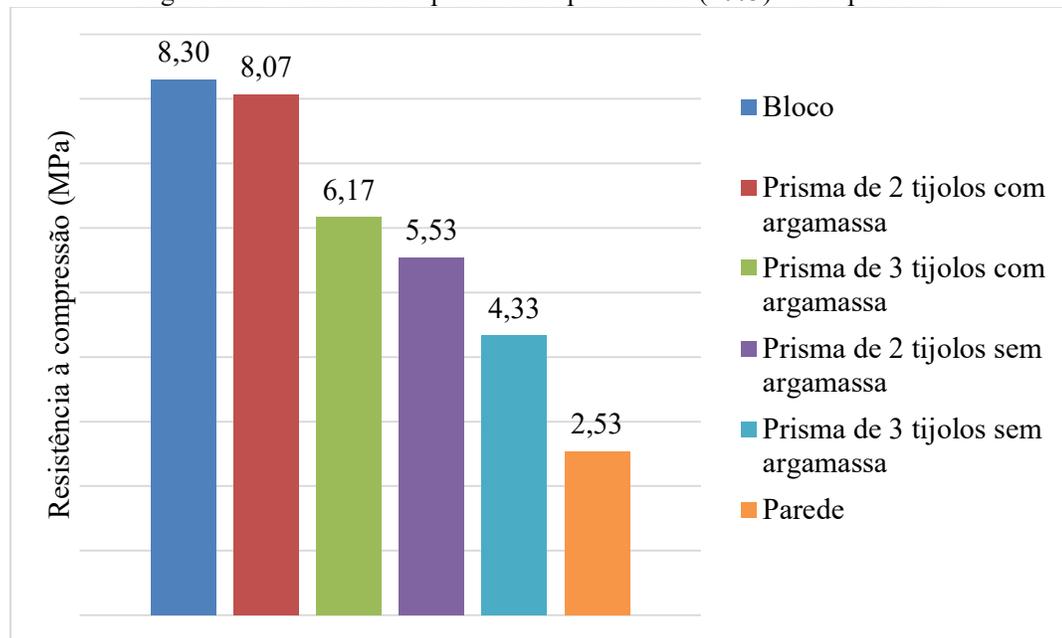
TIJOLOS f_{b119m} (MPa) (ref.)	PAREDE	TENSÃO						f_{pm} (MPa) PRISMAS ASSENTADOS A SECO			
		PAREDE		PRISMAS ASSENTADOS COM ARGAMASSA				2 tijolos		3 tijolos	
		f_{pa} (MPa)		2 tijolos		3 tijolos		2 tijolos		3 tijolos	
		f_{pa}	f_{pa}/f_{bm}	f_{pm}	f_{pm}/f_{bm}	f_{pm}	f_{pm}/f_{bm}	f_{pm}	f_{pm}/f_{bm}	f_{pm}	f_{pm}/f_{bm}
8,3	1	1,9	0,23	8,0	0,96	6,0	0,72	5,6	0,67	4,2	0,51
	2	2,7	0,33	7,2	0,87	6,2	0,74	5,6	0,67	4,5	0,54
	3	3,0	0,36	7,9	0,95	6,3	0,76	5,4	0,65	4,3	0,52

Calculou-se a eficiência da parede e dos prismas em comparação a resistência à compressão do tijolo (referência): $e = f / f_{b119m}$

Fonte: Grande (2003).

As médias dos valores de resistência podem ser vistas na Figura 2.22.

Figura 2.22 – Resultados apresentados por Grande (2003) - Comparativo.

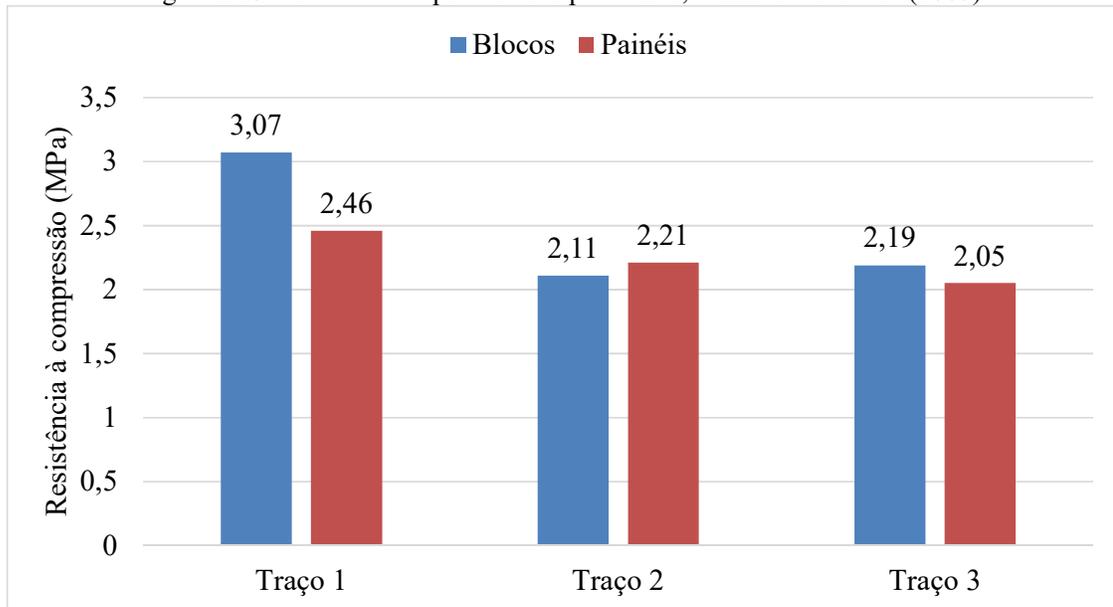


Fonte: própria.

O autor comprovou que o efeito do confinamento na prensa causado pela relação altura/espessura do corpo-de-prova interfere na interpretação do resultado de resistência de prismas. Por isso, o melhor método de determinação da capacidade portante da alvenaria de BTC é através do ensaio de resistência à compressão de paredes. Além disso, observa-se que a resistência da parede é altamente influenciada pela existência de argamassa de assentamento, a qual confere melhor distribuição dos esforços de compressão. A eficiência parede-bloco média observada foi de 0,31.

Júnior, Willrich e Barbosa (2003), analisaram a resistência à compressão de painéis de alvenaria (95 x 75 cm²) de BTC's vazados de diferente composições, incorporando resíduo cerâmico moído - Figura 2.23. Três traços foram analisados: um traço com 6% de cimento Portland em massa e os outros com 35% e 55% de resíduo em substituição ao cimento.

Figura 2.23 – Resultados apresentados por Júnior, Willrich e Barbosa (2003).



Fonte: própria.

Observa-se que as eficiências painel-bloco para os traços foram, respectivamente, 0,80, 1,05 e 0,94, sendo a média igual a 0,93.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Tomando como base os conceitos e estudos apresentados na revisão bibliográfica, pretende-se neste capítulo apresentar os materiais e os métodos utilizados para:

- Caracterizar a terra e o tipo de argila empregados;
- Produzir, experimentar e avaliar a resistência à compressão simples e absorção de água de blocos de terra compactada; e
- Produzir, experimentar e avaliar a resistência à compressão simples de painéis reduzidos de alvenaria de BTC não armada e não grauteada e da argamassa de assentamento empregada.

3.1 ORIGEM DOS MATERIAIS

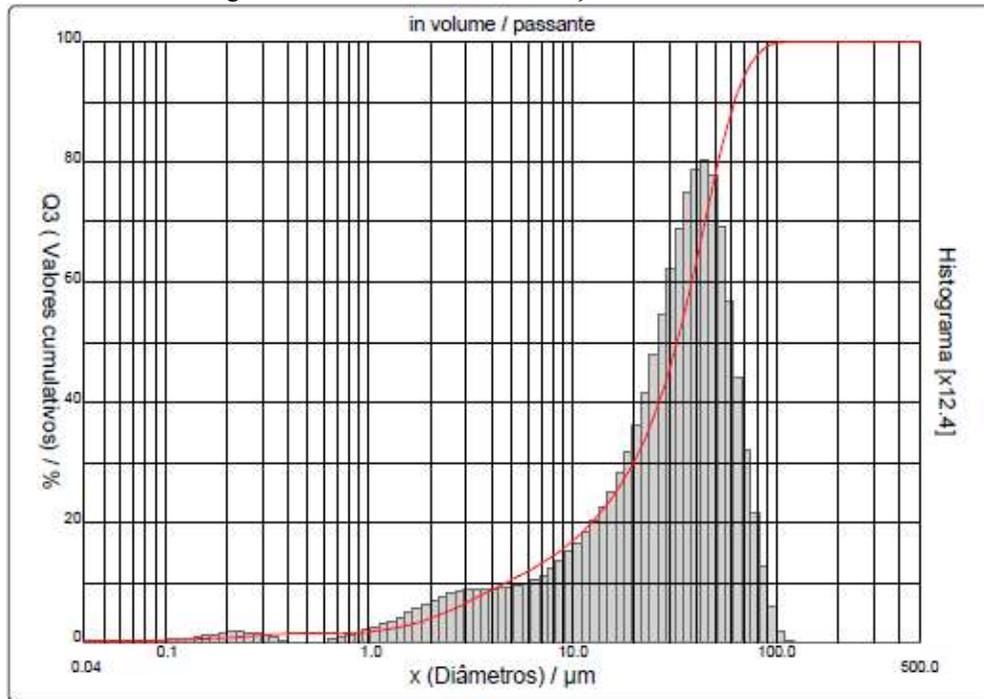
O cimento Portland empregado na estabilização dos blocos foi do tipo CP II-Z-32. O solo e o cimento utilizados foram adquiridos em estabelecimentos comerciais locais do ramo da construção civil. O solo foi armazenado ao ar livre e o cimento estocado em abrigo fechado livre de umidade. Em todo o experimento foi utilizada água potável tratada da rede pública de abastecimento local.

3.2 TERRA

3.2.1 Granulometria e limites de consistência

A análise granulométrica por peneiramento foi realizada com o objetivo de se determinar a curva de distribuição da fração grossa do solo (76 a 0,075 mm) de acordo com os tamanhos dos grãos, segundo NBR 7181 (ABNT, 1984c). Para a fração de finos (< 0,075 mm) foi utilizada a técnica de granulometria por difração de laser - Figura 3.1.

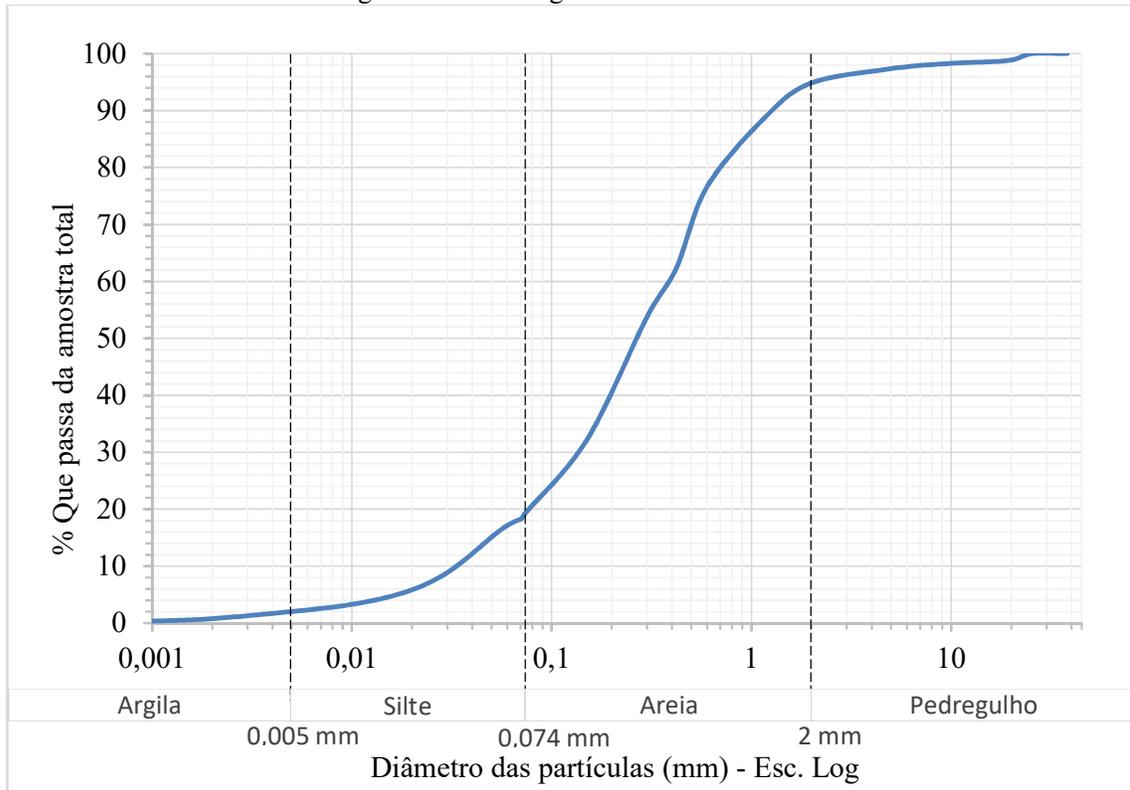
Figura 3.1 – Granulometria da fração de finos do solo.



Fonte: própria.

Com isso, formou-se a curva de distribuição granulométrica do solo, apresentada na Figura 3.2, indicando que o solo continha 5,15% de pedregulho, 75,49% de areia, 17,33% de silte e 2,03% de argila.

Figura 3.2 – Curva granulométrica do solo.



Fonte: própria.

Para a caracterização quanto aos índices representativos da plasticidade, realizou-se a determinação do limite de plasticidade, segundo NBR 7180 (ABNT, 1984b) e do limite de liquidez, segundo NBR 6459 (ABNT, 1984a). Foram obtidos os seguintes resultados: 18,62% para o limite de plasticidade, 28,64% para o limite de liquidez e, pela subtração $LL - LP$, 10,02% para o índice de plasticidade.

De acordo com a NBR 10833 (ABNT, 2012), o solo adequado para a produção de BTC é arenoso, e deve apresentar:

- 100% dos grãos menores que 4,8 mm;
- Entre 10 e 50% dos grãos menores que 0,075 mm (peneira nº200);
- Limite de liquidez $\leq 45\%$; e
- Índice de plasticidade $\leq 18\%$.

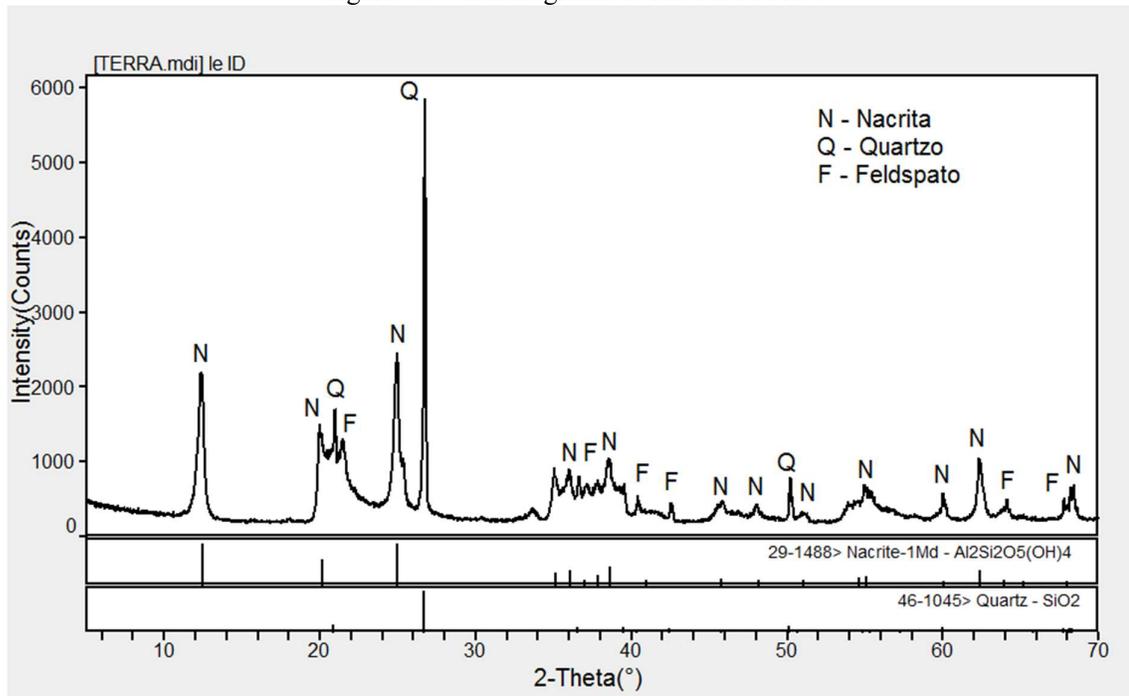
Assim sendo, o solo utilizado apresentou valores satisfatórios de acordo com a referida norma, quanto à classificação, concentração de finos e os índices de consistência. O tamanho máximo dos grãos também foi atendido, pois o solo foi peneirado na peneira 4,8 mm no preparo para a produção do BTC, como recomendado no item 2.1.3.4.

A porcentagem de finos do solo foi menor que 50% (igual a 19,36%) e a predominância da fração grossa foi de areia. Com isso, classificou-se, então, o solo pelo Sistema Unificado como do tipo SC (areia argilosa).

3.2.2 Argila

Para o solo utilizado, foram realizados os ensaios de Difratomia de Raios-X (DRX) e Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX) na fração de finos para a identificação dos minerais presentes. O DRX indicou a presença de quartzo, feldspato e do argilo-mineral nacrita - Figura 3.3. Este argilo mineral, um polimorfo da caulinita, apresenta mesma composição química ($\text{Al}^2\text{Si}^2\text{O}^5(\text{OH})^4$) desta, diferindo apenas na estrutura das camadas. Também observou-se a presença de material amorfo nas proximidades dos ângulos de 8, 16 e 30°. O FRX mostrou a predominância de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 - Tabela 3.1.

Figura 3.3 – Difratoograma de raios-x do solo.



Fonte: própria.

Tabela 3.1 - Composição química do solo.

Composto	Valor
SiO ₂	62,27 %
Al ₂ O ₃	23,97 %
Fe ₂ O ₃	9,96 %
TiO ₂	3,13 %
ZrO ₂	0,21 %
SO ₃	0,12 %
P ₂ O ₅	0,09 %
K ₂ O	0,08 %
CaO	0,05 %
Cr ₂ O ₃	0,05 %
SrO	0,02 %
MnO	0,02 %
NiO	0,01 %
ZnO	0,01 %
Ga ₂ O ₃	0,01 %
NbO	0,01 %

Fonte: própria.

3.3 BLOCOS

3.3.1 Preparo da terra

O solo foi levado para local coberto e deixado secar ao ar livre a fim de se remover o excesso de umidade, até que se atingisse um valor próximo à umidade higroscópica. Em seguida, o mesmo foi peneirado na peneira 4,8 mm e armazenado.

3.3.2 Estudo preliminar da umidade de compactação

Optou-se por fixar o teor de cimento na proporção de 12% em massa. Realizou-se uma mistura manual do solo com o cimento a fim de se determinar a umidade necessária para obter uma a mistura adequada à produção de BTC, como abordado na seção 2.1.3.2. Para uma amostra de 10 kg de solo (suficiente para a confecção de três blocos), decidiu-se testar primeiramente a umidade de 10%, o que resultou numa mistura muito úmida, de consistência plástica, impossibilitando a moldagem. Numa segunda tentativa, foi-se adicionando água gradativamente até a obtenção de uma mistura úmida, com umidade ótima para BTC, definindo-se o valor de 6% em massa para a produção dos blocos.

3.3.3 Produção e cura

Os BTC's foram produzidos no Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas (LABEME) da UFPB. Utilizou-se uma prensa hidráulica da marca Eco Máquinas, modelo Eco Brava (Figura 3.4), para a produção de um bloco por prensagem. Segundo o fabricante, o bloco é prensado com uma força de compactação equivalente a 6 toneladas. A capacidade de produção deste modelo é de até 1600 unidades diárias, para um turno de oito horas sem interrupções.

Figura 3.4 – Prensa utilizada para fabricação dos blocos.



Fonte: própria.

As dimensões do bloco (Figura 3.5) são de 12,5 x 25 x 7,5 cm (largura x comprimento x altura), sendo ele vazado, com furos de 6 cm de diâmetro e anéis de encaixes, que permitem a amarração direta entre componentes na execução da alvenaria. De acordo com o fabricante, o rendimento é de 54 unidades/m², sendo esse tipo de bloco indicado para edificações em geral.

Figura 3.5 – BTC produzido.



Fonte: própria.

Os BTC's foram produzidos segundo procedimento recomendado pela ABCP (2000), descrito na seção 2.1.3.4. Traços de 100 kg de solo, 12 kg de cimento e 6 kg de água foram misturados por um servente de pedreiro experiente (Figura 3.6). Após a primeira mistura, constatou-se que o teor de umidade necessário para a obtenção de boa qualidade dos blocos seria inferior ao teor de umidade ótima de compactação verificada no estudo preliminar. A fim de diminuir a quebra dos blocos optou-se por alterar a quantidade de água da mistura, na ordem de 1,5% a menos.

Figura 3.6 – Preparo da mistura para BTC.



Fonte: própria.

Após a prensagem, os blocos foram transportados e empilhados 3 a 3 sobre piso liso no entorno da prensa, forrado com plástico (Figura 3.7). Logo após a estocagem, os blocos foram mantidos cobertos com plástico para o processo de cura, por 14 dias. O local de estocagem era coberto, mas permitia a incidência de luz solar sobre os blocos em alguns períodos do dia. Foram produzidas em torno de 270 unidades para este trabalho.

Figura 3.7 – Prensagem e estocagem dos BTC's.



Fonte: própria.

3.3.4 Ensaio

3.3.4.1 Resistência à compressão

Do total de blocos produzidos, seis unidades foram retiradas para o ensaio de resistência à compressão simples, aos 82 dias de idade. Os corpos-de-prova foram serrados ao meio e unidos com a mesma argamassa de assentamento dos painéis de alvenaria, descrita adiante. As protuberâncias dos encaixes na face superior foram removidas e ambas as faces foram regularizadas com pasta de cimento.

O ensaio foi realizado para os blocos na condição seca. A célula de carga utilizada tinha capacidade de 500 kN. A aplicação da carga axial foi controlada manualmente a uma velocidade máxima de aproximadamente de 0,5 kN/s. Utilizou-se de um transdutor elétrico de deslocamento para a medida da deflexão axial durante o carregamento - Figura 3.8. Os valores de carga e deslocamento foram coletados por um “data logger”, modelo 2890-9 da Almemo.

Figura 3.8 – Ensaio de compressão axial nos blocos.



Fonte: própria.

Os valores individuais de resistência à compressão de cada bloco foram obtidos para a área líquida, considerando o acréscimo do peso extra exercido pelos pratos superiores.

3.3.4.2 Absorção de água

Outras seis unidades foram retiradas para realização de ensaio de absorção de água aos 82 dias de idade, segundo NBR 8492 (ABNT, 1984e). Os blocos foram identificados e colocados em estufa a uma temperatura de 110°C até a constância das massas, quando foram pesados para a obtenção da massa seca. Em seguida os blocos foram imersos em tanque com água à temperatura ambiente durante 24 h. Após retirar da imersão, antes de decorridos 3 minutos, foram pesados novamente, obtendo-se a massa saturada.

Os valores individuais de absorção de cada bloco, expresso em porcentagem, foram obtidos segundo a Equação (3.1).

$$A = \left(\frac{M_2 - M_1}{M_1} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

Onde,

A = absorção de água (%);

M₁ = massa do bloco seco (g);

M₂ = massa do bloco saturado (g).

3.4 ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO

Optou-se por utilizar argamassa de assentamento produzida com o mesmo solo utilizado para a fabricação dos blocos, estabilizado com 8% de cimento em massa. O solo e o cimento foram pesados e misturados manualmente. A água foi adicionada pelo profissional encarregado da confecção dos painéis até que a mistura adquirisse consistência fluida.

Parte da argamassa foi separada para confecção de seis corpos-de-prova cilíndricos 5x10 cm (diâmetro x altura) para cada painel de alvenaria, totalizando 18 corpos-de-prova. Os mesmos foram desmoldados após 24 horas e curados em ambiente fechado até a data do ensaio.

Buscou-se aferir a resistência à compressão das argamassas nas respectivas idades dos ensaios com os painéis (47 dias). Para o ensaio, utilizou-se de uma prensa operada manualmente para a leitura da carga última suportada por cada corpo-de-prova, a qual foi atingida pela aplicação de um carregamento à uma taxa da ordem de 5 kg/s – Figura 3.9.

Figura 3.9 – Ensaio de resistência à compressão para argamassa de assentamento.



Fonte: própria.

3.5 PAINÉIS REDUZIDOS DE ALVENARIA

3.5.1 Produção

Os painéis de alvenaria estudados eram compostos por 16 fiadas alternadas traspassadas de 5 blocos cada, com meio-blocos nas extremidades das fiadas alternadas. Três painéis, com dimensões médias de 126 x 128 x 12,5 cm (altura x largura x espessura) cada, foram produzidos por um profissional experiente.

Os blocos foram submersos em água por poucos segundos antes do assentamento a fim de se evitar uma absorção excessiva da umidade da argamassa. As primeiras fiadas foram assentadas sobre bases de madeira, com superfície regularizada com argamassa de cimento e areia. As demais fiadas foram assentadas com a argamassa de terra descrita anteriormente, espalhada nas faces de assentamento horizontal e vertical de cada bloco com espessura de aproximadamente 1 cm. Por fim, as faces superiores dos painéis foram capeadas com argamassa de cimento e areia. O assentamento de um painel pode ser visto na Figura 3.10.

Figura 3.10 – Produção dos painéis de alvenaria.



Fonte: própria.

3.5.2 Ensaio de resistência à compressão

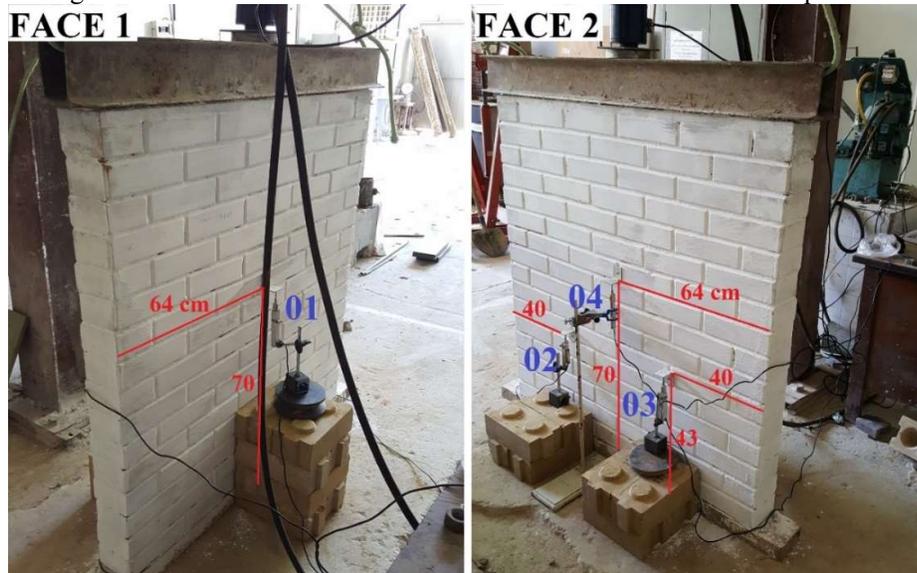
Os painéis foram pintados a fim de facilitar a visualização das fissuras. O ensaio de resistência à compressão ocorreu em um pórtico estrutural, o qual possuía apenas um ponto de aplicação de carga. Os painéis estavam na idade de 47 dias, sendo os blocos com 85 dias de idade.

Foram instalados 4 transdutores elétricos de deslocamento para a medida do encurtamento, dispostos no quadrado central delimitado pelos terços centrais de altura e comprimento - Figura 3.11. Utilizou-se de um perfil metálico de modo a aplicar o carregamento

de forma distribuída. A célula de carga utilizada tinha capacidade de 1000 kN. Os valores de carga e deslocamento foram coletados por um “data logger”, modelo 2890-9 da Almemo.

O carregamento foi aplicado manualmente à uma taxa da ordem de 0,50 kN/s, sendo pausado quando do surgimento de novas fissuras para marcação das mesmas e das respectivas cargas associadas. Os transdutores foram retirados quando a quantidade de fissuras indicava que a ruína estava próxima a fim de se evitar danos aos mesmos, já que os painéis eram constituídos de materiais frágeis. Em seguida o carregamento prosseguiu até a ruptura dos painéis.

Figura 3.11 – Posicionamento dos transdutores de deslocamento nos painéis.



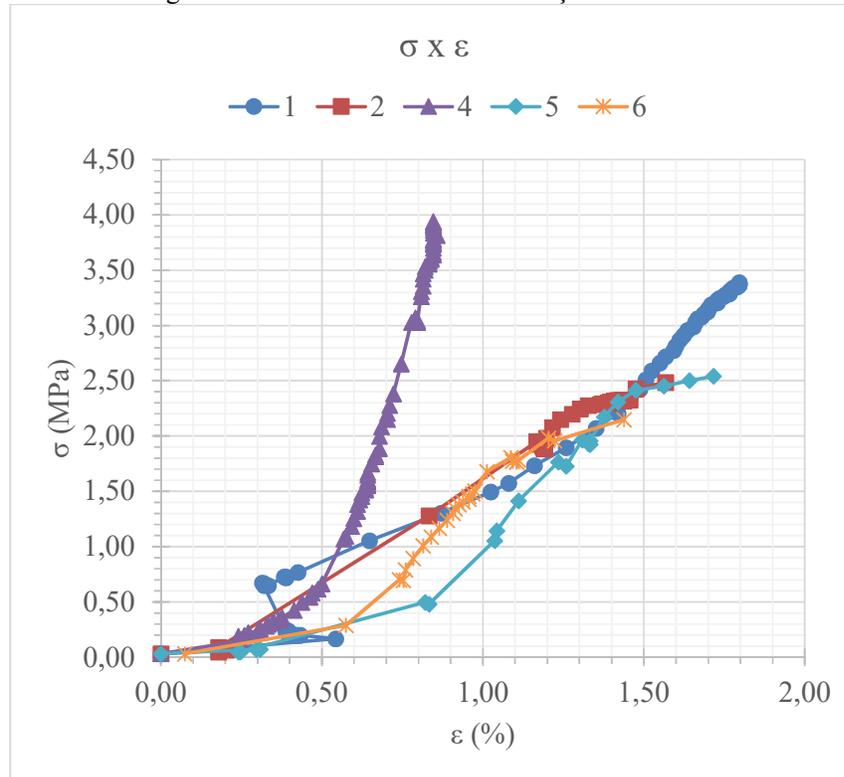
Fonte: própria.

4 RESULTADOS

4.1 BLOCOS

As curvas tensão x deformação dos corpos-de-prova são apresentadas na ¹Figura 4.1.

Figura 4.1 – Curvas tensão x deformação dos blocos.



Fonte: própria.

Observa-se que o CP 4 apresentou módulo de elasticidade bem diferente dos demais. Não foi identificada alguma anormalidade em termos de ensaio que pudesse explicar esse fato. Como esperado, os corpos-de-prova se comportaram de forma semelhante ao ensaio, apresentando fissuras verticais ao longo da altura e destacamento de alguma faces quando do rompimento dos mesmos – Figura 4.2.

¹O resultado do corpo-de-prova 3 se apresentou muito diferente dos demais e não pôde ser considerado como representativo. Por falha na operação da prensa não foi possível o controle da velocidade de aplicação de carga, o que acarretou no rompimento precoce do bloco.

Figura 4.2 – Blocos rompidos à compressão.



Fonte: própria.

Para os cinco resultados aproveitados, obteve-se a média de resistência à compressão dos blocos (f_b) mostrada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Resistência à compressão dos blocos.

CP	Carga de ruptura (kN)	f_b (MPa)
1	42,42	3,39
2	31,12	2,49
4	49,32	3,78
5	31,82	2,54
6	26,92	2,15
Média	36,32	2,87

Fonte: própria.

Os resultados do ensaio de absorção de água são mostrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Absorção de água dos blocos.

CP	Absorção de água (%)
1	15,45
2	15,76
3	17,70
4	17,69
5	15,27
6	18,18
Média	16,68

Fonte: própria.

Observando os estudos citados no item 2.3.1, percebe-se uma grande diferença dos resultados obtidos por Reddy e Gupta (2005). Os autores também empregaram 12% de cimento Portland para a estabilização de solo contendo maior teor de argila (9%, com LL = 44,6% e IP = 23,9) e obtiveram resistência à compressão de 7,19 MPa (2,5 vezes maior) e absorção de água

de 11,4%. Isso pode ser explicado pela diferença no processo de cura dos blocos, os quais foram umedecidos diariamente por 28 dias e ainda deixados curar em ambiente fechado por mais 30 dias. Vale salientar ainda que Reddy e Gupta (2005) optaram por realizar o ensaio em blocos saturados, o que torna essa disparidade ainda maior, como discutido no item 2.2.4.1.

Grande (2003) ainda obteve resultados semelhantes de resistência (também para blocos saturados) e absorção de água (2,83 MPa e 13,3%). O autor empregou menor teor de cimento (10%) para 10% de argila e mesmo processo de cura úmida utilizado por Reddy e Gupta (2005).

4.2 ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO

A resistência à compressão média da argamassa (f_a) empregada em cada painel é mostrada na ¹Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Resistência à compressão da argamassa de assentamento.

Painel 1		Painel 2		Painel 3	
CP	f_{a1} (MPa)	CP	f_{a2} (MPa)	CP	f_{a3} (MPa)
1	0,26	1	0,44	1	0,38
2	0,27	2	0,36	2	0,29
3	0,23	3	0,37	3	0,34
4	0,26	4	0,42	4	0,29
-	-	5	0,32	5	0,35
-	-	6	0,36	6	0,26
Média	0,26	Média	0,38	Média	0,32
f_{a1}/f_b	0,090	f_{a2}/f_b	0,132	f_{a3}/f_b	0,112

Fonte: própria.

Onde:

f_b : resistência à compressão média dos blocos;

f_a : resistência à compressão média da argamassa de assentamento do painel.

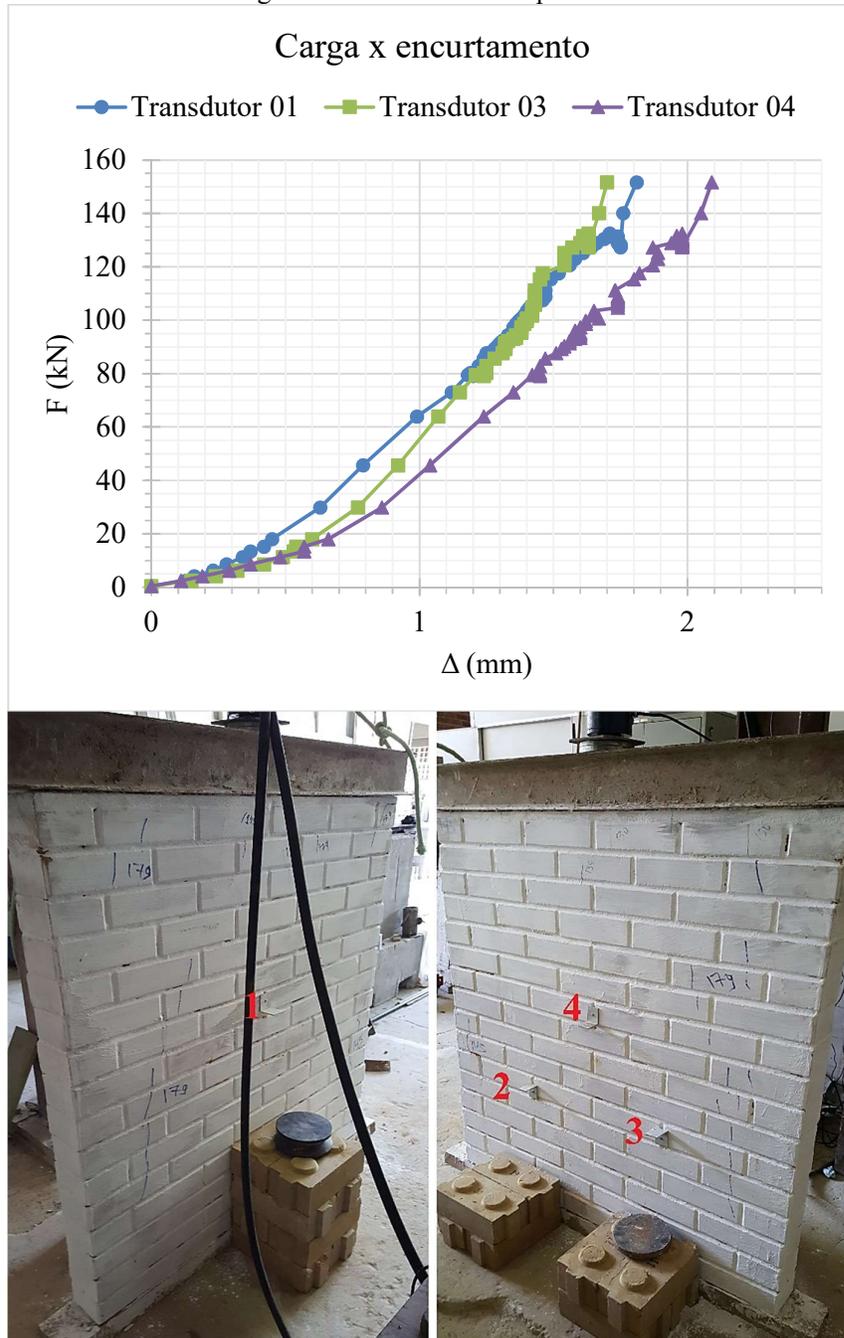
Observa-se que a resistência média da argamassa se apresentou muito baixa, na ordem de 11% da resistência à compressão do bloco, o que pode ter influenciado negativamente na resistência dos painéis, como discutido nos itens 2.2.3.2 e 2.2.4.2. Estes baixos valores de resistência podem ser explicados pela falta de controle do fator água/cimento do traço, o que prejudicou a estabilização da terra.

¹Dos seis corpos-de-prova confeccionados para a argamassa de assentamento do Painel 1, dois foram perdidos por falha na desmoldagem.

4.3 PAINÉIS

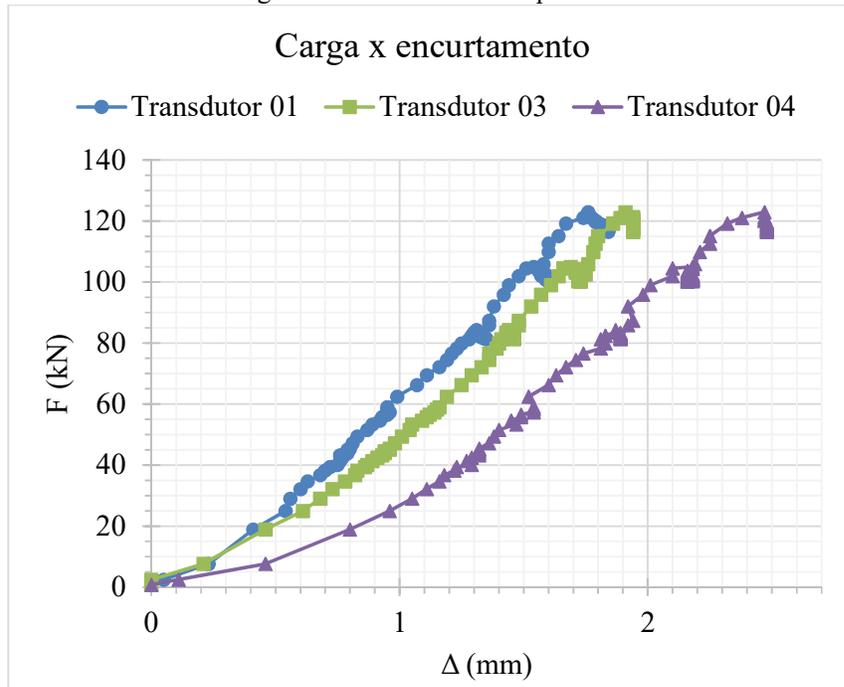
As curvas carga x encurtamento e a propagação das fissuras dos painéis são mostradas nas figuras a seguir. Os valores de leitura de deslocamento do transdutor 02 não puderam ser aproveitados por falha no equipamento.

Figura 4.3 – Resultados do painel 1.



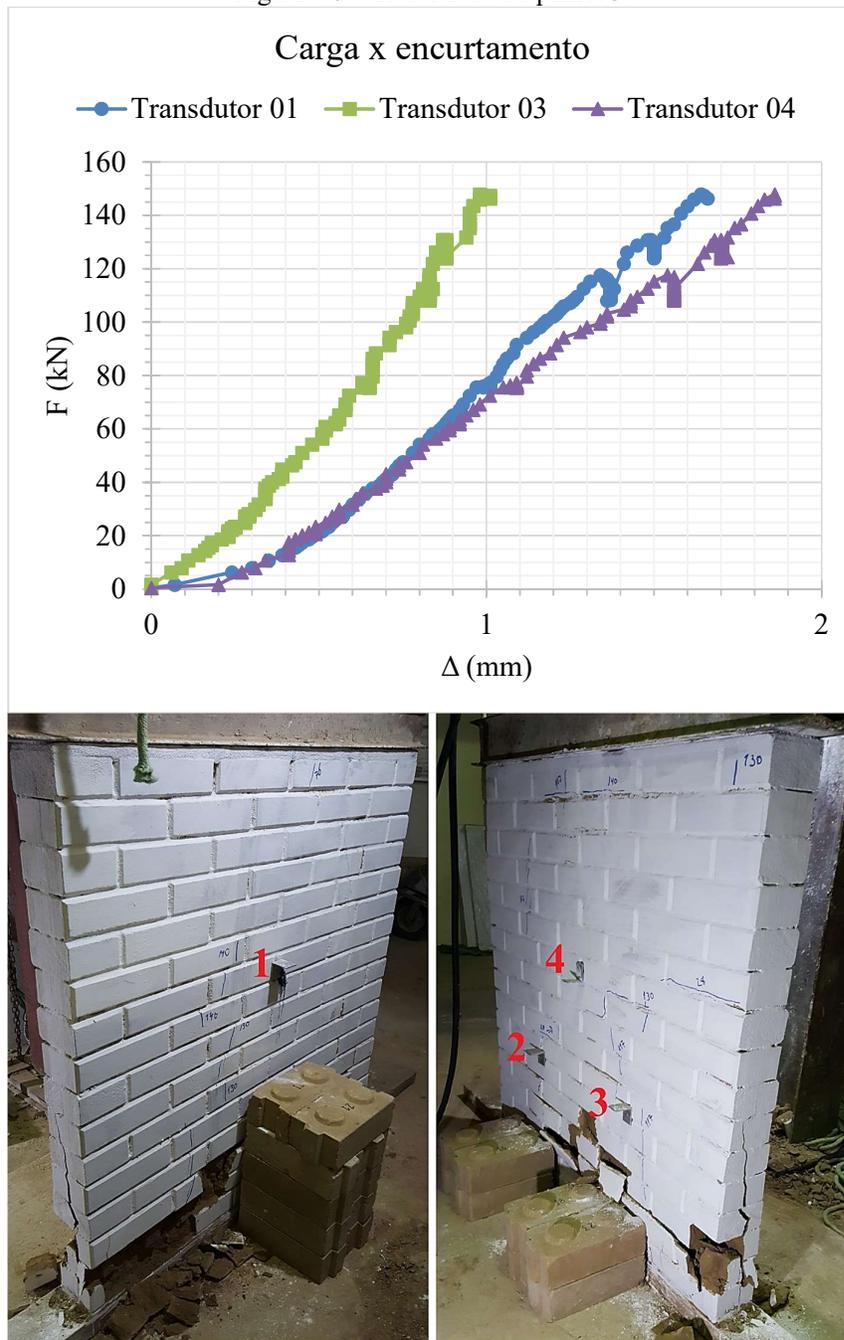
Fonte: própria.

Figura 4.4 – Resultados do painel 2.



Fonte: própria.

Figura 4.5 – Resultados do painel 3.



Fonte: própria.

Conforme esperado, nos painéis 1 e 3 observou-se que o transdutor 03 se encurtou menos que 01 e 04, pois o mesmo se encontrava mais afastado da linha de carregamento, ou seja, à uma menor altura da base. Segundo Azeredo et al (2016), os transdutores mais altos recebem de forma mais imediata o efeito do carregamento, o que leva a maiores encurtamentos. Para o painel 2 observou-se comportamento contrário, que pode ser explicado por uma possível

excentricidade do ponto de aplicação da carga. O maior encurtamento do lado do transdutor 03 é evidenciado pelo esmagamento acentuado dos blocos próximos ao mesmo.

Os momentos de aparecimento da primeira fissura e da retirada dos transdutores em função da carga aplicada para cada painel são mostrados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Momento das primeiras fissuras nos painéis.

Painel	Carga (kN)	
	1 ^a fissura	Retirada dos transdutores
1	130	152
2	83	116
3	76	146

Fonte: própria.

As fissuras em trechos contínuos e verticais foram observadas, como previsto no item 2.2.2. O rompimento dos painéis foi causado pelo esmagamento dos blocos, o que pode ser explicado pela natureza frágil de seus materiais. A partir das cargas máximas suportadas determinou-se a resistência à compressão de cada painel (f_p), apresentadas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Resistência à compressão dos painéis.

Painel	Carga de ruptura (kN)	f_p (MPa)
1	202,9	1,27
2	192,3	1,21
3	228,7	1,43
	Média	1,30

Fonte: própria.

A resistência média dos painéis foi de 1,30 MPa. Como discutido no item 2.2.4.3, segundo NBR 15812-1 (ABNT, 2010a) e NBR 15961-1 (ABNT, 2011a) a resistência à compressão das paredes de alvenaria pode ser estimada como 85% da resistência de pequenas paredes, como as que foram aqui estudadas. A resistência média da parede de alvenaria de BTC equivalente para este estudo pôde então ser aproximada por 1,11 MPa.

Confrontando os resultados com os apresentados no item 2.3.2, observa-se valores de resistência bem inferiores aos apresentados pelos autores. Aproximadamente 42% do valor apresentado por Júnior, Willrich e Barbosa (2003) para painéis foi atingindo (entretanto, tais painéis eram menores). Para paredes, estima-se 44% do resultado médio apresentado por Grande (2003).

5 CONCLUSÕES

Conclui-se que a resistência média dos painéis estudados foi igual a 1,30 MPa. A eficiência painel-bloco foi então determinada, sendo igual a 0,45 e a eficiência parede-bloco pôde ser estimada em 0,39. Considerando que quanto maior a resistência do bloco, menor a eficiência, a eficiência parede-bloco aqui estimada apresentou valor abaixo do típico esperado para alvenaria de blocos de concreto, que variam de 0,40 a 0,60 para blocos de 4,5 a 20 MPa, como abordado no item 2.2.3.1.

A partir dos resultados médios obtidos foi possível também concluir que os blocos apresentaram resultados satisfatórios às especificações da NBR 10834 (ABNT, 2012) referentes à resistência à compressão e absorção de água, sendo, respectivamente, maior que 2,0 MPa e menor que 20%.

Sugere-se para trabalhos futuros o estudo da influência do emprego de graute, com ou sem armaduras, no comportamento estrutural dos painéis aqui estudados, bem como a influência da adoção de diferentes teores de cimento para a estabilização dos blocos e da argamassa. Ainda, uma modelagem numérica dos ensaios pode auxiliar na análise dos resultados experimentais, validando a hipótese esperada ou os próprios resultados obtidos.

6 REFERÊNCIAS

ASSIS, João Batista Santos de. **Determinação experimental da resistência à tração na flexão em paredes construídas com blocos encaixáveis de solo-cimento**. Tese (Doutorado). Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

AZEREDO, G. A.; OLIVEIRA, G. M.; DANTAS, J. D. F.; SANTOS, F. E. F.; AZEREDO, A. F. N.; MEIRA, G. R. **Comportamento Estrutural de Alvenarias Construídas com Blocos de Terra Compactados (BTC)**. In: Avaliação de Desempenho de Tecnologias Construtivas Inovadoras: Sustentabilidade – Vol. 2. Cap. 8. São Carlos: Scienza, 2016.

FERREIRA, G. C. S.; JÚNIOR, A. L. M. **Cola à base de PVA e argamassa de solo-cimento como alternativas para o assentamento de alvenaria de tijolos maciços de solo-cimento**. Engenharia Agrícola, v. 31, n. 2, p. 237-248. Jaboticabal, mar./abr. 2011.

FIQUEROLA, Valentina. **Alvenaria de solo-cimento**. Revista Técnica, São Paulo, ed. 85, abr. 2004. Seção Tecnologia. Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/85/artigo286284-1.aspx>>. Acesso em 05 ago. 2016.

GRANDE, Fernando Mazzeo. **Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa**. Dissertação (Mestrado). São Carlos: Universidade de São Paulo, 2003.

GUILLAUD, Hubert. **Compressed earth blocks: manual of design and construction**. Vol. 2. 191 p. ISBN 3-528-02080-6. Eschborn: GTZ GmbH, 1995.

JÚNIOR, H. C. J.; WILLRICH, F. L.; BARBOSA, N. P. **Structural behavior of load bearing brick walls of soil-cement with the addition of ground ceramic waste**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 7, n. 3, p. 552-558. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2003.

LIMA, Fabíolla Xavier Rocha Ferreira. **Blocos de terra compactada de solo-cimento com resíduo de argamassa de assentamento e revestimento: caracterização para uso em edificações**. Tese (Doutorado). Brasília: Universidade de Brasília, 2013.

MINKE, Gernot. **Building with earth: design and technology of a sustainable architecture**. 199 p. Basel, Berlin, Boston: Birkhäuser, 2006.

PINTO, André Ricardo Alves Guedes. **Durabilidade e resistência de matriz de solo estabilizada com resina de mamona e fibras de pupunha para uso em construções com terra crua**. Tese (Doutorado). Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica, 2013.

- PINTO, Carlos de Sousa. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3. ed. 351 p. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.
- RAMALHO, M. A.; CORRÊA, M. R. S. **Projeto de edifícios de alvenaria estrutural**. 1. ed. 171 p. ISBN 85-7266-147-6. São Paulo: Pini, 2003.
- REDDY, B. V. V.; GUPTA, A. **Characteristics of soil-cement blocks using highly sandy soils**. Rilem: Materials and Structures 38 (July 2005) 651-658. Bangalore: Indian Institute of Science, 2005).
- RICHTER, Cristiano. **Alvenaria estrutural: processo construtivo racionalizado**. Curso de extensão - Área de ciências exatas e tecnológicas. [S.l.]: Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2007.
- RIGASSI, Vincent. **Compressed earth blocks: manual of production**. Vol. 1. 142 p. ISBN 3-528-02079-2. Eschborn: GTZ GmbH, 1995.
- SILVA, Ana Flávia da. **Avaliação da resistência à compressão da alvenaria estrutural**. Dissertação (Mestrado). Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista, 2007.
- TORGAL, F. P.; JALALI, S. O renascimento da construção com alvenaria de terra. **Revista Maquinaria**. v. 216, p. 80-89, jan. 2011. Angola: 2011.
- WALKER, Peter. **Characteristics of pressed earth blocks in compression**. 11th International Brick/block Masonry Conference, Tongji University, 14-16 oct. Shanghai: 1997.

NORMAS

- ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland). **BT-111: Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais**. 3.ed. 16p. São Paulo: ABCP, 2000.
- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 1984a.
- _____. **NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 1984b.
- _____. **NBR 7181: Solo – Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 1984c.
- _____. **NBR 8491: Tijolo maciço de solo-cimento – Especificação**. Rio de Janeiro, 1984d.
- _____. **NBR 8492: Tijolo maciço de solo-cimento – Determinação da resistência à compressão e da absorção de água**. Rio de Janeiro, 1984e.
- _____. **NBR 10833: Fabricação de tijolo maciço e bloco vazado de solo-cimento com utilização de prensa hidráulica: procedimento**. Rio de Janeiro, 2012.

- _____. **NBR 10834**: Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural: especificação. Rio de Janeiro, 2012.
- _____. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **NBR 15812-1**: Alvenaria estrutural – Blocos cerâmicos - Parte 1: Projetos. Rio de Janeiro, 2010a.
- _____. **NBR 15812-2**: Alvenaria estrutural – Blocos cerâmicos - Parte 2: Execução e controle de obras. Rio de Janeiro, 2010b.
- _____. **NBR 15961-1**: Alvenaria estrutural – Blocos de concreto - Parte 1: Projetos. Rio de Janeiro, 2011a.
- _____. **NBR 15961-2**: Alvenaria estrutural – Blocos de concreto - Parte 2: Execução e controle de obras. Rio de Janeiro, 2011b.
- CDI e CRATerre-EAG. **Compressed Earth Blocks**: Standards. 142 p. ISBN 2-906901-19-9. Bruxelas: Centre for the Development of Industry (CDI) e International Centre for Earth Construction – School of Architecture of Grenoble (CRATerre-EAG), 1998.