



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ANÁLISE DE RESISTÊNCIA DA ALVENARIA ESTRUTURAL DE
BLOCOS DE TERRA CRUA COM ABERTURA DE JANELA**

FELIPE ALVES DIONÍSIO

JOÃO PESSOA - PB

2015

FELIPE ALVES DIONÍSIO

**ANÁLISE DE RESISTÊNCIA DA ALVENARIA ESTRUTURAL DE
BLOCOS DE TERRA CRUA COM ABERTURA DE JANELA**

Monografia apresentada à Universidade Federal da Paraíba como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Givanildo Alves de Azeredo

JOÃO PESSOA - PB

2015

D592a Dionísio , Felipe Alves

Análise de resistência da alvenaria estrutural de blocos de terra crua com abertura de janela./ Felipe Alves Dionísio./ - João Pessoa, 2015.

61f. il.:

Orientador: Prof Dr Givanildo Alves de Azeredo

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

1. Alvenaria estrutural 2. Paredes com abertura. Fissuras. Bloco de terra comprimida 3. Resistência à compressão axial.
I .Título.

BS/CT/UFPB

CDU: 624.012.2 (043)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que é o centro de minha vida e o sentido de tudo, por ter guiado meus passos com muito zelo, ter me dado forças nos momentos difíceis e ter me conduzido a conclusão de mais uma etapa importante.

Aos meus pais, Washington Dionísio Sobrinho e Rossana Maria Alves da Silva, por acreditarem na minha capacidade de chegar até aqui, por terem me dado todo o suporte e incentivo e, principalmente, pelo amor incondicional com que me criaram e me presenteiam até hoje.

À minha irmã, Fernanda Alves Dionísio, por todo companheirismo ao longo de nossas vidas, por todas as brigas e desavenças, pelo respeito aos meus momentos de estudo e pelos laços sanguíneos que nos une.

A toda minha família, em especial minha saudosa avó Esmeralda da Silva, por sempre oferecer a Deus suas orações à mim e por ter guiado toda minha família na fé cristã.

Ao meu professor orientador, Givanildo Alves de Azeredo, por toda atenção, paciência, por acreditar no meu potencial como bom aluno, pelos seus ensinamentos e conhecimentos transmitidos com muita sabedoria.

A todos os meus amigos e colegas de curso, por cada dúvida compartilhada, por cada momento de estudo e aprendizado. Juntos, crescemos como profissionais.

Aos meus amigos na fé da Casa de Evangelização Monsenhor Aloísio Catão, por serem reflexo de Deus em minha vida e por sempre me proporcionarem momentos de alegria e descontração.

FOLHA DE JULGAMENTO

FELIPE ALVES DIONÍSIO

ANÁLISE DE RESISTÊNCIA DA ALVENARIA ESTRUTURAL DE BLOCOS DE TERRA CRUA COM ABERTURA DE JANELA

Trabalho de conclusão de curso defendido em 26/02/2015 perante a seguinte Banca Julgadora:

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

Professor Normando Perazzo Barbosa
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

Professor Roberto Leal Pimentel
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

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

RESUMO

Atualmente, com a necessidade de se construir edificações cada vez mais rápidas, de forma segura, durável e sustentável, a alvenaria estrutural de blocos de terra crua vem ganhando destaque enquanto técnica construtiva alternativa. A resistência dos blocos de terra compactados (BTC) está diretamente relacionada à capacidade resistente dos painéis de alvenaria, quando submetidos à compressão axial simples. Este ensaio foi realizado conforme determinações das normas brasileiras, em escala real. Baseado nisto, o presente trabalho visa analisar a resistência, o grau de fissuração e o modo de ruptura de uma parede com abertura de janela. Através do ensaio de três painéis de alvenaria, tem-se como objetivo verificar a influência do número de fiadas acima da verga e a rigidez que isto proporciona à parede. Os resultados obtidos do ensaio de compressão axial simples foram comparados com a análise de tensão crítica de ruptura, obtida por carregamentos atuantes em uma parede com função estrutural. As tensões foram analisadas através de gráficos carga x deslocamento e as formas de ruptura dos painéis são descritas.

Palavras-chave: Alvenaria Estrutural. Parede com Abertura. Fissuras. Blocos de Terra Comprimida. Resistência à compressão axial.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resultados do ensaio da Parede 1.....	39
Tabela 2. Resultados do ensaio na Parede 2.....	43
Tabela 3. Resultados do ensaio na Parede 3.....	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Pirâmides de Guizé.....	11
Figura 2. Farol de Alexandria	12
Figura 3. Coliseu.....	12
Figura 4. Catedral de Reims.....	13
Figura 5. Edifício Monadnock	13
Figura 6. Central Parque da Lapa	14
Figura 7. Tipos de blocos cerâmicos e de concreto	16
Figura 8. Comparação entre as resistências do bloco, da argamassa e do prisma.....	17
Figura 9. Blocos BTC tipo Mattone.....	18
Figura 10. Blocos BTC tipo convencional.....	19
Figura 11. Efeitos mecânicos que podem atuar em uma parede de alvenaria.....	23
Figura 12. Fissuras verticais causadas por sobrecarga vertical distribuída.....	24
Figura 13. Fissuras horizontais.....	25
Figura 14. Fissuras causadas por carga concentrada.....	25
Figura 15. Fissuras causadas por sobrecarga vertical uniforme em paredes com aberturas.....	26
Figura 16. Micro-modelagem numérica detalhada para alvenaria estrutural (Lourenço 1996).....	26
Figura 17. Modos de ruptura referentes à micro-modelagem detalhada, proposta por Lourenço (1996).....	27
Figura 18. Bloco BTC utilizado, tipo Mattone.....	28
Figura 19. Prensa tipo Mattone.....	29
Figura 20. Pórtico para ensaio de compressão, localizado no LABEME.....	30
Figura 21. Célula de carga de compressão.....	31
Figura 22. Defletômetros já instrumentados para o ensaio.....	31
Figura 23. Data Logger utilizado no ensaio.....	32
Figura 24. Blocos em processo de cura.....	33
Figura 25. Produção da argamassa de terra.....	33
Figura 26. Esquemas para a construção das Paredes 1, 2 e 3, respectivamente.....	34
Figura 27. Construção das primeiras fiadas do painel.....	35
Figura 28. Prumo e retinidade sendo verificados, respectivamente.....	35
Figura 29. Concretagem da contra-verga.....	36
Figura 30. Instrumentação das Paredes 1, 2 e 3, respectivamente.....	38
Figura 31. Primeira fissura observada na Parede 1, na face posterior.....	40
Figura 32. Fissuras observadas na Parede 1, região abaixo da contra-verga, nas faces frontal e posterior, respectivamente.....	41
Figura 33. Ruptura da Parede 1.....	42
Figura 34. Gráfico carga x deflexão para os defletômetros D1, D2 e D3.....	42
Figura 35. Gráfico carga x deflexão para o defletômetro D4.....	43
Figura 36. Primeira fissura observada na Parede 2.....	45
Figura 37. Fissuras observadas na região superior da Parede 2.....	45
Figura 38. Ruptura da Parede 2.....	46
Figura 39. Gráfico carga x deflexão para os defletômetros D1, D2 e D3.....	47
Figura 40. Gráfico carga x deflexão para o defletômetro D4.....	47
Figura 41. Primeira fissura na Parede 3.....	49
Figura 42. Fissuras de cisalhamento na Parede 3.....	50
Figura 43. Ruptura da Parede 3.....	50
Figura 44. Gráficos carga x deslocamento para os defletômetros D1, D2 e D3.....	51
Figura 45. Gráfico carga x deslocamento para o defletômetro D4.....	51
Figura 46. Croqui de uma edificação com três pavimentos.....	53
Figura 47. Esquema estrutural de viga biapoiada, representando as reações da laje de piso.....	54
Figura 48. Esquema estrutural de viga biapoiada, representando as reações da laje de cobertura.....	54
Figura 49. Esquema estrutural de viga biapoiada, representando as reações da cobertura de madeira.....	55
Figura 50. Croqui de edificação com quatro pavimentos.....	56

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	9
1.2. OBJETIVOS	10
1.3. JUSTIFICATIVA.....	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1. BREVE HISTÓRICO	11
2.2. A ALVENARIA NO BRASIL	14
2.3. A ALVENARIA ESTRUTURAL CONVENCIONAL	14
2.3.1. UNIDADE	15
2.3.2. ARGAMASSA.....	16
2.3.3. GRAUTE	17
2.3.4. ARMADURA	17
2.4. A ALVENARIA DE TIJOLOS PRENSADOS DE TERRA CRUA ESTABILIZADOS COM CIMENTO (BTC).....	18
2.5. FATORES QUE AFETAM A RESISTÊNCIA DA ALVENARIA	21
2.5.1. RESISTÊNCIA DAS UNIDADES	21
2.5.2. RESISTÊNCIA DA ARGAMASSA.....	21
2.5.3. QUALIDADE DA MÃO-DE-OBRA	21
2.5.4. GEOMETRIA DOS ELEMENTOS.....	22
2.6. COMPORTAMENTO MECÂNICO DA ALVENARIA.....	22
2.7. FISSURAÇÃO NAS ALVENARIAS	23
2.7.1. TIPOS DE FISSURAS EM ALVENARIA SUBMETIDAS A SOBRECARGAS DE COMPRESSÃO.....	24
2.7.2. ASPECTOS RELATIVOS À RUPTURA	26
3. METODOLOGIA	28
3.1. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	28
3.1.1. TIJOLO PRENSADO DE TERRA CRUA (BTC).....	28
3.1.2. PRENSA HIDRÁULICA.....	30
3.1.3. CÉLULA DE CARGA.....	30
3.1.4. DEFLETÔMETROS	31
3.1.5. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	31
3.2. MÉTODOS DE PRODUÇÃO.....	32
3.2.1. PRODUÇÃO DOS BLOCOS DE TERRA COMPACTADOS (BTC).....	32
3.2.2. PRODUÇÃO DA ARGAMASSA	33
3.2.3. PRODUÇÃO DOS PAINÉIS DE ALVENARIA	34
3.3. INSTRUMENTAÇÃO DO ENSAIO.....	36
4. RESULTADOS.....	39
4.1. ENSAIO DA PAREDE 1	39
4.2. ENSAIO DA PAREDE 2	43

4.3. ENSAIO DA PAREDE 3	48
4.3.1.1. DETERMINAÇÃO DA TENSÃO MÉDIA DE RUPTURA DOS PAINÉIS	52
4.4. CÁLCULO DA TENSÃO CRÍTICA DE RUPTURA NAS ALVENARIAS	52
4.4.1. TENSÃO CRÍTICA PARA UMA EDIFICAÇÃO DE TRÊS PAVIMENTOS	53
4.4.2. TENSÃO CRÍTICA PARA UMA EDIFICAÇÃO DE QUATRO PAVIMENTOS	56
5. CONCLUSÃO	58
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A alvenaria estrutural é um sistema construtivo em que a parede é o elemento portante, ou seja, ela é responsável por absorver e distribuir as cargas da edificação, exercendo todas as funções estruturais. Sendo assim, nesse sistema, é dispensado o uso de elementos convencionais como vigas e pilares. Vale ressaltar que nem toda parede de alvenaria, neste sistema, é portante.

Ao longo dos últimos anos, com o crescimento urbano desordenado atrelado à necessidade de uma urbanização das comunidades nas grandes cidades, a alvenaria estrutural vem se expandindo. Isto se deve ao fato desse sistema proporcionar uma maior economia e uma maior agilidade na construção de conjuntos habitacionais populares. Porém, não só a este ramo da construção civil se limita sua adoção. A alvenaria estrutural também é muito utilizada em edifícios residenciais de padrão médio, hotéis, prédios comerciais etc.

O emprego da alvenaria estrutural proporciona algumas várias vantagens, dentre as quais são destacadas as seguintes:

- Maior produtividade da mão de obra;
- Redução no uso de formas, de concreto e de aço;
- Redução nos desperdícios de material;
- Menor diversidade de materiais empregados etc.

Segundo Ramalho (2003), de uma forma geral, a principal vantagem da utilização da alvenaria estrutural, em relação às estruturas convencionais de concreto armado, reside numa maior racionalidade do sistema executivo, reduzindo-se o consumo de materiais e desperdícios.

Sua principal desvantagem é a impossibilidade de adaptações arquitetônicas que não foram previstas anteriormente. Também é um aspecto negativo a necessidade de uma mão de obra bem especializada e a interferência de projetos.

1.2. OBJETIVOS

A presente pesquisa tem como objetivo analisar o comportamento mecânico-estrutural dos painéis de alvenaria com abertura de janela, quando submetidos a carregamento uniformemente distribuído axial de compressão.

Como objetivos específicos, podem ser considerados:

- Verificação da ocorrência e grau de fissuração por estágio de carregamento;
- Obtenção de força e modo de ruptura;
- Uso dos resultados acima obtidos no desenvolvimento de análises numéricas;
- Verificação da perda de rigidez conforme espessura dos lintéis acima da verga.

1.3. JUSTIFICATIVA

Com o aumento do interesse por esse novo sistema construtivo, devido às vantagens econômicas e à otimização do tempo de execução, se faz necessário um maior investimento em pesquisas na área para se tomar conhecimento das características da alvenaria estrutural.

O presente estudo avalia a capacidade de suporte às cargas de um painel de parede de BTC. A ocorrência de fissuras muitas vezes se dá pelo fato desta capacidade ser atingida. Por isso, esse trabalho visa uma análise da resistência à fissuração da parede, bem como seu modo de ruptura, quando se há aberturas de janela.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. BREVE HISTÓRICO

A alvenaria é um sistema construtivo bastante tradicional e difundido ao longo de milhares de anos. Segundo Ramalho (2003), tem sido utilizado desde o início das atividades humanas para determinados fins. Com blocos de pedra, argila, calcário, e diversos outros materiais, esse sistema se mostrou bastante eficiente no que se refere à durabilidade. Muitas construções ainda estão em bom estado de conservação até o presente dia, conforme se pode observar nos exemplos da Antiguidade citados a seguir:

- a. **Pirâmides de Guizé:** são três grandes pirâmides construídas em blocos de pedra, por volta de 2600 a.C., através da colocação de uns sobre os outros. Segundo Ramalho (2003), cada bloco pesa aproximadamente 25 kN.



Figura 1. Pirâmides de Guizé

Fonte: <http://egipto.travelguia.net/las-piramides-de-giza.html>

- b. **Farol de Alexandria:** construído por volta de 280 a.C., em uma das ilhas de Alexandria, é o mais antigo farol de orientação, com 134 metros de altura.



Figura 2. Farol de Alexandria

Fonte: <http://www.infoescola.com/grecia-antiga/farol-de-alexandria/>

- c. **Coliseu:** constituído de pórticos formados por arcos e pilares, é um anfiteatro erguido em Roma por volta de 70 d.C., com mais de 500 metros de diâmetro e aproximadamente 50 metros de altura.



Figura 3. Coliseu

Fonte: http://www.piercedhearts.org/treasures/holy_sites/coliseum.htm

Na Idade Média, a alvenaria era utilizada na construção das grandes catedrais e castelos, dentre as quais se destaca a catedral de Reims. Esta última possui grandes vãos que foram vencidos apenas com estruturas comprimidas, através de arcos e pilares esbeltos.



Figura 4. Catedral de Reims

Fonte: <http://www.fotonostra.com/albums/europa/reims.htm>

No fim do século XIX, a alvenaria era um dos principais materiais de construção. A partir daí, foram iniciadas algumas pesquisas experimentais em tijolos a fim de obter informações técnicas, pois até então, as edificações eram erguidas baseadas nos conhecimentos adquiridos ao longo dos séculos. Uma obra que exemplifica bem esse período é o edifício Monadnock (1891), em Chicago. Com 65 metros de altura, foi considerado ousado e desafiador, no que diz respeito aos limites dimensionais possíveis para a alvenaria estrutural na época.



Figura 5. Edifício Monadnock

Fonte: <http://www.blueprintchicago.org/2010/07/07/the-monadnock-building/>

Com o surgimento do concreto armado, no início do século XX, a alvenaria sofreu um grande recuo enquanto sistema estrutural. Porém, em 1948, foi publicada a primeira norma

inglesa para o cálculo de alvenaria de tijolos (CP – 111), o que impulsionou novamente a construção de edifícios relativamente altos na Europa, de forma racionalizada.

2.2. A ALVENARIA NO BRASIL

Desde a chegada dos portugueses em terras brasileiras, no século XVI, a alvenaria é utilizada nas construções.

A partir da metade do século XX, a alvenaria estrutural moderna e racionalizada começou a ter seu uso estimulado no Brasil, através de incentivos e cursos oferecidos pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), que divulgavam seus blocos estruturais de concreto. Em 1966, São Paulo, foram erguidos os primeiros edifícios que adotaram esse sistema, como o Central Parque da Lapa.

Apesar do pouco investimento em termos de pesquisas e da chegada tardia no país, a alvenaria estrutural vem se firmando como uma alternativa econômica e eficiente para a construção de edificações comerciais e industriais, principalmente aquelas de baixo padrão.



Figura 6. Central Parque da Lapa

Fonte: <http://www.comunidadeconstrucao.com.br/banco-obras/1/alvenaria-estrutural>

2.3. A ALVENARIA ESTRUTURAL CONVENCIONAL

Os principais componentes da alvenaria estrutural são: as unidades (blocos ou tijolos), a argamassa e, eventualmente, o graute e as armaduras. Estes dois últimos são utilizados para

reforçar as paredes, cintas, vergas, entre outros elementos construtivos da alvenaria. Sendo assim, é um sistema composto formado pela interação de materiais.

2.3.1. UNIDADE

As unidades são os principais componentes da alvenaria estrutural, pois são elas que determinam a capacidade resistiva do sistema, bem como toda a sua modulação. Podem ser classificadas em: maciças e vazadas. De acordo com Ramalho (2003), as unidades maciças, tijolos, são aquelas que possuem até no máximo 25% de sua área total formada por vazios, já as vazadas, blocos, têm mais de 25% de sua área total composta por vazios.

A adoção do tipo de bloco ou tijolo varia de acordo com as necessidades de utilização, sejam elas arquitetônicas ou estruturais, de cada empreendimento. No Brasil, as unidades mais utilizadas são os blocos de concreto, os blocos cerâmicos e os blocos sílico-calcários.

Blocos de Concreto



Bloco inteiro



1/2 Bloco

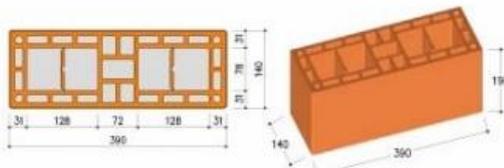


Bloco Canaleta

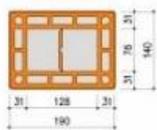


Bloco Jota

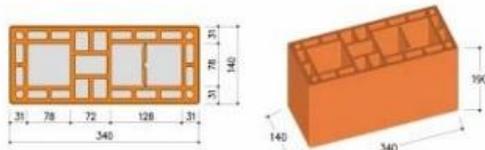
Blocos Cerâmicos



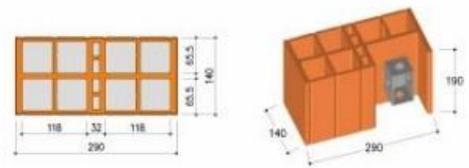
Bloco inteiro



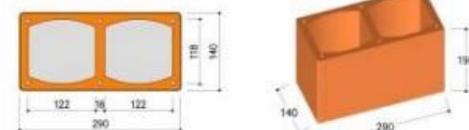
1/2 Bloco



Bloco Especial 14x34



Bloco Elétrico



Bloco Hidráulico



Bloco Hidráulico com passagem de duto externo

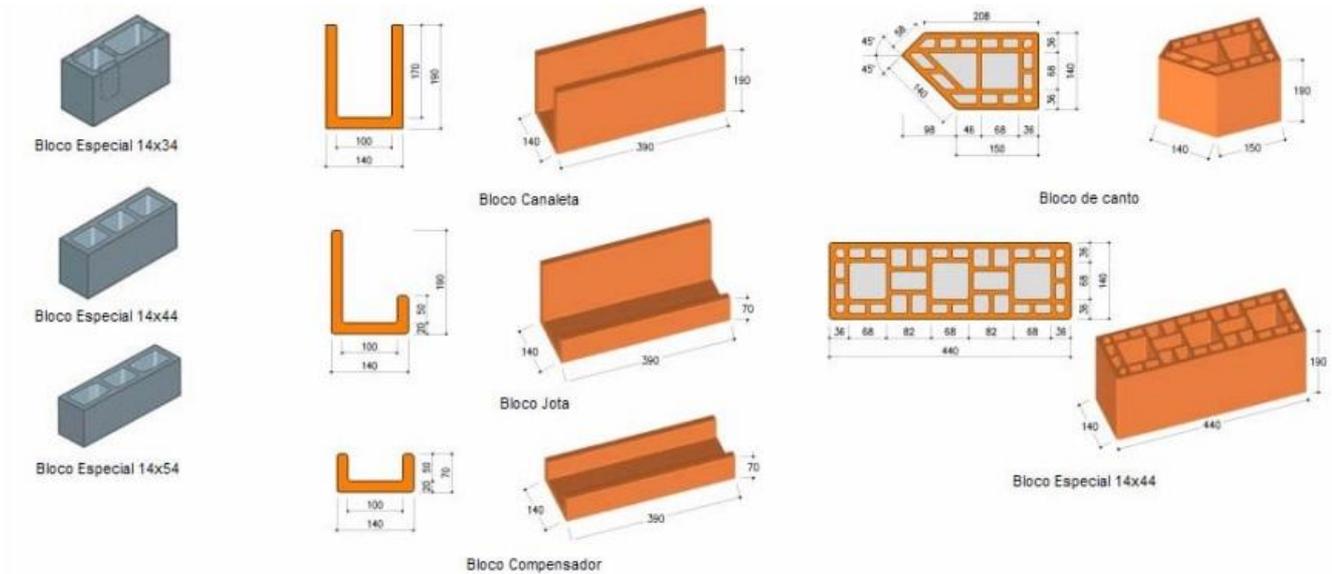


Figura 7. Tipos de blocos cerâmicos e de concreto

Fonte: Camacho (2006)

2.3.2. ARGAMASSA

A argamassa tem a função de solidarizar os blocos ou tijolos, transmitir e uniformizar as tensões entre as unidades, impedir a entrada de água e vento nas edificações e absorver pequenas deformações. Para cumprir com tais empregos, ela deve ter uma boa trabalhabilidade, resistência, plasticidade e durabilidade. Porém, no que se refere à resistência à compressão da parede, a resistência da argamassa não necessariamente precisa ser muito alta, como mostra a Figura 8.

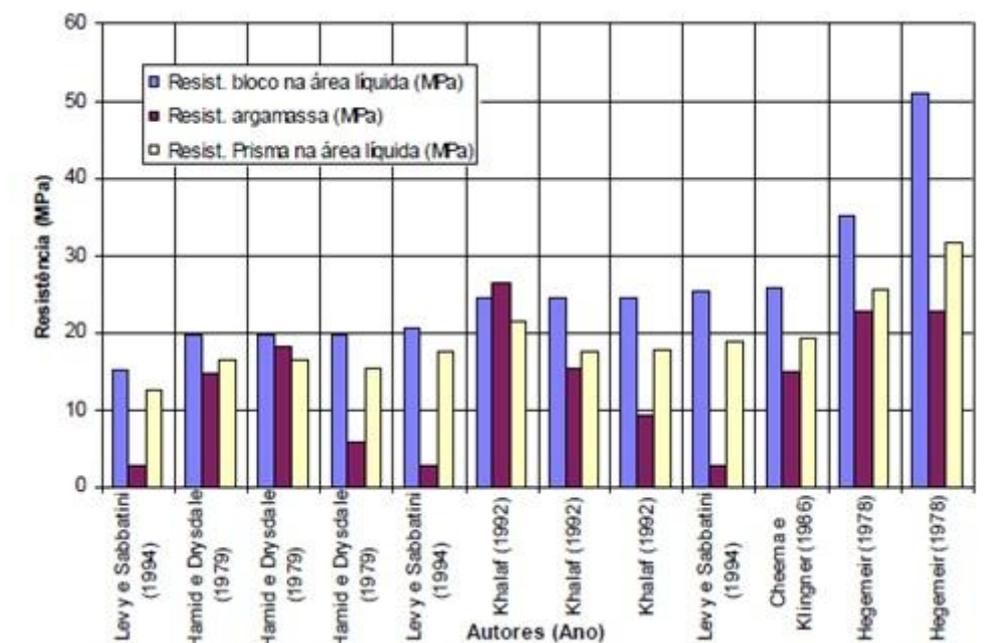


Figura 8. Comparação entre as resistências do bloco, da argamassa e do prisma.

Fonte: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1517-70762011000200008&script=sci_arttext

2.3.3. GRAUTE

O graute é um material composto por concreto fluido e agregados miúdos, com boa trabalhabilidade e resistência à compressão, utilizado para preencher os vazios dos blocos, a fim de reforçar as paredes de alvenaria estrutural. Além disso, ele é usado para formar um conjunto monolítico (bloco, graute e armadura), aderindo ao bloco e à armadura, que é responsável por fornecer resistência à flexão para as paredes.

É importante ressaltar que a NBR 10837 (1989) determina que a resistência característica do graute deve ser duas vezes maior que a resistência característica do bloco, medida em relação a sua área bruta.

2.3.4. ARMADURA

A alvenaria possui uma resistência à tração muito baixa, por isso as barras de aço são utilizadas para conferir uma melhoria para essa propriedade, em situações específicas. Ao ser utilizada desta forma, a armadura deve ser envolvida pelo graute para que trabalhem em conjunto. Elas também são empregadas nas fabricações de cintas, vergas e contra-vergas, bem como elementos construtivos da alvenaria.

2.4. A ALVENARIA DE TIJOLOS PRENSADOS DE TERRA CRUA ESTABILIZADOS COM CIMENTO (BTC)

A terra crua é considerada, hoje, como um material não convencional. Apesar de seu uso milenar nas construções, pode-se dizer que o tijolo de terra crua é um material moderno que passou a ser comprimido por prensas manuais a partir da década de 1950, através de uma criação do pesquisador colombiano G. Ramires.

São chamados de tijolos ecológicos em razão de não precisarem ser cozidos em seu processo de fabricação, ou seja, a sua produção não gera gases danosos à atmosfera. Segundo Barbosa (2003), trata-se de uma alternativa não poluente e de baixo consumo energético para a construção de edificações. Além disso, podem ser fabricados em diversos moldes, conforme a prensa que for utilizada.



Figura 9. Blocos BTC tipo Mattone.

Fonte: Acervo próprio.



Figura 10. Blocos BTC tipo convencional.

Fonte: <http://biobloctijolosecologicos.blogspot.com.br/p/blog-page.html>

A qualidade desses tijolos depende de:

- Tipo de terra;
- Umidade de moldagem;
- Tipo de prensa;
- Tipo e porcentagem de estabilizante;
- Cura.

Tipo de terra

Segundo Barbosa (2003), o solo usado nos tijolos prensados devem possuir plasticidade e baixo limite de liquidez (40-45%), além de ter uma composição granulométrica que atenda as seguintes recomendações: 10% a 20% de argila, 10% a 20% de silte, 50% a 70% de areia.

Para Pinto (1980), a terra indicada para a fabricação dos tijolos deve ter 15% de argila mais silte, 20% de areia fina, 30% de areia grossa e 35% de pedregulho. Porém, um solo bem graduado e com quantidade considerável de argila mais silte, é o mais indicado pelo fato de demandar uma quantidade menor de cimento na composição final do BTC.

Não devem ser utilizados solos superficiais ou solos orgânicos para a produção dos tijolos. E, aqueles que não se encaixam entre as faixas aqui citadas, podem ser utilizados, desde que sejam feitas correções granulométricas.

Umidade de moldagem

De acordo com Barbosa (2003), para que se tenha um tijolo de qualidade com um determinado solo, é indispensável que seja estabelecida uma porcentagem ideal de água e quantidade de material a ser colocada na prensa manual. Essas porcentagens são determinadas através de um processo de otimização baseado na máxima densidade seca.

Tipo de prensa

Quanto maior a energia de compactação, melhor será a qualidade do tijolo prensado de terra crua, devido à redução de vazios do material e, conseqüentemente, o aumento de sua resistência. Por isso, o tipo de prensa é relevante nesse quesito.

Tipo e porcentagem de estabilizante

O estabilizante é utilizado para melhorar as propriedades mecânicas do material. Desta forma, foi utilizado o cimento, que além de garantir estas melhorias, confere uma boa resistência à ação da água sob o material.

Segundo Barbosa (2003), os teores de cimento variam de acordo com a composição do solo: se houver muita argila, é exigido no mínimo 6% de cimento, em peso; se o solo é bem graduado, 4% de cimento é o necessário para obter tijolos de ótima qualidade. Sendo assim, usualmente, são adotados teores de cimento entre 4% a 6%.

Para Gonçalves (2005), os tijolos alcançarão qualidade desejável, quanto à resistência, quando o teor de cimento for de 8% até 15%, o que eleva significativamente o custo de produção dos BTC.

Cura

A água utilizada no produto não pode sair rapidamente do mesmo após sua fabricação, pois não haverá tempo suficiente para que ocorram as reações necessárias para estabilizar o tijolo. Logo, diante disto, é indispensável a realização da cura. Esta pode ser feita através do impedimento à evaporação, cobrindo os tijolos com lona plástica, ou molhando-os periodicamente, logo após o fim de sua fabricação.

2.5. FATORES QUE AFETAM A RESISTÊNCIA DA ALVENARIA

De acordo com Sampaio (2010), a alvenaria estrutural apresenta uma boa resistência à compressão, devido a alguns fatores isolados, tais como:

- Resistência das unidades;
- Resistência da argamassa;
- Qualidade da mão de obra;
- Geometria dos elementos.

2.5.1. RESISTÊNCIA DAS UNIDADES

A resistência da unidade é o mais relevante fator na resistência final da parede ou painel de alvenaria. Na Figura 8, podemos observar essa relação: a resistência do bloco é próxima da resistência do prisma.

2.5.2. RESISTÊNCIA DA ARGAMASSA

A resistência à compressão da argamassa não é tão importante para se obter uma boa resistência final da parede, como dito anteriormente e observado na Figura 8. No entanto, é importante ressaltar que, quando a argamassa for muito fraca, há o risco de esmagamento dos tijolos. Já, quando a sua resistência for demasiada, a alvenaria pode sofrer ruptura frágil, sem aviso prévio.

2.5.3. QUALIDADE DA MÃO-DE-OBRA

No caso do BTC, há uma cultura de que sua fabricação deve ser realizada pela população local. Sendo assim, é necessário formar a comunidade para tal tarefa, ensinando o peneiramento do solo, a dosagem dos materiais (terra, água e cimento), o procedimento de mistura, o método de utilização da prensa manual, a produção do tijolo, o processo de cura e cuidados na estocagem. Porém, mesmo com tal treinamento, o mais recomendável é que se procurem profissionais capacitados para a execução das paredes.

Durante a execução da alvenaria, deve haver constante fiscalização sobre a mão de obra, para que sejam evitados problemas com a redução da resistência e da durabilidade das paredes de alvenaria. Segundo Sampaio (2010), dentre alguns serviços a serem executados durante a construção da alvenaria, é importante a inspeção quanto:

- A forma de assentamento dos blocos: a argamassa deve ser assentada nos septos longitudinais e verticais, com espessura o mais uniforme possível, de forma a evitar concentração de tensões. Além disso, as juntas devem ser defasadas de forma que cada tijolo seja apoiado por outros dois;
- Ao controle tecnológico da argamassa: a argamassa compõe a estrutura do sistema, por isso deve atender todas as condições de projeto, sem improvisos, tais como resistência, trabalhabilidade e retenção de água;
- A agitação das unidades após o assentamento: as batidas nas unidades para corrigir prumo podem prejudicar a aderência entre os tijolos e a argamassa e causar fissuras nesta última;
- Ao prumo da parede: quando são de diferentes pavimentos, as paredes não devem possuir grandes excentricidades, causadas pela construção fora de prumo ou de alinhamento.

2.5.4. GEOMETRIA DOS ELEMENTOS

A geometria das unidades é um dos fatores que influencia na resistência final da parede de alvenaria. Segundo Barbosa (2004), quanto maior a altura da unidade, menor sua resistência, devido ao efeito de confinamento. Esta afirmação é baseada em experimentos realizados por Render (1986).

2.6. COMPORTAMENTO MECÂNICO DA ALVENARIA

A propriedade mais relevante para a avaliação do comportamento mecânico da alvenaria é a sua capacidade de resistência à compressão, segundo Medeiros (1993). Sobre a resistência mecânica das alvenarias, Sabbatini (1984) chegou às seguintes conclusões, baseado em trabalho efetuado:

- A resistência da alvenaria é inversamente proporcional à quantidade de juntas de assentamento;
- Unidades assentadas com juntas de amarração produzem uma alvenaria mais resistente que aquelas em que as unidades são assentadas com juntas verticais aprumadas;
- A resistência da parede não varia linearmente com a resistência da unidade e nem com a resistência da argamassa;
- A espessura ideal da junta de assentamento deve ser em torno de 10mm.

Porém, existem outras propriedades que também têm sua relevância no comportamento estrutural da alvenaria, tais como as resistências: à tração, ao cisalhamento e à flexão. Como já mencionado, os materiais constituintes da alvenaria não são dotados de boa capacidade resistente à tração. Desta forma, a alvenaria deve ser construída de modo que sejam minimizados os efeitos da tração.

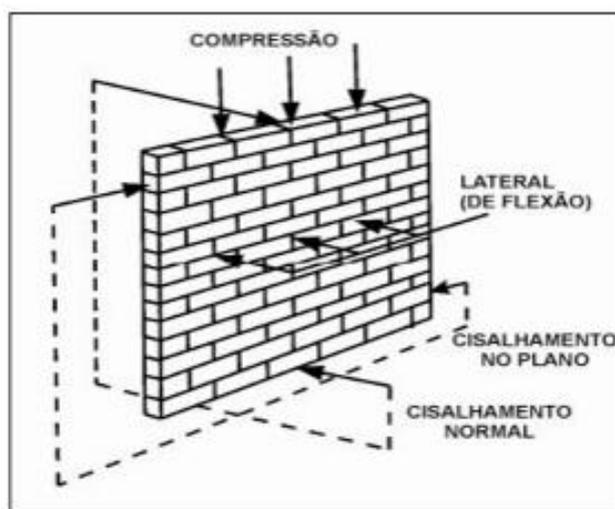


Figura 11. Efeitos mecânicos que podem atuar em uma parede de alvenaria.

Fonte: Medeiros (1993).

2.7. FISSURAÇÃO NAS ALVENARIAS

A patologia mais frequente em alvenarias são as fissuras, devido: à sua baixa resistência à tração; à diferença de comportamento entre os tijolos e a argamassa. Além disso, a deformação transversal da argamassa é mais acentuada que a mesma deformação da unidade; logo, são introduzidas tensões que levam ao fissuramento da alvenaria.

Segundo Thomaz (1989), além do que já fora citado, diversos outros fatores são responsáveis pela fissuração e resistência final de uma parede submetida à compressão axial, tais como: deformação longitudinal dos componentes da alvenaria e argamassa; rugosidade superficial e porosidade dos componentes de alvenaria; poder de aderência, retenção de água, elasticidade e retração da argamassa; espessura da junta de assentamento; esbeltez da parede produzida.

De acordo com Bauer, a configuração da fissura, sua abertura, espaçamento e, se possível, a época de ocorrência, podem servir como elementos para identificar sua origem.

Estudos realizados por Gonçalves (2005), em laboratório, com carregamentos cíclicos, alegam que os painéis de alvenaria de tijolo de terra crua apresentam uma boa capacidade de carga. Ele ainda observou que, geralmente, as paredes ficam submetidas a uma flexo-compressão oblíqua. Desta forma, os painéis não possuem um modo único de ruptura.

2.7.1. TIPOS DE FISSURAS EM ALVENARIA SUBMETIDAS A SOBRECARGAS DE COMPRESSÃO

Segundo Thomaz (1989), há dois tipos característicos de fissuras que podem ser observadas em paredes contínuas solicitadas por carregamento vertical uniformemente distribuído:

- Fissuras verticais: é o caso mais ocorrente, proveniente da deformação transversal da argamassa de assentamento sob a ação de tensões de compressão, ou da flexão localizada das unidades.

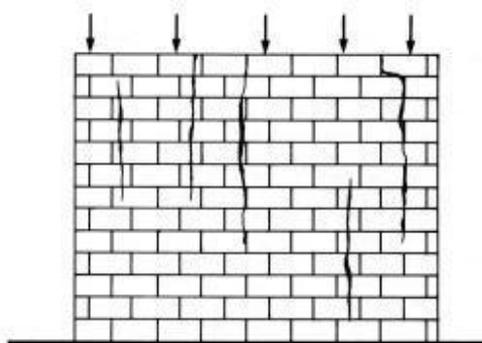


Figura 12. Fissuras verticais causadas por sobrecarga vertical distribuída.

Fonte: Bauer.

- Fissuras horizontais: originária da ruptura por compressão das unidades ou da argamassa, ou ainda de solicitações de flexo-compressão atuantes na parede. Também podem surgir quando ocorre expansão diferenciada entre as fiadas de tijolos, mesmo sob efeito de carregamento pequeno.

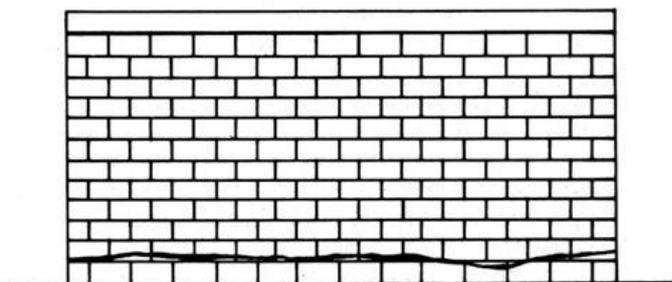


Figura 13. Fissuras horizontais.

Fonte: Bauer.

Quando há atuação de sobrecargas concentradas, formam-se fissuras inclinadas a partir do ponto de aplicação da carga, devido à resistência à compressão das unidades que compõem a alvenaria.

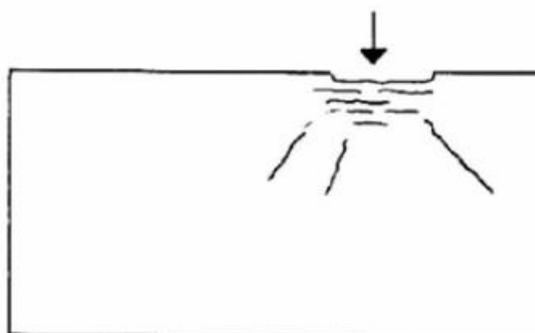


Figura 14. Fissuras causadas por carga concentrada.

Fonte: Bauer.

Em paredes com aberturas de portas e janelas e submetidas a sobrecargas verticais, as fissuras são formadas no contorno do vão, a partir dos vértices das aberturas e sob o peitoril das janelas. Estas fissuras, entretanto, dependem de diversas configurações, como: dimensão da parede, dimensão das aberturas, localização das aberturas na parede, dimensões e rigidez das vergas e contra-vergas etc.

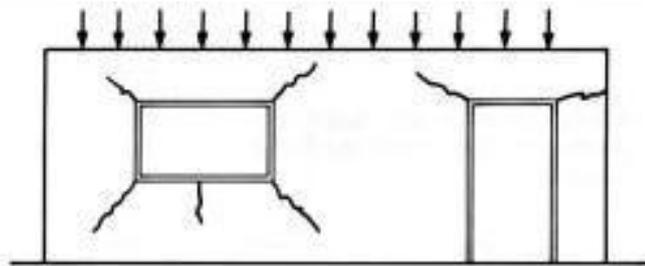


Figura 15. Fissuras causadas por sobrecarga vertical uniforme em paredes com aberturas.

Fonte: Bauer.

2.7.2. ASPECTOS RELATIVOS À RUPTURA

Através de uma modelagem numérica, pode-se chegar de forma detalhada ao surgimento das fissuras. A modelagem aqui estudada pode ser encontrada em Lourenço (1996) e consiste em classificá-la em três: micro-modelagem detalhada, micro-modelagem simplificada e macro-modelagem. Como se trata, no caso, de um estudo detalhado, optou-se pelo uso da primeira classificação.

Segundo Nascimento (2003), a micro-modelagem detalhada consiste na discretização isolada dos componentes constituintes da alvenaria. Em outras palavras, na modelagem, os blocos e as juntas de argamassa são considerados elementos finitos contínuos e a interface bloco/argamassa como elementos descontínuos.

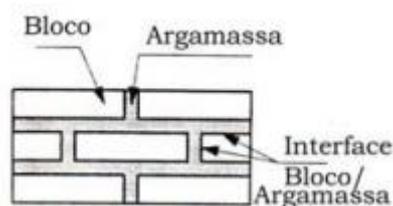


Figura 16. Micro-modelagem numérica detalhada para alvenaria estrutural (Lourenço 1996).

Fonte: Nascimento (2003).

De acordo com Lourenço (1996), são cinco os mecanismos de ruptura, levando em consideração a modelagem adotada no presente trabalho: tração direta na junta, escorregamento na junta, fissuração da unidade por tração, fissuração por tração diagonal e fissuração por esmagamento da unidade.

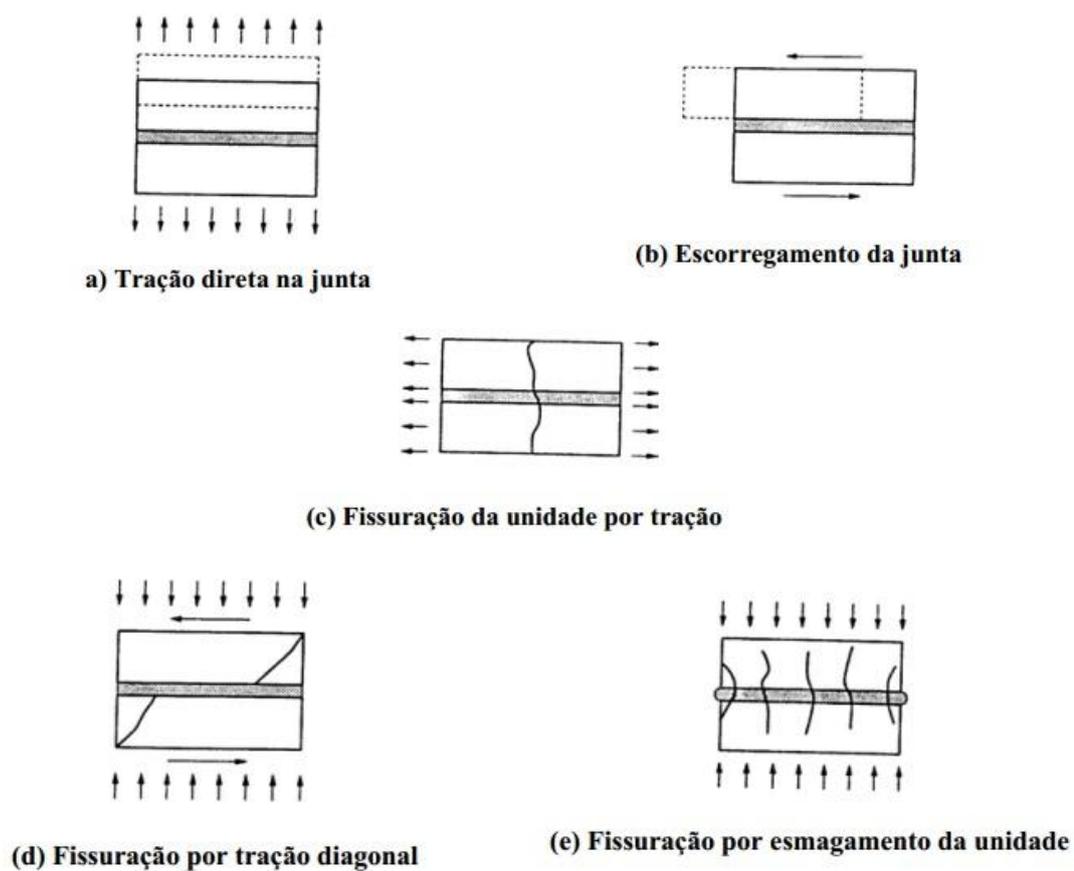


Figura 17. Modos de ruptura referentes à micro-modelagem detalhada, proposta por Lourenço (1996).

Fonte: Nascimento (2003).

Como afirma Peleteiro (2002), nestes mecanismos há um crescimento das fissuras a nível micro do material, de tal forma que, quando ocorrem deformações inelásticas, há uma liberação de energia de fratura durante a ocorrência de fratura interna.

3. METODOLOGIA

3.1. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Os materiais utilizados, em destaque, ao longo do desenvolvimento do presente trabalho, foram:

- Terra;
- Cimento;
- Prensa manual;
- Prensa hidráulica;
- Célula de carga;
- Defletômetros;
- Sistema de aquisição de dados.

3.1.1. TIJOLO PRENSADO DE TERRA CRUA (BTC)

No presente trabalho, optou-se pelo uso do BTC de Mattone para se obter um maior conhecimento sobre suas propriedades mecânicas. De acordo com Barbosa (2003), este tipo de bloco resulta em uma alvenaria de boa rigidez e possibilita a construção de edificações de três a quatro pavimentos, quando aumentado o teor de cimento.

Suas dimensões são 14 cm x 28 cm x 9,5 cm. O peso varia entre 6,6 e 7 quilos, conforme Barbosa (2003).



Figura 18. Bloco BTC utilizado, tipo Mattone.

Fonte: Acervo próprio.

3.1.1.1. TERRA

A terra utilizada no processo de fabricação do BTC e da argamassa de assentamento foi adquirida em loja de material de construção e é proveniente de jazida em Santa Rita. Possui cor amarelada.

3.1.1.2. CIMENTO

Tanto para a fabricação do bloco quanto para a produção da argamassa, foram utilizados um teor de 12% de cimento em relação ao peso total de terra.

O cimento empregado foi do tipo CPIIZ-32 com adição de pozolana, facilmente encontrado em comércio local.

3.1.1.3. PRENSA MANUAL

Os tijolos foram moldados na prensa Mattone, sobre uma pressão de compactação de 2MPa. Eles foram modelados segundo a forma concebida pelo professor de mesmo nome da prensa, do Politecnico di Torino. Tal geometria implica em saliências dos tipos macho e fêmea (Figura 19), que permite o encaixe uns nos outros, admitindo pequenos deslocamentos relativos entre os tijolos, segundo Barbosa (2003).



Figura 19. Prensa tipo Mattone.

Fonte: Acervo próprio.

3.1.2. PRENSA HIDRÁULICA

A prensa hidráulica é um dispositivo de aplicação de carga com capacidade de 75 tf. É aparelhada em um pórtico de altura regulável, constituído de perfis metálicos, para dar suporte ao ensaio.



Figura 20. Pórtico para ensaio de compressão, localizado no LABEME.

Fonte: Acervo próprio.

3.1.3. CÉLULA DE CARGA

A célula de carga é um transdutor que mede força de forma indireta, através da resposta do material à aplicação de carga. No caso do trabalho, a força é medida através da variação de tensão a qual a célula está submetida.

As células de carga são variadas de acordo com a sua aplicação. Existem aquelas destinadas apenas a ensaios de tração, bem como de compressão. Além disso, podem ser classificadas de acordo com o intervalo de forças medidas e sua precisão.

Utilizou-se neste trabalho uma célula de compressão que mede forças até 1000 kN.



Figura 21. Célula de carga de compressão.

Fonte: Acervo próprio.

3.1.4. DEFLETÔMETROS

Os defletômetros são transdutores que medem a deflexão de corpos em condições estáticas. Os que foram utilizados neste trabalho mediram os deslocamentos no painel, em milímetros, devido à aplicação da carga uniformemente distribuída.

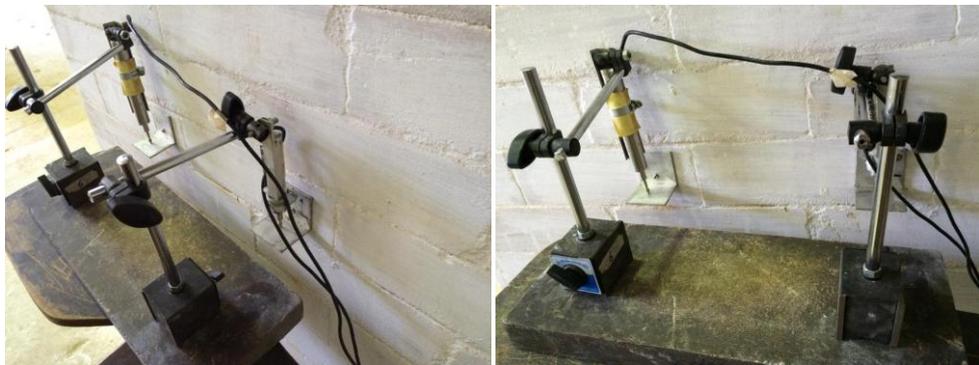


Figura 22. Defletômetros já instrumentados para o ensaio.

Fonte: Acervo próprio.

3.1.5. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

É um sistema composto de eletro-eletrônicos responsáveis pela obtenção e leitura de dados adquiridos ao longo do ensaio. Os dados obtidos são armazenados em um banco de dados e são transferidos para computadores.

O sistema utilizado é formado pelo data logger Almemo 2890 e pelo software AMR-control ALMEMO (AHLBORN) instalado no computador. Todas as informações adquiridas pelo logger são transmitidas ao computador pelo software.



Figura 23. Data Logger utilizado no ensaio.

Fonte: Acervo próprio.

3.2. MÉTODOS DE PRODUÇÃO

3.2.1. PRODUÇÃO DOS BLOCOS DE TERRA COMPACTADOS (BTC)

Depois de verificada a granulometria da terra utilizada, dá-se início a fabricação do BTC com adição de 12% de cimento. O cimento é misturado ao solo e a mistura umedecida é colocada na prensa, com uma quantidade de água necessária e otimizada para a produção de um bloco de qualidade, segundo Barbosa (2003). A quantidade água é definida preliminarmente em um processo de otimização. Este processo é feito através do tato, ou seja, conforme for adicionando água, pelo contato manual com a mistura, chega-se ao resultado. Após sua confecção, os blocos são colocados em local aberto e cobertos com lona plástica para o processo de cura. Para compensar a perda de água sofrida durante este processo, em um intervalo de dois dias, os blocos foram cuidadosamente molhados e após uma semana, empilhados.



Figura 24. Blocos em processo de cura.

Fonte: Oliveira (2012)

3.2.2. PRODUÇÃO DA ARGAMASSA

A argamassa de assentamento, utilizada para a construção dos painéis de alvenaria, são feitas com a mesma terra usada na fabricação do BTC. Além disso, os mesmos 12% de cimento são adicionados ao solo. Após feita essa mistura, a água é adicionada à ela de forma visual, com auxílio de proveta graduada, até adquirir uma boa plasticidade. Para a produção desta argamassa, a cada 10kg de terra, foram adicionados 1,2kg de cimento e 4,4 litros de água.



Figura 25. Produção da argamassa de terra.

Fonte: Acervo próprio.

3.2.3. PRODUÇÃO DOS PAINÉIS DE ALVENARIA

As paredes foram produzidas conforme apresentadas na Figura 26.

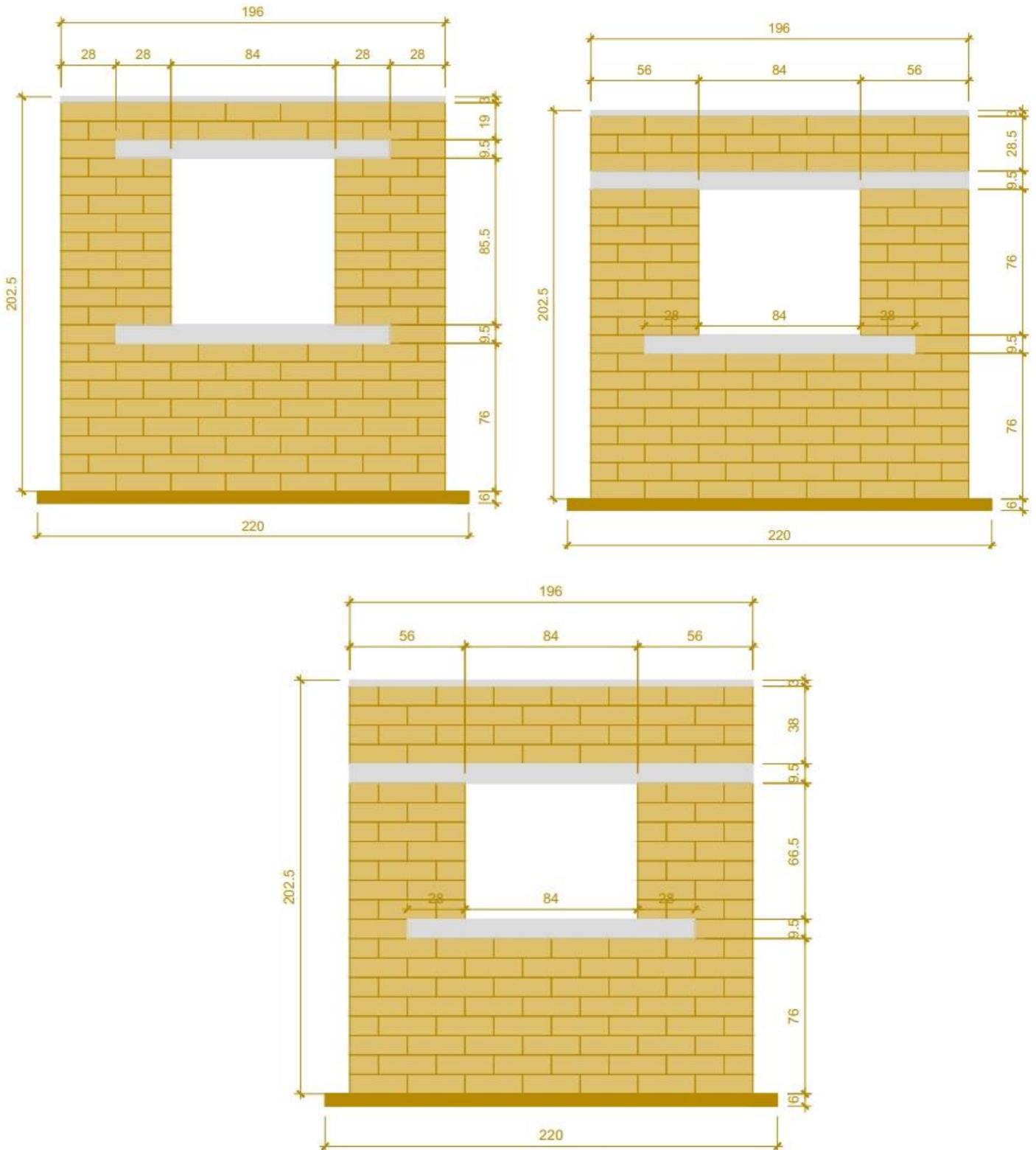


Figura 26. Esquemas para a construção das Paredes 1, 2 e 3, respectivamente.

Fonte: Acervo próprio.

Antes de iniciar o processo de fabricação dos painéis, os blocos são molhados para garantir melhor aderência à argamassa de assentamento.

A primeira fiada é colocada sobre um pedaço de madeira de lei de dimensões 220x14x6 cm. A segunda fiada é colocada de forma que a amarração entre ela e a primeira seja feita através da intercalação dos blocos. E assim, sucessivamente. Os blocos são assentados uns aos outros e uns sobre os outros, através dos encaixes macho-fêmea.



Figura 27. Construção das primeiras fiadas do painel.

Fonte: Acervo próprio.

O prumo e a retilinidade do painel é garantido com o prumo de face e com a régua, respectivamente. O prumo deve ser verificado, em relação à primeira fiada, em cada bloco colocado. Já a retilinidade do painel deve ser examinada em cada fiada de tijolos.



Figura 28. Prumo e retilinidade sendo verificados, respectivamente.

Fonte: Acervo próprio.

Ao chegar na altura da contraverga, o pedreiro põe uma forma de madeira para a concretagem *in loco* da mesma. As formas são travadas com grampos improvisados de aço (Figura 29). O concreto utilizado é de traço volumétrico 1:4:4 (cimento:areia:brita) e foi produzido no próprio laboratório, com brita cascalhinho, areia média e 4 litros de água para cada traço. Para reforço das vergas e contravergas, foram utilizados dois ferros de bitola 5.0mm.



Figura 29. Concretagem da contraverga.

Fonte: Acervo próprio.

Após a conclusão das contravergas, as aberturas das janelas são feitas conforme as medidas apresentadas nos esquemas da Figura 26.

Na última fiada, é aplicada uma fina camada de argamassa comum de cimento, para regularizar a superfície de aplicação de carga. Após o término de sua fabricação, o painel é pintado com cal para melhor visualizar as fissuras no momento do ensaio.

3.3. INSTRUMENTAÇÃO DO ENSAIO

Após o transporte e colocação do painel sob o pórtico e sua centralização com a célula de carga, são seguidas as seguintes etapas, antes do início do ensaio:

1. Instalação de pequenos perfis metálicos no painel para a colocação dos defletômetros, de modo que seja possível realizar suas leituras;
2. Colocação de perfil metálico sobre o painel, para distribuir a carga ao longo de seu comprimento;

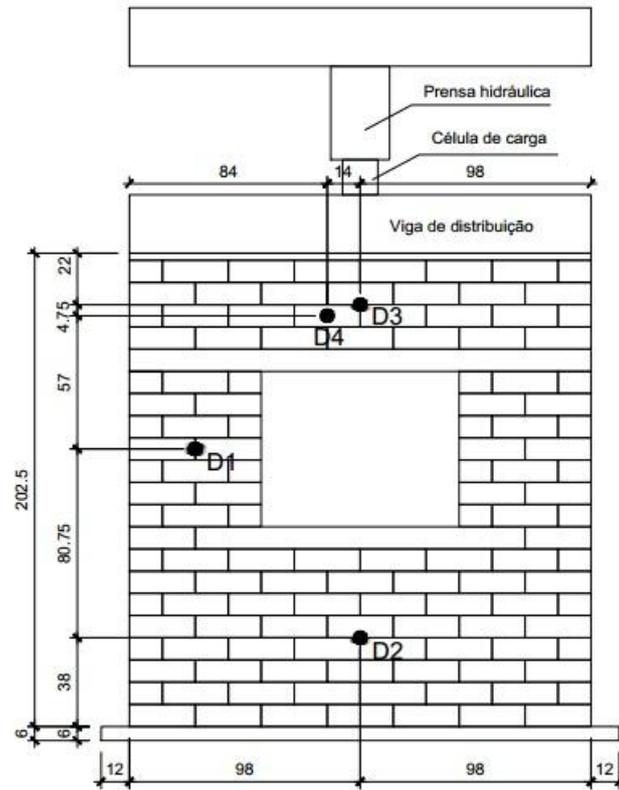


Figura 30. Instrumentação das Paredes 1, 2 e 3, respectivamente.

Fonte: Acervo próprio.

4. RESULTADOS

Após toda a instrumentação do painel de alvenaria, deu-se início ao ensaio, com auxílio do técnico de laboratório do Labeme. É importante ressaltar que é necessário fazer o isolamento da área do ensaio para que seja evitado o transitar de pessoas no local de alcance de projéteis, advindos da ruptura do painel.

A aplicação de carga foi dada de forma crescente, de modo a permitir o traçado de um gráfico carga por deslocamento. Quando ocorria o aparecimento de fissuras, a carga era visualizada no logger e anotada próxima à fissura, no próprio painel. Ao perceber que a alvenaria estava sinalizando uma ruptura próxima, o ensaio era interrompido e eram retirados os defletômetros para não danificá-los. Logo após, a carga era aplicada até o painel romper.

4.1. ENSAIO DA PAREDE 1

Tabela 1. Resultados do ensaio da Parede 1.

Carga (kN)	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	D4 (mm)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,00	0,22	0,05	0,24	1,28
10,20	0,26	0,15	0,57	3,12
14,90	0,06	0,15	0,57	3,46
20,00	0,03	0,15	0,48	3,52
25,10	0,09	0,14	0,43	3,50
30,30	0,14	0,09	0,39	3,50
34,90	0,18	0,09	0,32	3,48
40,60	0,25	0,05	0,21	3,24
45,20	0,29	0,04	0,13	3,24
50,80	0,32	0,02	0,03	3,24
55,50	0,32	0,02	0,03	3,24
60,70	0,39	0,05	0,11	3,24
64,90	0,47	0,08	0,16	3,24
70,10	0,47	0,08	0,21	3,24
75,20	0,47	0,09	0,26	3,24
80,60	0,52	0,13	0,33	3,24
85,50	0,58	0,13	0,41	3,24
91,00	0,65	0,16	0,44	3,24
95,20	0,61	0,17	0,49	3,24
100,50	0,65	0,17	0,55	3,24
110,60	0,72	0,23	0,65	3,24
120,70	0,79	0,24	0,83	3,26
130,30	0,90	0,28	0,96	3,26

140,50	0,94	0,30	1,11	3,24
160,30	1,14	0,35	1,42	3,26
170,00	1,12	0,37	1,58	3,24
175,90	1,16	0,38	1,67	3,24
202,60	1,41	0,44	2,16	3,24
210,50	1,43	0,44	2,18	3,24
220,20	1,55	0,45	2,34	3,24
230,30	1,57	0,47	2,49	3,24
240,30	1,64	0,48	2,65	3,24
250,50	1,70	0,49	2,84	3,22
260,00	1,77	0,51	2,97	3,22
270,20	1,86	0,51	3,15	3,22
280,30	1,92	0,52	3,30	3,38
290,00	1,99	0,53	3,43	3,56
300,50	2,06	0,55	3,68	3,68
310,20	2,12	0,55	3,82	3,80
320,30	2,19	0,55	4,00	3,92
357,90	RUPTURA			

Na Parede 1, a primeira fissura surgiu próxima a verga, o que não foi observado no lado oposto, caracterizando uma descentralização do carregamento devido a alguma imperfeição construtiva do painel ou na sua própria centralização com a célula de carga.

A carga associada ao aparecimento desta primeira fissura foi de 147 kN.



Figura 31. Primeira fissura observada na Parede 1, na face posterior.

Fonte: Acervo próprio.

As próximas fissuras surgiram com cargas acima de 200 kN e se concentraram, em grande maioria, em apenas um lado do painel.



Figura 32. Fissuras observadas na Parede 1, região abaixo da contra-verga, nas faces frontal e posterior, respectivamente.

Fonte: Acervo próprio.

Carga de ruptura:

A carga de ruptura máxima do painel foi de $F_{rup} = 357,90$ kN.

Modo de ruptura:

A ruptura ocorreu por esmagamento da fiada logo abaixo da verga, no local de surgimento da primeira fissura.



Figura 33. Ruptura da Parede 1.

Fonte: Acervo próprio.

Gráficos:

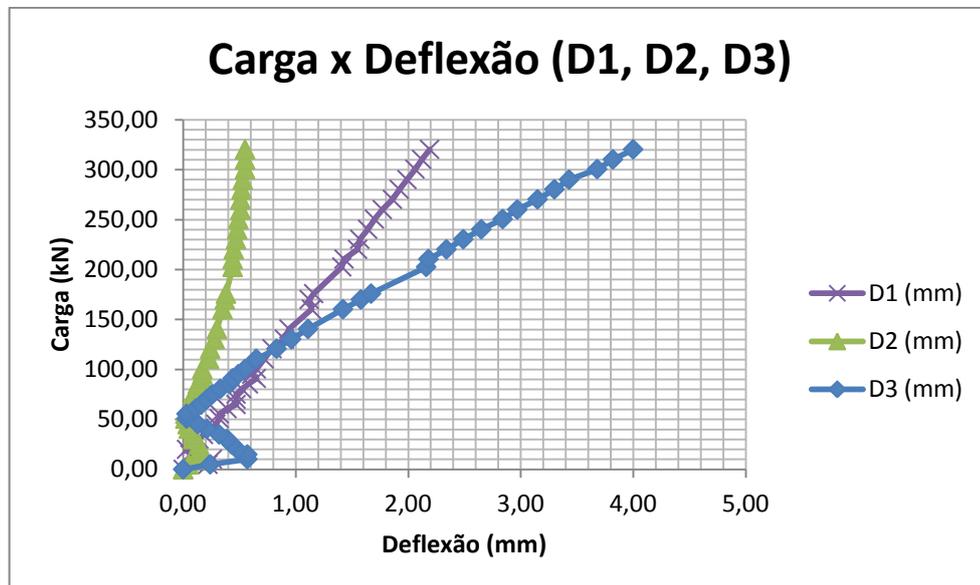


Figura 34. Gráfico carga x deflexão para os defletômetros D1, D2 e D3.

Fonte: Acervo próprio.

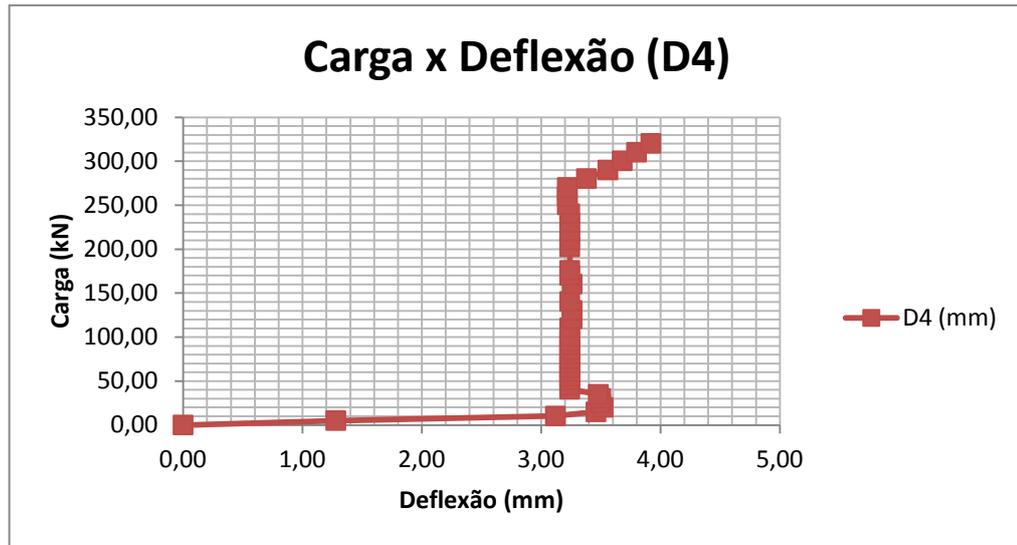


Figura 35. Gráfico carga x deflexão para o defletômetro D4.

Fonte: Acervo próprio.

De acordo com a análise dos gráficos acima, pode-se perceber que houve uma variação brusca dos deslocamentos relativos na parte superior do painel, acima da verga, na região onde estavam os defletômetros D3 e D4. Entre as cargas de 10 a 50 kN, aproximadamente, houve uma mudança de direção do deslocamento devido a uma possível acomodação do painel ao carregamento. Após isto, entende-se que o mesmo encontrou sua posição de equilíbrio e seus deslocamentos relativos foram crescendo até a ruptura.

Determinação da tensão crítica de ruptura da Parede 1:

$$\sigma_{crP1} = \frac{F_{rup}}{A} = \frac{357,90}{1,96 * 0,14} = 1,30 \text{ MPa}$$

4.2. ENSAIO DA PAREDE 2

Tabela 2. Resultados do ensaio na Parede 2.

Carga (kN)	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	D4 (mm)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,00	0,13	0,02	0,01	0,18
10,30	0,09	0,02	0,12	0,24
14,90	0,13	0,02	0,25	0,22
20,20	0,02	0,02	0,37	0,24
25,10	0,11	0,04	0,43	0,30
30,30	0,16	0,09	0,46	0,36
35,20	0,20	0,13	0,39	0,34
40,50	0,24	0,15	0,29	0,30

45,10	0,27	0,18	0,27	0,28
49,80	0,31	0,21	0,24	0,26
54,90	0,35	0,24	0,14	0,44
60,80	0,40	0,28	0,05	0,42
64,90	0,42	0,29	0,03	0,40
70,50	0,49	0,34	0,04	0,50
75,90	0,54	0,35	0,11	0,50
80,60	0,56	0,38	0,17	0,48
84,70	0,62	0,39	0,23	0,48
90,30	0,67	0,40	0,32	0,60
95,40	0,73	0,40	0,43	0,66
100,90	0,78	0,42	0,54	0,70
109,90	0,85	0,43	0,71	1,10
120,80	0,96	0,46	0,88	1,22
130,40	1,03	0,52	1,04	1,40
140,20	1,16	0,56	1,26	1,80
150,10	1,29	0,57	1,43	2,02
160,10	1,36	0,61	1,61	2,28
170,00	1,43	0,63	1,85	2,62
180,00	1,58	0,67	2,02	2,92
190,10	1,72	0,72	2,28	3,62
200,00	1,87	0,75	2,42	4,34
210,10	2,07	0,81	2,42	5,24
220,10	2,19	0,86	2,51	5,86
230,20	2,30	0,88	2,56	6,20
240,50	2,28	0,88	2,61	6,32
250,40	2,43	0,93	2,63	6,50
260,30	2,50	0,95	2,64	6,72
270,10	2,57	0,99	2,65	6,98
280,10	2,70	1,02	2,64	7,32
290,20	2,77	1,04	2,63	7,64
296,00	2,79	1,07	2,63	7,88
418,00	RUPTURA			

Devido a construção de forma errada da verga, de canto a canto do painel, a primeira fissura observada foi justamente no meio desta, de um lado a outro da verga, associada a uma carga de 95 kN.

De acordo com a Figura 37, grande parte das fissuras são verticais, causadas por flexão localizada nos blocos ou pela deformação transversal da argamassa. Há algumas horizontais, nas juntas, que possivelmente ocorreram devido à acomodação do painel ou a devido à ruptura da argamassa.

Carga de ruptura:

A carga máxima de ruptura foi de $F_{rup} = 418 \text{ kN}$

Modo de ruptura:

A ruptura se deu por esmagamento na região abaixo da verga, ao lado da abertura da janela.



Figura 38. Ruptura da Parede 2.

Fonte: Acervo próprio.

Gráficos:

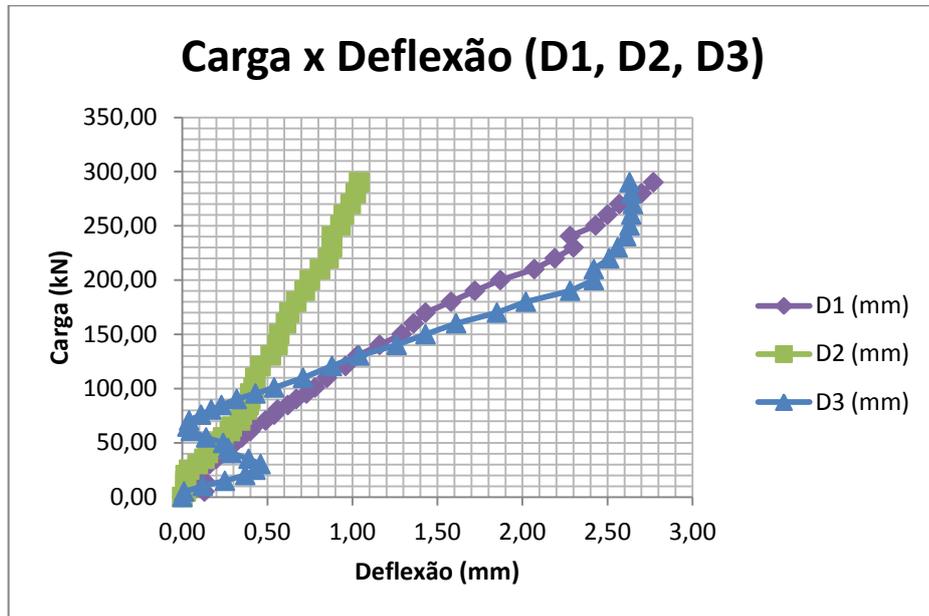


Figura 39. Gráfico carga x deflexão para os defletômetros D1, D2 e D3.

Fonte: Acervo próprio.

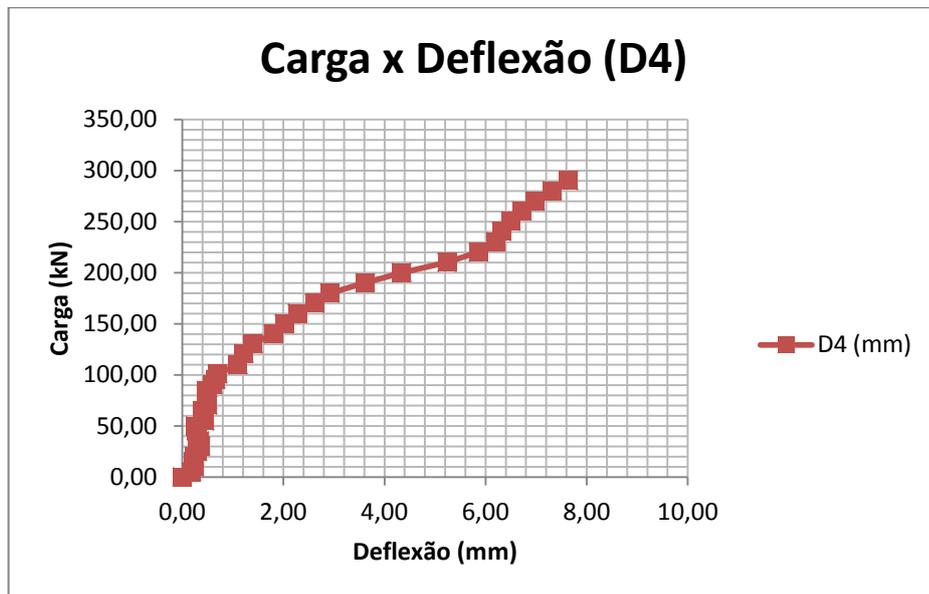


Figura 40. Gráfico carga x deflexão para o defletômetro D4.

Fonte: Acervo próprio.

Segundo os gráficos apresentados, o único defletômetro que apresentou uma variação brusca no deslocamento relativo, ao longo da crescente aplicação de carga, foi o D3, devido a uma possível acomodação do painel. Este mesmo efeito foi observado na Parede 1, também no D3, o que pode caracterizar uma falha em sua instrumentação.

Determinação da tensão crítica de ruptura da Parede 2:

$$\sigma_{crP2} = \frac{F_{rup}}{A} = \frac{418,00}{1,96 * 0,14} = 1,52 \text{ MPa}$$

4.3. ENSAIO DA PAREDE 3

Tabela 3. Resultados do ensaio na Parede 3.

Carga (kN)	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	D4 (mm)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,20	0,00	0,00	0,02	0,06
10,10	0,07	0,00	0,09	0,10
15,10	0,05	0,00	-0,03	1,32
20,00	0,07	0,00	0,01	1,66
25,20	0,03	0,01	0,12	1,72
30,10	0,07	0,03	0,18	1,80
35,10	0,16	0,03	0,24	1,82
40,20	0,22	0,08	0,31	1,82
45,80	0,31	0,11	0,37	0,94
50,60	0,31	0,14	0,45	0,64
55,20	0,36	0,16	0,58	0,56
60,50	0,45	0,19	0,68	0,48
65,70	0,49	0,25	0,78	0,34
70,30	0,51	0,26	0,87	0,22
75,30	0,56	0,27	0,98	0,10
81,10	0,63	0,34	1,11	0,02
85,60	0,67	0,34	1,20	0,22
90,40	0,72	0,39	1,32	0,26
95,60	0,76	0,40	1,44	0,38
100,90	0,81	0,41	1,72	0,42
110,40	0,94	0,47	1,98	0,64
120,60	1,14	0,54	2,37	0,72
129,80	1,25	0,61	2,69	0,78
140,10	1,37	0,65	2,93	1,06
149,90	1,50	0,71	3,21	1,22
160,70	1,70	0,73	3,54	1,44
170,50	1,85	0,77	3,73	1,64
180,60	1,94	0,83	3,97	1,76
190,00	2,06	0,86	4,16	1,88
200,50	2,19	0,89	4,40	2,04
210,30	2,34	0,90	4,58	2,16
220,40	2,41	0,91	4,75	2,36
228,70	2,50	0,96	4,91	2,40
359,50	RUPTURA			

A primeira fissura, assim como na Parede 2, foi no meio da verga, devido ao mesmo erro construtivo, de um lado ao outro do painel.

A carga relacionada ao aparecimento desta fissura foi de 84 kN.



Figura 41. Primeira fissura na Parede 3.

Fonte: Acervo próprio.

No decorrer do ensaio, com o aumento contínuo do carregamento, as fissuras também foram surgindo de forma simétrica. A diferença, em relação a Parede 2, é que devido a um desaprumo inicial, surgiram fissuras de cisalhamento na parte superior, acima da verga. Estas fissuras foram causadas pelo escorregamento das juntas horizontais e pela separação das juntas verticais. As demais fissuras, em grande parte, foram verticais.



Figura 42. Fissuras de cisalhamento na Parede 3.

Fonte: Acervo próprio.

Carga de ruptura:

A carga máxima de ruptura foi de $F_{rup} = 359,5 \text{ kN}$

Modo de ruptura:

A ruptura ocorreu por esmagamento dos blocos abaixo da verga, ao lado da abertura.



Figura 43. Ruptura da Parede 3.

Fonte: Acervo próprio.

Gráficos:

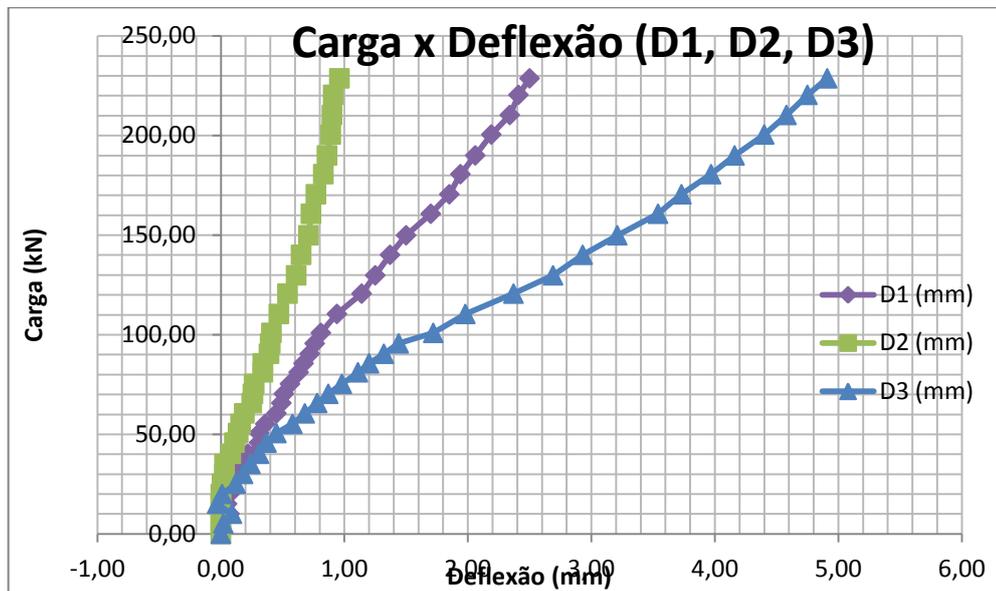


Figura 44. Gráficos carga x deslocamento para os defletômetros D1, D2 e D3.

Fonte: Acervo próprio.

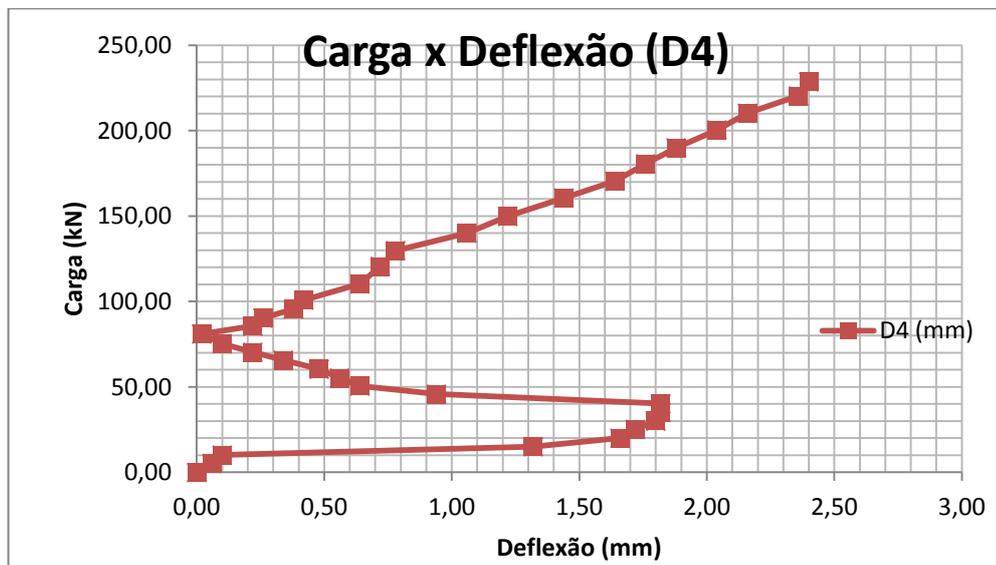


Figura 45. Gráfico carga x deslocamento para o defletômetro D4.

Fonte: Acervo próprio.

Pela análise dos gráficos acima, percebe-se que o deslocamento relativo variou quase linearmente com o aumento da carga. Já o defletômetro D4, aquele que mede as deflexões horizontais, apresentou variação brusca e mudança de direção no deslocamento. Ou seja, o painel fletiu para um lado, até uma carga de aproximadamente 75 kN (Figura 45) e depois passou a fletir para o lado oposto. Isto acontece devido à acomodação das fiadas acima da verga em relação à carga aplicada.

Determinação da tensão crítica de ruptura da Parede 3:

$$\sigma_{crP3} = \frac{F_{rup}}{A} = \frac{359,50}{1,96 * 0,14} = 1,31 \text{ MPa}$$

4.4.DETERMINAÇÃO DA TENSÃO MÉDIA DE RUPTURA DOS PAINÉIS

A tensão média de ruptura é dada pela média aritmética das três tensões de ruptura obtidas dos ensaios nos painéis:

$$\sigma_{Mrup} = \frac{\sigma_{crP1} + \sigma_{crP2} + \sigma_{crP3}}{3} = \frac{1,30 + 1,52 + 1,31}{3} = 1,38 \text{ MPa}$$

4.5.CÁLCULO DA TENSÃO CRÍTICA DE RUPTURA NAS ALVENARIAS

Esse cálculo leva em consideração as seguintes solicitações: o peso próprio das paredes, das cintas de amarração e da estrutura de cobertura de madeira; as reações das lajes de piso e de cobertura.

4.5.1. TENSÃO CRÍTICA PARA UMA EDIFICAÇÃO DE TRÊS PAVIMENTOS

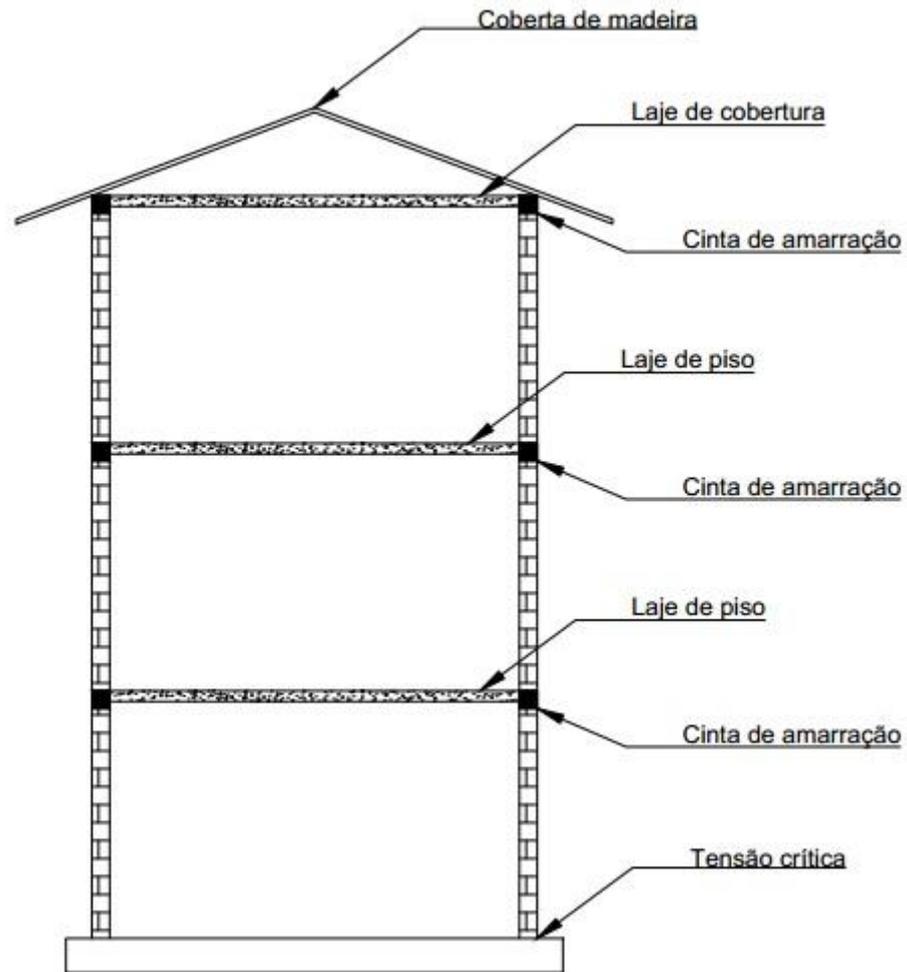


Figura 46. Croqui de uma edificação com três pavimentos.

Fonte: Acervo próprio.

Carga solicitante do peso próprio da alvenaria (q_{al})

Altura da parede (h): 2,80m

Largura da parede (b): 20 cm

Peso específico da alvenaria de BTC (γ_{al}): 18 kN/m³

$$q_{al} = 3 \cdot \gamma_{al} \cdot h \cdot b = 3 \times 18 \times 2,80 \times 0,20 = 30,24 \text{ kN/m}$$

Carga solicitante do peso próprio das cintas (q_{ci})

Altura da cinta (h): 20 cm

Largura da cinta (b): 20 cm

Peso específico do concreto armado (γ_{ca}): 25 kN/m³

$$q_{ci} = 3 \cdot \gamma_{ca} \cdot h \cdot b = 3 \times 25 \times 0,20 \times 0,20 = 3,00 \text{ kN/m}$$

Carga solicitante da laje de piso (LT12)

Carga acidental: 2 kN/m²

Peso próprio (treliça + capa): 2,05 kN/m² (Anexo 1)

Contrapiso: 0,03m x 18 kN/m³ = 0,54 kN/m²

Revestimento: 1 kN/m²

$$\Sigma = 5,59 \text{ kN/m}^2$$

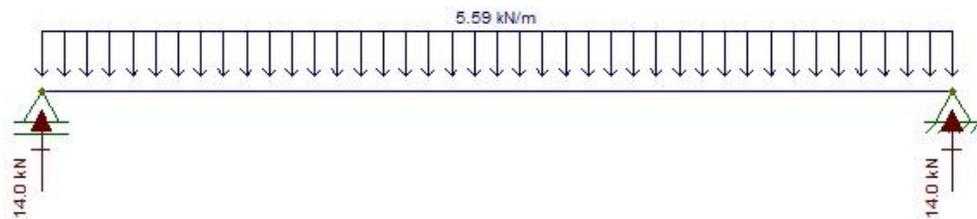


Figura 47. Esquema estrutural de viga biapoiada, representando as reações da laje de piso.

Fonte: Acervo próprio.

Reação de apoio da laje de piso: $R_{lp} = 14 \text{ kN/m}$

Carga solicitante da laje de cobertura (LT12)

Carga acidental: 0,5 kN/m²

Peso próprio (treliça + capa): 2,05 kN/m² (Anexo 1)

Contrapiso: 0,03m x 18 kN/m³ = 0,54 kN/m²

Revestimento: 1 kN/m²

$$\Sigma = 4,09 \text{ kN/m}^2$$

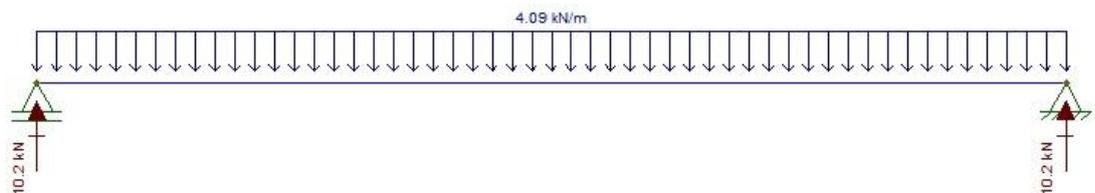


Figura 48. Esquema estrutural de viga biapoiada, representando as reações da laje de cobertura.

Fonte: Acervo próprio.

Reação de apoio da laje de cobertura: $R_{lc} = 10,2 \text{ kN/m}$

Carga solicitante de cobertura de estrutura de madeira e telha cerâmica

Telhado de 2 águas com vão de 10m

Carga estimada da cobertura é de 80 kgf/m^2

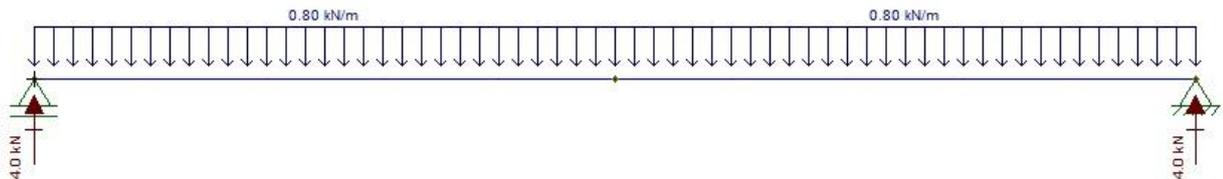


Figura 49. Esquema estrutural de viga biapoiada, representando as reações da cobertura de madeira.

Fonte: Acervo próprio.

Reação de apoio da cobertura: $R_{co} = 4 \text{ kN/m}$

Carga total na alvenaria

$$q_{\text{total}} = q_{al} + q_{ci} + 2R_{lp} + R_{lc} + R_{co} = 30,24 + 3,00 + (2 \times 14,00) + 10,20 + 4,00$$

$$= 75,44 \text{ kN/m}$$

Cálculo da tensão crítica de ruptura

$\sigma_{\text{crup}} = \frac{q_{\text{total}}}{b}$, tal que b é a largura do BTC.

$$\sigma_{\text{crup}} = \frac{75440}{0,14} = 0,54 \text{ MPa}$$

4.5.2. TENSÃO CRÍTICA PARA UMA EDIFICAÇÃO DE QUATRO PAVIMENTOS

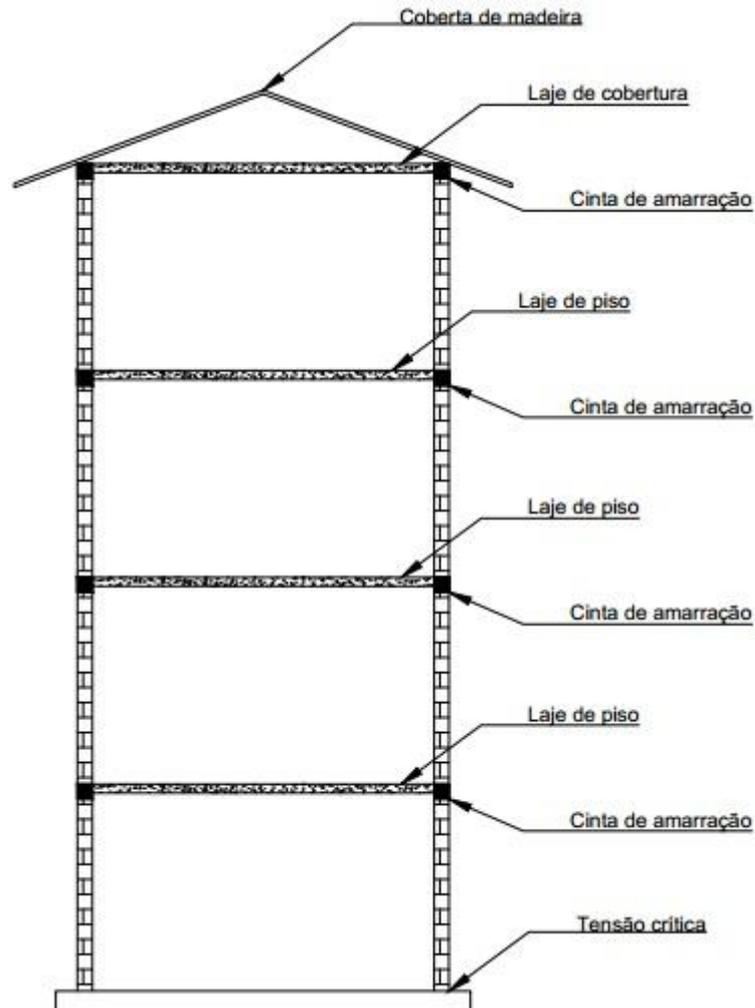


Figura 50. Croqui de edificação com quatro pavimentos.

Fonte: Acervo próprio.

Carga solicitante do peso próprio da alvenaria (q_{al})

Altura da parede (h): 2,80m

Largura da parede (b): 20 cm

Peso específico da alvenaria de BTC (γ_{al}): 18 kN/m³

$$q_{al} = 4 \cdot \gamma_{al} \cdot h \cdot b = 4 \times 18 \times 2,80 \times 0,20 = 40,32 \text{ kN/m}$$

Carga solicitante do peso próprio das cintas (q_{ci})

Altura da cinta (h): 20 cm

Largura da cinta (b): 20 cm

Peso específico do concreto armado (γ_{ca}): 25 kN/m³

$$q_{ci} = 4 \cdot \gamma_{ca} \cdot h \cdot b = 4 \times 25 \times 0,20 \times 0,20 = 4,00 \text{ kN/m}$$

Carga solicitante da laje de piso (LT12)

Reação de apoio da laje de piso: $R_{ip} = 14 \text{ kN/m}$

Carga solicitante da laje de cobertura (LT12)

Reação de apoio da laje de cobertura: $R_{lc} = 10,2 \text{ kN/m}$

Carga solicitante de coberta de estrutura de madeira e telha cerâmica

Reação de apoio da coberta: $R_{co} = 4 \text{ kN/m}$

Carga total na alvenaria

$$\begin{aligned} q_{total} &= q_{al} + q_{ci} + 3R_{ip} + R_{lc} + R_{co} = 40,32 + 4,00 + (3 \times 14,00) + 10,20 + 4,00 \\ &= 100,52 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Cálculo da tensão crítica de ruptura

$\sigma_{crup} = \frac{q_{total}}{b}$, tal que b é a largura do BTC.

$$\sigma_{crup} = \frac{100520}{0,14} = 0,72 \text{ MPa}$$

5. CONCLUSÃO

O ensaio realizado forneceu resultados que permitem a análise do comportamento das alvenarias de BTC com aberturas de janelas, reforçadas com vergas e contravergas, quando submetidas a carregamentos verticais que, na prática, são: o peso próprio, a reação das lajes e cintas, o peso de outras paredes sobre as lajes, as sobrecargas etc.

Devido à colocação de vergas e contravergas nas aberturas das paredes, a carga foi absorvida por estas, pelo fato de apresentar maior rigidez que as unidades, e redistribuídas no painel, de tal forma que foram observadas poucas fissuras em torno das aberturas.

Outro aspecto importante é a inspeção durante a construção da parede. É extremamente necessário que se tenha uma fiscalização durante este processo, pois os erros cometidos neste trabalho, como o desaprumo, influenciaram em alguns resultados:

- Fissuras assimétricas na Parede 1, devido a um desaprumo inicial ou a uma descentralização da célula de carga;
- Fissuras em forma de escada (cisalhamento) na Parede 3, devido ao escorregamento na junta de argamassa e as ações horizontais, que surgiram por causa do desaprumo inicial, conforme aplicação de carga vertical crescente.

Outro erro cometido foi na construção das vergas das Paredes 2 e 3, onde o pedreiro fez estas de forma contínua, de um canto ao outro dos painéis. Porém, verificou-se que este erro não foi tão relevante para os resultados do ensaio, bem como também para a fissuração nas paredes. De certa forma, estas vergas redistribuíram em uma área maior o carregamento aplicado, mas não foram observadas grandes diferenças, no que se refere ao grau de fissuração e a resistência final, em relação à Parede 1.

Comparando os três painéis, chegou-se as seguintes conclusões:

- Apesar dos erros construtivos, a resistência final das paredes não foi tão discrepante;
- O grau de fissuração foi bem parecido, com fissuras predominantemente verticais e de acomodação;
- Os modos de ruptura foram todos por esmagamento das unidades;
- O defletômetro D2 é o que apresenta menores valores de variação de deslocamento relativo, devido a sua posição no painel. Em outros ensaios, sugere-se que procure uma outra posição para este;

- A Parede 2, com três fiadas acima da verga, foi a mais resistente e a que melhor redistribuiu as cargas, conforme pode-se observar nas fissuras apresentadas.

Como foi dito anteriormente que, a alvenaria de BTC suporta edificações de até quatro pavimentos, foi feita uma verificação com os resultados das tensões de ruptura obtidos dos ensaios e as tensões críticas de ruptura calculadas:

- Para três pavimentos: $\sigma_{\text{crup}} = 0,54 \text{ MPa} < \sigma_{\text{Mrup}} = 1,38 \text{ MPa} \rightarrow \text{OK!}$
- Para quatro pavimentos: $\sigma_{\text{crup}} = 0,72 \text{ MPa} < \sigma_{\text{Mrup}} = 1,38 \text{ MPa} \rightarrow \text{OK!}$

Por fim, Gonçalves (2005), realizou um ensaio com sua Parede 11, também com abertura, feita com blocos de adobe, estabilizados com palha de grama japonesa, que resultou em uma resistência final à parede de 0,8 MPa. Comparando este resultado com os obtidos neste trabalho para as Paredes 1, 2 e 3, conclui-se que o cimento agindo como estabilizante, com um teor de 12%, é mais eficaz que a palha.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDREAUS, U. **Failure criteria for masonry engineering handbook**. Masonry Institute of America, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8949: **Paredes de Alvenaria Estrutural - Ensaio à Compressão Simples**. ABNT, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15182: **Alvenaria Estrutural – Blocos Cerâmicos Parte 1: Projetos**. ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10837: **Cálculo de Alvenaria Estrutural de Blocos Vazados de Concreto**. ABNT, 1989.

BARBOSA, N. P.; GHAVAMI, K. Terra Crua para Edificações. In: ISAIA, G. C. (Org.). **Materiais de Construção Civil**. Jardim Olimpia: Ibracon.

BARBOSA, N. P. Transferência e aperfeiçoamento da tecnologia construtiva com tijolos prensados de terra crua em comunidades carentes. In: FORMOSO, Carlos Torres; INO, Akemi. **Coletânea Habitar – Volume 2 – Inovação, Gestão da Qualidade & Produtividade e Disseminação do Conhecimento na Construção Habitacional**. Porto Alegre: ANTAC, 2003. p. 12-39.

BAUER, R. J. F. Patologias em Alvenaria Estrutural de Blocos Vazados de Concreto. In: CAMACHO, J. S. (Org.). **Caderno Técnico Alvenaria Estrutural**. São Paulo: Mandarim. p. 33-38.

CAMACHO, J. S. **Projeto de Edifícios de Alvenaria Estrutural**. Ilha Solteira. 2006. 48 p.

LOURENÇO, P.B. **Computational strategies for masonry structures**. Netherlands, Delft University Press, 1996.

GONÇALVES, Jameson da Silva. **Contribuição para a Normalização da Alvenaria Estrutural com uso de Tijolos de Terra Crua para Construções Urbanas**. João Pessoa, 2005. 134 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba.

NASCIMENTO NETO, J. A. **Estudo de painéis com abertura constituídos por alvenaria estrutural de blocos**. São Carlos, 2003. 320 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

PELETEIRO, Suzana C. **Contribuições à modelagem numérica de alvenaria estrutural**. São Carlos, 2002. 143 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

RAMALHO, Marcio A.; CORRÊA, Márcio R. S. **Projeto de Edifícios de Alvenaria Estrutural**. 3. ed. São Paulo: Pini, 2003. 169 p.

SAMPAIO, M. B. **Fissuras em Edifícios Residenciais em Alvenaria Estrutural**. São Carlos, 2010. 104 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

TAUIL, Carlos Alberto; NESE, Flávio José Martins. **Alvenaria Estrutural: Metodologia do Projeto, Detalhes, Mão de Obra, Normas e Ensaios**. 1. ed. São Paulo: Pini, 2010. 183 p.

THOMAZ, Ércio. **Trincas em Edifícios – Causas, Prevenção e Recuperação**. 1. ed. São Paulo: Pini, 2002. 194 p.