AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE GRAUTE FEITO COM SOLO E FEITO COM CONCRETO NO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE ALVENARIAS COM TIJOLOS VAZADOS DE SOLO-CIMENTO

Camilla Martins de Almeida Figueiredo Rangel

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Leandro Torres Di Gregorio

Coorientador: Wilson Wanderley da Silva

Rio de Janeiro

Maio de 2021

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE GRAUTE FEITO COM SOLO E FEITO COM CONCRETO NO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE ALVENARIAS COM TIJOLOS VAZADOS DE SOLO-CIMENTO

Camilla Martins de Almeida Figueiredo Rangel

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL.

Examinado por:

_____

Prof. Leandro Torres Di Gregorio, D. Sc, Orientador

_____

Prof. Wilson Wanderley da Silva, Arq, Co-orientador

_____

Prof. Gustavo Vaz de Mello Guimarães, D. Sc

_____

Prof. Márcio Santos Faria

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MAIO DE 2021

Rangel, Camilla Martins de Almeida Figueiredo

Avaliação da influência de graute feito com solo e feito concreto no comportamento estrutural de alvenarias com tijolos vazados de solo-cimento/ Camilla Martins de Almeida Figueiredo Rangel – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2021

83p.: il.

Orientador: Leandro Torres Di Gregório

Coorientador: Wilson Wanderley da Silva

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Civil, 2021

Referências Bibliográficas: p. 80

1. Graute feito com solo e com concreto
2. Tijolo de solo-cimento
3. Alvenaria estrutural
4. Resistência à compressão

I. Leandro Torres Di Gregório

II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil

III. Avaliação da resistência à compressão em prismas de tijolos de solo-cimento quando preenchidos com graute feito com solo e graute feito com concreto

“Eu me alegrei em todo o meu trabalho,

essa foi a recompensa de todo meu esforço”

(Eclesiastes 2:10)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, maravilhoso conselheiro, por ter grandes planos para a minha vida e jamais me abandonar.

Agradeço aos meus pais Michele e Ricardo, meus melhores amigos, pelas infinitas demonstrações de amor, cuidado e compreensão. Por se dedicarem, sem medir esforços, a me proporcionar o melhor, desde antes da minha existência. Por me ensinarem a hora de ir em frente e a hora de dar um passo para trás. Por me ensinarem, com as próprias palavras e atitudes, sobre respeito, dedicação, honestidade e humildade.

Ao meu falecido avô, Antônio Carlos, por ser meu maior incentivador, me ensinando a ter coragem, disciplina, confiança e caráter.

Ao meu namorado Victor, pelo imenso apoio e cuidado, por ser minha inspiração nos estudos e na profissão.

Ao meu professor e orientador Leandro Torres, pelos ensinamentos além da sala de aula, sobre disciplina, profissionalismo, empatia e por todo o apoio para que este estudo pudesse ser concretizado.

Ao professor Wilson, coorientador, que prontamente me auxiliou sempre que necessário, principalmente com as dúvidas e questões relacionadas ao laboratório.

Agradeço especialmente ao Will, amigo e parceiro no Projeto SHS, que me proporcionou grande ajuda ao longo da realização do projeto.

À Fernanda e ao Marcelo, grandes amigos que a faculdade me proporcionou, por alegrarem meu dia sempre que nos cruzávamos pelo corredor.

A todos os profissionais do Núcleo de Materiais Sustentáveis da Escola Politécnica/COPPE (NUMATS/UFRJ) pelo suporte técnico e disponibilidade. Aos profissionais Nelson e Vaguinho, pela ajuda sempre que necessário.

Por fim, agradeço aos demais amigos e familiares que, mesmo de longe, muitas vezes, me proporcionaram grande apoio e momentos de alegria ao longo desta graduação.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Civil

Avaliação da influência de graute feito com solo e feito com concreto no comportamento estrutural de alvenarias com tijolos vazados de solo-cimento

Camilla Martins de Almeida Figueiredo Rangel

Maio/2021

Orientador: Leandro Torres Di Gregorio

Coorientador: Wilson Wanderley da Silva

Curso: Engenharia Civil

Resumo: De acordo com a NBR 15812-1 (2010) o graute é o componente aplicado no preenchimento de espaços vazios de blocos, com a finalidade de solidarizar armaduras à alvenaria ou aumentar sua capacidade resistente. Ramalho e Correa (2003) afirmam que, para blocos de concreto, a resistência da alvenaria cresce conforme aumenta-se a resistência do graute utilizado, por se tratar de materiais semelhantes. Já para blocos cerâmicos, não é tão simples, pois o graute feito com concreto e a cerâmica são materiais distintos, com características elásticas diferentes.

Dentro do contexto do Projeto Solução Habitacional Simples (SHS), que trata de alvenarias estruturais de tijolos de solo-cimento, deseja-se avaliar, entre duas composições de graute, qual produz alvenarias mais resistentes à compressão. Assim, o objetivo desta pesquisa consiste em avaliar a resistência à compressão quando é utilizado graute com solo ou com concreto na alvenaria de tijolos de solo-cimento, a partir da realização de ensaio de resistência à compressão em prismas.

O resultado indicou que não houve ganho nem perda de resistência à compressão ao variar a composição do graute e os resultados de tensão máxima encontrados foram equivalentes para os prismas ocos e grauteados. Dentre as hipóteses que poderiam justificar tal resultado inesperado, destaca-se a possível ruptura da argamassa de solo e a dimensão dos corpos de prova prismáticos, pequena em comparação com a dimensão das paredes em escala real.

Palavras-Chave: Resistência a compressão, alvenaria estrutural, graute com solo, graute com concreto, solo-cimento.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfilment of the requirements for the degree of Engineer.

Evaluation of the structural behaviour in masonries made of hollow soil-cement bricks when filled with grout made of soil or grout made of concrete

Camilla Martins de Almeida Figueiredo Rangel

May/2021

Advisor: Leandro Torres Di Gregorio

Co-advisor: Wilson Wanderley da Silva

Course: Civil Engeneering

Abstract: According to NBR 15812-1 (2010), grout is a component commonly used to fill the blocks empty spaces, to solidify the reinforcement to the masonry or to increase its resistant capability. Ramalho e Correa (2003) states that, when grout fills the spaces in concrete blocks, its resistant increases as the grout resistant increases, because of the similarity between those two materials. When in ceramic blocks, for example, the masonry behaviour is not as simple, because both ceramics and grout have very different elastic characteristics.

Within the context of the Simple Housing Solution Project (SHS), which deals with structural cement-soil bricks masonry, it is desired to evaluate, between two compositions of grout, made of concrete or made of soil, which one produces the most resistant to compression masonry. Thus, this work aims to evaluate the gain of resistance to compression when the grout is made of soil or concrete, based on the performance of resistance to compression in prisms.

The result indicated that there was no significant gain or loss of compressive strength when varying the composition of the grout. The results of the tension found were equivalent for both hollow and grouted prisms. It was concluded that the effect of grouting on the resistance gain was not shown, probably due to the rupture of the mortar made of soil and due to the dimension of the prisms in comparinson to the scale of the walls.

Key words: Compressive strength, grout, grout made of soil, cement-soil bricks, structural masonry.

Sumário

1. INTRODUÇÃO 10

1.1. Contextualização 10

1.2. Motivação e Justificativa 11

1.3. Objetivos 12

1.3.1. Objetivo geral 12

1.3.2. Objetivos específicos 12

1.4. Metodologia 13

1.5. Estrutura do trabalho 14

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 15

2.1. Projeto SHS 15

2.2. Alvenaria estrutural 16

2.2.1. Definição e características 16

2.2.2. Elementos constituintes 17

2.2.2.1. Blocos 17

2.2.2.1. Graute 18

2.2.2.2. Armadura 18

2.2.2.3. Argamassa 19

2.3. Resistência da alvenaria estrutural 19

2.3.1. Conceitos importantes 20

2.3.1.1. Módulo de elasticidade 20

2.3.1.2. Área bruta *versus* líquida 21

2.3.1.3. Fator de eficiência 21

2.3.2. Forma de ruptura 22

2.4. Influência do graute 25

2.5. Influência da argamassa 28

2.6. Resistência da alvenaria estrutural de solo-cimento 34

3. MATERIAIS E MÉTODOS 41

3.1. Fabricação dos tijolos de solo-cimento 41

3.2. Fabricação dos corpos de prova de graute 43

3.3. Fabricação dos prismas 47

3.4. Ensaio de resistência à compressão dos grautes e prismas 50

3.5. Obstáculos 51

4. RESULTADOS 53

4.1. Resistência à compressão do tijolo 53

4.2. Resistência à compressão do graute 54

4.3. Resistência à compressão do prisma 59

4.4. Resistência à compressão da argamassa 66

4.5. Forma de ruptura dos prismas 67

4.6. Análises e hipóteses 69

4.6.1. Ruptura da argamassa 71

4.6.2. Ruptura do Graute 74

4.6.3. Retração do Graute 74

4.6.4. Dimensão dos corpos de prova..... 75

5. CONCLUSÃO 77

5.1. Considerações finais 77

5.2. Recomendações para estudos futuros 79

REFERÊNCIAS 80

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

Segundo Almeida *et al.* (2020) o emprego do solo-cimento é uma alternativa viável para a construção de habitações populares, no que diz respeito à redução dos impactos ambientais, custos da obra e tempo de execução. Este material é utilizado na confecção de alvenarias estruturais, em que a própria alvenaria é a responsável por resistir às cargas atuantes na estrutura da construção (TAUIU, 2010). No entanto, não há normas brasileiras que tratem o tijolo de solo-cimento como alvenaria estrutural.

É comum que, principalmente em pontos de concentração de tensões, como nos cantos de portas e janelas ou em encontros de paredes, utilize-se armadura envolta por graute para aumentar a capacidade portante da estrutura. O grauteamento é uma prática que consiste no preenchimento dos furos dos blocos com concreto fluido, visando aumentar a rigidez e a capacidade resistente da alvenaria.

Contudo, Ramalho (2003) explica que nem sempre aumentar a resistência do graute utilizado no preenchimento dos furos gera ganho de resistência para o conjunto. De acordo com o autor, a resistência das paredes gruteadas depende não só da resistência dos elementos que a compõe, ou seja, do bloco, graute, aço e argamassama utilizados, mas também da forma como esses elementos se deformam quando submetidos ao carregamento.

É importante que haja compatibilização entre as características elásticas dos materiais, bem como dos fenômenos físicos e mecânicos desenvolvidos na alvenaria para maximizar o desempenho da alvenaria estrutural (MENDES, 1998). A concentração de tensões em um dos elementos pode comprometer o desempenho resistente do conjunto.

Encontram-se muitos estudos na literatura que avaliam as alvenaria estruturais constituídas de blocos de concreto ou cerâmicos quanto à resistência à compressão, mas poucos abordam tijolos de solo-cimento. É neste contexto que este trabalho se encontra. Visto o potencial econômico e social que este elemento apresenta, deseja-se complementar a literatura sobre a resistência de alvenarias estruturais grauteadas compostas por tjolos de solo-cimento.

Uma das formas mais práticas e econômicas de se avaliar a resistência de uma alvenaria é realizando ensaio de resistência à compressão em prismas. Diversos autores, como Grohmann (2006), Miranda (2012) e Lino *et al.* (2020), avaliaram a correlação entre a resistência de blocos, prismas ou pequenas paredes em relação à parede em si,

concluindo que é possível avaliar a influência do conjunto a partir das resistências dos elementos (graute, argamassa, bloco).

1.2. Motivação e Justificativa

A aposta em uma solução que seja simples, rápida e eficiente para a construção ou reconstrução de modelos habitacionais para população de baixa renda tem sido o maior foco do projeto Solução Habitacional Simples (SHS). O projeto é uma iniciativa de cunho acadêmico que estuda as alvenarias estruturais em tijolos solo-cimento como solução para construção de casas populares, visto que, após situações de conflitos e desastres naturais, muitos locais não apresentam recursos para construir ou reestruturar suas residências.

Nesse sentido, tem-se desenvolvido estudos a respeito do uso de tijolos de solo-cimento, também conhecidos popularmente como "tijolos ecológicos" ou "blocos de terra compactada estabilizada com cimento (BTC)", como principal elemento de construção de habitações em alvenaria estrutural. Além da composição dos tijolos, a avaliação dos tipos de argamassa, graute (concreto fluido) e aço são de vital importância para a viabilidade do projeto. Contudo, não está muito bem estabelecido na literatura a relação do grauteamento com o ganho de resistência em alvenarias estruturais de solo-cimento. Além disso, como não há normas brasileiras que tratem a alvenaria em tijolos de solo-cimento como alvenaria estrutural, este estudo tem sido desenvolvido pelo projeto SHS a partir de normas internacionais, como a BS 5628.

Dentro do projeto SHS, estudo prévio avaliou o desempenho de diferentes traços de graute feitos com solo e com concreto em relação à resistência à compressão (LIMA, 2018). Visando dar continuidade a esta pesquisa, este trabalho buscou avaliar qual composição de graute, feito com solo ou feito com concreto, garantiria melhor resistência da estrutura.

Outro questionamento que serviu de motivação para este estudo foi com relação à influência do grau de solidarização entre o tijolo e composições diferentes de graute no ganho de resistência da alvenaria. Pressupõe-se que, quando a estrutura for composta por blocos de concreto e graute feito com concreto, a similaridade destes componentes gerará aumento da resistência da alvenaria. Já quando os blocos e o graute forem materiais distintos, as diferentes características elásticas podem influenciar negativamente o conjunto, como apontado por Miranda (2012). Sabendo disso, espera-se que o graute feito com solo funcione melhor do que graute feito com concreto no ganho de resistência da

estrutura em alvenarias de tijolos de solo-cimento, devido a maior similaridade entre materiais.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo geral

Tendo em vista tais questionamentos e a relação entre eles, este trabalho surgiu com o objetivo de investigar a influência do tipo de graute no aumento de resistência de alvenaria estruturais, principalmente nas estruturas compostas por tijolos de solo-cimento, visando complementar a literatura no que se refere a este tema e ainda contribuir para o avanço e viabilização do projeto Solução Habitacional Simples. Deseja-se investigar se há variação no resultado quando se altera a composição desse graute, ao substituir a areia por solo.

1.3.2. Objetivos específicos

Esse trabalho tem como objetivos específicos:

- Analisar os resultados do ensaio de resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos, tanto de graute com solo quanto de graute com concreto, segundo a NBR 5739 (2015), em duas situações: sem cura e com cura em câmara úmida;
- Avaliar os resultados da resistência à compressão de prismas de tijolos de solo-cimento preenchidos com graute de solo, graute de concreto e de prismas sem graute, baseados na norma NBR 8492 (2013) que trata do ensaio de compressão em tijolos isolados;
- Avaliar os efeitos da mudança de composição do graute em uma estrutura de tijolos de solo-cimento;
- Avaliar o comportamento elástico dos elementos da alvenaria no conjunto, além da influência dos materiais na deformação do conjunto e na sua ruptura.

1.4. Metodologia

A metodologia para este trabalho consiste em duas partes: revisão bibliográfica e a parte experimental. A pesquisa bibliográfica foi realizada através da busca dos temas sobre tijolos de solo-cimento e a prática de grauteamento em alvenaria estrutural. Para isso, foram consultados artigos, teses e livros de autores referenciados no assunto.

Com a finalidade de avaliar a influência do tipo de graute empregado no preenchimento dos furos dos tijolos em alvenaria estrutural de solo-cimento, o programa experimental consiste em avaliar os resultados da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos de graute feito com solo e de graute feito com concreto em duas situações: sem cura e com cura em câmara úmida, bem como da resistência à compressão do conjunto tijolo/graute/argamassa em três grupos de prismas: ocos, preenchidos com graute feito com solo e preenchidos com graute feito com concreto.

Dessa forma, o programa experimental é composto por duas etapas: a primeira consiste na confecção de tijolos de solo-cimento, prismas e corpos de prova de graute e a segunda consiste na realização dos ensaios de resistência à compressão nos prismas e nos cilindros de graute. O detalhamento de cada uma destas etapas encontra-se no Capítulo 3. De modo geral, a descrição da tipologia e quantitativo dos corpos de prova dos ensaios de resistência à compressão encontra-se abaixo:

- 03 cilindros de graute feitos com solo com cura;
- 03 cilindros de graute feito com solo sem cura;
- 03 cilindros de graute feito com concreto com cura;
- 03 cilindros de graute feito com concreto sem cura;
- 03 prismas preenchidos com graute feito com solo;
- 03 prismas preenchidos com graute feito com concreto;
- 03 prismas sem graute.

1.5. Estrutura do trabalho

Esta pesquisa está estruturada em cinco capítulos. No Capítulo 1 é realizada uma introdução ao tema, onde são apresentados alguns aspectos com relação ao desempenho de alvenaria estrutural. São definidos, ainda, a motivação e os objetivos esta pesquisa pretende alcançar, justificando a importância deste estudo e a metodologia a ser seguida, e também os obstáculos enfrentados para o desenvolvimento pleno deste trabalho.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica acerca do Projeto (SHS), dos elementos da alvenaria estrutural, bem como de conceitos importantes e de resultados de autores, com relação às influências do graute e argamassa no desempenho da resistência à compressão da alvenaria estrutural.

O Capítulo 3 detalha a metodologia adotada, caracterizando os materiais, a instrumentalização utilizada, a fabricação dos corpos de prova (tijolos de solo-cimento, cilindros de graute feito com solo e com concreto e prismas grauteados e não grauteados) e os ensaios de resistência à compressão realizados nos cilindros de graute e nos prismas.

No Capítulo 4 encontram-se os resultados obtidos nos ensaios realizados e uma análise sobre tais resultados em comparação com diferentes autores.

No Capítulo 5 são apresentadas as considerações finais sobre a influência do graute no ganho de resistência da alvenaria estrutural de tijolos de solo-cimento. Além disso, o capítulo apresenta recomendações de estudo para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Projeto SHS

Após o tsunami que atingiu o sul da Ásia em 2004, matando mais de 285 mil pessoas, a ideia de que são necessários métodos que possibilitem a construção de moradias populares de forma eficiente, rápida e econômica foi ganhando força e esse contexto serviu como motivação inicial para que, em 2009, uma equipe coordenada pelo professor Leandro Torres Di Gregorio, iniciasse o projeto "Solução Habitacional Simples (SHS): Reconstruindo Após Desastres e Conflitos".

O objetivo desse projeto é propor uma metodologia de construção de casas populares, ou edificações de pequeno porte, de forma a aproveitar ao máximo os recursos disponíveis, incluindo a mão de obra local, para a reconstrução de moradias em regiões afetadas por desastres e/ou situações críticas, em que há necessidade de construir com recursos escassos.

Entende-se que em um contexto pós desastres não haja grande disponibilidade de recursos para a (re)construção de moradias. Sabendo disso, a ideia do projeto é proporcionar a construção de moradias da forma mais simplificada possível, utilizando como matéria prima materiais que sejam de mais fácil acesso à comunidade devastada.

Assim, o SHS tem desenvolvido experimentos e pesquisas direcionados à análise da viabilidade de se usar tijolos de solo-cimento como principal constituinte das moradias, cujo processo produtivo é prático e de baixo custo.

Parte do projeto consiste em disponibilizar gratuitamente um material didático, composto por vídeos, slides e textos. Esse material envolve desde a fabricação dos tijolos, uso dos equipamentos para a produção e ensaios que devem ser realizados, até a parte administrativa que engloba o gerenciamento da mão de obra e da obra em si. Este conteúdo é direcionado à profissionais e assistentes técnicos que, nesse tipo de situação caótica, desejam trabalhar com essa metodologia. Esse material pode ser consultado em: https://www.shs.poli.ufrj.br/.

A ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) define o solo-cimento conforme citado abaixo:

> [...] material resultante da mistura homogênea, compactada e curada de solo, cimento e água em proporções adequadas. O produto resultante deste processo é um material com boa resistência à compressão, bom

> índice de impermeabilidade, baixo índice de retração volumétrica e boa durabilidade [...] (ABCP, 2009)

Observa-se que em áreas que foram atingidas por desastres ou conflitos, pode ser mais vantajoso utilizar tijolos de solo-cimento do que tijolos convencionais, principalmente porque, como explicitado por Abiko (1980), o solo é um material extremamente abundante, de fácil obtenção e aplicação. O autor afirma ainda que, a adição de cimento ao solo permite impedir a deterioração quando o material é submerso em água, bem como a variação volumétrica relacionada à absorção ou perda de umidade e ainda permite apresentar resistência à compressão semelhantes ao tijolo de barro cozido.

Além disso, segundo Motta *et. al* (2014), o processo de fabricação do tijolo de solo-cimento gera menos resíduos, pois não passa pelo processo de queima como um tijolo convencional. Para sua produção, conta-se com o auxílio de uma prensa, que pode ser manual ou automática, e um destorroador elétrico, contudo, caso não haja energia elétrica disponível, o processo de destorroamento do solo também é possível de ser realizado manualmente. O autor também pontua como ponto positivo o bom desempenho de resistência, impermeabilidade, durabilidade e vedação termoacústica que construções em solo-cimento podem apresentar.

2.2.Alvenaria estrutural

2.2.1. Definição e características

"Alvenaria" é a justaposição de peças que são coladas em sua interface, formando um elemento vertical coeso. Assim, em geral, as alvenarias são elementos de vedação, sem função estrutural, que visam promover o isolamento térmico, compartimentação de ambientes e a proteção acústica. As alvenarias podem, contudo, apresentar desempenho estrutural, dispensando a utilização de vigas e pilares, sendo elas próprias responsáveis por resistir às cargas atuantes na estrutura da construção, transmitindo-as para as fundações (TAUIU, 2010).

Quanto ao processo de execução, Mohamad *et. al* (2015) cita que a alvenaria estrutural se destaca em relação ao método tradicional que utiliza vigas e pilares como elementos estruturais. Isso porque há otimização das tarefas na obra devido às técnicas executivas simplificadas, o que também acarreta uma flexibilidade quanto ao

planejamento de execução das etapas, além de haver maior facilidade de controle nestas etapas de produção.

O autor cita ainda que há também uma redução do volume de resíduos gerados na obra, gerando maior economia de custos. Roman *et. al* (1999) complementa com dois outros fatores que colaboram para a redução dos custos: em primeiro lugar, a simplificação das instalações evita que sejam necessários rasgos nas paredes para passagem de dutos, reduzindo desperdícios. Em segundo lugar, com esse sistema estrutural é possível economizar com a contratação de mão de obra, pois reduz-se significativamente a necessidade de mão de obra para carpintaria e ferragens, além de que a execução é de fácil aprendizagem. Assim, é possível trabalhar com equipes menores, o que facilita a supervisão da obra.

Como contraponto, Roman *et. al* (1999) afirma que o principal inconveniente está relacionado à limitação do projeto arquitetônico, pois devido à simplicidade da estrutura, projetos mais arrojados elevariam os custos. Além disso, o autor cita que, devido à função estrutural das paredes, o design fica mais restrito e adaptações como remoção de paredes são difíceis de serem realizadas, sendo necessário definir no projeto quais paredes poderiam ser removidas.

2.2.2. Elementos constituintes

2.2.2.1. Blocos

Os blocos são os principais elementos que compõem a alvenaria estrutural e, segundo a NBR 15270-2 (2017), que trata de requisitos de blocos cerâmicos para alvenaria estrutural, os blocos são sempre definidos por três dimensões principais: largura, altura e comprimento. No Brasil, os blocos cerâmicos e blocos de concreto constituem os principais tipos de blocos utilizados no país (Mohamad, 2015).

As unidades cerâmicas estruturais podem ser definidas como componentes da alvenaria que possuem furos prismáticos perpendiculares à face que os contém, devendo ser assentados com os furos na vertical (NBR 15270-1, 2017). Requisitos mínimos com relação aos blocos cerâmicos são exigidos pela NBR 15270-1 (2017) e a especificação de métodos de ensaio desses blocos é realizada pela NBR 15270-2 (2017). As exigências quanto aos métodos de ensaio, ao projeto, à execução e ao controle de obras de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos são apresentadas pela NBR 15812-1 (2010), NBR 15812-2 (2010) e NBR 15812-3 (2017).

Os blocos de concreto são unidades estruturais vazadas, encontrados no Brasil com diferentes geometrias e resistências à compressão (MOHAMAD, 2015). A NBR 6136 (2016) apresenta os requisitos para a classificação dos blocos vazados de concreto simples, destinados tanto a alvenaria estrutural quanto não estrutural. As exigências quanto ao projeto, à execução e o controle de obras de alvenaria estrutural de blocos de concreto são apresentadas pela NBR 15961-1(2011) e NBR 15961-2(2011).

2.2.2.1. Graute

De acordo com a NBR 15812 -1 (ABNT, 2010), graute é um componente utilizado para preenchimento de espaços vazios de blocos, com a finalidade de solidarizar armaduras à alvenaria ou aumentar sua capacidade resistente. É composto por cimento, água, agregado miúdo e agregado graúdo, o graute destoa-se do concreto convencional na dimensão da brita e na relação água-cimento (ROMAN *et al.* 1999).

Segundo Mohamad (2015), a mistura do graute deve ser coesa e fluida, de modo a garantir que todos os vazios sejam preenchidos. Além disso, a retração do graute deve ser tal que não permita a separação entre o graute e as paredes do bloco. Ainda sobre propriedades que o graute deve apresentar, o autor afirma que a resistência à compressão do graute, combinada com as propriedades mecânicas dos blocos e da argamassa, definirá as características à compressão da alvenaria.

Para bom desempenho da alvenaria frente aos esforços solicitantes, Soares (2011) afirma que uma boa aderência entre graute, bloco e armadura é fundamental, de forma que o conjunto trabalhe monoliticamente. Para isso o graute deve envolver completamente as armaduras e preencher homogeneamente os furos dos blocos.

De acordo com a NBR 16868-1 (2020), a avaliação da resistência do graute na compressão da alvenaria deve ser realizada mediante o ensaio de resistência à compressão de prismas, pequenas paredes ou paredes. A resistência característica do graute deve ser determinada conforme a NBR 5738 (2015) e NBR 5739 (2015).

2.2.2.2. Armadura

Assim como no concreto armado, a utilização de armaduras em alvenarias estruturais visa aumentar a capacidade resistente da estrutura e permite que o aço absorva os esforços de tração que o concreto/graute por si só não tenha capacidade para suportar, devido a sua baixa resistência a tração. Nos pontos grauteados e armados, a armadura

deve absorver os esforços de tração. Conforme pontuado por Fusco (1995), isso ocorrerá devido a aderência entre os dois materiais, que permitirá essa transferência de esforços.

Deve-se ressaltar que os ensaios para caracterização do aço devem estar em conformidade com a norma NBR 7480 (2007), que define as condições exigíveis na encomenda, fabricação e fornecimento de barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado.

2.2.2.3. Argamassa

Segundo a NBR 13281 (2005) a argamassa é uma mistura homogênea composta por agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) e água, contendo ou não aditivos com propriedades de aderência e endurecimento e podendo ser dosada em obra ou em instalação própria (argamassa industrializada). A norma aponta que, para alvenaria estrutural, a argamassa é indicada para a ligação das unidades estruturais, como blocos e tijolos, no assentamento.

Ramalho e Correa (2003) expõem que a argamassa de assentamento deve apresentar boas características de trabalhabilidade, resistência, plasticidade e durabilidade, para cumprir com suas funções de solidarizar as unidades, transmitir e uniformizar as tensões entre as unidades de alvenaria, absorver pequenas deformações e prevenir a entrada de água e vento nas edificações.

Pode-se afirmar, então, que a argamassa de assentamento é utilizada para unir os blocos tornando a alvenaria coesa e uniforme, são só esteticamente, ao compensar as irregularidades, mas estruturalmente, ao transferir as tensões uniformemente entre os blocos, dentre outras funções.

Para evitar o risco de fissuras, a NBR 16868-1 recomenda especificar a resistência à compressão da argamassa limitada a 1,5 vezes a resistência característica especificada para bloco, em relação à sua área bruta. A resistência da argamassa deve ser determinada de acordo com a NBR 13279.

2.3. Resistência da alvenaria estrutural

Visto que uma das funções do graute é de aumentar a resistência de determinada alvenaria sem alterar a resistência de seus componentes em si, entende-se que o preenchimento dos furos dos blocos aumentaria a resistência à compressão do conjunto

(MIRANDA, 2012). Contudo, o aumento da resistência do conjunto não necessariamente decorre do aumento da resistência à compressão do graute.

Ramalho e Correa (2003) explicam que, para blocos de concreto preenchidos com graute feito com concreto, por exemplo, esta relação do aumento da resistência da parede com o aumento da resistência do graute funciona muito bem, devido a maior compatibilidade entre os materiais. Contudo, já não ocorre desta mesma maneira para blocos cerâmicos, por exemplo, por conta das propriedades físicas e mecânicas da cerâmica e do concreto serem muito distintas.

Além disso, estudos mostram que a argamassa pode ou não trazer grandes impactos na resistência final do conjunto, dependendo da resistência do bloco e do graute utilizados, conforme será explicitado a seguir.

Sendo assim, é importante que, para decidir o tipo de graute a ser utilizado, seja avaliado não só sua resistência em separado, mas sim do conjunto, levando em consideração as características mecânicas e elásticas de cada componente no comportamento do elemento como um todo.

2.3.1. Conceitos importantes

2.3.1.1. Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade é definido como o coeficiente de proporcionalidade entre tensão e deformação, sob um carregamento (SANTOS, 2008). Através da análise do módulo de elasticidade é possível observar o quão deformável é determinado elemento. Em uma alvenaria composta por materiais distintos, torna-se necessário avaliar o módulo de elasticidade de cada componente da alvenaria, pois a tendência do elemento de maior rigidez é absorver a maior parte do carregamento (MIRANDA, 2012).

Segundo Khalifa e Magzoub (1994) *apud* Nascimento (2015), o melhor desempenho da alvenaria grauteada é obtido quando os módulos de elasticidade do bloco, argamassa e grautes são similares. Se o graute ou argamassa apresentarem módulo de elasticidade mais elevados que do bloco, certamente haverá concentração de tensões nestes elementos, que se deformarão e poderão causar tensões de tração no bloco, levando-o a ruptura. Caso contrário, ou seja, se o bloco se apresentar mais rígido que os demais elementos, não necessariamente isso trará consequências negativas ou positivas para o conjunto, tornando necessário avaliar a situação com mais cautela.

2.3.1.2. Área bruta *versus* líquida

Segundo Ramalho (2003) a tensão de resistência à compressão dos blocos, tijolos, prismas ou paredes pode ser calculada em relação à área bruta ou em relação à área líquida. A tensão em relação à área bruta se refere à área total da unidade, sem levar em consideração os vazios dos furos dos blocos. Já para a tensão em relação à área líquida, deve-se descontar a área referente aos vazios.

2.3.1.3. Fator de eficiência

A correlação prisma/parede é mais próxima do que a relação bloco/parede, principalmente porque o prisma possui o componente de argamassa. Assim, a análise de prismas para avaliação da resistência a compressão de alvenarias estruturais é comum nos estudos empíricos (GROHMANN, 2006). Segundo Mendes (1998), realizar ensaios em paredes em escala real pode ser inviável tanto técnica quanto economicamente e, por isso, é possível realizar tais estudos em prismas para verificação das propriedades de uma parede de alvenaria.

Sendo assim, calcula-se uma relação entre a resistência das paredes ou prismas e a resistência do tijolo ou bloco, chamado fator de eficiência, sendo então a razão do primeiro pelo segundo. Segundo La Rovere (1997) apud Mata (2006), a resistência à compressão da unidade sempre será superior à resistência do prisma, que por sua vez será superior à resistência da parede. Segundo o autor, isso acontece porque a restrição nas extremidades do bloco causada pelos pratos da prensa de ensaio gera um confinamento lateral parcial por atrito entre o prisma e a chapa. Conforme o corpo de prova se aproxima da escala real, este efeito vai sendo minimizado.

Gomes (1983) conclui que a resistência da alvenaria é de cerca de 25 a 50% da resistência do bloco cerâmico, sendo o limite inferior para ensaios utilizando argamassa de baixa resistência e o superior com argamassa de alta resistência. O autor indica que um fator de eficiência a partir de 0,3 (ou seja, paredes com 30% da resistência do bloco) é desejável para alvenaria de blocos cerâmicos. Garcia (2000) *apud* Grohmann (2006) encontrou em seu experimento um fator de eficiência em torno de 0,3 para paredes grauteadas, 0,4 para prismas de três blocos e 0,55 para prismas de dois blocos em relação ao bloco cerâmico. Já para blocos de concreto, Ramalho e Correa (2003) situaram o fator de eficiência parede-bloco entre 0,4 e 0,6.

2.3.2. Forma de ruptura

Cheema e Klingner (1986) *apud* Nascimento (2015) classificam as formas de ruptura em blocos de concreto em cinco tipos:

1) Fendilhamento lateral do bloco: ocorre quando a resistência à tração do bloco é alcançada, levando à ruptura da alvenaria por tração no bloco;
2) Esmagamento da argamassa: ocorre quando a máxima tensão de compressão atuante na argamassa atinge a resistência de compressão da argamassa confinada;
3) Esmagamento do bloco: ocorre quando é atingida a resistência à compressão do bloco;
4) Fendilhamento da argamassa: ocorre quando é atingida a resistência à tração máxima da argamassa;
5) Esmagamento do graute: ocorre quando a máxima tensão de compressão atuante no graute atinge a resistência à compressão confinada do graute.

Grohmann (2006) verificou em seu experimento algumas das formas de ruptura características de prismas grauteados feitos com blocos cerâmicos. Para uso de argamassas mais fracas e deformáveis, por exemplo, o prisma tende a apresentar uma fissuração lenta. A argamassa tende a se expandir lateralmente e, sendo mais deformável, tem maior capacidade de absorver as deformações. Nesse caso, é provável que o conjunto rompa por tração no bloco, que por ser mais rígido, não consegue acompanhar a deformação da argamassa e rompe por fendilhamento. A Figura 2.1 apresenta um prisma que sofreu fendilhamento no bloco por conta da expansão da argamassa.

Já para prismas com argamassa mais forte e rígida, segundo o autor, o conjunto tende a romper de forma frágil, com ruptura e rompimento súbitos, como mostrado na Figura 2.2. Isso também foi verificado por autores como Miranda (2012) e Lino *et al.* (2020).

Figura 2.1: Ruptura por fendilhamento do bloco devido à expansão da argamassa (GROHMANN, 2006)

Figura 2.2: Ruptura frágil de prisma com argamassa rígida (GROHMANN, 2006)

Grohmann (2006) também verificou experimentalmente que os prismas podem apresentar fissuração e/ou rompimento por conta da expansão do graute no interior dos furos dos blocos, vide Figura 2.3. Se, quando solicitado, o graute não atingir sua capacidade máxima de resistência à compressão, as tensões de tração geradas pelo graute

no bloco causará o conjunto a romper por fendilhamento do bloco. Nesse caso, a ruptura é caracterizada pelo desplacamento das paredes dos blocos, conforme Figura 2.4. Além disso, quando o graute for de rigidez mais elevada, ocorre a formação de pilaretes, de modo que a coluna grauteada permanece praticamente intacta. Já para grautes de menor rigidez, é possível observar, na ruptura, um rompimento da estrutura do graute. Observa-se que, nestes ensaios, as colunas grauteadas não foram armadas.

Figura 2.3: Fissuras verticais em decorrência da expansão do graute em prisma grauteado (GROHAMNN, 2006)

Figura 2.4: Desplacamento das paredes do prisma e formação de pilarete em prisma com graute mais resistente que o bloco (GROHAMNN, 2006)

Nota-se que o fendilhamento do bloco pode ocorrer tanto devido à expansão da argamassa quanto do graute.

2.4. Influência do graute

Lino *et al.* (2020) realizou ensaios de resistência à compressão em prismas de blocos cerâmicos constituídos por dois blocos, três blocos e em pequenas paredes, variando entre o uso de graute de baixa resistência (14 MPa) e alta resistência (30 MPa). Em todos os casos, o desempenho do conjunto foi melhor para os corpos de prova grauteados em comparação com os não grauteados. Contudo, tanto para os prismas de dois blocos quanto para os de três blocos, o desempenho do conjunto em relação à resistência à compressão foi estatisticamente o mesmo. Ou seja, aumentar a resistência do graute não trouxe aumento da resistência para os prismas. Já para as pequenas paredes, houve diferença significativa entre os resultados, de modo que o melhor desempenho ocorreu para o uso do graute de menor resistência. A conclusão dos autores foi que quanto mais o objeto ensaiado se aproxima da escala real, mais evidente se torna a influência da variação da resistência do graute na resistência do conjunto. Observou-se que as

resistências obtidas para os prismas de dois blocos foram superiores as de três blocos, provavelmente efeito do confinamento gerado pelos pratos da prensa.

Miranda (2012) estudou o efeito do grauteamento na resistência à compressão da alvenaria de blocos cerâmicos. Foram utilizados dois grautes no preenchimento dos prismas, denominados Graute A, de resistência 9,88 MPa, e Graute C, de resistência 25,3 MPa. Nesse experimento, foi obtido que os prismas preenchidos com o graute A apresentaram resultados modestamente superiores, mas a análise estatística realizada pela autora concluiu que, na verdade, os resultados para ambos os grautes no prisma podem ser considerados equivalentes, assim como no estudo de Lino *et al.* (2020). Além disso, também não houve discrepância significativa entre o resultado do prisma grauteado para o não grauteado, o que não foi um resultado esperado. O resultado da resistência à compressão da argamassa e dos grautes, blocos e prismas encontra-se na Tabela 2.1 a seguir:

Tabela 2.1: Resistência à compressão de blocos, argamassas, grautes e prismas de blocos cerâmicos

Resistência média à Compressão (MPa) e Módulo de Elasticidade entre parênteses							
Bloco *(Abruta)*	Bloco *(Alíquida)*	Argamassa	Graute A	Graute C	Prisma A	Prisma C	Prisma Oco
13,6 (3,2 GPa)	35,7 (8,6 GPa)	6,1	9,9 (17,65 GPa)	25,3 (28,2 GPa)	6,2	5,8	6,1 (3,7 GPa e 9,6 GPa *)

*Módulo de elasticidade referente a área líquida do prisma oco
Fonte: Miranda (2012)

A autora buscou uma justificativa para tais resultados a partir de uma análise do módulo de elasticidade dos elementos. Como a tendência do elemento de maior rigidez é absorver mais carga, o fato de o módulo de elasticidade de ambos os grautes ser muito maior do que o do bloco na área líquida indica que o graute deveria ser mais solicitado que o bloco sob carregamento. De fato, surgiram fissuras nas paredes do bloco, isso poderia ser um indicativo de que o graute poderia ter sido solicitado e se expandido, causando ruptura por tração horizontal. As características da ruptura dos prismas grauteados, indicado na Figura 2.5 a seguir, foi a mesma que o de Lino *et al.* (2020).

Figura 2.5: Ruptura dos prismas grauteados (MIRANDA, 2012)

Apesar de o graute ter sido solicitado, houve uma contradição no resultado já que a resistência do prisma grauteado se equipara a do não grauteado, como se o graute não tivesse absorvido nenhuma carga. Analisando a imagem da ruptura, é possível que o rompimento do prisma esteja mais associado à expansão da argamassa do que do graute, pois observa-se na que o bloco apresenta uma região mais tracionada na região de contato do bloco com a argamassa, como também observado por Grohmann (2006). Dessa forma, provavelmente o conjunto rompeu por tração no bloco por conta da expansão da argamassa. Além disso, é interessante ressaltar que a tensão de ruptura de ambos os prismas está próxima da tensão de resistência à compressão da argamassa.

Miranda (2012) também realizou ensaio de resistência à compressão em pequenas paredes não grauteadas (1ª série) e grauteadas (3ª série). A Tabela 2.2 a seguir contém as médias dos resultados dos ensaios encontrados. Obteve-se que, diferentemente dos prismas, houve aumento significativo de resistência devido ao grauteamento dos corpos de prova, em relação à área bruta. Segundo a autora, o ganho de área líquida no caso dos prismas foi maior do que o aumento de carga suportado por eles e, com isso, o graute no interior do prisma fez reduzir a resistência à compressão em relação à área líquida. Já para pequenas paredes grauteadas o ganho de área líquida devido ao preenchimento dos vazios foi proporcional ao aumento da capacidade de resistir ao carregamento aplicado.

Tabela 2.2: Resistência à compressão em pequenas paredes com e sem graute C de MIRANDA (2012)

1ª Série: Não grauteado		3ª Série: Grauteado	
Tensão *Abruta* (MPa)	Tensão *Alíquida* (MPa)	Tensão *Abruta* (MPa)	Tensão *Alíquida* (MPa)
3,94	10,94	7,29	10,97

É importante ressaltar a semelhança entre os resultados de Miranda (2012) e Lino *et al.* (2020). Ambos os autores encontraram que, conforme o conjunto ensaiado se aproxima da escala real, alterações na resistência do graute são mais evidentemente influentes na resistência do conjunto.

Por fim, comparando a resistência em relação à área líquida das paredes com a do bloco em si na área líquida, que foi de 30,9 MPa, encontra-se um fator de eficiência de 35,5% tanto para as paredes grauteadas quanto não grauteadas, dentro dos limites estabelecidos por Gomes (1983) para blocos cerâmicos. Já com relação à área bruta do bloco, que foi de 10,9 MPa encontra-se um fator de eficiência de 36,1%.

2.5. Influência da argamassa

Ramalho (2003) enfatiza que a resistência da argamassa não influencia de forma tão significativa na resistência à compressão da alvenaria, a não ser que sua resistência seja menor do que 30% da resistência do bloco, caso em que seria esperado uma queda na resistência do conjunto.

Gomes (1983) ensaiou à compressão algumas séries de paredes. As séries de paredes A, E, F e G não foram grauteadas e os blocos utilizados eram cerâmicos e de resistência variável para cada tipo de parede. A Tabela 2.3 abaixo resume os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão obtidos.

Tabela 2.3: Médias das resistências das argamassas, blocos e paredes das séries A, E, F e G de Gomes (1983)

Série	**Resistência média da parede na área bruta (MPa)**	**Ra (MPa)**	**Rb (MPa)**	***Ra/Rb**	**Fator de eficiência na área bruta**
A	2,5	3,6	15,3	23%	16%
F	2,6	5,1	7,5	68%	34%

E	3,1	10,2	9,6	95%	32%
G	2,9	12,0	7,5	160%	39%

*Ra: Resistência média da argamassa; Rb: Resistência média dos blocos na área bruta

Para as paredes F e G, que foram construídas com blocos de mesma resistência, nota-se que a resistência da argamassa aumentou em 135% da primeira para a segunda, sendo que isso acarretou um aumento de apenas 11% na resistência das paredes.

Além disso, o autor observou que conforme a resistência da argamassa aumenta, o fator de eficiência cresce. Contudo, o autor constatou que quando a resistência da argamassa ultrapassa a faixa dos 70% da resistência do bloco, o fator de eficiência permanece no patamar dos 30 a 40%. Ou seja, ainda que a resistência da argamassa seja bem superior à resistência do bloco, a resistência da parede não sofrerá um aumento tão significativo. Deve-se apenas atentar ao fato de que, para argamassas de alta resistência, a ruptura tende a ser excessivamente frágil e a parede não acompanhará os eventuais movimentos da estrutura. Então, o autor conclui a partir destes ensaios que para obter bons resultados de resistência à compressão da alvenaria, a resistência da argamassa deve ser de pelo menos 70% da resistência do bloco em sua área líquida, todavia sem ultrapassá-la.

Santos (2008) realizou ensaio de resistência à compressão em pequenas paredes e em prismas de dois e três blocos cerâmicos, não grauteados, variando a resistência da argamassa utilizada. Em todos os casos foram utilizados blocos cerâmicos. Foi verificado que o aumento da resistência da argamassa proporcionou aumento gradual da resistência tanto dos prismas de dois e três blocos quanto da pequena parede, conforme Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Influência da argamassa na resistência na área bruta de pequenas paredes e prismas de blocos cerâmicos de paredes maciças e não grauteados

Argamassa	Ra/Rbb	Prisma 2 Blocos (MPa)	Prisma 3 Blocos (MPa)	Pequena Parede (MPa)
T1 (4,4 Mpa)	27,8%	6,32	5,55	3,22
T2 (8,7 Mpa)	55,1%	8,8	8,7	4,86
T3 (13,9 Mpa)	88,0%	9,33	9,47	6,34
T4 (16,8 Mpa)	106,3%	10,11	10,76	7,35

Ra = Resistência da argamassa; Rbb = Resistência do bloco na área bruta
Fonte: Adaptado de Santos (2008)

Contudo, o autor apresentou os valores de tensão dos prismas em relação à área bruta dos blocos. Para melhor comparação com os resultados de Gomes (1983), estes dados foram transformados para indicar a tensão em relação à área líquida. Para isso,

basta multiplicar os valores pela razão entre a área bruta (411,12cm²) e a área líquida (200,78 cm²) dos blocos, que equivale a 2,07. Dessa forma, a Tabela 2.5 abaixo indica as tensões de resistência à compressão dos prismas em relação à área líquida. A resistência do bloco na área líquida é de 30,82 MPa.

Tabela 2.5: Tensões de resistência à compressão dos prismas em relação à área líquida

Argamassa	Ra/Rbl	Prisma 2 Blocos (MPa)	Prisma 3 Blocos (MPa)	Pequena Parede (MPa)
T1 (4,4 Mpa)	14,3%	12,94	11,36	6,59
T2 (8,7 Mpa)	28,2%	18,02	17,81	9,95
T3 (13,9 Mpa)	45,1%	19,10	19,39	12,98
T4 (16,8 Mpa)	54,5%	20,70	22,03	15,05

Ra = Resistência da argamassa; Rbl = Resistência do bloco na área líquida
Fonte: Adaptado de Santos (2008)

Como a argamassa T1 apresenta resistência bem abaixo de 30% da resistência do bloco, faixa na qual, segundo Ramalho (2003) a argamassa tem maior influência negativa na resistência do conjunto, será avaliada a influência do aumento da resistência da argamassa T2 para a T4 no conjunto. Nesse caso, houve um aumento de 93% na resistência da argamassa, que proporcionou um aumento de 14,8% na resistência de prismas de dois blocos e de 23,4% em prismas de três blocos. Em comparação com Gomes (1983), o aumento na resistência da argamassa parece ter gerado mais influência na resistência do conjunto, contudo, ambos resultados indicam que o aumento na resistência da argamassa aumenta a resistência do conjunto em uma proporção muito inferior.

Ramalho (2003) concorda com Gomes (1983) e cita um exemplo da norma britânica BS 5628, que indica que aumentar a resistência da argamassa de 6,5 MPa para 16,6 MPa (aumento de 155%) gerou um aumento de apenas 6% na resistência à compressão de parede com blocos de 7,0Mpa. Similarmente, Arantes (2003) *apud* Lino *et al.* (2020) realizou ensaios de compressão em prismas de blocos cerâmicos e concluiu que, independentemente do tipo de graute utilizado, a influência da argamassa na resistência do prisma foi pequena, com o aumento máximo de 21%, sendo que uma argamassa era três vezes mais resistente que a outra. Além disso, observou que o aumento

da resistência da argamassa acarretou o ganho de rigidez do prisma, levando a uma ruptura frágil.

Khalaf (1996) *apud* Nascimento (2008), observou que, em se tratando de blocos de concreto, o melhor desempenho dos prismas grauteados ocorre quando as características de deformação do bloco e do graute são as mesmas. Além disso, foi observado que o aumento da resistência da argamassa não teve grande impacto na resistência do conjunto.

Mendes (1998) realizou ensaios de resistência à compressão em prismas de blocos cerâmicos com argamassas e grautes de diferentes resistências e observou a influência na resistência do conjunto e a relação entre ambos os elementos. A Tabela 2.6 resume os resultados das resistências médias obtidas para as argamassas, grautes e prismas ensaiados à compressão. A tensão do bloco é de 22,89 MPa em relação à área bruta e de 43,73 MPa em relação à área líquida.

Tabela 2.6: Resultados da média das resistências à compressão de prismas em relação à área bruta de Mendes (1998)

Resistência da argamassa (MPa)	Resistência do graute (MPa)	Resistência do prisma (MPa) na área bruta
6,7 (Argamassa 3)	-	8,11 (15,5)
	49,87 (Graute 1)	12,28
	28,32 (Graute 2)	14,66
	13,94 (Graute 3)	17,94
20,0 (Argamassa 1)	-	12,56 (23,99)
	49,57 (Graute 1)	20,81
	25,08 (Graute 2)	18,99
	12,37 (Graute 3)	21,33

*Entre parênteses o valor da tensão em relação à área líquida dos prismas sem graute
Fonte: Adaptado de Mendes (1998)

Nesse estudo, o autor obteve que, para a argamassa mais fraca, a resistência do prisma reduz conforme aumenta a resistência do graute. Já para a argamassa mais forte, as tensões resultantes para os três grupos de prismas foi praticamente a mesma, de modo que o uso de grautes de diferentes desempenhos não gerou mudança significativa na resistência do prisma. O autor não encontrou a mesma relação que Gomes (1983) de que a resistência do graute deve ser próxima da resistência do bloco na área líquida para melhor desempenho do conjunto.

Além disso, o autor percebeu que a resistência do conjunto não depende só da resistência dos elementos em separado, mas sim do comportamento elástico destes elementos e do conjunto. De acordo com o autor, a argamassa mais resistente faz aumentar a rigidez do conjunto bloco mais argamassa, de forma que a alvenaria recebe a maior parte das cargas, em comparação ao graute. Assim, há menos tensões de tração lateral geradas pelo graute sobre o bloco e isso fez aumentar a resistência à compressão do conjunto. É possível que, na verdade, a argamassa auxilie o tijolo a resistir aos esforços de tração gerados pelo graute, que fica mais confinado do que em uma situação de argamassa fraca.

Dentre os corpos de prova com argamassa mais fraca, o melhor desempenho ocorreu para o graute que apresentou curva de Tensão x Deformação mais próxima da argamassa. Quanto mais deformável o graute, maior a compatibilidade com a argamassa, que tende a se deformar mais. Isso proporcionou uma melhor distribuição das tensões nos os três casos.

Contudo, para a argamassa mais resistente, esperava-se que, da mesma forma, o melhor desempenho fosse para a combinação de graute e argamassa que apresentassem curvas mais próximas, ou seja, argamassa 1 e graute 3. De fato, foi o maior valor de tensão encontrado, porém a análise estatística afirmou que a resistência do conjunto para os três tipos de graute foi equivalente. Assim, o autor concluiu que, a partir do momento que a argamassa apresentar resistência e elasticidade maior do que a metade do que no graute, não ocorre aumento significativo na resistência do conjunto. A Figura 2.6 indica as curvas de Tensão x Deformação dos grautes e argamassas ensaiados à compressão.

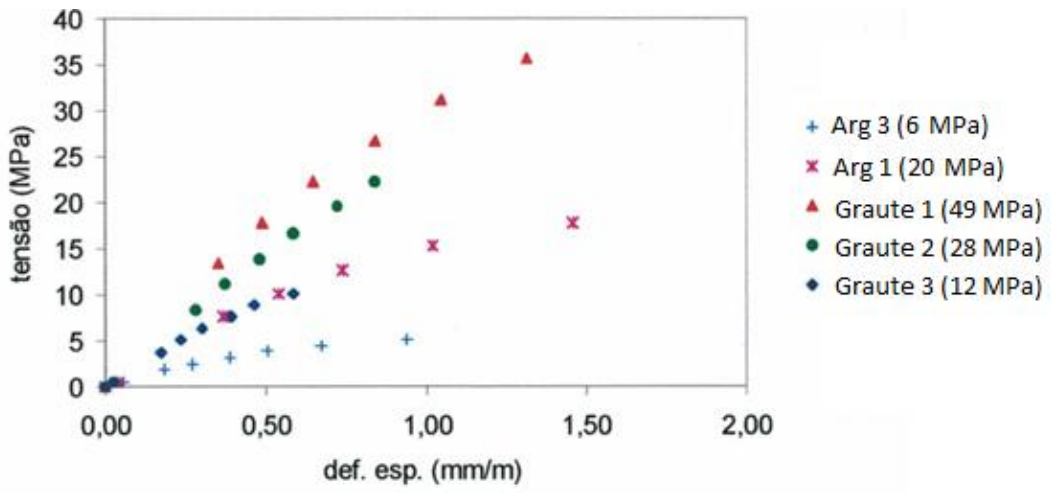

Figura 2.6: Curva de Tensão x Deformação para as argamassas e grautes utilizados nos prismas, adaptado de Mendes (1998)

A partir da análise dos resultados e dos gráficos, também se pode concluir que, apesar de o graute 1 ser bem mais resistente que o graute 2, suas curvas de Tensão x Deformação são muito próximas até a carga de ruptura, de modo que realmente não se esperava que o aumento da resistência do graute 2 para o 1 levasse a um aumento significativo na resistência do conjunto.

Além disso, nota-se que, no geral, houve aumento da resistência à compressão para os três tipos de graute, ao aumentar a resistência da argamassa. Segundo o autor, isso ocorreu porque, para a argamassa mais fraca, o graute recebeu a maior parte da carga. Com isso, acentuou-se a deformação deste que levou o conjunto a romper. Ao aumentar a rigidez da argamassa, houve maior compatibilização entre os elementos e melhor distribuição das cargas, reduzindo a deformação lateral imposta pelo graute e fazendo aumentar a resistência à compressão. Isso foi evidenciado pelo módulo de elasticidade do prisma, que, segundo o autor, reduziu quando se utilizou a argamassa mais resistente. Ou seja, resultou em um prisma mais deformável, devido a melhor distribuição das tensões.

Ainda sobre a influência da argamassa na resistência das alvenarias estruturais, Grohmann (2006) ressalta que um outro fator relevante é com relação à espessura das juntas, que devem ser de aproximadamente um centímetro. Variações significativas nesta espessura podem causar perdas na resistência e na capacidade de acomodar deformações. Francis (1967) *apud* Gomes (1983) encontrou que a resistência da parede de blocos cerâmicos reduz com o aumento da espessura da junta de argamassa. Santos (2008) explica que, nesse caso, a resistência da alvenaria reduz por conta do aparecimento de tensões de tração laterais nas unidades. Isso foi verificado por Cheema e Klinger (1986) *apud* Santos (2008), que realizou ensaio de resistência à compressão em prismas de blocos de concreto de resistência 25,8 MPa e argamassa de resistência 14,9 MPa, variando-se a espessura da junta. Foi encontrado que, para junta de 10mm, a resistência média do prisma foi de 19,2 MPa. Já para junta de 12,7mm, a média foi de 13,80 MPa.

Já com relação às juntas de espessura menor que 10mm, Santos (2008) explica que, teoricamente, a resistência da alvenaria deveria aumentar. De fato, isso foi verificado por Mohamad (1998), que ao utilizar juntas de 7mm em comparação com juntas de 10mm, encontrou um aumento na resistência da alvenaria. Contudo, isso nem sempre acontece, visto que juntas muito finas podem não ser capazes de absorver e suprir as irregularidades dos blocos.

Com base nos resultados dos autores aqui descritos, percebe-se que as conclusões divergem em algumas situações. Isso pode acontecer devido às diferenças do tipo de bloco utilizado, traço e resistência da argamassa e do graute utilizado, além da resistência do bloco. É comum encontrar na literatura expressões como “rígido”, “dúctil” e “resistente” para caracterizar os elementos utilizados. Contudo, deve-se buscar discernimento entre os trabalhos, visto que estes adjetivos geralmente são utilizados ao se comparar as características mecânicas de um elemento em relação a outro, e cada estudo utiliza um referencial diferente. Alguns comparam o desempenho do graute e da argamassa em relação à resistência do bloco, que pode ser a resistência na área bruta ou na área líquida, ou mesmo em relação à resistência do prisma, dependendo do estudo. Por isso, é necessário estar atento ao tipo de resistência que está sendo utilizada como referência para as comparações.

Apesar desse tipo de discrepância, a grande maioria dos estudos concorda que para haver melhor desempenho da alvenaria, é necessário que haja compatibilização entre as características mecânicas e elásticas dos elementos do conjunto, para que a estrutura se comporte monoliticamente e haja melhor distribuição das tensões.

2.6. Resistência da alvenaria estrutural de solo-cimento

Há poucos estudos na literatura que avaliam a influência do graute e argamassa no desempenho da resistência à compressão da alvenaria feita com tijolos de solo-cimento. Assim, a principal base para comparação dos resultados desta pesquisa são os estudos de Lima (2018) e de Tenório (2019), que realizaram ensaios de resistência à compressão em corpos de prova de tijolos de solo-cimento grauteados, como prismas estendidos e pequenas paredes, dentro do contexto do Projeto SHS. Além disso, Lima (2018) realizou ensaio de resistência à compressão em diferentes traços e composições de graute, tanto feito com solo quanto com concreto.

Lima (2018) utilizou tijolos de solo-cimento na fabricação de pequenas paredes e prismas estendidos grauteados. Primeiramente, o autor ensaiou à compressão diferentes traços de tijolos, de grautes com concreto e com solo e também de argamassas. Com relação aos tijolos, utilizou os traços de 1:8 e 1:6:0,5 para pequenas paredes, sendo o segundo com adição de pó de pedra, e 1:10 para prismas. O ensaio de prisma estendido teve como finalidade investigar o comportamento da resistência do conjunto ao aumentar a área de furos grauteados. Assim, foram ensaiados prismas ocos, com graute a cada 1,0m

e a cada 0,50m. O graute utilizado nos prismas foi no traço de 1:3:2 e relação água/cimento 1,0. Os prismas estendidos apresentam dois tijolos de altura e quatro tijolos de comprimento. A Tabela 2.7 indica os resultados do ensaio de resistência obtidos na área bruta.

Tabela 2.7: Resistência à compressão de prismas estendidos sem graute, com graute a cada 1,0m e a cada 0,50m em relação à área bruta (LIMA, 2018)

Prisma Estendido	Resistência Média na área bruta (MPa)	Evolução
Sem graute	1,06	100% (Referência)
Graute 1,0 em 1,0m	1,31	124%
Graute 0,50 em 0,50m	1,40	133%

Estes valores podem ser convertidos em tensão em relação à área líquida, ao multiplicá-los pela razão entre a Área bruta (Abr) e Área líquida (Alíq). No caso, para calcular a área líquida, basta subtrair a área dos furos não grauteados em cada caso, sabendo que o diâmetro dos furos é de 6,5cm. Assim, a Tabela 2.8 a seguir indica os resultados do ensaio de resistência obtidos na área líquida.

Tabela 2.8: Resistência à compressão de prismas estendidos sem graute, com graute a cada 1,0m e a cada 0,50m em relação à área líquida, adaptado de LIMA (2018)

Prisma Estendido	Resistência média na área bruta (MPa)	A_{br} / $A_{líq}$	Resistência Média na área líquida (MPa)	Evolução da resistência na área líquida
Sem graute	1,06	1,27	1,35	100% (Referência)
Graute a cada 1,0m	1,31	1,19	1,56	116%
Graute a cada 0,5m	1,40	1,22	1,71	127%

Ao observar os resultados de Lima (2018), nota-se que houve aumento da resistência do conjunto, tanto em relação à área bruta quanto líquida, ao aumentar a área grauteada. Segundo o autor, entre os prismas sem grauteamento e com grauteamento a cada 1,0m houve aumento na área líquida de cerca de 4%, ocasionando aumento da resistência bruta em 24% e na resistência líquida em 16%. Já entre os prismas ocos e com graute a cada 0,50m o aumento de área líquida foi de 8% e acarretou o aumento da resistência bruta em 33% da resistência líquida em 27%.

Esses resultados podem ser comparados com o estudo de Grohmann (2006), que avaliou o desempenho de prismas quanto a resistência à compressão ao aumentar a porcentagem de furos grauteados, porém com blocos cerâmicos. No geral, o autor obteve que o aumento do percentual de furos grauteados proporcionou aumento da resistência dos prismas. Esse aumento na resistência do prisma foi cada vez menor conforme aumentava-se a quantidade de furos grauteados e conforme o graute se tornava mais resistente. Entre os prismas ocos e prismas com 1/3 dos furos grauteados, houve um aumento máximo de 16,4% na resistência do prisma em relação à área bruta (Graute de 24 MPa e argamassa de 18 MPa) e, no pior caso, houve uma redução de 8,1% (Graute e argamassa de 8 MPa). Já entre os prismas com 2/3 dos furos grauteados e prismas com todos os furos grauteados, houve um aumento em máximo de 24% (Graute e argamassa de 8MPa) na resistência do prisma e mínimo de 9% (Graute de 24 MPa e argamassa de 18 MPa).

Apesar dos diferentes elementos utilizados entre os autores e dimensões dos corpos de prova distintos, nota-se que o aumento na resistência do conjunto foi maior ao aumentar a área grauteada dos prismas estendidos de Lima (2018). Sendo assim, neste quesito, o desempenho do prisma de tijolos de solo-cimento ao aumentar a área grauteada parece satisfatório. Porém, uma observação importante sobre os prismas de Lima (2018) é que os furos grauteados estavam muito distantes entre si e talvez não houvesse uma interação entre eles como houve no caso de Grohmann (2006), cujos furos grauteados nos prismas estavam a, no máximo, um bloco de distância entre si.

Já com relação ao ensaio de pequenas paredes de Lima (2018), o autor considerou dois cenários, o primeiro de acordo com a NBR 16522 (2016) e o segundo, de acordo com a norma britânica BS 1052 (1999). Os gráficos de Tensão x Deformação dos tijolos, grautes e argamassas utilizados em cada cenário encontram-se nas Figuras 2.7, 2.8 e 2.9 a seguir. As escalas dos gráficos originais foram alteradas.

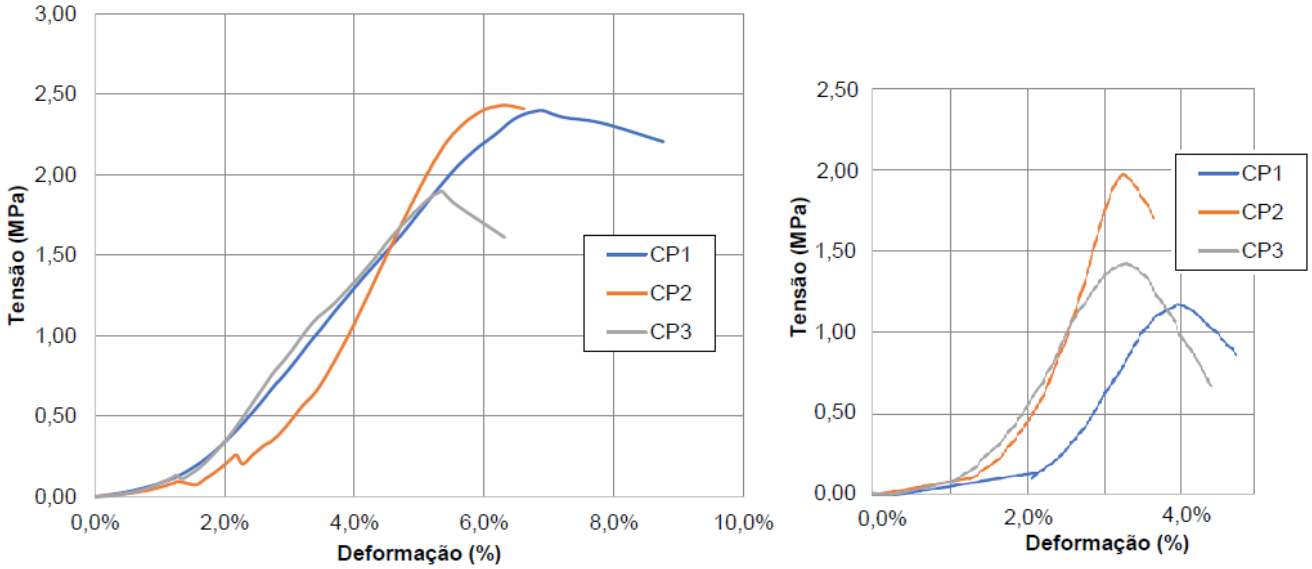

Figura 2.7: Tijolo 1:8 (Cenário 1) e Tijolo de solo-cimento com adição de pó de pedra 1:6:0,5 aos 28 dias (Cenário 2) de Lima (2018)

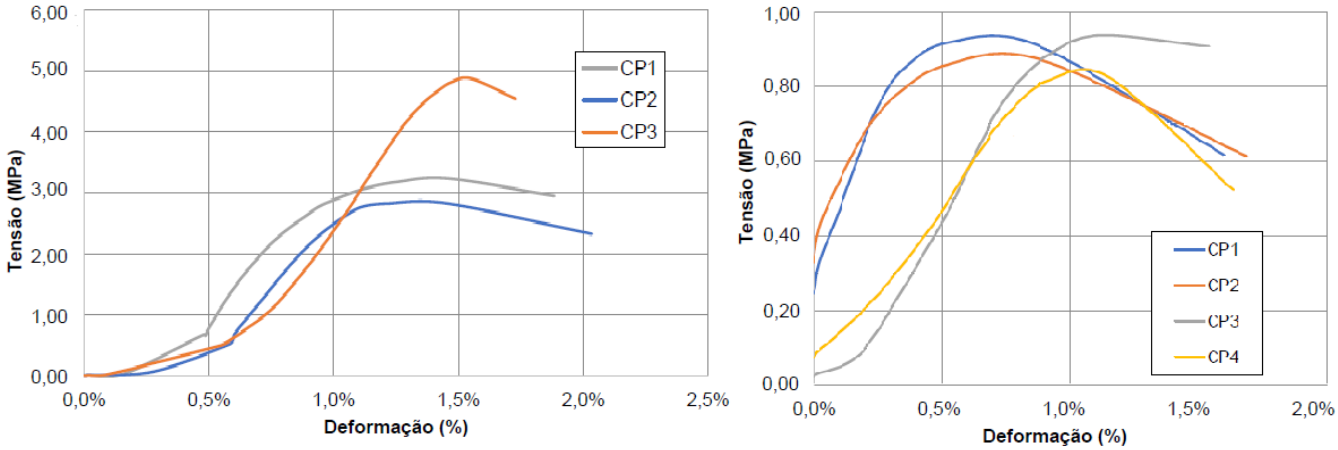

Figura 2.8: Graute 1:3:2 com relação a/c em volume 1,0 aos 7 dias de cura (Cenário 1) e Graute 1:5:3 com relação a/c em volume 2,25 aos 14 dias de cura (Cenário 2) de Lima (2018). Gráficos em escalas verticais diferentes.

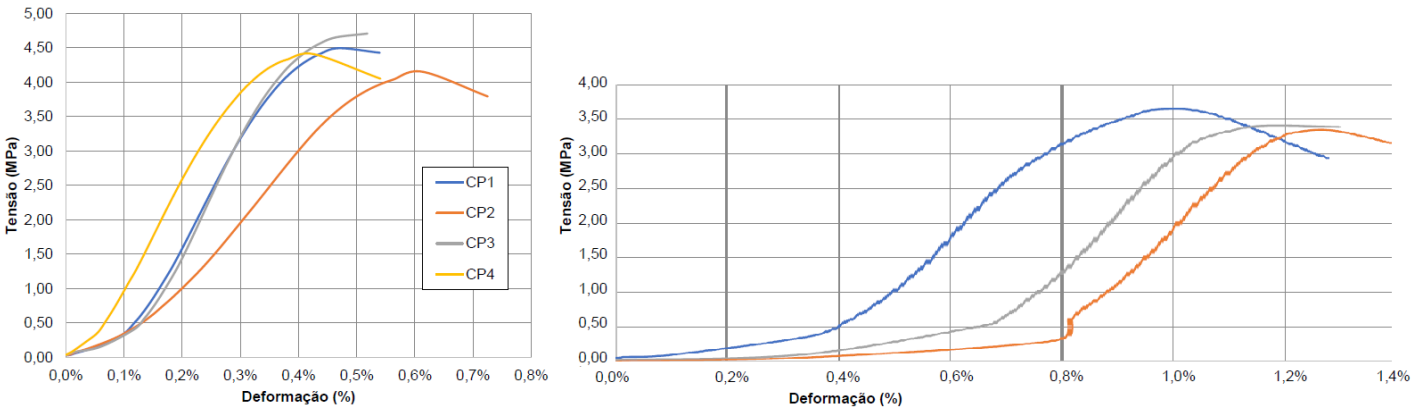

Figura 2.9: Argamassa Cimentcola aos 14 dias sem cura (Cenário 1) e Argamassa de cal, cimento e areia 1:1:6 com relação a/c em volume 1,5 aos 14 dias sem cura (Cenário 2) de Lima (2018)

O resultado das tensões médias de resistência dos elementos utilizados em cada caso, bem como da pequena parede em si encontram-se na Tabela 2.9. Esta tabela foi adaptada e acrescentou-se a coluna contendo os valores dos módulos de elasticidade. Estes valores não foram calculados pelo autor e foram aqui calculados para melhor análise sobre a rigidez dos elementos. Para obter o módulo de elasticidade, calculou-se a inclinação da região reta dos gráficos, ou seja, na fase elástica de cada um, a partir de dois pontos na reta.

Tabela 2.9: Resistência à compressão das pequenas paredes, grauteadas a cada 50cm, e de seus elementos constituintes. Entre parênteses está a resistência do tijolo com relação a área líquida, valor não calculado pelo autor. Adaptado de Lima (2018)

Pequena Parede Cenário 1 - Segundo NBR 16522 (2016)				
Elemento	Idade (dias)	Resistência média (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Resistência Média da parede (MPa)
Tijolo 1:8	28	2,06 (2,56)	50*	1,22
Graute 1:3:2 a/c 1,0	7	3,65	400*	
Argamassa Cimentcola	14	4,44	1000*	
Pequena Parede Cenário 2 - Segundo BS 1052 (1999)				
Elemento	Idade (dias)	Resistência média (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Resistência Média (MPa)
Tijolo 1:6:0,5	28	1,4 (1,74)	50*	1,76
Graute 1:5:3 (solo) a/c 2,25	14	0,89	150*	
Argamassa CCA 1:1:6 a/c 1,5	14	3,46	625*	

*Resultados não calculados por Lima (2018).

Antes da análise de resultados, é importante ressaltar que as dimensões dos corpos de prova para cada cenário são diferentes. No Cenário 1, as pequenas paredes apresentam 70cm de altura e 100cm de largura. Já no Cenário 2, as pequenas paredes têm 50cm de altura e 50cm de largura.

Analisando os resultados, percebe-se que, do Cenário 1 para o 2, alguns fatores podem ter contribuído para que a parede se tornasse mais resistente no segundo caso. A argamassa, apesar de ter sofrido uma leve redução em sua resistência, se tornou mais deformável. Visto que a argamassa é o elemento mais rígido do conjunto, uma redução na rigidez certamente contribuiu para que houvesse melhor distribuição das tensões.

Além disso, o graute também sofreu redução, tanto da resistência quanto do módulo de elasticidade, do primeiro para o segundo cenário. A queda em sua resistência, diferente da argamassa, foi bem mais significativa, situando-se abaixo da resistência do tijolo. Isso não significa prejuízo para a estrutura, pois muitos autores concordam que a resistência do graute e argamassa devem ser próximas do tijolo, porém sem ultrapassá-la, para obter melhores resultados. Outro destaque é o fato de que a curva de Tensão x Deformação do graute se aproximou mais da curva do tijolo, comparado ao Cenário 1. Isso também pode ter acontecido devido à composição do graute substituir a areia pelo mesmo solo que compõe o tijolo, tornando as características do elemento mais compatíveis com as do tijolo.

Quanto aos tijolos utilizados, percebe-se pelos gráficos que o primeiro é cerca de 47% mais resistente que o segundo. Apesar disso, possuem a mesma rigidez, ou seja, o mesmo módulo de elasticidade.

Conclui-se que, apesar da redução na resistência do graute e da argamassa no segundo cenário, a queda na rigidez de ambos os elementos, que são muito mais rígidos que o tijolo, foi fundamental para obter um melhor desempenho do conjunto. Nota-se que, apesar de os corpos de prova dos dois cenários possuírem diferentes dimensões, é possível comparar seus resultados. Visto que se espera uma redução no desempenho do conjunto ensaiado conforme se aproxima das dimensões da escala real (LA ROVERE, 2001, *apud* MATA, 2006) a resistência da pequena parede no Cenário 2 deveria ser maior do que no Cenário 1, o que de fato aconteceu.

Além de Lima (2018), Tenório (2019) chegou a realizar ensaio de resistência à compressão em pequenas paredes e em enrijecedores, com o objetivo de obter seu módulo de elasticidade. Como o intuito do estudo era voltado para a análise estrutural e de resistência a cargas sísmicas, não foram aprofundados os ensaios e gráficos de resistência à compressão dos elementos, sendo utilizados como base alguns dos resultados de Lima (2018).

Para a confecção dos corpos de prova do estudo de Tenório (2019), foi utilizado graute no traço 1:6:4 e relação a/c em volume 1,0; argamassa de cal, cimento e areia no

traço 1:1:6 e relação a/c em volume 1,5 e tijolo contendo pó de pedra em sua composição, no traço de 1:6:0,5 que, segundo Lima (2018), possui resistência média de 1,40 MPa na área bruta e 1,74 MPa na área líquida. A Figura 2.10 a seguir apresenta o gráfico de Tensão x Deformação do Graute 1:6:4, porém com relação a/c em volume 2,5, aos 14 dias de idade.

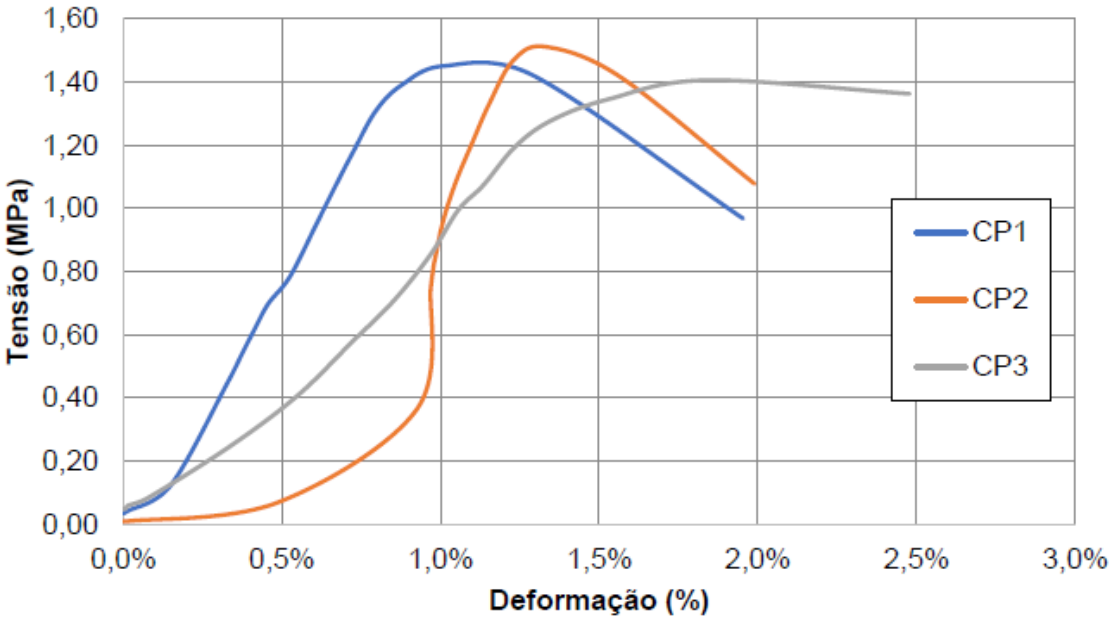

Figura 2.10: Gráfico Tensão x Deformação de graute 1:6:4 e relação a/c em volume 2,5 aos 14 dias de idade, sem cura (LIMA, 2018)

Para as dimensões de dois blocos de comprimento e sete blocos de altura, a autora obteve uma resistência média de 1,34 MPa para as pequenas paredes grauteadas a cada 50cm e módulo de elasticidade 260 MPa. Esse resultado pode ser comparado à média obtida por Lima (2018) para o ensaio de pequena parede no Cenário 2, pois as dimensões foram muito próximas.

Assim, tem-se que a média de resistência de parede obtida por Tenório (2019) foi cerca de 23% menor. Isso pode ser justificado, principalmente, pelo graute utilizado. Ao observar e comparar as curvas dos dois tipos de graute, percebe-se que o traço utilizado por Tenório (2019) é 55% mais resistente e a curva de Tensão x Deformação é mais vertical, ou seja, este é um graute mais rígido, reduzindo a resistência à compressão do conjunto. Além disso, é válido ressaltar que a relação a/c em volume utilizado é muito baixa, comparado ao utilizado por Lima (2018), algo que pode estar associado ao aumento de sua rigidez.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Com a finalidade de analisar a influência do tipo de graute empregado no preenchimento dos furos de tijolos de solo-cimento em alvenaria estrutural, o programa experimental consistiu em avaliar a resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos de graute feito com solo e de graute feito com concreto em duas situações: sem cura e com cura em câmara úmida, bem como a resistência à compressão do conjunto tijolo/graute/argamassa em três grupos de prismas: ocos, preenchidos com graute feito com solo e preenchidos com graute feito com concreto.

3.1. Fabricação dos tijolos de solo-cimento

Conforme adotado por Lima (2018) no Projeto SHS, os tijolos de solo-cimento foram fabricados com auxílio de uma prensa manual, observada na Figura 3.1 e destorroador elétrico. Os tijolos são constituídos por Cimento Portland CP-ll E32 da marca Tupi, água (proveniente da CEDAE), solo e cal hidratada CH-lll da marca Itaú.

Figura 3.1: Prensa manual utilizada na fabricação dos tijolos de solo-cimento

O solo utilizado é uma mistura de solos extraídos de duas jazidas de solo residual, localizadas no Campus da UFRJ/Macaé, na cidade de Macaé- RJ. Lima (2018) realizou a caracterização de ambos os solos, que denominou de Solo 1 e Solo 2. Primeiramente os solos foram destorroados, com auxílio de um destorroador elétrico, e peneirados em uma peneira de abertura de 5mm, em seguida foram misturados em proporções iguais.

Após o preparo do solo, adicionou-se o cimento e a cal. O traço cimento-solo empregado foi de 1:6 e a quantidade de cal foi de 2% da mistura de solo e cimento, conforme recomendado no manual do Projeto SHS. Em seguida adicionou-se a água. Segundo o procedimento executivo do projeto, deve-se borrifar a água e misturar aos poucos para que a mistura fique homogênea e não haja acúmulo de água.

Para saber o ponto ideal de umidade deve-se apertar um punhado da mistura com a mão para formar um torrão. Se, ao tentar parti-lo ao meio, o torrão se dividir em duas metades iguais sem dificuldade, a umidade está no ponto ideal, conforme Figura 3.2. Mas se o torrão esfarelar ou suar água, deve-se corrigir a umidade, adicionando água ou adicionando mais mistura do traço à umidade ambiente.

Figura 3.2: Ponto ideal de umidade do solo para fabricação dos tijolos

Nessas proporções, a mistura foi sendo adicionada aos poucos na prensa para fabricar os tijolos. Durante o processo de prensagem, foi necessário corrigir a umidade da

mistura uma ou duas vezes, para que permanecesse no ponto ideal. A prensa havia sido regulada ao início da atividade e todos os tijolos foram fabricados aplicando-se aproximadamente a mesma força de compactação e tendo o mesmo operador prensando os tijolos. Observa-se que houve certa dificuldade para prensar os tijolos. A prensa também foi untada com óleo queimado para evitar que a mistura grudasse na prensa. Por fim, os tijolos fabricados foram levados para a câmara úmida, observar Figura 3.3, por 28 dias.

Figura 3.3: Cura dos tijolos em câmara úmida

3.2. Fabricação dos corpos de prova de graute

A fabricação dos corpos de prova de graute, tanto de solo quanto de concreto, foi realizada segundo o procedimento executivo da norma NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Foram fabricados doze corpos de prova de graute de dimensões 10x20cm conforme esquematizado a seguir. Para cada tipo de graute foi preparada a mistura e realizadas as etapas de moldagem e compactação, passando ou não pelo processo de cura em câmara úmida.

O traço adotado foi de 1:4:2, respectivamente: cimento, solo e brita ou cimento, areia e brita. Tal traço foi escolhido pois, dentre os diferentes traços de graute ensaiados por Lima (2018), este resultou em um graute de resistência mais próxima da resistência do tijolo, além de ser um traço mais econômico e relativamente próximo do traço do tijolo.

Para a dimensão de corpo de prova de 10x20cm, a norma NBR 5738 recomenda 12 golpes por camada para o adensamento, sendo duas camadas. O fator água/cimento foi 3,0 para o graute com concreto e 2,5 para o graute com solo. Todos os moldes foram untados com óleo queimado anteriormente à moldagem dos corpos de prova. Todos os corpos de prova foram numerados em ordem de fabricação. A Figura 3.4 apresenta o esquema dos corpos de prova de graute.

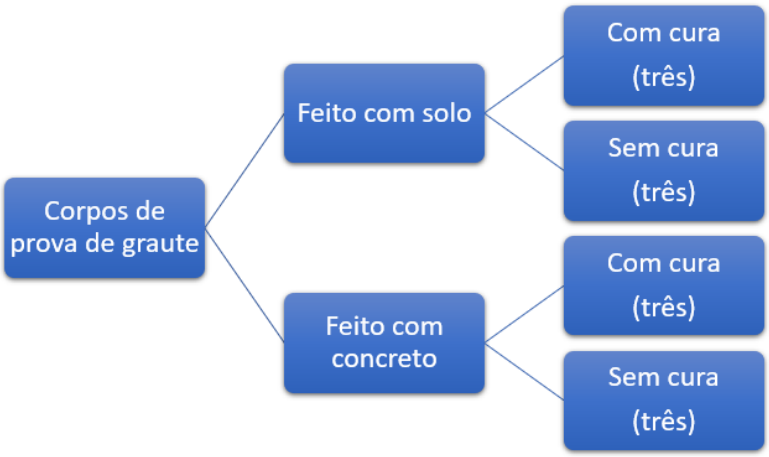

Figura 3.4: Esquema de fabricação dos corpos de prova de graute

Após o processo de moldagem e adensamento, a norma recomenda esperar um período de 24h para cura inicial antes do desmolde. Porém, com receio de os corpos de prova estarem frágeis, foi decidido, junto ao orientador, aguardar mais 24h. Dessa forma, todos os corpos de prova foram desmoldados após 48h da fabricação.

Observa-se que, segundo a norma, os corpos de prova deveriam iniciar o processo de cura após as 24h de cura inicial. Assim, como decidiu-se aguardar mais um dia para o desmolde, foi colocado um pano úmido ou uma fina camada de água na superfície exposta dos corpos de prova, como visto na Figura 3.5. Optou-se por manter os moldes no local onde foram fabricados para evitar perturbações neste período de cura inicial.

Figura 3.5: Camada de água após 24h da moldagem pré câmara úmida

Notou-se que os corpos de prova de graute com concreto sofreram um abatimento maior do que os de graute com solo, observado na Figura 3.6, além de que os de graute com concreto tiveram mais imperfeições na superfície do topo. Possivelmente, isso se deu por conta da diferença da relação a/c em volume, que, por sua vez, foi causada pela substituição da areia por solo argiloso. Já na superfície lateral, percebe-se que os corpos de prova de graute feito com solo apresentaram bem mais irregularidades do que os de concreto, visto na Figura 3.7.

Figura 3.6: Abatimento dos corpos de prova de graute

Figura 3.7: Superfície lateral dos corpos de prova de graute

Por último, é importante ressaltar que, ao longo do período de experimentos, foi necessário replanejar a data dos dias de laboratório, por conta da pandemia do Coronavírus. Sendo assim, os seis corpos de prova que passaram pelo processo de cura permaneceram em câmara úmida por 54 dias ao invés dos 28 dias recomendados pela norma. Próximo da data do ensaio de resistência à compressão, todos os cilindros foram capeados com enxofre para regularização das faces, vide Figura 3.8. Todos os cilindros foram medidos e pesados antes do ensaio e do capeamento.

Figura 3.8: Capeamento dos corpos de prova de graute feito com solo

3.3. Fabricação dos prismas

Após os 28 dias de cura dos tijolos em câmara úmida, os prismas foram preparados sobrepondo dois tijolos e unindo-os com uma junta de argamassa. Após confeccionados, os prismas não passaram pelo processo de cura em câmara úmida. Com relação à regularização da superfície, Lima (2018) verificou que a substituição da camada de capeamento de argamassa por uma raspagem manual da face que vai receber o carregamento gerou resultado positivo. Dessa forma, para regularização da superfície, os anéis dos tijolos que ficaram por cima foram cortados e raspados, observado na Figura 3.9.

Figura 3.9: Raspagem do anel dos tijolos superiores dos prismas

Foram fabricados nove prismas, sendo três não grauteados, três preenchidos com graute feito com solo e três preenchidos com graute feito com concreto. O esquema da fabricação dos prismas encontra-se na Figura 3.10 a seguir.

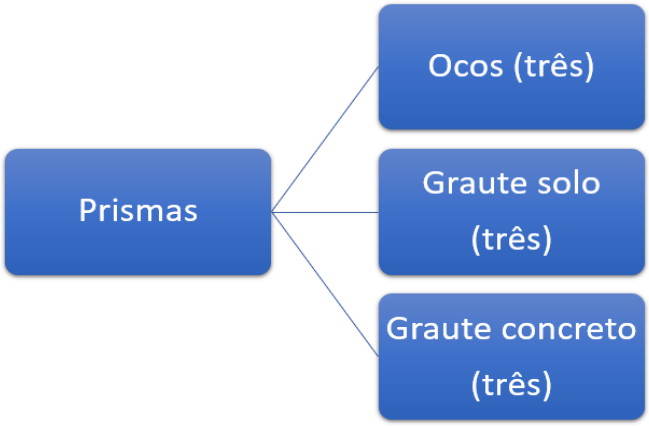

Figura 3.10: Esquema da fabricação dos prismas

A argamassa foi fabricada no traço de 1:5 (cimento e solo). A quantidade de água foi adicionada até obter a consistência de argamassa, de forma que a relação a/c em volume foi 3,0. Optou-se por fabricar a argamassa com solo ao invés de areia, pois considera-se que dessa forma haverá maior compatibilidade dos elementos do conjunto. Deve-se ressaltar que a resistência à compressão e módulo de elasticidade da argamassa

não foram avaliados neste trabalho. Contudo, é possível utilizar como referência os resultados de Lima (2018), apresentado na seção 2.6.

É interessante observar que Lima (2018) também avaliou a resistência à compressão de argamassas feitas com cal, cimento e areia e de argamassas industrializadas e, dentre todas elas, a que apresentou curva de Tensão x Deformação mais próxima do tijolo foi a argamassa feita com solo, mais deformável. As demais apresentaram-se com a rigidez próxima à rigidez de graute.

O grauteamento dos prismas foi realizado com a mesma mistura de graute com solo e de graute com concreto que foram preparadas na fabricação dos cilindros. Os furos dos prismas foram preenchidos em duas camadas e adensados com 12 golpes, da mesma maneira que os cilindros. Todos os prismas permaneceram no mesmo local onde foram fabricados até o dia do ensaio de resistência à compressão.

Observa-se que, no dia da moldagem, a face exposta dos corpos de prova não ficou perfeitamente plana. Então, no dia seguinte, raspou-se a face para que ficasse uniforme. Esse processo acabou retirando um pouco da brita, deixando pequenos buracos que foram preenchidos com nata de cimento, para regularização. Ao final, passou-se uma esponja úmida em movimentos circulares para uniformizar e melhorar o acabamento. Vide Figura 3.12. Todos os prismas foram medidos e pesados, conforme Figura 3.13.

Figura 3.12: Prismas com graute feito com concreto antes e depois da regularização da superfície

Figura 3.13: Pesagem dos prismas

3.4. Ensaio de resistência à compressão dos grautes e prismas

O ensaio de resistência à compressão dos cilindros de graute segue a NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos (2018), que recomenda velocidade de carregamento de 0,45 $\pm$ 0,15Mpa/s. Segundo a norma, a resistência à compressão é calculada segundo a Equação 3.1:

$$f_c = \frac{4 \times F}{\pi \times D^2} \qquad \text{(Equação 3.1)}$$

Sendo:

f_c = a resistência à compressão (Mpa)

F = Força máxima alcançada (N)

D = Diâmetro do cilindro (mm)

Já o ensaio de resistência à compressão dos prismas foi realizado com base nas recomendações da NBR 8492: Tijolo de solo-cimento: análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio (2012). A velocidade de carregamento, segundo a norma, é de 500 N/s. Semelhantemente à equação anterior, a resistência à compressão dos prismas é calculada segundo a Equação 3.2:

$$f_c = \frac{F}{A_b} \quad \text{(Equação 3.2)}$$

Sendo:

$f_c =$ a resistência à compressão (Mpa)

$F =$ Força máxima alcançada (N)

$A_b =$ Área bruta do prisma em contato com a chapa (mm²)

Para ambos os casos o equipamento utilizado foi a máquina Shimadzu LEN 03 com capacidade de 1000 kN. É importante ressaltar que, no caso dos prismas, a área utilizada para o cálculo da resistência deve ser a área bruta efetiva, ou seja, a área que está em contato com a chapa. Para isso, deve-se desconsiderar a espessura das laterais que são rebaixadas.

3.5. Obstáculos

Nesta seção são explicitadas duas situações que dificultaram o desenvolvimento pleno deste trabalho. Primeiramente, esta pesquisa foi realizada durante a pandemia do Coronavírus e, por conta disso, foi necessário replanejar a data do ensaio de resistência à compressão dos prismas e cilindros. Sendo assim, não foi possível realizar o ensaio aos 28 dias a partir da data de confecção dos cilindros e dos prismas, sendo o ensaio realizado aos 54 dias. Acredita-se, contudo, que isso não tenha prejudicado o resultado do ensaio, pois a partir da data dos 28 dias a resistência dos corpos de prova não sofre mudança significativa.

Em segundo lugar, após os ensaios de resistência à compressão, foi verificado que o extensômetro, aparelho que realiza a leitura das deformações, estava com defeito. Ao plotar os dados resultantes da máquina do ensaio, percebeu-se que os valores de deformação estavam apresentando muitas oscilações, como exemplificado na Figura 3.14. Para mitigar este problema, foi feita uma regressão com polinômio de grau 4 ou 5, de modo que fosse traçada uma curva que se aproximasse dos valores centrais dessa flutuação. Sendo assim, os valores dos gráficos de Tensão x Deformação que foram gerados devem ser utilizados com cautela, devido às limitações já explicitadas.

Nota-se que, para que as curvas de regressão fossem mais representativas da realidade, estas foram plotadas somente até o ponto de ruptura. Isso porque, após a ruptura, há uma queda brusca na resistência. Como a curva de regressão busca de

aproximar de todos os pontos, essa queda na resistência estava “arrastando” a curva para baixo, de modo que ela não se aproximasse do ponto de tensão máxima. Assim, ao construir a curva com base nos pontos até o momento da ruptura, a curva se tornou mais representativa do comportamento do elemento ensaiado em sua fase elástica. A Figura 3.15 apresenta o resultado deste ajuste para o gráfico de Tensão x Deformação do prisma não grauteado 3.

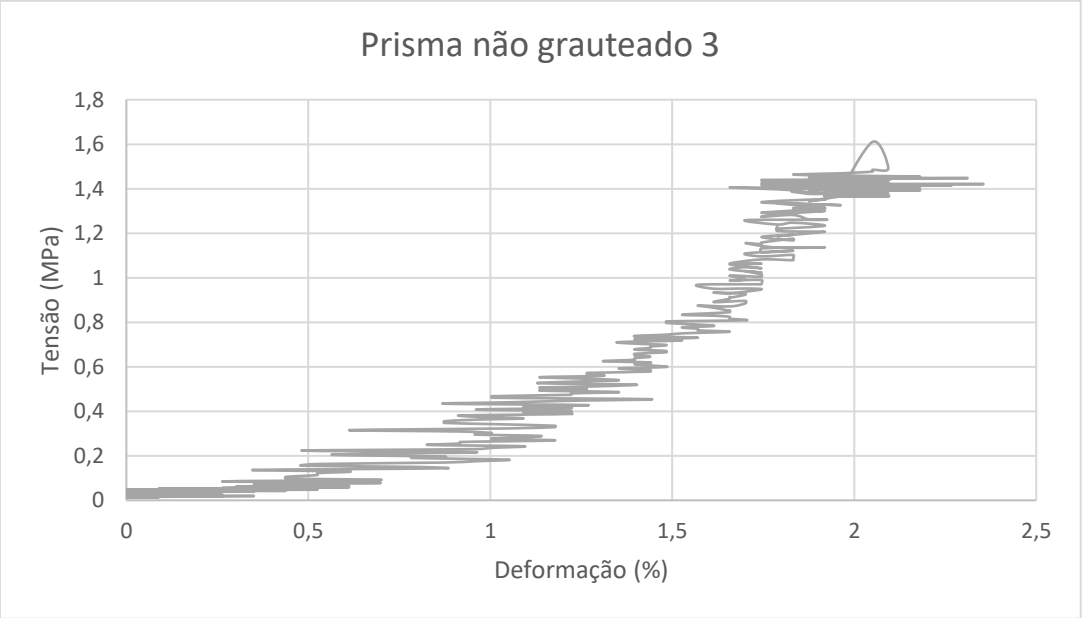

Figura 3.14: Curva Tensão x Deformação com oscilações, em um dos prismas não grauteados, por conta de defeito no extensômetro

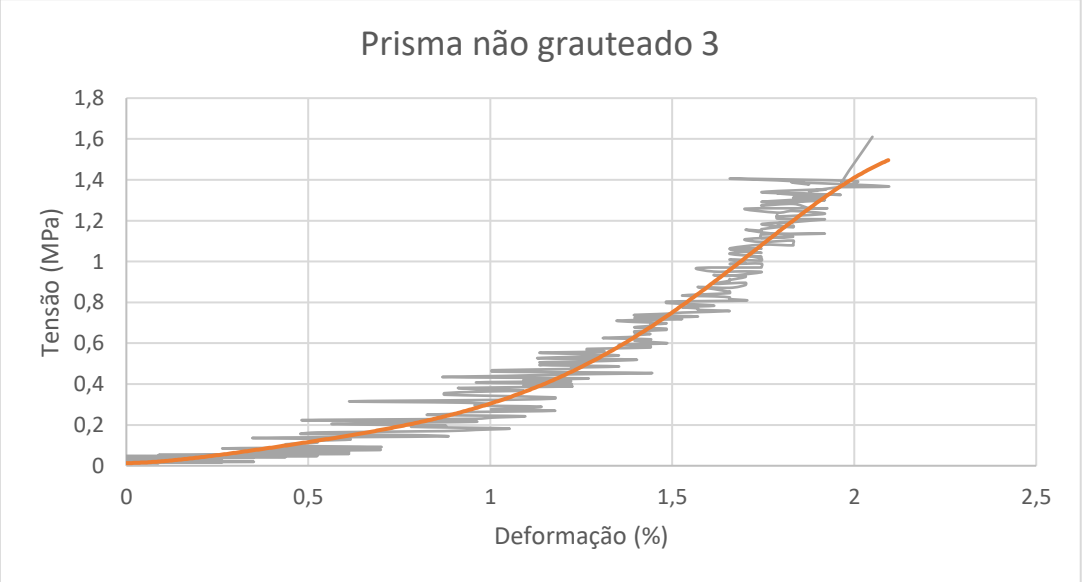

Figura 3.15 – Ajuste realizado por Curva de Regressão para corrigir os efeitos do defeito do extensômetro no gráfico de Tensão x Deformação do prisma não grauteado 3

4. RESULTADOS

4.1. Resistência à compressão do tijolo

Previamente à montagem dos prismas foi realizado pelo Projeto SHS o ensaio de resistência à compressão dos tijolos, do mesmo lote que foi utilizado para a fabricação dos prismas. Deve-se ressaltar que não é o foco do presente trabalho analisar aprofundadamente este ensaio. Os resultados de tensão média de resistência à compressão, de deformação média na ruptura e de módulo de elasticidade são apresentados na Tabela 4.1, com os respectivos desvios-padrão entre parênteses. Foram ensaiados sete tijolos de traço 1:6, ensaiados inundados.

Tabela 4.1: Tensão, deformação e módulo de elasticidade médios do ensaio de resistência à compressão dos tijolos 1:6, inundados. Entre parênteses o desvio padrão.

Tensão Média (MPa)	Deformação na ruptura (%)	Módulo de elasticidade (MPa)
1,25 (0,15)	2,6 (0,35)	53,5 (7,20)

Lima (2018) realizou este mesmo ensaio em tijolos no traço de 1:6 aos 28 dias de cura. Para fins de comparação, são apresentados a seguir o gráfico Tensão x Deformação, na Figura 4.1, e os valores de tensão média, deformação na ruptura e módulo de elasticidade, na Tabela 4.2. Estes dois últimos parâmetros foram obtidos com base nos dados do gráfico de Tensão x Deformação. O módulo de elasticidade foi calculado pela média da inclinação da parte reta de cada curva, que corresponde ao trecho de deformação elástica.

Tabela 4.2: Tensão média, deformação na ruptura e módulo de elasticidade do Tijolo 1:6 de Lima (2018), ensaiado seco aos 28 dias

Tensão Média (MPa)	Deformação na ruptura (%)	Módulo de elasticidade (MPa)
2,19 (0,15)	6,3 (0,95)	47,2 (11,1)

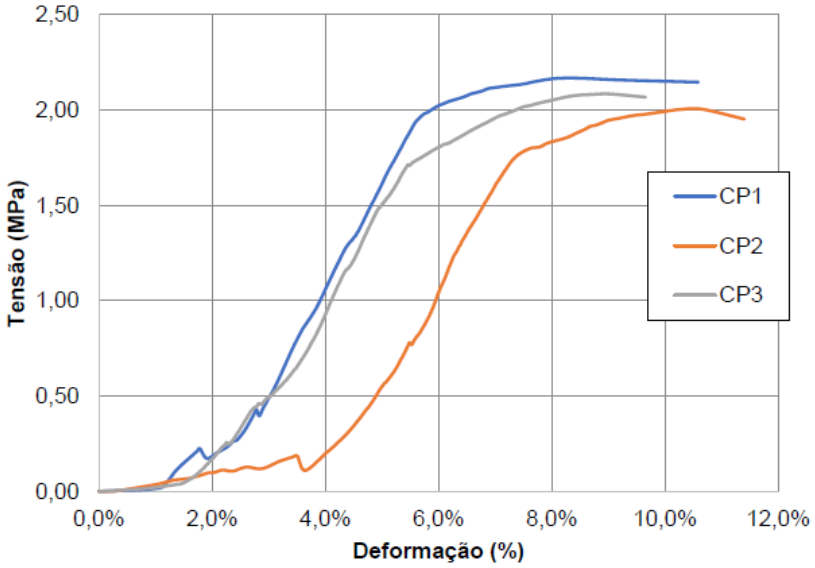

Figura 4.1: Gráfico Tensão x Deformação de tijolo de solo-cimento no traço 1:6 aos 28 dias e ensaiados secos (LIMA, 2018)

Percebe-se que o resultado obtido para os tijolos do presente trabalho (1,25 MPa) apresentou aproximadamente a metade da resistência média obtida por Lima (2018), que foi de 2,19 MPa. Possivelmente essa discrepância se deu devido a diferentes forças de compactação aplicadas no momento da prensagem. Também é possível que a cura dos tijolos tenha sido comprometida, pois notou-se que a região em que os tijolos estavam na câmara não parecia tão úmida quanto outras prateleiras. Além disso, é importante ressaltar que os tijolos de Lima (2018) foram ensaiados secos, já os do presente estudo, inundados, o que certamente contribui para uma redução no valor da resistência obtida.

Outra observação é que, apesar desta diferença entre os valores de resistência à compressão dos dois estudos, o módulo de elasticidade foi aparentemente próximo, o que é esperado, visto que se trata de uma mesma composição de materiais. Porém, ao analisar o valor da deformação na ruptura, percebe-se que houve diferença significativa em relação à deformação do tijolo ensaiado neste estudo e no de Lima (2018). Para o mesmo traço, nota-se que o tijolo ensaiado pelo referido autor apresentou deformação na ruptura cerca de 2,5 vezes a deformação na ruptura do tijolo do presente estudo.

4.2. Resistência à compressão do graute

A Tabela 4.3 abaixo indica os resultados do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos de graute feito com solo e a Tabela 4.4, de graute feito

com concreto. Deve-se lembrar que os corpos de prova 1,2 e 6 de ambos os grautes não passaram pelo processo de cura em câmara úmida. Ainda, é importante ressaltar que todos os corpos de prova de graute foram ensaiados secos.

Tabela 4.3: Ensaio de resistência à compressão de graute com solo

GRAUTE DE SOLO (GS)						
Nº	**Tipo de cura**	**Peso (kg)**	**Comprimento (cm)**	**Diâmetro (cm)**	**Força Máxima (kN)**	**Tensão (Mpa)**
1	Sem	2,56	20,0	9,90	23,6	3,07
2	Sem	2,52	20,0	10,00	20,8	2,65
3	Com	3,02	20,0	9,90	28,6	3,72
4	Com	3,00	20,1	9,80	28,1	3,73
5	Com	3,02	19,9	9,80	31,1	4,12
6	Sem	2,60	20,0	10,00	21,9	2,79

Tabela 4.4: Ensaio de resistência à compressão de graute com concreto

GRAUTE DE CONCRETO (GC)						
Nº	**Tipo de cura**	**Peso (kg)**	**Comprimento (cm)**	**Diâmetro (cm)**	**Força Máxima (kN)**	**Tensão (Mpa)**
1	Sem	3,06	19,3	10,00	29,7	3,78
2	Sem	3,12	19,6	9,90	40	5,20
3	Com	3,34	19,5	10,00	44,3	5,64
4	Com	3,32	19,3	9,80	56,2	7,45
5	Com	3,34	19,1	10,00	60,4	7,69
6	Sem	3,16	19,5	9,90	51,8	6,73

A partir dos dados do ensaio de resistência à compressão, também foram gerados os gráficos de Tensão x Deformação para os corpos de prova de graute. Conforme explicado na seção 4.1, devido ao extensômetro estar com defeito, as variações da deformação foram suavizadas ao realizar uma regressão de polinômio com grau 4 ou 5 após a plotagem dos pontos. Os gráficos apresentam as curvas apenas até o momento da

ruptura, pois a queda súbita na tensão após este evento faz cair a curva. Deste modo, a curva fica mais fiel aos pontos para melhor análise e comparação da deformabilidade dos elementos.

Assim, a Figura 4.2 apresenta o gráfico de Tensão x Deformação dos cilindros de graute com solo e com concreto sem cura, e a Figura 4.3, dos cilindros de graute com solo e com concreto com cura em câmara úmida. Nota-se que os corpos de prova submetidos ao processo de cura foram levados para a mesma câmara úmida na qual foram levados os tijolos.

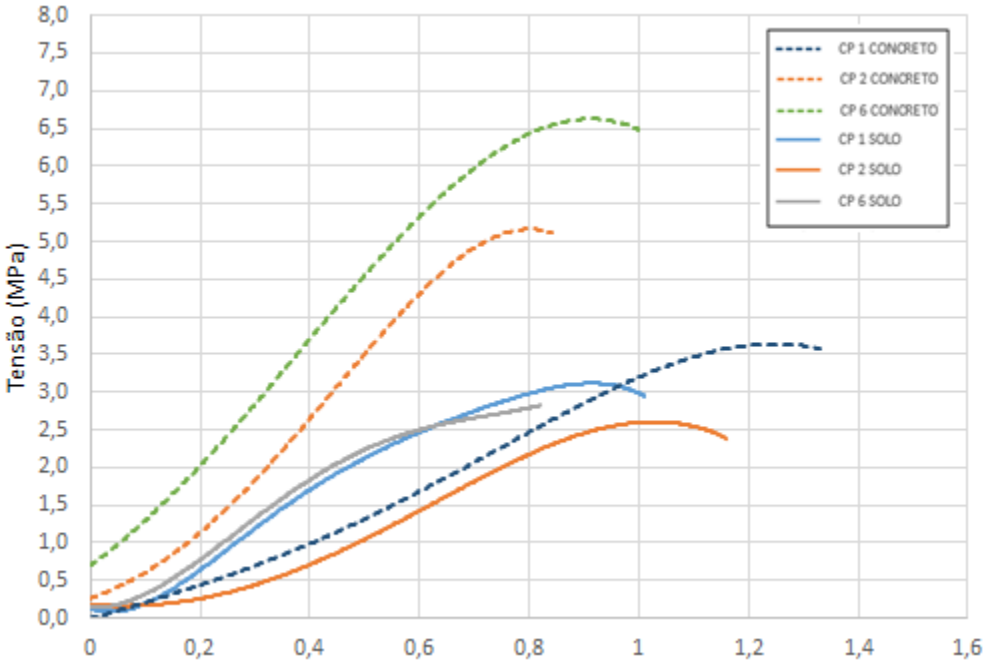

Figura 4.2: Gráfico de Tensão x Deformação dos cilindros de graute de solo e graute de concreto, ambos sem cura

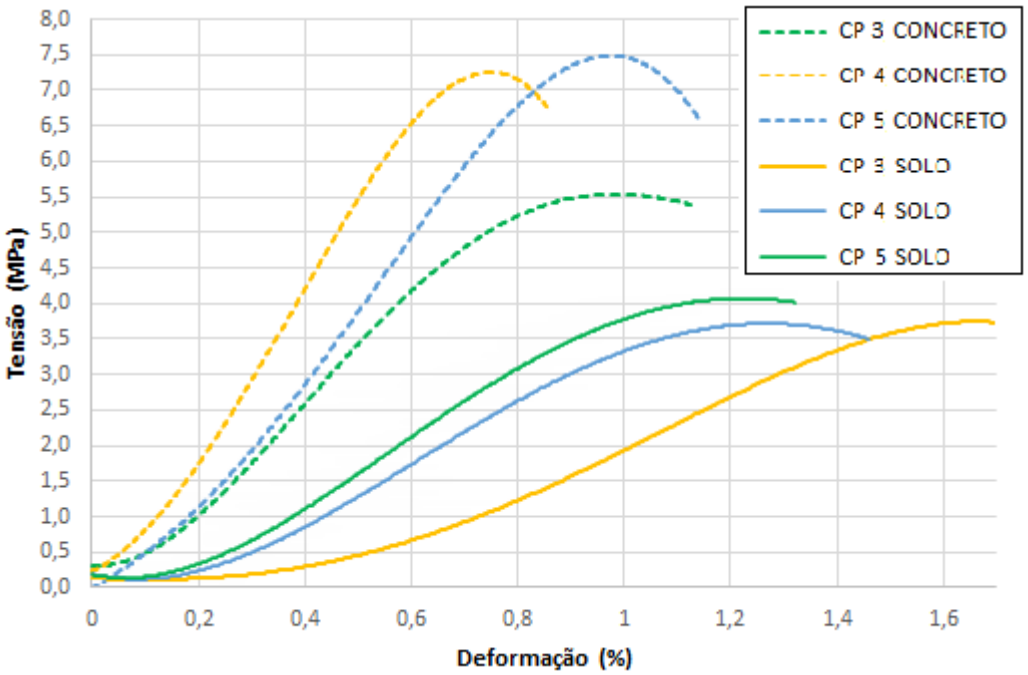

Figura 4.3: Gráfico de Tensão x Deformação dos cilindros de graute de solo e graute de concreto, ambos com cura em câmara úmida

As médias das tensões máximas obtidas e a média dos módulos de elasticidade para cada corpo de prova de ambos os grautes com e sem o processo de cura encontram-se na Tabela 4.5 a seguir. Os módulos de elasticidade foram calculados a partir de dois pontos que definem a inclinação do trecho de deformação elástica (trecho reto) de cada curva.

Tabela 4.5: Média das resistências à compressão e dos módulos de elasticidade dos corpos de prova de graute. Desvio padrão entre parênteses.

CP	**Graute de concreto (Mpa)**		**Graute de solo (Mpa)**	
	Tensão (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)	Tensão (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
Sem cura	5,24 (1,47)	617 (275)	2,83 (0,21)	385 (88,6)
Com cura	6,93 (1,12)	933 (202)	3,85 (0,23)	388 (39,9)

A análise dos resultados permite observar que a média das resistências dos corpos de prova de concreto foi superior à dos corpos de prova de graute feito com solo nas duas ocasiões (com e sem cura). Esse resultado indica que o graute feito com concreto apresenta aproximadamente o dobro da resistência do que o feito com solo, para o mesmo traço. Esta queda na resistência do graute com concreto para o graute com solo se deve

justamente à presença do solo no lugar da areia, uma vez que a relação a/c em volume do graute com solo é ainda menor do graute com areia. Além disso, é válido mencionar que, em ambos os casos, a resistência sem cura é cerca de 75% da resistência com cura.

Com relação ao módulo de elasticidade, deve-se ressaltar que os valores encontrados devem ser utilizados com cautela, por conta das oscilações dos gráficos. Ao analisar estes gráficos, nota-se que o aumento no valor do módulo de elasticidade entre os corpos de prova sem cura e com cura não foi significativo para os cilindros de graute de solo. Já para o graute com concreto, houve aumento no módulo de elasticidade dos corpos de prova com cura. Nota-se, então, que houve diferença na rigidez do graute, tanto ao mudar a composição quanto ao submetê-los ao processo de cura, e, de modo geral, pode-se afirmar que os corpos de prova de graute feito com concreto são mais rígidos do que os de graute feito com solo, mais deformáveis.

Os resultados obtidos para o graute de solo sem cura podem ser comparados aos de Lima (2018), que confeccionou cilindros de graute de solo no mesmo traço, porém com algumas diferenças quanto às condições de preparo e de ensaio. Assim, a Figura 4.4 apresenta o gráfico de Tensão x Deformação do graute de solo do autor e a Tabela 4.6 compara as características dos corpos de prova entre o estudo de Lima (2018) e o presente estudo.

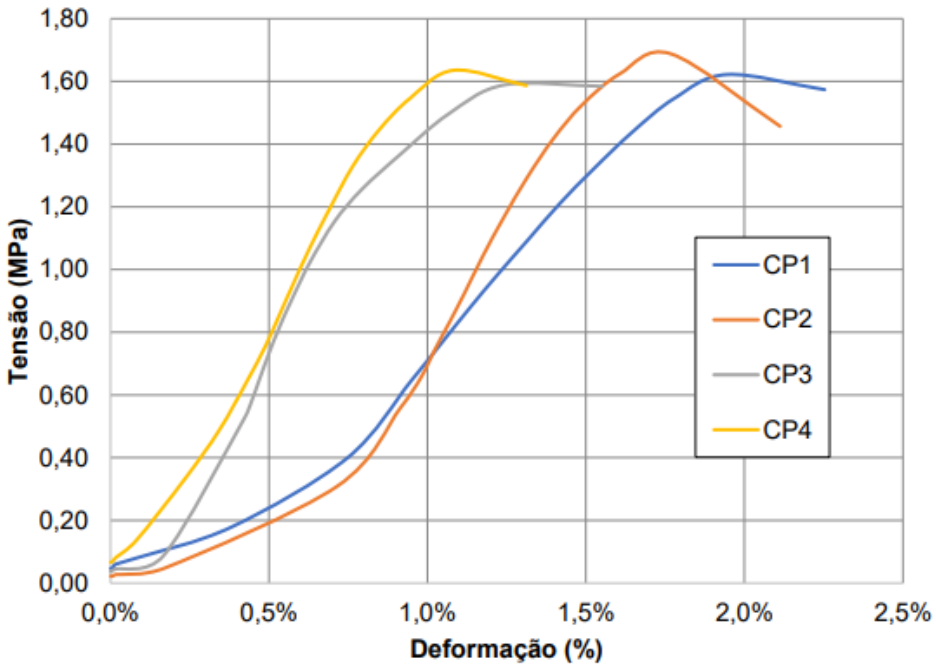

Figura 4.4: Gráfico Tensão x Deformação de graute feito com solo no traço 1:4:2 e relação a/c em volume 2,0 aos 14 dias sem cura (LIMA, 2018)

Tabela 4.6: Comparação do resultado de resistência à compressão de graute feito com solo não submetidos ao processo de cura ao resultado de Lima (2018)

Autor	Traço	Relação a/c	Idade	Dimensões	Estado do corpo de prova no ensaio	Tensão Média
Lima (2018)	1:4:2	2,0	14 dias	5x10cm	Inundado	1,63 MPa
Presente estudo	1:4:2	2,5	54 dias	10x20cm	Seco	2,83 MPa

Nota-se que o graute feito com solo no presente estudo apresentou tensão de resistência cerca de 74% superior ao de Lima (2018), para o mesmo traço. Alguns fatores podem ter colaborado para que os resultados do autor fossem inferiores aos do presente estudo. Primeiro, os corpos de prova de Lima (2018) foram ensaiados aos 14 dias de idade, ou seja, antes de atingirem sua resistência máxima, aos 28 dias. Além disso, os corpos de prova foram ensaiados inundados, o que colabora na redução da resistência máxima. Percebe-se, ainda, que as dimensões dos corpos de prova são diferentes. Lima (2018) utilizou dimensões de 5x10, para estudar a tensão do graute com dimensão próxima à do furo do tijolo, contudo, a norma indica que as dimensões mínimas para o ensaio são de 10x20cm.

4.3. Resistência à compressão do prisma

A Tabela 4.7 abaixo indica os resultados do ensaio de resistência à compressão dos prismas não grauteados e grauteados, bem como a análise dimensional de cada corpo de prova. As tensões referentes à área bruta e à área líquida foram denominadas “tensão bruta” e “tensão líquida”.

Tabela 4.7: Análise dimensional e tensões de resistência à compressão dos prismas

Prismas	**Nº**	**Peso (Kg)**	**Altura**	**Dimensões efetivas (cm)**		**Área bruta (cm^2)**	**Tensão bruta (MPa)**	**Área líquida (cm^2)**	**Tensão líquida (MPa)**
				Comprimento	**Largura**				
Sem graute	1	6,13	13,2	23,3	10,8	251,6	1,53	227,9	1,69
	2	6,33	13,9	23,3	10,9	254,0	1,25	230,2	1,38
	3	6,28	14,0	23,3	10,9	254,0	1,64	230,2	1,81
Graute (solo)	1	8,22	13,5	23,5	10,8	253,8	1,23	253,8	1,23
	2	8,16	13,5	23,3	10,8	251,6	1,58	251,6	1,58

	3	8,34	13,9	23,5	10,7	251,5	1,57	251,5	1,57
Graute (concreto)	1	8,48	13,7	23,4	10,9	255,1	1,51	255,1	1,51
	2	8,28	13,6	23,1	10,9	251,8	1,40	251,8	1,40
	3	8,16	13,6	23,2	10,8	250,6	0,98	250,6	0,98

Observa-se que a tensão referente a área líquida só difere da tensão referente a área bruta para os prismas não grauteados, devido ao desconto da área dos furos. As médias das tensões encontradas para cada grupo de prismas estão na Tabela 4.8 a seguir.

Tabela 4.8: Média das tensões de resistência à compressão dos prismas

Prismas	**Nº**	**Tensão bruta (MPa)**	**Tensão bruta média (MPa)**	**Tensão líquida média (MPa)**
Sem graute	1	1,53	1,47	1,63
	2	1,25		
	3	1,64		
Graute (solo)	1	1,23	1,46	1,46
	2	1,58		
	3	1,57		
Graute (concreto)	1	1,51	1,30	1,30
	2	1,40		
	3	0,98		

As curvas de Tensão x Deformação dos prismas ocos e grauteados encontram-se nas Figuras 5 e 6 a seguir. A Figura 4.5 contém as curvas dos prismas ocos e dos prismas com graute de solo. Já a Figura 4.6, as curvas dos prismas ocos e dos prismas com graute de concreto.

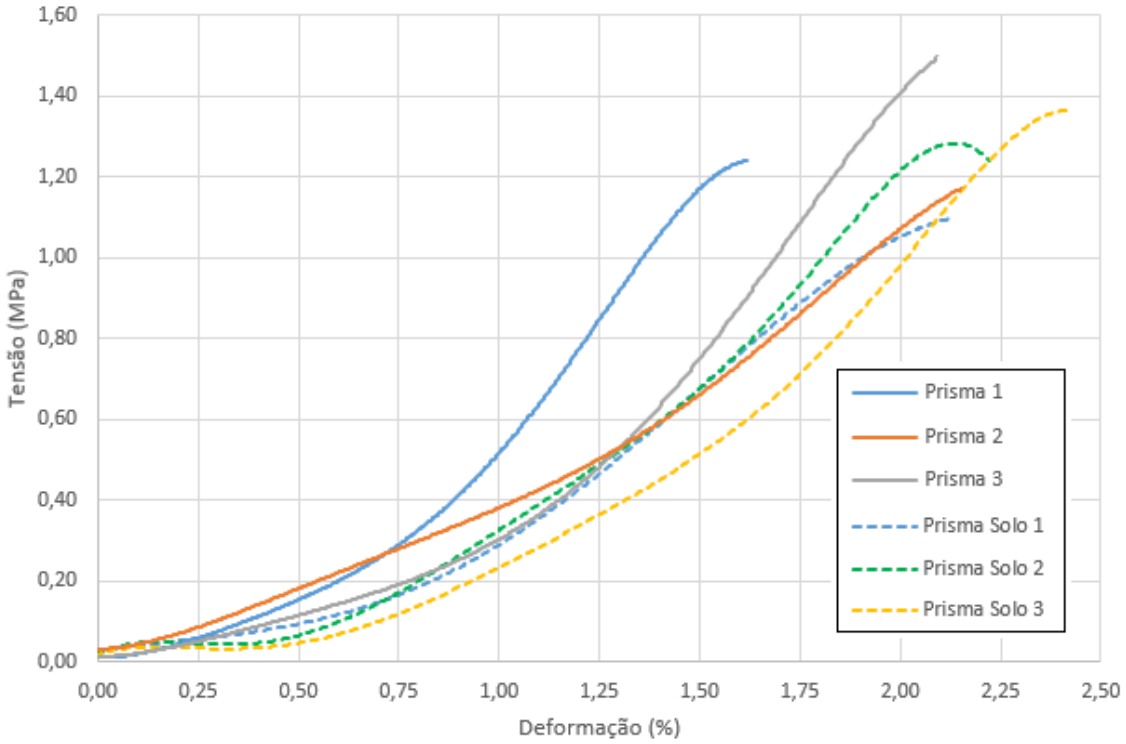

Figura 4.5: Gráfico Tensão x Deformação de prismas ocos e de prismas com graute de solo

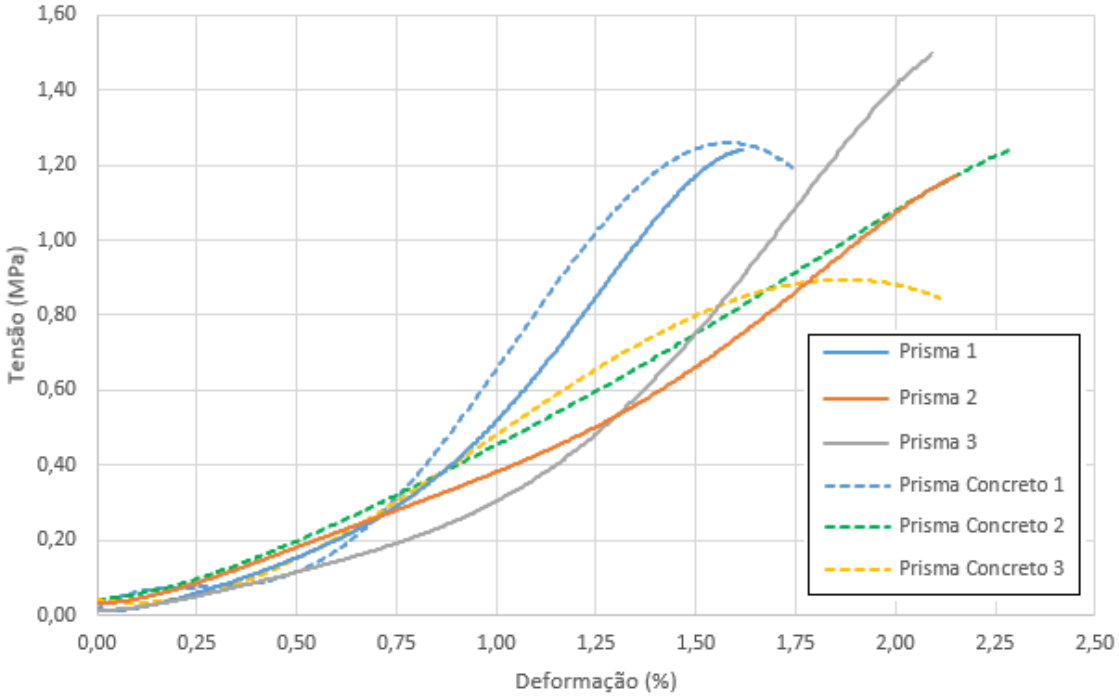

Figura 4.6: Gráfico Tensão x Deformação de prismas ocos e de prismas com graute de solo

A partir da análise dos gráficos, calcula-se o módulo de elasticidade a partir de dois pontos na região de deformação elástica (trecho reto). Os módulos de elasticidade para cada tipo de prisma encontram-se na Tabela 4.9 a seguir:

Tabela 4.9: Média dos módulos de elasticidade dos prismas

Corpo de prova	Módulo de elasticidade (MPa)
Prisma oco	90,0 (25,2)
Prisma solo	73,6 (5,55)
Prisma concreto	87,9 (46,7)

Ao observar as tensões de ruptura dos prismas e seus módulos de elasticidade, percebe-se que não houve diferença significativa entre os grupos de prismas. Para verificar a igualdade das tensões médias encontradas, foi realizada uma análise estatística sobre tais resultados a partir da estatística de teste F, de Fischer. Através de testes de igualdade entre as médias, este método verifica se os fatores produzem mudanças sistemáticas a determinado nível de interesse pelo cálculo do quociente F. Quando este quociente é menor do que o F crítico não há diferença entre os fatores. Já quando o F calculado for maior que o F crítico, há diferença entre os fatores.

O teste F foi realizado a partir da matriz apresentada na Figura 4.7 a seguir:

m

	Sem graute	Graute solo	Graute concreto
CP 1	1,53	1,23	1,51
CP 2	1,25	1,58	1,40
CP 3	1,64	1,57	0,98
Média Parcial	1,47	1,46	1,30
Média Total	1,41		

n

Figura 4.7: Matriz para o Teste F, sendo todos os valores em MPa

A Estatística F é obtida pela Equação 4.1 a seguir:

$$\text{Estatística F} = \frac{\frac{SQE}{m-1}}{\frac{SQD}{m\times(n-1)}} \qquad \text{(Equação 4.1)}$$

Sendo:

SQD = Soma dos Quadrados Dentro de cada grupo de corpo de prova

SQE = Soma dos Quadrados Entre as médias parciais respectivas a cada um dos valores e a média total.

m = número de grupos

n = número de amostras de cada grupo

Assim:

SQD = (1,53 - 1,47)² + (1,25 - 1,47)² + (1,64 - 1,47)² + (1,23 - 1,46)² + (1,58 - 1,46)² + (1,57 - 1,46)² + (1,51 - 1,30)² + (1,40 - 1,30)² + (0,98 - 1,30)² = 0,3144

SQE = (1,47 - 1,41)² + (1,47 - 1,41)² + (1,47 - 1,41)² + (1,46 - 1,41)² + (1,46 - 1,41)² (1,47 - 1,41)² + (1,30 - 1,41)² + (1,30 - 1,41)² + (1,30 - 1,41)² = 0,0578

Pela Equação 4.1:

Estatística F = $\frac{\frac{0,0578}{3-1}}{\frac{0,3144}{3\times(3-1)}} = 0,5518$

Consultou-se a tabela do Teste F para um nível de significância de 5% e, para m = 3 e n = 3, tem-se um Fcrítico de 5,1433. Dessa forma, verificou-se que as tensões obtidas para os três grupos de prismas são, de fato, equivalentes, visto que o valor da Estatística F encontrado é inferior ao Fcrítico correspondente.

Este resultado, a princípio, sugere que o graute, possivelmente, não tenha tido influência na resistência dos prismas. Contudo, este resultado diverge do encontrado por Lima (2018). Conforme já abordado no item 2.6 "Resistência da alvenaria estrutural de solo-cimento", o referido autor realizou ensaio de resistência à compressão em prismas estendidos de dois tijolos de altura e quatro de comprimento, parcialmente grauteados, e obteve aumento da resistência ao aumentar a área grauteada dos prismas.

Os gráficos de Tensão x Deformação do graute e do tijolo, respectivamente, utilizados no ensaio de prisma estendido de Lima (2018), são apresentados nas Figuras 4.8 e 4.9 a seguir. Em seguida, a Tabela 4.10 compara os valores de tensão e de módulo de elasticidade entre o graute e tijolo utilizados no presente estudo e utilizados por Lima (2018) no ensaio de prisma estendido.

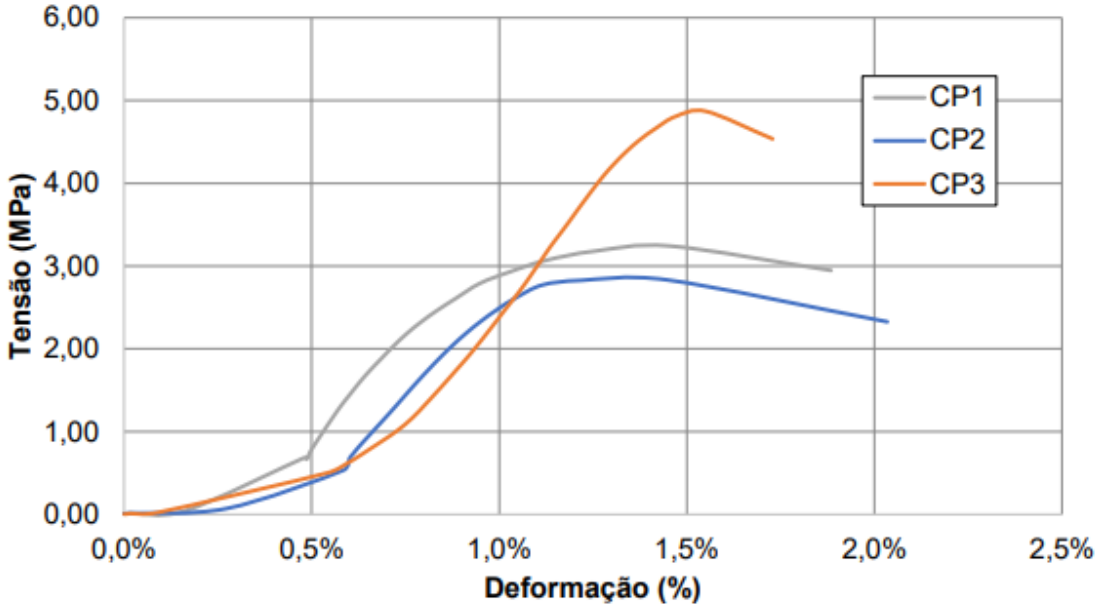

Figura 4.8: Gráfico de Tensão x Deformação de graute 1:3:2 com relação água/cimento em volume 1,0 ensaiados secos

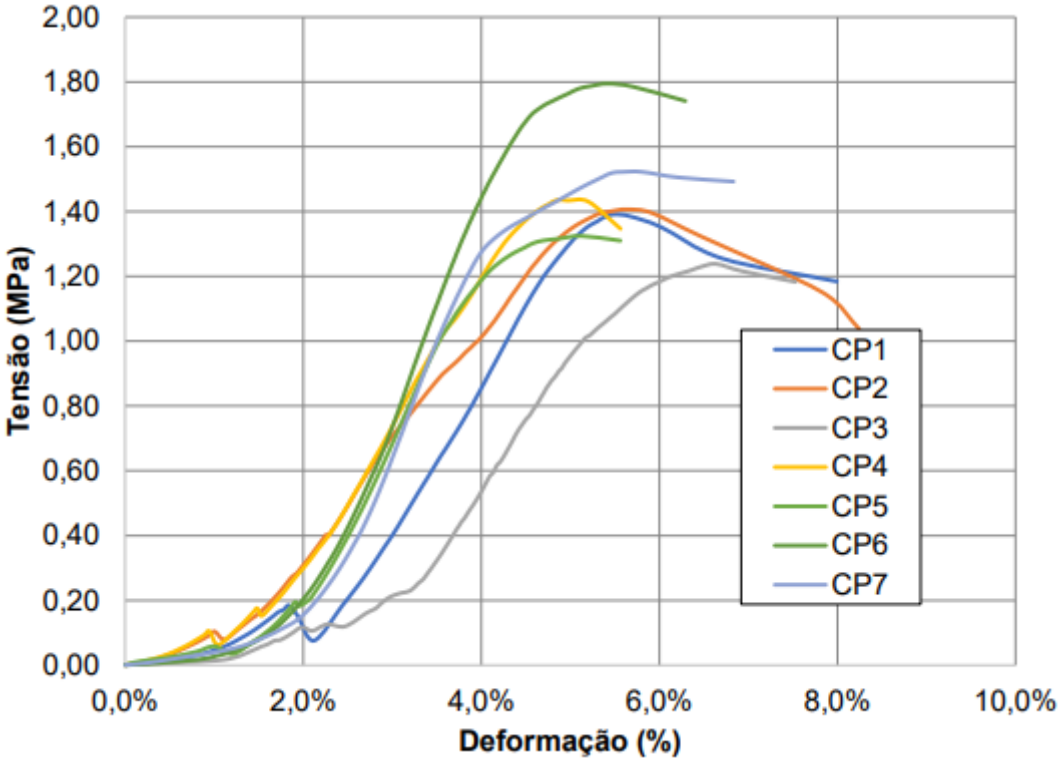

Figura 4.9: Gráfico de Tensão x Deformação de tijolo de solo-cimento 1:10 ensaiados inundados

Tabela 4.10: Tensão e módulo de elasticidade médios dos grautes e tijolos utilizados no ensaio de compressão de prismas do presente estudo e de Lima (2018)

Elemento	Autor	Tensão (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
Tijolo 1:6	Presente estudo	1,25 (0,15)	53,5 (7,20)
Tijolo 1:10	Lima (2018)	1,32 (0,16)	46,8 (9,04)
Graute 1:4:2 concreto a/c 2,5	Presente estudo	5,24 (1,47)	617 (275)
Graute 1:3:2 concreto a/c 1,0	Lima (2018)	3,65 (1,08)	383 (57,7)

No caso, as principais divergências entre o experimento de Lima (2018) e o desta pesquisa são as dimensões dos corpos de prova, a ausência de argamassa de assentamento nos prismas estendidos e a composição do tijolo e do graute utilizados. Em ambos os casos o graute utilizado foi bem mais resistente e rígido do que o tijolo, contudo, esta discrepância foi ainda maior no caso do presente estudo. Apesar disso, este não parece ser o principal motivo que justifique o fato de todos os prismas terem rompido com a mesma resistência à compressão. É possível que esse resultado esteja relacionado, então, à um possível rompimento da argamassa de assentamento ou à questão da dimensão do prisma confeccionado. Uma análise mais aprofundada destas hipóteses será apresentada no item 4.6 “Análises e hipóteses”.

4.4. Resistência à compressão da argamassa

Com relação à argamassa utilizada na confecção dos prismas, deve-se ressaltar que se utilizou como referência o resultado de resistência à compressão de Lima (2018) para argamassa 1:6 com relação a/c em volume 2,5 aos 14 dias de idade. Este resultado apresenta-se na Figura 4.10.

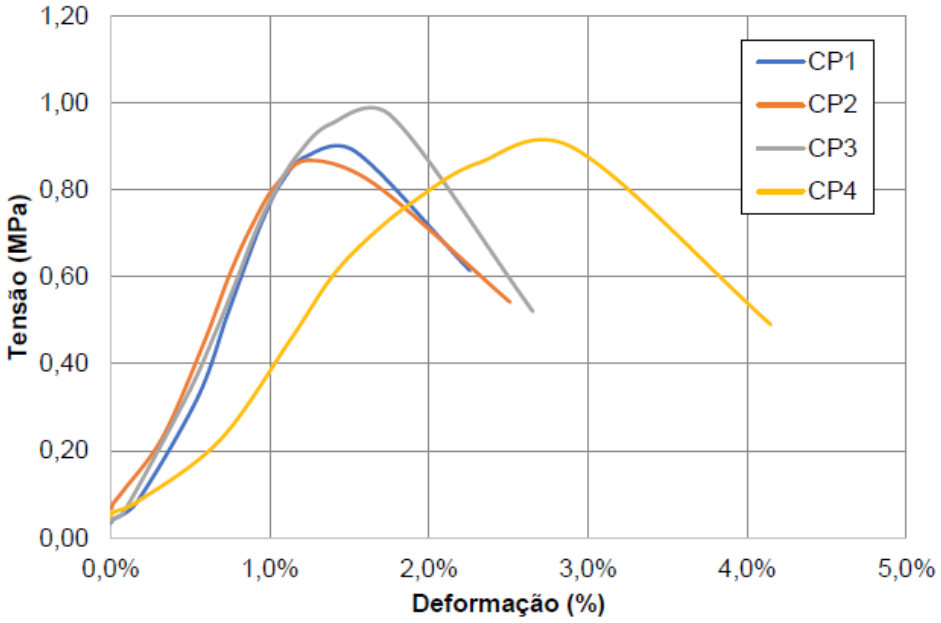

Figura 4.10: Gráfico Tensão x Deformação de argamassa feito com solo no traço 1:6 e relação a/c em volume 2,5 aos 14 dias sem cura (LIMA, 2018)

Para a argamassa de Lima (2018) tem-se um módulo de elasticidade de cerca de 80 MPa e deformação específica média de 1,65% com desvio padrão de 0,66%. Nota-se que o módulo de elasticidade é próximo do módulo de elasticidade obtido para os prismas.

4.5. Forma de ruptura dos prismas

As Figuras 4.11, 4.12 e 4.13 apresentam as fissuras apresentadas pelos prismas ocos, com graute de concreto e com graute de solo, respectivamente.

Figura 4.11: Fissuras no prisma não grauteado

Figura 4.12: Fissura no prisma de graute feito com concreto

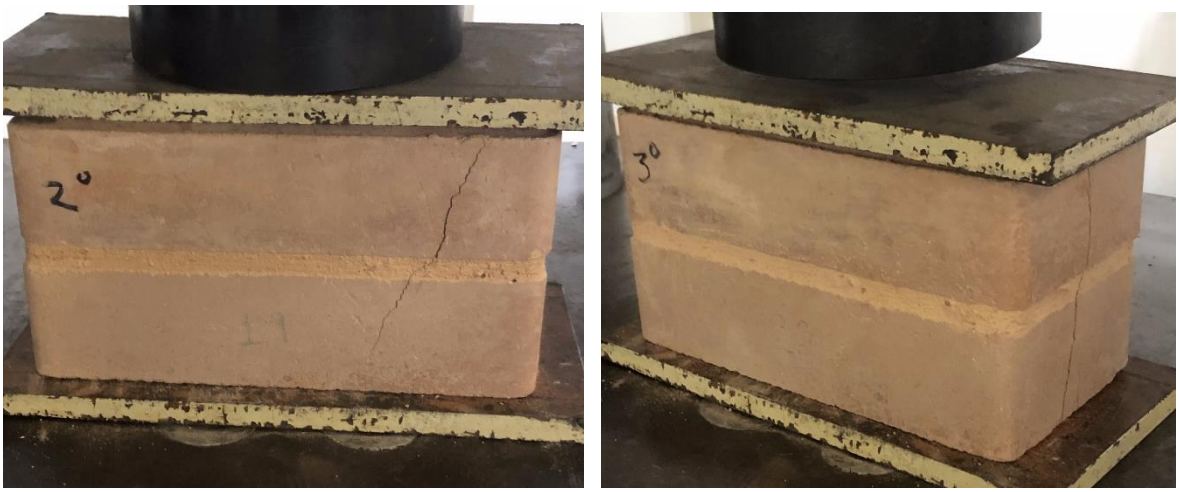

Figura 4.13: Ruptura do prisma de graute feito com solo

Na Figura 4.11, notam-se fissuras na superfície do tijolo superior e na argamassa. As fissuras no tijolo se encontram em torno do rebaixo que há na extremidade, possivelmente efeito do confinamento gerado pelos pratos da prensa. Já a fissura na argamassa pode ser um indicativo de esmagamento ou fendilhamento da mesma.

Na Figura 4.12, nota-se uma fissura vertical que atravessa os dois tijolos do prisma, possivelmente devido à concentração de tensões no entorno deste furo, por conta da expansão do graute. Observa-se, ainda, que há uma fissura na junta de argamassa, indicada na imagem. Mais uma vez, isso pode indicar que a argamassa sofreu ruptura por esmagamento ou fendilhamento.

Na Figura 4.13, notam-se fissuras verticais que atravessam todo o prisma. Na imagem da esquerda, esta fissura está inclinada e, na da direita, a fissura é vertical. Do mesmo modo que no prisma de graute feito com concreto, é possível que tais fissuras sejam decorrentes da expansão do graute.

De modo geral, esperava-se que a concentração de carga no graute, nos prismas grauteados, faria com que este elemento se deformasse, provocando tensões de tração no tijolo e levando-o à ruptura, o que, de fato, parece ter acontecido. Nos estudos de Grohmann (2006), Miranda (2012) e Lino *et al.* (2020) os efeitos da expansão do graute foram mais fortemente evidenciados pelo desplacamento das paredes dos blocos ensaiados. No caso do presente estudo, não foi observado nenhum desplacamento, contudo, o ensaio foi interrompido um pouco depois que os prismas atingiram a carga máxima e não permaneceram recebendo carga. Se fosse o caso, acredita-se que haveria

desplacamento das paredes do tijolo. Apesar disso, as fissuras verticais que atravessam os dois blocos continuam sendo um indicativo de que foram geradas tensões de tração lateral decorrentes da expansão do graute. Já os prismas ocos quase não apresentaram fissuras. As únicas fissuras que surgiram foram nas quinas dos tijolos, na face superior, e também na região da argamassa de assentamento.

4.6. Análises e hipóteses

Conforme observado na seção 4.3, as tensões de resistência à compressão dos prismas ocos e grauteados com graute de solo e de concreto foram equivalentes. A Tabela 4.11 a seguir apresenta o resumo do módulo de elasticidade médio, da deformação média na ruptura e da tensão média dos elementos, já explicitados anteriormente.

Tabela 4.11: Resumo das características mecânicas e elásticas do tijolo, da argamassa, dos grautes e dos prismas (entre parênteses a tensão na área líquida do tijolo)

Elemento	Autor	Módulo de elasticidade (MPa)	Deformação na ruptura	Tensão Média (MPa)	Porcentagem da tensão em relação à tensão líquida do tijolo
Tijolo 1:6	Autor	53,5	2,50%	1,25 (1,48)*	100% (Referência)
Argamassa de solo 1:6	Lima (2018)	80,0	1,50%	0,90	60,8%
Prisma graute solo	Autor	73,6	2,00%	1,30	-
Prisma graute concreto	Autor	87,9	1,75%	1,46	-
Prisma sem graute	Autor	90,0	1,75%	1,47	-
Graute solo (sem cura)	Autor	385	0,90%	2,83	191%
Graute solo (com cura)	Autor	388	1,20%	3,85	260%
Graute concreto (sem cura)	Autor	617	0,90%	5,24	354%
Graute concreto (com cura)	Autor	933	0,90%	6,93	468%

Com relação aos prismas, esperava-se que houvesse maior discrepância entre os resultados, de forma que os prismas grauteados com graute de solo apresentassem tensões de ruptura mais elevadas. A ideia, a princípio, seria que os elementos do prisma (tijolo, graute e argamassa feitos com solo) apresentassem deformações mais próximas por conta da similaridade entre eles e isso faria com que esses elementos trabalhassem de forma monolítica, atuando no ganho de rigidez e resistência.

Dentre todos os elementos, o tijolo apresentou menor módulo de elasticidade. Menor ainda que o da argamassa, que, segundo diversos autores, costuma ser o elemento

mais deformável da alvenaria. Esse fato, a princípio, contraria o pensamento de que o prisma teria rompido por não ter acompanhado as deformações da argamassa, como ocorrido no estudo de Miranda (2012) e de Grohmann (2006), por exemplo, visto que o tijolo se deforma um pouco mais do que a argamassa, para uma mesma tensão. Apesar disso, a recomendação de Ramalho e Correa (2003) quanto à argamassa é que esta apresente resistência à compressão entre 70% e 100% da resistência líquida do bloco, e também que não seja menor do que 30% desta resistência. No caso, conforme mostrado na Tabela 4.10, a argamassa se situa na faixa dos 60% da resistência líquida do tijolo de solo-cimento. Isso, na verdade, não parece ser prejudicial, mas indica apenas que, caso a resistência se situasse nesta faixa ótima de Ramalho e Correa (2003), o resultado provavelmente seria mais satisfatório.

Já com relação ao graute, nota-se que este apresentou resistência à compressão superior à resistência à compressão do tijolo, o que também não é recomendado pela literatura na busca pelo melhor desempenho da alvenaria. O graute feito com solo é aproximadamente três vezes mais resistente do que o tijolo. Já o graute feito com concreto, aproximadamente seis vezes maior. Não só ambos os graute apresentaram tensões mais elevadas do que a do tijolo, como também seus módulos de elasticidade foram muito mais elevados, conforme visto na Tabela 4.10. Isso indica que há certo conflito entre os dois elementos, tanto em relação às características mecânicas quanto elásticas.

Ainda que em situação desfavorável, esperava-se que o grauteamento influenciasse a resistência à compressão do prisma de alguma forma, positivamente ou negativamente. Ao comparar os resultados do tijolo isoladamente e do prisma, em uma primeira análise, nota-se que houve certo ganho de rigidez, pois ultrapassaram a carga de ruptura do tijolo se deformando menos do que este elemento, o que leva a crer que o graute poderia ter sido o agente por trás disso. De fato, o módulo de elasticidade do tijolo para o prisma aumentou. Contudo, como não houve variação significativa de resistência nem de elasticidade entre os dois tipos de prismas grauteados, nem mesmo entre prismas ocos e grauteados, sugere-se que o graute, de fato, não tenha tido influência no conjunto.

Seguindo este raciocínio, foram desenvolvidas quatro hipóteses que pudessem justificar os resultados encontrados nos experimentos desta pesquisa. São eles: ruptura da argamassa, ruptura do graute, retração do graute e dimensão dos corpos de prova.

4.6.1. Ruptura da argamassa

A primeira hipótese seria uma possível ruptura da argamassa, elemento em comum em todos os prismas. Para investigar isso, calcula-se, para cada prisma, qual seria a deformação específica no tijolo e na argamassa na ruptura. Assumindo a hipótese de que o sistema tijolo + argamassa atua como um sistema de molas em série, presume-se que a tensão solicitante no primeiro tijolo é a mesma para a argamassa, assim como para o tijolo inferior, conforme Equação 4.2.

$$\sigma_1 = \sigma_2 \qquad \text{(Equação 4.2)}$$

Sendo:

σ_1 = Tensão de resistência à compressão no tijolo (N)
σ_2 = Tensão de resistência à compressão na argamassa (N)

Sabendo que a tensão é o produto entre módulo de elasticidade e deformação específica, que por sua vez é a razão entre a variação na altura e a altura total do prisma, tem-se as Equações 4.3 e 4.4 a seguir:

$$\sigma = E \times \varepsilon \qquad \text{(Equação 4.3)}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{Htot} \qquad \text{(Equação 4.4)}$$

Sendo:

σ = Tensão de resistência à compressão do material (N)
E = Módulo de elasticidade do material (MPa)
ε = Deformação específica do material (%)
Δh = Variação na altura do material (mm)
H_{tot} = Altura total do material (mm)

Substituindo-se a Equação 4.3 na Equação 4.2, teremos a Equação 4.5, em função de ε_1:

$$\varepsilon_1 = \frac{E_2 \times \varepsilon_2}{E_1} \quad \text{(Equação 4.5)}$$

Pode-se assumir, então, que a variação na altura total do prisma será a variação na altura do tijolo mais a variação na altura da argamassa, conforme Equação 4.6. Nota-se que, apesar do prisma ser constituído por dois tijolos, ambos são feitos do mesmo material e o que importa é o comprimento total deste material no sistema de molas em série.

$$\Delta h_{tot} = \Delta h_1 + \Delta h_2 \quad \text{(Equação 4.6)}$$

Assim, substituindo-se Δh_1 e Δh_2 pela Equação 4.4 e, em seguida, substituir ε_1 pela Equação 4.5, tem-se Equação 4.7.

$$\Delta h_{tot} = \left(\frac{E_2 \times \varepsilon_2}{E_1}\right) \times H_1 + \varepsilon_2 \times H_2 \quad \text{(Equação 4.7)}$$

Por fim, tornando a Equação 4.7 em função de ε_2, tem-se a Equação 4.8, que torna possível obter a deformação na argamassa a partir da variação na deformação total do prisma e dos módulos de elasticidade do tijolo e da argamassa.

$$\varepsilon_2 = \left(\frac{E_1}{E_2 \times H_1 + E_1 \times H_2}\right) \times \Delta h_{tot} \quad \text{(Equação 4.8)}$$

Os módulos de elasticidade da argamassa e do tijolo correspondem a $E_2 = 80\ MPa$ e $E_1 = 53{,}5\ MPa$, respectivamente obtidos a partir do gráfico de Tensão x Deformação da argamassa, por Lima (2018), e dos tijolos utilizados no presente estudo, conforme já explicitado.

A Tabela 4.12 a seguir apresenta os resultados do cálculo da variação na altura dos prismas ($\Delta H_{tot}\ Prisma$), a partir da Equação 4.4, e os valores de deformação específica na argamassa e no tijolo ($\varepsilon_{argamassa}$ e ε_{tijolo}) a partir da Equação 4.8 e 4.5, respectivamente.

Tabela 4.12: Deformação total dos prismas e deformações específicas na argamassa e no tijolo, para cada prisma

Prismas	**Nº**	**Htot (mm) Prisma**	**εtot Prisma**	**ΔHtot (mm) Prisma**	**ε2 Argamassa**	**ε1 Tijolo**
Sem graute	1	132	1,50%	1,98	1,03%	1,54%
	2	139	2,00%	2,78	1,37%	2,05%
	3	140	2,00%	2,80	1,37%	2,05%
Graute (solo)	1	135	2,00%	2,70	1,37%	2,05%
	2	135	2,20%	2,97	1,51%	2,26%
	3	139	2,25%	3,13	1,54%	2,30%
Graute (concreto)	1	137	1,50%	2,06	1,03%	1,54%
	2	136	2,25%	3,06	1,54%	2,31%
	3	136	1,75%	2,38	1,20%	1,79%

A partir das deformações específicas do tijolo e da argamassa, é possível verificar, nos gráficos de Tensão x Deformação de cada elemento, se a tensão correspondente é maior ou menor do que a tensão de ruptura. A Tabela 4.13 apresenta as deformações específicas médias da argamassa e do tijolo para cada grupo de prismas, bem como o desvio padrão.

Tabela 4.13: Deformações específicas na argamassa e no tijolo para cada prisma

Prismas	**Nº**	**Deformação específica argamassa**	**Deformação específica média**	**Desvio Padrão**	**Deformação específica tijolo**	**Deformação específica média**	**Desvio Padrão**
Sem graute	1	1,03%	1,26%	0,20%	1,54%	1,88%	0,29%
	2	1,37%			2,05%		
	3	1,37%			2,05%		
Graute (solo)	1	1,37%	1,47%	0,09%	2,05%	2,20%	0,13%
	2	1,51%			2,26%		
	3	1,54%			2,30%		
Graute (concreto)	1	1,03%	1,26%	0,26%	1,54%	1,88%	0,39%
	2	1,54%			2,31%		
	3	1,20%			1,79%		

Ao analisar os dados da Tabela 4.13, percebe-se que, em quase todos os casos, a deformação específica da argamassa é superior à deformação de ruptura da argamassa de Lima (2018), vide Figura 4.10, que corresponde a 1,2%. Levando-se em consideração o desvio padrão, tem-se que, em todos os casos, a argamassa teria alcançado sua ruptura. Nota-se, ainda, que o tijolo também apresentou deformações de ruptura próximas, porém

inferiores, à deformação correspondente à tensão de ruptura do material, indicando que também é possível que o rompimento do tijolo tenha causado a ruptura dos prismas. Porém, como não houve sinais mais evidentes de esmagamento do tijolo, é mais provável que a argamassa tenha rompido antes que o tijolo alcançasse seu limite de resistência, sendo a principal causa do colapso dos prismas.

4.6.2. Ruptura do Graute

A segunda hipótese está relacionada à ruptura e/ou à deformação do graute no interior dos prismas. É uma possibilidade que o graute tenha alcançado sua ruptura. Isso porque os cilindros de graute apresentaram deformação na ruptura de cerca de 1,0%, já os prismas, cerca de 1,75%. Para estas deformações, a princípio, o graute poderia ter rompido e se deformado ainda mais, levando os tijolos a apresentar as fissuras verticais e a romperem por fendilhamento. Essa hipótese só é coerente pelo fato de que o conjunto tijolo + argamassa e o graute funcionam como um sistema de molas em paralelo, ou seja, as deformações totais e específicas são as mesmas, pois a altura da coluna de graute é a mesma altura do prisma. Sendo assim, é possível comparar as deformações específicas entre um conjunto e outro. Só não é possível garantir que o graute teria rompido por este motivo, pois nos prismas o graute se encontra mais confinado do que quando é ensaiado isoladamente, então pode haver certa variação no comportamento do elemento.

De qualquer modo, tendo em vista que os prismas não grauteados também apresentaram tensões de ruptura e módulo de elasticidade próximos ao dos prismas grauteados, é improvável que a ruptura e expansão do graute tenham condicionado a ruptura em todos os casos, apesar de ser a possível causa das fissuras dos prismas grauteados.

4.6.3. Retração do Graute

A terceira hipótese para a compreensão dos resultados obtidos é com relação ao processo de endurecimento do graute. É possível que tenha ocorrido uma retração do graute no interior dos prismas durante o processo de endurecimento, de modo que ocorresse um descolamento do graute da superfície lateral do furo, fazendo com que o tijolo tenha absorvido a maior parte da carga aplicada e, por isso, as tensões resultantes foram tão próximas em todos os casos. Nesse caso, a retração do graute pode ter sido intensificada pelo fato de que foi utilizado um alta relação a/c em volume. Para o graute

com solo e com concreto, ambos no traço 1:4:2, foi utilizado uma relação a/c em volume de 2,5 e 3, respectivamente. Já Lima (2018) utilizou, para este mesmo traço de graute com solo, uma relação a/c em volume de 2,0. Além disso, possivelmente, um graute mais fluido se deformaria mais, gerando tensões de tração no tijolo, o que colabora para o surgimento de fissuras no tijolo.

4.6.4. Dimensão dos corpos de prova

A quarta e última hipótese está relacionada à dimensão dos corpos de prova ensaiados em comparação com a escala real das paredes. Lino *et al.* (2020), ao realizar ensaio de resistência à compressão em prismas com grautes de diferentes resistências, também não observou discrepância na tensão máxima obtida nos prismas, tanto em prismas de dois blocos quanto de três blocos. Já Miranda (2012), não encontrou discrepância entre as tensões máximas obtidas para prismas ocos e prismas grauteados. Porém, ambos autores observaram variação nos valores de tensão ao realizar os ensaios em pequenas paredes. Sendo assim, apesar de ser recomendado por norma o ensaio em prismas para avaliar a resistência da alvenaria, é razoável supor que nem sempre a influência do graute na alvenaria seja evidenciada em corpos de prova muito menores do que a alvenaria em escala real, conforme concluído por Miranda (2012).

Seguindo o raciocínio desta hipótese, é possível comparar os resultados do presente estudo aos de Lima (2018), que realizou ensaio de resistência à compressão em prismas estendidos, constituídos de dois tijolos de solo-cimento de altura e quatro de comprimento. Foram ensaiadas três séries de prisma estendido: sem grauteamento, com grauteamento a cada 1,0m e com grauteamento a cada 0,50m, sendo o graute feito com concreto. A partir da análise das resistências obtidas, obteve-se um aumento da resistência do conjunto conforme aumentava-se a quantidade de furos grauteados.

Nota-se que, ainda que a literatura não recomende o uso de grautes mais rígidos que o tijolo na literatura, Lima (2018) confeccionou prismas estendidos com graute de resistência 3,65 MPa na data do ensaio, aos 7 dias, aproximadamente 2,5 vezes mais resistente que o tijolo no traço 1:10 utilizado, de resistência média 1,32 MPa. Além disso, não foi utilizada argamassa de assentamento, apenas uma camada de capeamento na face superior dos prismas e uma fina camada de nata de cimento entre as duas fiadas. Camadas de argamassa menores do que 1,0 cm e grautes de resistência muito superior ao do tijolo são dois pontos que, segundo a literatura, desfavorecem a resistência à compressão do

conjunto. Ainda assim, o aumento dos furos grauteados gerou resultado satisfatório, de forma que a resistência a compressão do prisma aumentou, ainda que pouco, conforme o aumento da porcentagem de área grauteada. Ou seja, diferentemente do presente trabalho, Lima (2018) obteve discrepância entre as tensões obtidas para prismas grauteados e não grauteados, ainda que em situação desfavorável.

Supõe-se, então, que um dos motivos pelos quais Lima (2018) obteve tal resultado e o presente estudo não, seja porque o referido autor utilizou corpos de prova mais próximos da escala real do que os prismas confeccionados no presente estudo. Além disso, a presença da camada de capeamento também pode ter colaborado, pois a camada de capeamento não só favorece a distribuição das cargas entre os elementos do conjunto, como também oferece certas condições de confinamento da face superior do prisma, evitando fissuras verticais por expansão do graute.

5. CONCLUSÃO

5.1. Considerações finais

Esta pesquisa avaliou a resistência em alvenaria estrutural de solo-cimento ao receber grauteamento com diferentes composições e resistências, a partir do ensaio de resistência à compressão em prismas grauteados e não grauteados.

Em primeiro lugar, como em uma situação real as colunas grauteadas não passam pelo processo de cura, foram ensaiadas à compressão as duas composições de graute, feito com solo e feito com concreto, tanto com cura quanto sem cura em câmara úmida. Para ambas as composições, obteve-se que os grautes sem cura apresentaram cerca de 75% da resistência do graute com cura. Essa relação é importante para estimar a resistência das colunas grauteadas por meio de ensaio normatizado. Contudo, recomenda-se repetir este ensaio em uma amostra maior, para verificar se esta relação se mantém.

Em segundo lugar, neste estudo não foi observado diferença entre a resistência dos prismas grauteados e não grauteados, o que levou a entender que o graute não teve influência na resistência à compressão do conjunto. Os resultados obtidos foram fundamentais para que haja reavaliação da composição dos elementos da alvenaria e das dimensões dos corpos de prova a serem submetidos ao ensaio, na busca por melhor desempenho da alvenaria na resistência à compressão.

Acredita-se que todas quatro hipóteses abordadas na seção 4.6 sejam válidas, mas que, tendo em vista o cálculo da deformação específica na argamassa de cada prisma, é bem provável que a principal causa de todos os prismas terem apresentado a mesma tensão de ruptura tenha sido por conta da ruptura da argamassa, conforme a hipótese 1.

Além disso, tendo em vista que os autores Miranda (2012) e Lino *et al.* (2020) não obtiveram diferença na resistência entre prismas ocos e grauteados, ou entre prismas preenchidos com grautes de diferentes resistências, mas encontraram essa diferença ao ensaiar pequenas paredes, é possível que prismas nestas dimensões nem sempre sejam a melhor forma de se avaliar o ganho de resistência devido ao grauteamento nas alvenarias estruturais. Complementarmente, a norma NBR 16868-3 (2020) recomenda a confecção de prismas feitos com duas unidades sobrepostas, quando se tratando de blocos cerâmicos, e quatro unidades sobrepostas, com três juntas de assentamento, em se tratando de tijolos.

Conclui-se, então, que muito provavelmente ocorreu uma combinação da hipótese 1 com a hipótese 4, de forma que a ruptura da argamassa teria justificado o fato de os prismas terem rompido com a mesma tensão, e que a dimensão dos prismas, muito distante da escala real de uma parede, teria influenciado o fato de o grauteamento não ter apresentado influência na resistência do conjunto. Neste caso, acredita-se que o uso de argamassa um pouco mais resistente e a confecção de prismas maiores, ou mesmo de pequenas paredes, resultaria em resultados mais satisfatórios, revelando a influência das diferentes composições de graute no ganho de resistência da alvenaria de solo-cimento.

Além destas hipóteses, é importante levar em consideração que a falta de capeamento no caso dos prismas pode ter tido influência nestes resultados, pois qualquer irregularidade na face pode se tornar uma região de concentração de tensões. Neste estudo, foi considerado que, conforme concluído por Lima (2018), a substituição do capeamento por uma raspagem manual da face seria suficiente para a regularização das faces, mas dificilmente este procedimento garantiria o mesmo acabamento que o capeamento realizado nos corpos de prova cilíndricos por exemplo.

Nestas conclusões, é importante levar em consideração que, pelo fato de não haver normas que tratem o tijolo de solo cimento como alvenaria estrutural, as análises e considerações deste estudo tiveram como principal base ensaios em alvenarias de blocos cerâmicos e blocos de concreto, abundantemente presentes na literatura. Contudo, realizar analogias entre tijolos de solo-cimento e blocos de outras composições é desafiador, pois as características muito diferentes podem gerar comportamentos mecânicos e elásticos completamente distintos. A própria comparação do comportamento entre alvenarias de blocos cerâmicos pode ser dificultada simplesmente pela enorme variedade de geometrias dos blocos, o que por si só já tem influência no resultado final. Do mesmo modo, blocos vazados de concreto podem apresentarem paredes maciças ou paredes alveolares, por exemplo.

Sendo assim, é necessário realizar uma quantidade muito maior de ensaios para verificar a veracidade destas conclusões. Apesar deste desafio, acredita-se que este estudo tem grande relevância no tema, não só por ser uma fonte de dados sobre o comportamento de alvenarias de tijolos de solo-cimento, mas também por dar direcionamento e rumo para as próximas análises em estudos futuros.

Outra consideração a ser feita é que, a princípio, os tijolos de solo-cimento, tanto deste estudo quanto do estudo de Lima (2018) apresentam baixa resistência para serem utilizados em alvenaria estrutural. Segundo a NBR 15270-2 (2017), a resistência mínima

para blocos cerâmicos estruturais é de 3 MPa, em relação a área bruta. Porém, acredita-se que, pelo fato de o tijolo de solo-cimento ser mais próximo de um tijolo maciço, é possível que sejam admitidas tensões inferiores a este valor, mas é necessário ter uma referência normativa para confirmar esta hipótese.

Por fim, este estudo cumpriu seu objetivo ao avaliar, a partir dos ensaios realizados, uma aplicação estrutural dentro dos limites do material de solo-cimento.

5.2. Recomendações para estudos futuros

Para trabalhos futuros, sugere-se repetir o ensaio de resistência à compressão em prismas de tijolos de solo-cimento grauteados, contudo, recomenda-se a confecção de prismas mais altos, com quatro tijolos de altura, segundo recomendação da NBR 16868-3 (2020). Dessa forma atenua-se o efeito do confinamento gerado pelos pratos da prensa, que faz aumentar a resistência à compressão do prisma. Recomenda-se a regularização das faces superiores dos prismas com capeamento.

Além disso, realizar o ensaio em paredes e/ou pequenas paredes grauteadas, para calcular o fator de eficiência tanto em relação aos tijolos em si quanto em relação aos prismas, para aprimorar a estimativa da resistência das alvenarias estruturais.

Sugere-se, ainda, que sejam ensaiados corpos de prova com diferentes grautes e argamassas, tanto feitos com solo quanto com concreto, para ampliar o campo de dados e a análise sobre a influência destes elementos na alvenaria. Para isso, buscar compatibilizar as características elásticas dos elementos. Optar por grautes mais flexíveis, visto que apresentaram rigidez muito maior que a do tijolo no presente estudo. Optar, também, por argamassas com módulo de elasticidade mais próximo possível ao do tijolo, para melhor distribuição das tensões.

Recomenda-se, por fim, realizar tais ensaios também em paredes, pequenas paredes e prismas armados, avaliando e comparando o efeito da inserção do aço no comportamento do conjunto e o desempenho da aderência entre aço e graute.

REFERÊNCIAS

ABIKO, A. K., 1980, **Tecnologias apropriadas: Tijolos e paredes monolíticas de solo-cimento**. Dissertação (Mestrado)- Universidade de São Paulo, São Paulo.

ALMEIDA, G. S; GALONI, A, B; MOREIRA NETO, J. C. E *et. al*. Solo-cimento como alternativa para sustentabilidade e economia na construção de residências populares. **Revista Científica Semana Acadêmica**, N°000193, Mai. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____ **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos (2018). Rio de Janeiro, 2015.

_____ **NBR 6136**: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria — Requisitos. Rio de Janeiro, 2016.

_____ **NBR 7480**: Barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado - Especificação. Rio de Janeiro, 2007.

_____ **NBR 8492:** Tijolo de solo-cimento - Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

_____ **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 13281**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

_____ **NBR 15270-1**: Componentes cerâmicos —Blocos e tijolos para alvenaria - Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2017.

_____ **NBR 15270-2**: Componentes cerâmicos —Blocos e tijolos para alvenaria - Parte 2: Métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2017.

_____ **NBR 15812-1**: Alvenaria estrutural — Blocos cerâmicos - Parte 1: Projetos. Rio de Janeiro, 2010.

_____ **NBR 15812-2**: Alvenaria estrutural — Blocos cerâmicos - Parte 2: Execução e controle de obras. Rio de Janeiro, 2010.

_____ **NBR 15812-3**: Alvenaria estrutural — Blocos cerâmicos - Parte 3: Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

_____ **NBR 15961-1**: Alvenaria estrutural — Blocos de concreto - Parte 1: Projeto. Rio de Janeiro, 2011.

_____ **NBR 15961-2**: Alvenaria estrutural — Blocos de concreto - Parte 2: Execução e controle de obras. Rio de Janeiro, 2011.

_____ **NBR 16868-1**: Alvenaria estrutural - Projeto. Rio de Janeiro, 2020.

_____ **NBR 16868-3**: Alvenaria estrutural – Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2020.

CHEEMA, T. S. e KLINGNER R. E. Compressive strength of concrete masonry prism. **American Concrete Institute Journal**, 1986. January/February, p. 88-97.

CUNHA, E. H., 2001, **Análise experimental do comportamento de prismas grauteados em alvenaria estrutural.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Goiás.

FRANCIS, J.A. *et al.* The effect of joint thickness and other factors on the compressive strength of brickwork. **International conference on masonry structural systems**, Universidade do Texas, publicação n9 5, Austin, 1967.

FUSCO, P. B., **Técnica de armar as estruturas de concreto**, São Paulo, Ed. Pini, 1995.

GOMES, N. S., 1983, **A resistência das paredes de alvenaria**, Tese de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

GARCIA, P. D., 2000, **Contribuições do estudo de resistência à compressão de paredes de alvenaria de blocos cerâmicos,** Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos, São Paulo, Brasil.

GROHMANN, L. Z., 2006, **Análise do comportamento de prismas grauteados de alvenaria estrutural cerâmica**, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.

KHALAF, F. M. Factors influencing compressive strength of concrete masonry prisms. **Magazine of Concrete Research**. June, 1996, v48, nº 175, p. 95-101.

KHALIFA, M. A; MAGZOUB, A. E. Compressive strength of masonry prisms. In: 12th **Congress of the structures**. EUA, 1994. Proceeding. p 1100-1005.

LA ROVERE, H.; RODRIGUES, R. M. Análise do Comportamento Mecânico de Prismas de Alvenaria de Blocos de Concreto Pelo MEF. In: **XXVIII Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural**, 1997, São Carlos. Anais - **Estruturas e Fundações**, 1997. v.1. p. 179-188.

LIMA, D. A. S. M. F., 2018, **Avaliação do tijolo modular de solo-cimento fabricado em prensa manual como material para construção de baixo custo com mão de obra comunitária.** Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em engenharia civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

LINO, R. A; IZQUIERDO, O. S; IZQUIERDO, I, S; CORREA, M. R. S., Influência do graute na resistência à compressão da alvenaria estrutural de blocos cerâmicos. **A Aplicação do Conhecimento Científico na Engenharia Civil**, V. 2, Capítulo 16, Mar. 2020.

MATA, R. C., 2006, **Influência do padrão de argamassamento na resistência à compressão de prismas e mini-paredes de alvenaria estrutural de blocos de concreto**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

MENDES, R. J. K., 1998, **Resistência à compressão de alvenaria de blocos cerâmicos estruturais**, Tese de Mestrado, Pós-graduação em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil.

MIRANDA, L, A, 2012, **Estudo do efeito do não preenchimento das juntas verticais e eficiência do graute na resistência da alvenaria estrutural de blocos cerâmicos**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em engenharia civil) – Universidade de São Carlos, São Paulo, Brasil.

MOHAMAD, G**., Construções em Alvenaria Estrutural: materiais, projeto e desempenho,** Editora Blucher, 2015, 368p.

MONK JUNIOR, C. B., A Historical Survey Analysis of the Compressive Strength of Brick Masonry. **Structural Clay Products Research Fondation**, 1967.

MOTTA, J. C. S. S; MORAIS, P. W. P; ROCHA, G. N. *et al.* (2014). Tijolo De Solo-Cimento: Análise Das Características Físicas E Viabilidade Econômica De Técnicas Construtivas Sustentáveis. **Revista Exacta**, v. 7, n. 1, p. 13-26. Editora UniBH. Disponível em: <www.unibh.br/revistas/exacta/>.

NASCIMENTO, M. R., 2015, **O uso de argamassa de assentamento como preenchimento de alvenaria estrutural cerâmica**, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, Brasil.

RAMALHO, M. A.; CORRÊA, M. R. S. **Projeto de Edifícios de Alvenaria Estrutural**. São Paulo, Ed. Pini, 2003.

REIS, P. F. O., 2010, **Análise Numérica da Influência dos Segmentos Grauteados na Interação entre Paredes de Alvenaria Estrutural de Blocos de Concreto.** Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Construção Civil) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Goiás. Goiânia, Goiás.

ROMAGNA, R. H., 2000, **Resistência à compressão de prismas de blocos de concreto grauteados e não grauteados**, Tese de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, Brasil.

ROMAN, H. R; MUTTI, C. N. ARAÚJO, H. N., **Construindo em Alvenaria Estrutural**. Florianópolis: Ed. Da UFSC, 1999, 84p.

SANTOS, M. J. F, 2008, **Análise da resistência de prismas e pequenas paredes de alvenaria estrutural cerâmica para diferentes tipos de argamassas**, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.

SOARES, M. M. M., 2011, **Especificação, execução e controle de alvenaria estrutural em blocos cerâmicos de acordo com a NBR 15812.** Dissertação de Mestrado, Universidade de São Carlos, São Paulo, Brasil.

TAUIL, C. A; NESE, F.J.M. **Alvenaria estrutural – Metodologia de projeto, Detalhes, Mão de obra, Normas e ensaios**. São Paulo, Ed. Pini, 2010, 188p.

TENÓRIO, M. C. U. ,2019, **Análise Da Viabilidade Técnica Da Alvenaria Estrutural Em Tijolos De Solo-Cimento Para Situações Com Cargas Sísmicas: Práticas Construtivas E Análise Estrutural Do Projeto De Solução Habitacional Simples (SHS)**, Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.