

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**DESENVOLVIMENTO DA TÉCNICA DE MACACOS PLANOS NA
AVALIAÇÃO DE ESTRUTURAS DE ALVENARIA COM BLOCOS
VAZADOS DE CONCRETO**

Mateus de Oliveira Soriani

Fevereiro de 2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**TÉCNICA DE MACACOS PLANOS NA AVALIAÇÃO DE ESTRUTURAS DE
ALVENARIA COM BLOCOS VAZADOS DE CONCRETO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Estruturas e Construção Civil.

Área de Concentração: Sistemas
Construtivos

Mateus de Oliveira Soriani

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Aris Parsekian

São Carlos

Fevereiro de 2016

Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da Biblioteca Comunitária UFSCar
Processamento Técnico
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S714t Soriani, Mateus de Oliveira
Técnica de macacos planos na avaliação de estruturas de alvenaria com blocos vazados de concreto / Mateus de Oliveira Soriani. -- São Carlos : UFSCar, 2016.
176 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2016.

1. Macacos planos. 2. Teste de deformabilidade. 3. Avaliação não destrutiva. 4. Blocos vazados de concreto. I. Título.



Folha de Aprovação


Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Mateus de Oliveira Soriani, realizada em 02/02/2016:



Prof. Dr. Guilherme Aris Parsekian
UFSCar



Prof. Dr. Rafael Aguilar Velez
PUC-Perú



Prof. Dr. Marcio Roberto Silva Correa
USP

Aos meus pais João e Clara e à minha irmã Laís, com todo o meu amor e admiração.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela vida, pela condição de fazer este trabalho e por todas as oportunidades que me são oferecidas.

Agradeço aos meus pais: João Roberto e Clara, e à minha irmã Laís, de quem o apoio e torcida foram primordiais para o desenvolvimento da pesquisa, e por serem exemplos na minha vida.

Obrigado ao professor Dr Guilherme Parsekian, orientador deste trabalho, pela atenção, envolvimento e orientação neste trabalho, por todos os ensinamentos ao longo do curso e ao logo de outros projetos já realizados.

Muito obrigado ao aluno de graduação Eduardo Sanches, que colaborou muito em todo o programa experimental, de maneira bastante comprometida.

Agradeço ao Fundo de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio a esta pesquisa através do projeto número 2013/23774-5 e ao projeto BEPE número 1024/25110-6.

Agradeço a assistência e consultoria técnica de alguns profissionais e pesquisadores que apresentaram preciosas colaborações, como João Soriani, Michael Schuller, Dr Spinelli, Dr Ahmad Hamid, Dr Ivan Bartoli e Dr Mohammad Bolhassani.

Obrigado à empresa Argafácil pela doação das argamassas industrializadas e à Glasser pela doação dos blocos estruturais de concreto.

Muito obrigado à Escola e Faculdade Senai Antônio Adolpho Lobbe, de São Carlos pela parceria na execução de soldas dos equipamentos, em especial aos professores Scarelli e Amair Coelho.

Agradeço à empresa Atkinson-Noland & Associates por compartilhar informações sobre a fabricação de equipamentos, fornecimento de materiais e pela oportunidade de realizar um estágio na empresa, participando de projetos de avaliação estrutural. Agradeço a Michael Schuller e Andrew Geister pelo apoio técnico.

Muito obrigado à empresa Fameth Espaçadores para Construção Civil pelo fundamental apoio nesta pesquisa, pela parceria no desenvolvimento e fabricação do novo macaco plano e na fabricação do sistema de base das leituras de deformação. Agradeço a João Soriani e Flávio dos Santos pelo total apoio e envolvimento no trabalho.

Gostaria de agradecer a todos os professores e mestres que já tive e que, indiretamente, contribuíram para este trabalho. Assim como a todos os professores da Engenharia Civil da UFSCar.

Obrigado ao técnico do Laboratório de Sistemas Estruturais Ricardo Canatto pelo auxílio em atividades experimentais.

Agradeço a todos os amigos que me auxiliaram durante o projeto, compartilhando informações, como: Rafael Tineo e Emerson Ricardo.

RESUMO

O presente trabalho trata da avaliação não destrutiva em alvenarias estruturais de blocos de concreto, através da técnica de macacos planos. A técnica já é utilizada em análises de estruturas de alvenaria de tijolos maciços e de pedras, sendo considerada bastante eficiente para a obtenção de propriedades mecânicas, no próprio local, sem causar danos permanentes. Os testes com macacos planos em alvenarias de unidades maciças já fazem parte de normas e recomendações internacionais como: ASTM C 1196 e 1197-09 e RILEM MDT.D.4 e MDT.D.5-04. As normas e as aplicações práticas já realizadas tratam apenas de alvenarias com elementos de tijolos ou pedras. Existe uma demanda para avaliação estrutural não destrutiva em alvenarias modernas, na maioria compostas por blocos vazados, de maneira que a técnica poderia ser utilizada. Entretanto, os macacos atualmente disponíveis podem ser aplicados em unidades maciças apenas, devido a limitações geométricas. Portanto, este estudo visa adaptar a técnica de macacos planos para análise não destrutiva em alvenarias modernas, compostas por blocos vazados de concreto. O teste adaptado é o teste de deformabilidade, em que se visa obter o módulo de elasticidade e uma estimativa da resistência à compressão. Para a realização deste trabalho, um novo modelo de macaco foi desenvolvido, possibilitando sua aplicação em blocos vazados, sendo testado em amostras de paredes. O equipamento foi desenvolvido com sucesso e utilizado em testes de deformabilidade em paredes com blocos de concreto. Como resultado, propriedades foram obtidas com boa proximidade com os valores esperados, indicando potencialidade da técnica para esse tipo de aplicação.

Palavras-chave: Macacos planos; teste de deformabilidade; avaliação não destrutiva; blocos vazados de concreto.

ABSTRACT

The present study deals with nondestructive evaluation of modern masonry built with hollow concrete blocks, through the flatjack technique. The technique is already used to evaluate masonry structures with solid bricks and stones and it is considered as efficient to obtain in situ mechanical properties, without any permanent damages. The tests in solid unit masonry using flatjack is included in international standards and recommendations as: ASTM C 1196 e 1197-09 e RILEM MDT.D.4 e MDT.D.5-04. The current standards and the practical applications deal with masonry with brick or stones elements only. Nondestructive evaluation in modern hollow block masonry is demanded and the flatjack can be used in these cases. However, the current available jack can be used only on solid units, due to its geometrical limitations. Therefore, this research proposes to adapt the flatjack technique for nondestructive evaluation in modern masonry built with hollow concrete blocks. The analyzed test is the deformability one, which the modulus of elasticity and an estimative of the compressive strength is wanted. In this research, a new flatjack equipment was developed to allow its application on hollow blocks and it was tested in modern masonry samples. The new equipment was successfully developed and it was used in flatjack tests on hollow concrete block masonry. As main results, masonry properties obtained from the flatjack technique was close to the expected ones, indicating the great potentiality of the technique for hollow blocks also.

Key-words: Flatjack; deformability test; nondestructive evaluation; hollow concrete blocks.

Sumário

<i>CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA</i>	0
<i>CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA</i>	1
<i>AGRADECIMENTOS</i>	3
<i>RESUMO</i>	5
<i>ABSTRACT</i>	6
<i>Índice de figuras</i>	10
<i>Índice de tabelas</i>	16
1 INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVOS	18
1.1.1 Geral.....	18
1.1.2 Específicos.....	19
1.2 JUSTIFICATIVA	19
1.2.1 Análise estrutural e avaliação não destrutiva.....	19
1.2.2 Técnica de macacos planos.....	20
1.2.3 Macacos planos em blocos vazados.....	20
1.3 Descrição dos capítulos	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 Avaliação Estrutural	23
2.2 Técnicas de avaliação não destrutiva	24
2.2.1 Múltiplas técnicas.....	29
2.3 Modelagem de alvenarias	30
2.4 Desenvolvimento da técnica de macacos planos	33
2.4.1 Classificação da técnica.....	34
2.4.2 Histórico.....	35
2.5 Testes com a técnica de macacos planos	39
2.5.1 Teste de tensão.....	41
2.5.2 Teste de deformabilidade.....	44
2.6 Calibração do macaco plano	47
2.7 Precisão dos testes	48

2.8	Vantagens e desvantagens	49
2.9	Fontes de erros	51
2.10	Normas e recomendações	53
2.10.1	ASTM C 1196-09 e C 1197-09	53
2.10.2	RILEM MDT.4-04 E RILEM MDT.5-04	54
2.10.3	Comparação geral entre ASTM e RILEM para os testes com a técnica de macacos planos	55
2.10.4	ASTM C1196:09.....	56
2.10.5	RILEM MDT.D.4	57
2.10.6	Comparação entre ASTM C1196-09 e RILEM MDT.4-04	59
2.10.7	ASTM C1197:09.....	59
2.10.8	RILEM MDT.D.5	60
2.10.9	Comparação entre ASTM C 1197-09 e RILEM MDT.5-04	61
2.11	Macacos planos em avaliações estruturais	62
2.12	Aplicação de macacos planos em estruturas não convencionais.....	65
2.13	Estudos sobre macacos planos	68
2.14	Desenvolvimento de novos modelos de macacos	71
2.15	Posição dos pontos de referência para medida de deformação nos testes com macacos planos	72
2.15.1	Estudos realizados para o teste de tensão.....	73
2.15.2	Estudos realizados para o teste de deformabilidade.....	75
2.16	Estudos sobre consideração da área efetiva dos macacos planos	78
2.17	Leitura da deformação	80
2.18	Macacos planos em alvenarias modernas	82
3	<i>Estudo experimental</i>.....	84
3.1	Demanda de um novo equipamento	84
3.2	Idealização de um novo macaco plano	86
3.2.1	Desenvolvimento para o teste de deformabilidade	87
3.2.2	Testes de verificação dos protótipos.....	88
3.3	Protótipo 1	88
3.4	Protótipo 2	91
3.5	Protótipo 3	94
3.5.1	Aumentando a resistência do macaco	94
3.6	Teste de Calibração	100

3.6.1	Resultados do teste de calibração	102
3.7	Amostras de alvenaria	105
3.7.1	Amostra utilizada.....	107
3.7.2	Projeto do pórtico metálico.....	108
3.7.3	Controle da alvenaria.....	109
3.7.4	Ensaio dos blocos.....	110
3.7.5	Ensaio dos prismas	111
3.7.6	Ensaio de parte da parede	113
3.7.7	Valores de referência	117
3.8	Alvenaria para teste com macacos	118
4	Teste com macacos planos	120
4.1.1	Aplicação de carga.....	120
4.1.2	Leitura das deformações	121
4.2	Procedimentos de ensaio	121
4.2.1	Posição dos macacos planos	121
4.2.2	Dois diferentes testes executados	122
4.2.3	Equipamentos e materiais	123
4.2.4	Conexão entre os macacos.....	123
4.2.5	Sistema de medição de deformação.....	125
4.2.6	Posição dos pontos de leitura de deformação	127
4.2.7	Preparação para início dos testes	129
4.2.8	Procedimento do teste.....	133
4.2.9	Fatores da calibração	133
4.3	Teste 1 e teste 2.....	134
4.3.1	Ensaio A e B.....	134
4.3.2	Parede 1 - Ensaio A (teste 1)	136
4.3.3	Parede 1 -Ensaio B (teste 1).....	138
4.3.4	Parede 2 - Ensaio A (teste 1)	140
4.3.5	Parede 2 - Ensaio B (teste 1).....	141
4.3.6	Parede 3 - Ensaio A (teste 2)	144
4.3.7	Parede 4 - Ensaio A (teste 2)	145
4.4	Resultados dos testes.....	148
4.4.1	Considerações sobre a tensão e a deformação considerada nos testes.....	148
4.4.2	Parede 1: ensaio A	150
4.4.3	Parede 1: ensaio B	152
4.4.4	Parede 2: ensaio A	153
4.4.5	Parede 2: ensaio B	154
4.4.6	Parede 3	155

4.4.7	Parede 4	156
4.5	Análise dos resultados	157
4.5.1	Comportamento da curva.....	158
4.5.2	Fissuras após os ensaios	159
4.5.3	Módulo de elasticidade.....	159
4.5.4	Estimativa da resistência da parede	160
4.5.5	Propriedades obtidas com os testes experimentais	161
4.5.6	Comparação entre os testes.....	163
4.5.7	Análise comparativa	165
5	CONCLUSÕES.....	168
5.1	Equipamento de macaco plano desenvolvido	168
5.2	Testes de macacos planos em alvenarias de blocos vazados.....	168
5.3	Valores obtidos com os testes de macacos planos	169
5.4	Conclusões gerais.....	170
5.5	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	170
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	172

Índice de figuras

Figura 1: Ensaio de infravermelho em laboratório.....	25
Figura 2: Instrumentação de ensaio acústico.....	26
Figura 3: Mapa de tensões principais obtidos com a técnica de correlação digital de imagens.	27
Figura 4: Modo de transmissão direta	28
Figura 5: Equipamento de radar.	28
Figura 7: Simulação numérica do ensaio de compressão diagonal.	31
Figura 8: Modelos representativos do teste de tensão com macacos planos.	33
Figura 9: Modelos numéricos do teste de deformabilidade com macaco planos.	33
Figura 10: Modelo de macaco de grande área.....	36
Figura 11: Esquematização de ensaio com dois macacos planos.....	37
Figura 12: Modelos de macacos planos com as dimensões mas utilizadas.....	40

Figura 13: Três formatos disponíveis de macacos planos.	40
Figura 14: Aplicação de pressão pelo macaco na alvenaria.	42
Figura 15: Etapas do teste de tensão.	42
Figura 16: Instrumentação de teste de tensão presente.	43
Figura 17: Exemplo de valores obtidos com o teste de tensão.	43
Figura 18: Aplicação de pressão por macacos planos no teste de deformabilidade.	45
Figura 19: Etapas do teste de deformabilidade.	45
Figura 20: Instrumentação do teste de deformabilidade.	46
Figura 21: Resultados obtidos com o teste de deformabilidade.	46
Figura 22: Resultado do teste de deformabilidade com carregamento cíclico.	47
Figura 23: Curva tensão por deformação obtida pelo teste de deformabilidade.	47
Figura 24: Sugestão do posicionamento dos pontos de referência no teste de tensão.	56
Figura 25: Procedimentos para teste de tensão com macaco plano.	57
Figura 26: Posicionamento dos pontos de referência para o teste de tensão.	58
Figura 27: Posicionamento dos pontos de referência no teste de deformabilidade.	60
Figura 28: Esquemática do teste de deformabilidade.	61
Figura 29: Curva obtida com o teste de deformabilidade da igreja de S. Estorgio.	62
Figura 30: Curvas para camada externa e interna da parede.	63
Figura 31: Localização dos macacos e dos pontos de referência em um pilar.	64
Figura 32: Prédio central do St Elizabeths Hospital, em Washington-DC (Estados Unidos). .	65
Figura 33: Paredes de blocos vazados ensaiadas com macacos planos.	66
Figura 34: Macaco plano especial desenvolvido para estruturas de concreto.	66
Figura 35: Curva obtida com o teste de macacos duplos.	67
Figura 36: Sobrado Aguiar Vallin, em Bananal.	67
Figura 37: Esquemática do ensaio em parede de taipa.	68
Figura 38: Curva obtida com o teste de macacos duplos.	68

Figura 39: Teste de deformabilidade em amostra de parede.	70
Figura 40: Equipamento de macaco plano flexível.	72
Figura 41: Configuração dos pontos de referência proposta.	74
Figura 42: Indicação das curvas se interceptando.	74
Figura 43: Deformação da alvenaria ao redor do rasgo.....	75
Figura 44: Exemplo de distribuição dos pontos de referência.....	76
Figura 45: Recomendação da configuração dos pontos de referência.....	76
Figura 46: Deformação da região entre os macacos no teste de deformabilidade.	77
Figura 47: Danos decorrentes de altas tensões aplicadas no teste de deformabilidade.....	77
Figura 48: Trincas observadas em teste de deformabilidade realizado até a ruptura da alvenaria.....	78
Figura 49: Macaco semioval com rede de marcação.....	79
Figura 50: Área de contato obtida através da rede de marcação.	79
Figura 51: Área de contato obtida com papel carbono e com rede de marcação.	79
Figura 52: Leitura através de extensômetro mecânico.	80
Figura 53: Leitura com extensômetro.....	81
Figura 54: Teste de deformabilidade com LVDTs para obtenção da deformação.....	82
Figura 55: Macaco plano retangular da ANA.	85
Figura 56: Bloco vazado de concreto.	85
Figura 57: Modelos de macaco de uma aba e de duas abas com as respectivas área de atuação.	86
Figura 58: Esquema transversal do protótipo 1.	89
Figura 59: Macaco de uma e duas abas do protótipo 1.	89
Figura 60: Macaco de duas abas posicionado no bloco.....	90
Figura 61: Teste de resistência do macaco 1 na prensa hidráulica.	90
Figura 62: Corte transversal do macaco modelo 2 com medidas em centímetros.	91
Figura 63: Solda TIG executada no SENAI.	92

Figura 64: Macaco de uma aba do protótipo 2.	92
Figura 65: Dois modelos estudados de macacos do protótipo 2 sobre os blocos.	93
Figura 66: Teste de estanqueidade do protótipo 2.	93
Figura 67: Esquemática do corte transversal do protótipo 3.	95
Figura 68: Quadro retangular metálico e solda para fechamento do quadro.	96
Figura 69: Inserção do quadro retangular entre as duas chapas de inox.	96
Figura 70: Solda ponto realizada em toda a borda do equipamento.	97
Figura 71: Medição da espessura do macaco.	97
Figura 72: Processo de fabricação do modelo 3.	98
Figura 73: Solda TIG realizada no protótipo 3.	98
Figura 74: Realização do furo em fresadora.	99
Figura 75: Modelo 3 do macaco plano.	99
Figura 76: Teste de calibração na prensa hidráulica.	101
Figura 77: Bomba conectada ao macaco confinado na prensa hidráulica durante o teste de calibração.	101
Figura 78: Curvas que relacionam a pressão interna do macaco desenvolvido com a força aplicada e com a pressão externa.	103
Figura 79: Curva que relaciona a pressão interna e a força externa do macaco no teste de calibração.	104
Figura 80: Curva que relaciona a pressão interna e a força externa do macaco no teste de resistência.	105
Figura 81: Configuração da amostra de alvenaria a ser testada macacos planos.	107
Figura 82: Desenhos para ilustração de montagem do pórtico.	108
Figura 83: Verificação dos perfis.	109
Figura 84: Pórtico metálico e amostra da alvenaria construída.	109
Figura 85: Teste de resistência à compressão nos blocos de concreto.	110
Figura 86: Capeamento dos prismas com pasta de cimento.	112

Figura 87: Teste dos prismas na prensa.....	112
Figura 88: Amostra da parede testada na prensa com sistema de medição de deformação. ...	114
Figura 89: Região removida da parede para teste na prensa.	114
Figura 90: Amostra sendo ensaiada na prensa, indicando o sistema de medição da deformação utilizado e as tiras de forro pacote.....	115
Figura 91: Amostra de parede testada na prensa com indicação dos pontos de medição da deformação.	116
Figura 92: Curvas tensão por deformação para a amostra 1.....	116
Figura 93: Curva tensão por deformação para a amostra 2.	117
Figura 94: Construção das paredes.....	119
Figura 95: Parede sendo construída.....	119
Figura 96: Lote de paredes prontas.	119
Figura 97: Indicação da posição dos macacos planos na alvenaria.	122
Figura 98: Conexões dos macacos.....	123
Figura 99: Ilustração das conexões no teste em uma face do bloco.	124
Figura 100: Esquema de conexão entre os macacos para o teste com duas as duas faces do bloco.	125
Figura 101: Sistema de medição de deformação para a alvenaria entre os macacos.	126
Figura 102: Sistema de medição para os demais pontos de leitura.	127
Figura 103: Pontos de leitura de deformação para o teste 1.....	128
Figura 104: Pontos de leitura de deformação para o teste 2.....	129
Figura 105: Marcação da região a ser testada.....	129
Figura 106: Processo de remoção da argamassa na junta.....	130
Figura 107: Rasgo acabado, com ausência total de argamassa.	130
Figura 108: Colagem e montagem do sistema de leitura de deformação.....	131
Figura 109: Macaco encunhado na junta.....	132
Figura 110: Processo de preenchimento do sistema com óleo.....	132

Figura 111: Indicação dos rasgos nas juntas para os ensaios A e B.....	135
Figura 112: Bulbos de tensão esperados para cada ensaio.	136
Figura 113: Ilustração dos testes realizados com macacos planos.	136
Figura 114: Realização do ensaio A da parede 1.	137
Figura 115: Ensaio B da parede 1.....	139
Figura 116: Fissuras na alvenaria ao redor da região testada.	139
Figura 117: Ensaio A da parede 2.	140
Figura 118: Ensaio B da parede 2.....	142
Figura 119: Fissuras na parede ao redor da região testada.	142
Figura 120: Flexão na parede 2.	143
Figura 121: Ensaio realizado nas duas faces da parede 3.....	144
Figura 122: Fissuras na parede 3 após o ensaio.....	145
Figura 123: Duas faces da parede 4.....	146
Figura 124: Conexões entre os 4 macacos na parede 4.	146
Figura 125: Fissuras após o ensaio na parede 4.....	147
Figura 126: Deformações provenientes da flexão da parede.....	150
Figura 127: Curva tensão por deformação e linha de tendência do ensaio A da parede 1.....	152
Figura 128: Curva tensão por deformação e linha de tendência do ensaio B da parede 1	153
Figura 129: Curva tensão por deformação e linha de tendência do ensaio A da parede 2.	154
Figura 130: Curva tensão por deformação e linha de tendência para o ensaio B da parede 2.	155
Figura 131: Curva tensão por deformação e linha de tendência do teste na parede 3.....	156
Figura 132: Curva tensão por deformação e linha de tendência para teste da parede 4.....	157
Figura 133: Valores de módulo e resistência obtidos em diferentes testes para as paredes 1 e 2	164
Figura 134: Valores de módulo e resistência obtidos diferentes testes para as paredes 3 e 4.	165

Índice de tabelas

Tabela 1: Resistência à compressão dos blocos.	111
Tabela 2: Valores de resistência à compressão dos prismas segundo área bruta e área líquida.	113
Tabela 3: Propriedades das amostras retiradas das paredes.	117
Tabela 4: Dados de referência segundo testes dos prismas.	118
Tabela 5: Dados obtidos no ensaio A da parede 1.....	138
Tabela 6: Dados obtidos no ensaio B da parede 1.....	140
Tabela 7: Dados obtidos no ensaio A da parede 2.....	141
Tabela 8: Dados obtidos durante o ensaio B da parede 2.....	143
Tabela 9: Dados coletados no teste na parede 3.	145
Tabela 10: Dados obtidos no teste com a parede 4.....	147
Tabela 11: Deformações no ensaio A da parede 1.....	151
Tabela 12: Deformação e pressão na alvenaria do ensaio B da parede 1.....	152
Tabela 13: Deformação e pressão na alvenaria do ensaio A da parede 2.....	153
Tabela 14: Deformação e pressão aplicada na alvenaria no ensaio B da parede 2.....	155
Tabela 15: Deformação e pressão na alvenaria no teste na parede 3.	156
Tabela 16: Deformação e pressão na alvenaria do teste da parede 4.	157
Tabela 17: Propriedades obtidas através da técnica de macacos planos.	161
Tabela 18: Diferenças entre os valores obtidos com macacos planos nos testes nas paredes.	162
Tabela 19: Valores médios obtidos com macacos planos.	163
Tabela 20: Propriedades da alvenaria pelos diferentes testes.....	164
Tabela 21: Diferenças entre os valores obtidos pelos macacos planos com os valores de referência.	165

1 INTRODUÇÃO

Há inúmeros casos de edifícios em alvenaria estrutural com suspeitas na segurança estrutural. Essas suspeitas podem estar relacionadas a materiais de baixa qualidade, a técnicas de construção inadequadas e à falta de controles na execução da estrutura.

Fatores como a mudança no uso típico de um edifício (uso comercial em um edifício projetado como residencial), novas normas de segurança e possibilidades de perda de resistência por ações de intempéries são indicativos que podem levar a dúvidas sobre a integridade estrutural do edifício. Também são exemplos desses indicativos a possibilidade de desgaste de materiais ao longo do tempo, falta de registros sobre os materiais e as técnicas construtivas empregados na construção, além do aparecimento de patologias. Patologias como trincas na alvenaria e deformações excessivas podem ser sinais da necessidade de uma avaliação estrutural.

Para diagnósticos mais precisos sobre a estrutura é fundamental o conhecimento detalhado dos materiais que a constituem, além de informações quantitativas, como as solicitações na estrutura e as propriedades mecânicas dos elementos. Para obter dados reais, ensaios são necessários, os quais podem ser destrutivos ou não destrutivos.

Os ensaios destrutivos são aqueles em que danos são causados à amostra analisada da estrutura, sendo necessários reparos. Nesses casos há a destruição das partes testadas, inviabilizando sua reutilização, como é o caso da remoção e ruptura de amostras. Já os ensaios não destrutivos são aqueles que possibilitam obter as propriedades desejadas sem causar danos permanentes à estrutura, por vezes, danos temporários são aceitos, desde que permitam fácil reparação.

Em alguns casos, a avaliação destrutiva não é viável, seja por exigência de conservação ou limitação de aplicação. As exigências de conservação estão relacionadas a monumentos tombados ou patrimônios históricos, além dos casos em que a estrutura está em uso (e a retirada de amostras não seria desejável para os usuários). Filipe (2012) afirma que métodos de ensaios destrutivos, por vezes, não são aceitáveis pois podem danificar patrimônio que não pode sofrer alterações de nenhum tipo. As limitações de aplicação são aquelas ligadas aos custos e ao tempo de remoção e transporte das amostras.

A vantagem da avaliação não destrutiva é justamente não causar danos permanentes à estrutura analisada. Uma das técnicas de análise não destrutivas mais utilizadas para avaliação em alvenarias estruturais é a de macacos planos, conhecido internacionalmente por “flatjack”.

Essa ideia é confirmada por Parivallal, et al. (2011), que afirma que a técnica é a mais utilizada entre as de análise não destrutiva para a determinação de propriedades mecânicas da alvenaria.

A técnica de macacos planos é considerada, por grande parte da literatura, como sendo não destrutiva. Além disso é aplicada no próprio local da avaliação, não necessitando de remoção de amostras. Os ensaios disponíveis permitem obter propriedades mecânicas da alvenaria como: módulo de elasticidade, resistência à compressão e o valor presente de compressão. Esses ensaios fazem parte de normas internacionais, como ASTM C1196-09, ASTM C1197-09 e recomendações, como RILEM MDT.D.4-04, RILEM MDT.D.5-04.

A técnica é reconhecida pelos autores como sendo bastante eficiente em avaliações estruturais. Segundo Binda e Tiraboschi (2013), “o teste de macaco plano é certamente o mais atrativo já que pode ser usado para definir o valor local de compressão e também obter o comportamento tensão por deformação da alvenaria”. Maier, Rossi e Landriani (1983) afirmam que o teste de macaco plano é uma ferramenta poderosa pois pode determinar propriedades mecânicas sem a extração de amostras. De acordo Schuller (2001), "teste com macacos planos é uma maneira confiável de se determinar, in loco, o comportamento à compressão da alvenaria". Turner (1992) afirma que "o teste de macacos planos é preciso na determinação de propriedades sobre força-deformação da alvenaria".

As normas, recomendações e grande parte dos estudos já relacionados sobre o tema são referentes à análise de alvenarias com unidades maciças, como pedras e tijolos. Entretanto, alvenarias modernas, compostas por blocos vazados de concreto, também podem demandar avaliações, de modo que a avaliação não destrutiva, mais especificamente a técnica de macacos planos, poderia ser aplicada de maneira eficiente nesses casos.

Assim, este trabalho propõe uma adaptação na técnica existente para possibilitar sua aplicação nesse tipo de estrutura, apresentando opções de modelos de equipamentos e os resultados experimentais obtidos para essa aplicação.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

O trabalho desenvolvido teve como objetivo adaptar, testar e viabilizar a técnica de macacos planos para análises de alvenarias compostas por blocos vazados de concreto.

1.1.2 Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho foram:

- Apresentar as recomendações formalizadas para aplicação da técnica de macacos planos;
- Identificar as principais fontes de erros na utilização de macacos planos para análises de estruturas;
- Identificar e propor o modelo mais eficiente de um novo macaco plano para aplicação em alvenarias com blocos vazados;
- Disponibilizar os procedimentos adotados em testes em alvenarias de blocos, assim como apresentar os resultados obtidos e a eficiência da técnica para essa aplicação.

1.2 JUSTIFICATIVA

1.2.1 Análise estrutural e avaliação não destrutiva

A análise estrutural apresenta uma importante função pois fornece dados que, sob criteriosa interpretação, permitem atestar ou não a segurança estrutural de uma construção, minimizando os riscos sociais (segurança dos usuários) e econômicos (custo do edifício, custos de manutenção).

As avaliações não destrutivas possibilitam obter informações sem causar danos permanentes à estrutura, o que é interessante em edificações que não permitem tais danos. Monumentos históricos, por exemplo, não permitem nenhum tipo de dano ou alteração devido à necessidade de preservação. Outro caso é o de edifícios em utilização, em que a danificação de parte da estrutura, como remoção de amostras, não é desejável pelos usuários. Nesses casos, a avaliação não destrutiva poderia ser uma alternativa viável.

As técnicas destrutivas tradicionais requerem a remoção da amostra para testes em laboratório. O processo de remoção e transporte das amostras é custoso, uma vez que demanda equipamentos e cuidados especiais, além do custo do ensaio propriamente dito. Além do ponto de vista econômico, o processo de remoção e transporte de amostras, por mais cuidadoso que seja, pode danificá-las, alterando os resultados originais. Grande parte das técnicas não destrutivas podem ser aplicadas na própria estrutura, testando-a sob condições reais de carregamento, apresentando benefícios econômicos e técnicos.

Segunda Miha (2001) "o processo de retirada de amostras com tamanho adequado até o transporte para o laboratório é, geralmente, um procedimento custoso e com alto tempo consumido". Epperson e Abrams (1989) afirmam que: "a remoção de amostras intactas pode ser difícil de se fazer, e há muitos casos em que isso não é aceitável para a aparência da estrutura. E de acordo Woodham e Schuller (2003), "a remoção de amostras de alvenaria para testes desfigura o edifício e frequentemente danifica a amostra".

1.2.2 Técnica de macacos planos

A técnica de macacos planos é considerada pela maioria dos autores como sendo não destrutiva. Além dessa vantagem, também é aplicada diretamente na estrutura, não necessitando de remoções de amostras. É considerada como uma ferramenta eficiente na avaliação de estruturas de alvenaria.

Segundo Binda e Tiraboschi (2001), "os resultados obtidos com a técnica podem ser usados de maneira bem-sucedida em diagnósticos de estruturas de alvenaria". Woodham e Schuller (2003) afirmam que "a experiência em testes com macacos planos tem demonstrado sua utilidade quanto ao custo-benefício para a determinação de propriedades da alvenaria".

Os testes com macacos planos permitem obter informações essenciais para uma análise da estrutura, como módulo de elasticidade, resistência à compressão e tensão de compressão presente no local testado. A análise conjunta da resistência à compressão e da tensão presente é importante pois possibilita interpretar se a estrutura está supercarregada ou subcarregada, ou seja, se há necessidade de reforços ou se é capaz de receber novos carregamentos. As primeiras normas sobre o tema surgiram na década de 90, o que demonstra uma relativa atualidade do tema.

1.2.3 Macacos planos em blocos vazados

A técnica atualmente disponível pode ser aplicada apenas em alvenarias de unidades maciças, como tijolos, pedras e terra batida, principalmente por limitações geométricas do equipamento. Isso faz com que seu uso seja mais comum em estruturas antigas. Porém, estruturas novas também podem demandar avaliações, de modo que macacos planos poderiam ser uma alternativa com vantagens técnicas e econômicas.

Alvenarias de blocos vazados representam a maioria das estruturas modernas de alvenaria, sendo bastante representativa para o sistema empregado no Brasil. Assim, viabilizar a técnica para alvenarias de blocos vazados de concreto pode torná-la uma opção de uso nas avaliações estruturais de alvenarias modernas.

Schuller (2001) afirma que uma das melhorias desejáveis para a técnica de macacos planos atual é: "uma proposta para avaliar alvenarias com unidades vazadas, com construção de unidades de blocos de concreto sem graute". Ainda segundo Schuller (2001), "o macaco plano atual não pode ser usado em alvenarias desse tipo, porém há muitas situações em que o comportamento à compressão de construção com unidades vazadas é requerida."

Vale ressaltar que durante a pesquisa bibliográfica realizada neste trabalho, não foram encontrados trabalhos sobre a aplicação bem-sucedida de macacos planos em unidades vazadas, tratando-se, portanto, de uma lacuna atual.

1.3 Descrição dos capítulos

O trabalho desenvolvido está organizado em capítulos. O trabalho é dividido em sete capítulos.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica realizada neste trabalho, apresentando diversos trabalhos publicados sobre técnicas não destrutivas e sobre macacos planos mais especificamente, assim como as normas internacionais referente ao tema. Nesse capítulo, comparação entre as normas é feita, identificando as diferenças entre elas, além disso, pontos são analisados, como precisão dos testes e as principais dificuldades e limitações da técnica de macacos planos segundo diferentes autores.

O capítulo 3 apresenta o estudo experimental realizado no desenvolvimento do macaco e da construção e teste das amostras. As limitações da técnica atual para alvenaria de blocos vazados são listadas, apontando as soluções necessárias em um novo equipamento. Com base nessas soluções protótipos foram projetos e fabricados, sendo apresentado o processo de fabricação e os resultados de eficiência de cada modelo de protótipo. A construção e os testes de controle das amostras de alvenaria também são apresentados nesse capítulo.

O capítulo 4 é referente aos testes realizados com o novo equipamento de macaco plano desenvolvido. São apresentados os diferentes tipos de testes realizados, assim como as configurações e os procedimentos adotados em cada um dos tipos. Os dados experimentais coletados e as particularidades identificadas em cada teste são listados, bem como a análise desses dados para a obtenção dos resultados do teste, no caso, as curvas de deformabilidade de cada parede. Com base nas curvas, valores de módulo de elasticidade e resistência à

compressão são extraídos e comparados com os valores das amostras de prisma e partes das paredes.

O capítulo 5 apresenta as principais conclusões possíveis de serem obtidas com a análise dos resultados experimentais obtidos. É destaque a conclusão que aponta que a técnica de macacos planos foi desenvolvida com sucesso para a aplicação em alvenarias com blocos vazados de concreto. Por fim, apresentam-se algumas recomendações para trabalhos futuros sobre o tema desenvolvido neste trabalho. Algumas recomendações são voltadas quanto à aplicação do novo equipamento em alvenarias de diferentes propriedades para analisar uma possível validação num contexto mais amplo da alvenaria moderna.

O capítulo 7 apresenta as referências bibliográficas utilizadas no corpo do texto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A técnica de macacos planos é, atualmente, utilizada como parte de avaliações não destrutivas de alvenarias de tijolos ou pedras, geralmente construções históricas. A técnica é considerada como eficiente, pois permite obter propriedades da alvenaria que auxiliam numa avaliação estrutural. A avaliação é necessária quando há algum tipo de suspeita na segurança estrutural de um edifício.

Diversos trabalhos já foram realizados e publicados sobre técnicas não destrutivas e, mais especificamente sobre macacos planos. Alguns desses são apresentados e comparados nesse capítulo. Com base nos trabalhos apresentados, algumas análises são possíveis de serem feitas, como valores de precisão da técnica, as principais dificuldades e limitações apontadas por pesquisadores e o processo de desenvolvimentos dos procedimentos e equipamentos.

2.1 *Avaliação Estrutural*

Inúmeros casos de edificações possuem suspeita quanto à segurança estrutural. Entre esses casos estão estruturas antigas e edifícios modernos.

Nas estruturas antigas, muitas vezes não se tem conhecimento sobre a qualidade dos materiais utilizados. Além disso existe a possibilidade de degradação da estrutura pela ação do tempo, seja por abandono, por não cumprir as manutenções necessárias ou até mesmo pela vida útil dos materiais. Tais estruturas podem possuir valor histórico ou, até mesmo, possibilidade de utilização.

Nos edifícios modernos, a suspeita da segurança estrutural ocorre quando patologias começam a surgir ou quando edifícios da mesma tipologia começam a apresentar problemas estruturais. Em geral, suspeita-se de materiais de baixa qualidade, falta de controle dos materiais, falta de padronização e técnicas construtivas inadequadas. Essas edificações podem possuir um alto valor tanto econômico, quanto social.

Epperson e Abrams (1989) afirmam que "a resistência ou a rigidez de uma estrutura podem precisar de avaliação quando a função do edifício é redefinida, as cargas aumentam, as normas de construção são alteradas, quando deseja-se conhecer o risco de se atingir algum estado limite ou quando a estrutura apresenta sinais de deterioração". Assim, os autores afirmam que o objetivo principal de uma avaliação é de verificar se o sistema estrutural resiste às presentes solicitações ou se resistirá às futuras.

A avaliação estrutural é importante para responder às suspeitas de segurança estrutural, já que envolve a obtenção e análise de dados da estrutura. As avaliações, de uma maneira em geral, podem ser divididas em três principais classificações: destrutiva, semidestrutiva e não destrutiva.

A avaliação destrutiva é aquela que, para se obter dados da estrutura, danos precisam ser causados. Normalmente, tratam-se de danos permanentes, em que há profunda alteração das condições iniciais, de modo que o reparo precisa ser feito com elementos diferentes dos originais. Um exemplo é a retirada de amostras para ensaios que, para obter propriedades, inutilizam a amostra para futuros usos, havendo, por exemplo, o rompimento dessas.

Já a avaliação não destrutiva é aquela em que a obtenção dos dados desejados é possível sem a necessidade de causar danos permanentes na estrutura. Para se conhecer a resistência, por exemplo, não é necessário o rompimento de uma amostra, uma vez que a resistência é medida de maneira indireta. Por vezes, mesmo com a necessidade de pequenos danos, os testes podem ser considerados como não destrutivos, desde que a integridade da estrutura seja mantida. Landriani e Taliércio (1986) definem que uma técnica pode ser classificada como tal, desde que "após completar o teste, a estrutura possa ser restaurada para as suas condições originais". São exemplos a avaliação visual e a ultrassonografia.

A avaliação semidestrutiva é aquela em que houve alteração das condições iniciais da estrutura, reparos são possíveis, porém são trabalhosos. Também podem ser casos de avaliação semidestrutiva, quando apenas uma pequena parcela da estrutura é comprometida nos testes realizados. A técnica de "bond wrench" pode ser considerada um exemplo.

Há casos em que não se permite ou não se deseja qualquer tipo de dano na estrutura, sejam por questões históricas ou de segurança e utilização. Para Gregorczyk e Lourenço (2000), a preservação de arquiteturas antigas é um problema fundamental nas sociedades modernas, e que grandes investimentos têm sido feitos para desenvolver meios de inspeção. Nesses casos, a avaliação não destrutiva representa uma alternativa.

2.2 Técnicas de avaliação não destrutiva

Há inúmeras opções de análises não destrutivas possíveis de serem aplicadas em estruturas de um modo geral. Apesar do foco do trabalho ser na técnica de macacos planos, é válido apresentar as principais alternativas para avaliação da estrutura.

De um modo em geral, a aplicação de técnicas não destrutivas necessita de um profissional bastante capacitado. Mesmo com equipamentos simples, o modo de utilização do equipamento e a interpretação dos dados obtidos requerem experiência e conhecimento técnico.

As técnicas mais simples são aquelas que não necessitam de equipamentos e tecnologias especiais, apesar de exigirem alto conhecimento técnico do avaliador. Algumas dessas técnicas são: inspeção visual, exploração física do local, avaliação de projetos, conferência dos memoriais, levantamento histórico (matérias e técnicas usualmente empregados na época de construção da estrutura). Com a necessidade de mais informações, outras técnicas podem ser aplicadas em conjunto. Segundo Miha (2001), "pela examinação visual do edifício, informações gerais sobre o sistema estrutural podem ser obtidas, já por testes não destrutivos como radar, informações qualitativas referentes à estrutura são obtidas".

Infravermelho é uma técnica óptica, que obtém dados da estrutura pela interpretação das imagens térmicas obtidas, sendo a termografia o seu princípio de funcionamento. Nesse caso, a temperatura dos materiais é convertida em uma imagem termal pela irradiação infravermelha dos materiais e, através dessa imagem, uma avaliação pode ser feita. São exemplos de aplicação prática a verificação de distribuição de tensões em um elemento e do controle de qualidade da construção, podendo verificar a presença de armaduras, por exemplo. Hamid (2013) aponta como vantagens, o fato de sua utilização ser prática e apresentar dados úteis, já Khan (2014) ressalta a não necessidade de contato com a estrutura, além da possibilidade de identificar microfissuras na alvenaria (pelas discontinuidades nos gradientes de temperatura). A Figura 1 apresenta um ensaio com infravermelho.

Figura 1: Ensaio de infravermelho em laboratório.



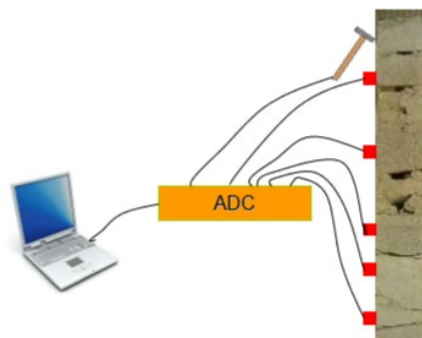
Fonte: Próprio autor.

Ultrassonografia é uma técnica de emissão e propagação de ondas. Segundo Khan (2014), a técnica consiste na transmissão e reflexão de ondas e pode ser aplicada em alvenarias para

identificar variações no material ou presença de fissuras, já que diferenças na densidade alteram a propagação de ondas. Segundo Miranda (2011), a ultrassonografia funciona com ondas de alta frequência, até 10 MHz e a vantagem da alta frequência é que permite a leitura de mais pontos por segundo. Nessa técnica, a interpretação é feita baseada na relação entre o impacto gerado e o recebido, bem como com o tempo de viagem da onda.

Sonografia é uma técnica acústica, que obtém propriedades através da velocidade de propagação de ondas. A diferença com relação à ultrassonografia é a frequência de ressonância dos acelerômetros (emitem as ondas). Segundo Miranda (2011), a ultrassonografia trabalha com baixas frequências, de até 50 kHz. A Figura 2 ilustra a instrumentação de um ensaio acústico, envolvendo o sistema de aquisição de dados.

Figura 2: Instrumentação de ensaio acústico.

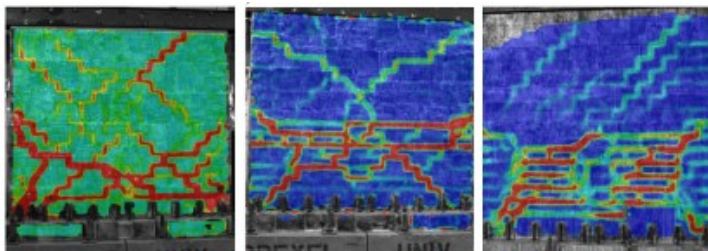


Fonte: Miranda (2011).

Emissão acústica, técnica de princípio acústico. Nesse caso, ondas são geradas por uma fonte localizada dentro do material analisado. Khan (2014) aponta eficiência da técnica para obter informações de danos em curso, sendo indicada para monitoramento de estruturas em tempo real. Os danos podem ser identificados pois a energia acumulada nos acelerômetros aumenta com a presença de danos próximos a eles.

Correlação digital de imagens é uma técnica óptica que possibilita a obtenção de um mapa de deformações na superfície de uma estrutura. Esse mapa pode ser obtido pelo processamento de imagens da estrutura obtidas antes (referência) e durante o processo de carregamento. Segundo Vanniamparambil, et al. (2014), deve-se aplicar pintura aleatória com spray na superfície da estrutura a ser estudada, pois os resultados serão obtidos através da alteração da intensidade lumínica da pintura, que ocorre devido a deformações. Os autores afirmam que a técnica é precisa para identificar a progressão de fissuras, bem como para fornecer uma visão geral do comportamento da estrutura.

Figura 3: Mapa de tensões principais obtidos com a técnica de correlação digital de imagens.

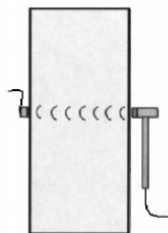


Fonte: Vanniamparambil, et al. (2014).

Teste de cisalhamento ("shove test") é um teste em que se tem como objetivo medir a resistência ao cisalhamento da junta horizontal de uma parede. A resistência é medida através do deslocamento horizontal de um bloco. Nesse teste, uma unidade da alvenaria deve ser removida, assim como uma junta vertical. Um macaco plano é inserido na junta vertical, aplicando cargas na lateral de um bloco. Esse bloco pode se mover na direção oposta à aplicação de carga, no espaço livre deixado pela retirada do outro bloco. A resistência é correspondente à força necessária aplicada para fazer com que o bloco inicie o deslocamento. Apesar das remoções, Noland, Atkinson, Kingsley e Schuller (1990) afirmam que o teste pode ser considerado como não destrutivo pois o bloco removido pode ser recolocado e a junta refeita.

McCann e Forde (2001) citam opções de técnicas não destrutivas que podem ser aplicadas em estruturas de concreto e de alvenaria. Os autores agruparam as técnicas de acordo com seu princípio de funcionamento. Inicialmente, alguns princípios de avaliação são citados, agrupando algumas técnicas em cada um, são esses: frequência sônica, radiografia e teste elétrico.

Transmissão sônica é uma técnica cujo princípio de funcionamento é a frequência sônica. Costuma ser aplicada para verificação de uniformidade no elemento, checando a presença de vazios internos. Hamid (2013) aponta o baixo custo de utilização como vantagem. De acordo com McCann e Forde (2001), ondas são emitidas em baixas frequências (entre 0,5 e 10 kHz), de modo que a velocidade de viagem das ondas é medida e utilizada para a análise. A Figura 4 apresenta um esquema de utilização da técnica.

Figura 4: Modo de transmissão direta

Fonte: McCann e Forde (2001).

A radiografia é a técnica em que raios X, gama ou nêutron são emitidos obter informações do interior de um elemento. Segundo McCann e Forde (2001), a análise dos resultados é feita com base na comparação entre as ondas emitidas e as que ultrapassam o elemento, já que a parte absorvida irá depender da densidade do material. Desse modo, podem ser identificados: porosidades, falhas, vazios e materiais estranhos.

Radar ou "surface penetration radar" possui amplas possibilidades de uso, sendo utilizado para identificar vazios, presença de armaduras no interior de elementos, assim como medir a profundidade dessas ocorrências. Tem como vantagem a velocidade de aplicação e como desvantagem a dificuldade na interpretação dos dados recebidos. A Figura 5 apresenta os equipamentos da técnica radar. McCann e Forde (2001) afirmam que o equipamento emite ondas eletromagnéticas em alta frequência, próxima a 1 GHz, podendo ser menor para se conseguir maior penetração no elemento (até 0,1 GHz). Hamid (2013) afirma que é possível identificar a superfície que separa dois materiais diferentes.

Figura 5: Equipamento de radar.

Fonte: Próprio autor.

A técnica de vibração transversal tem como princípio a análise das frequências principais de vibração do material. Targa, Ballarin e Biaggioni (2005) citam a possibilidade de se obter o módulo de elasticidade de materiais com boa precisão através da técnica.

2.2.1 Múltiplas técnicas

A integração de múltiplas técnicas não destrutivas é desejável, já que cada técnica possui limitações próprias, aproximações e fontes de erro. O uso simultâneo de diferentes técnicas possibilita uma interpretação mais aprofundada dos danos, havendo complementação entre elas. Segundo Khan (2014), a associação de técnicas pode fazer com que haja superação das limitações individuais.

Khan (2014) sugere o uso de diferentes técnicas não destrutivas em conjunto em avaliações estruturais para o melhor acesso às condições de alvenaria. Além disso, cita que é extremamente importante conhecer as limitações e restrições de cada técnica não destrutiva empregada. Noland, Atkinson, Kingsley e Schuller (1990) afirmam que "nenhuma técnica isolada é suficiente para uma avaliação não destrutiva completa, ou seja, para uma avaliação compreensiva e de qualidade". Também citam que "cada técnica deve ser usada na sua melhor vantagem em uma combinação com outras técnicas para desenvolver um conjunto de evidências sobre as condições da estrutura existente".

Khan (2014) utilizou três técnicas não destrutivas para monitorar uma alvenaria ensaiada em laboratório, em que se aplicava uma carga vertical constante e carga horizontal cíclica. Foram utilizadas técnicas com funcionamento acústico, como ultrassom e emissão acústica e de funcionamento ótico, como infravermelho. O infravermelho foi utilizado para verificar as condições iniciais da alvenaria (presença do graute) antes dos carregamentos, e de verificar fissuras durante os carregamentos. A emissão acústica se mostrou efetiva no monitoramento de danos na estrutura durante a aplicação dos carregamentos. O ultrassom foi utilizado no final de cada ciclo de carga para identificação dos danos após a aplicação do carregamento, permitindo identificar fissuras. Como conclusão, Khan (2014) afirma que as três técnicas utilizadas em conjunto mostraram ser eficientes no monitoramento de alvenarias, possibilitando a interpretação dos danos sofridos pela estrutura.

Vanniamparambil, et al. (2014) aplicaram as técnicas de emissão acústica e correlação digital de imagens para monitorar danos progressivos em amostras de paredes de concreto, ensaiadas em laboratório sob carregamento cíclico. Como conclusão, a utilização das duas técnicas em conjunto foi eficiente na quantificação dos danos progressivos, identificando o início da

fissuração, o crescimento das fissuras e a ruptura da parede. Os resultados de ambas as técnicas foram correlacionados, interpretando conjuntamente o campo total de tensões principais (obtido pela correlação de imagens) e valores de energia (obtido pela emissão acústica).

Epperson e Abrams (1989) aplicaram cinco métodos não destrutivos na avaliação estrutural de um edifício antigo de alvenaria estrutural, sendo eles: ondas eletrossônicas, ondas sônicas, macacos planos (teste de tensão e deformabilidade) e teste de cisalhamento ("shove test"). Para conhecer a precisão dos métodos, amostras foram retiradas e ensaiadas de maneira destrutiva, obtendo propriedades. Os autores aplicaram as diferentes técnicas para obter diferentes propriedades da alvenaria, que se complementaram para uma avaliação estrutural mais completa.

Noland, Atkinson, Kingsley e Schuller (1990) analisaram experimentalmente diferentes técnicas não destrutivas para avaliação de alvenaria, como: macacos planos, martelo de Schmidt, teste de cisalhamento, teste de aderência por arrancamento, pulso mecânico e pulso ultrassônico. Como conclusão, recomenda-se o uso em conjunto da técnica de macacos planos com a do teste de cisalhamento, para controle da carga vertical, sendo que ambas realizam medições diretas, enquanto que as técnicas de pulso realizam medições indiretas. Especificamente com relação à técnica com macacos planos, cita-se que "o teste com macacos tem sido facilmente integrado no processo de avaliação estrutural e provê informações complementares a outros testes não destrutivos".

2.3 Modelagem de alvenarias

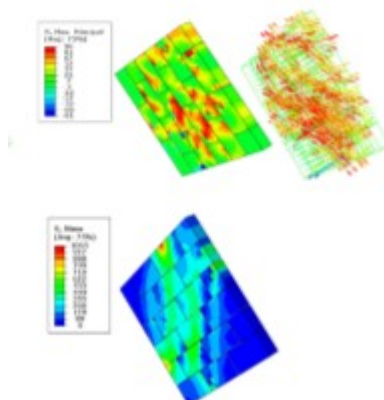
A modelagem numérica é o desenvolvimento e análise de um modelo computacional que visa simular as condições reais, através da atribuição de propriedades e inserção de ações. A alvenaria pode ser modelada e analisada para diferentes carregamentos e de condições de contorno.

A modelagem pode ser uma ferramenta muito útil em uma análise estrutural, permitindo obter resultados prévios sobre a distribuição de tensão, identificar pontos críticos e tensões máximas presentes. Também pode ser utilizada em conjunto com ensaios experimentais, possibilitando verificar diferentes parâmetros a partir de um modelo original, diminuindo o número de amostras necessárias. No método dos elementos finitos, divide-se uma estrutura complexa em

uma quantidade finita de elementos com as devidas propriedades, de modo que esses elementos se interagem entre si, simulando o comportamento de um modelo complexo.

Bolhassani, et al. (2015) estudou a construção de um modelo numérico de alvenaria parcialmente grauteada de blocos de concreto. Para esse estudo, o autor utilizou o programa de elementos finitos ABAQUS, através da micromodelagem. Elementos de interface foram considerados entre os componentes presentes: blocos, graute e argamassa. Para obter os parâmetros a serem inseridos no modelo, como parâmetros elásticos e inelásticos para critérios de escoamento e ruptura, ensaios em laboratórios foram realizados. Como conclusão, aponta-se boa concordância entre as respostas do modelo numérico e dos ensaios experimentais. Desse modo, o modelo validado foi proposto para simular a estrutura estudada, dentro das particularidades do trabalho. A Figura 6 apresenta modelos numéricos que simulam o teste de compressão diagonal da alvenaria parcialmente grauteada.

Figura 6: Simulação numérica do ensaio de compressão diagonal.



Fonte: Bolhassani, et al. (2015).

Landriani e Taliércio (1986) realizaram modelagens numéricas, utilizando o método dos elementos finitos, através de uma análise não linear, para simular testes com macacos planos em alvenaria. Para tal, o programa STRUP 2 foi utilizado. Os autores inseriram dados experimentais de outros trabalhos para calibrar o modelo numérico. Nesse estudo, tanto o teste de tensão, quanto o de deformabilidade com macacos foram simulados. Para reduzir os custos computacionais, algumas simplificações foram feitas, como estabelecer comportamento isotrópico para a alvenaria. As condições de escoamento da alvenaria foram representadas pelo critério de Drucker-Prager. Nos modelos, a teoria de Saint Venant foi considerada. São apresentados os modelos para os dois testes (de tensão e de deformabilidade). Nesses modelos, propriedades que seriam obtidas nos testes experimentais foram obtidas nos modelos numéricos.

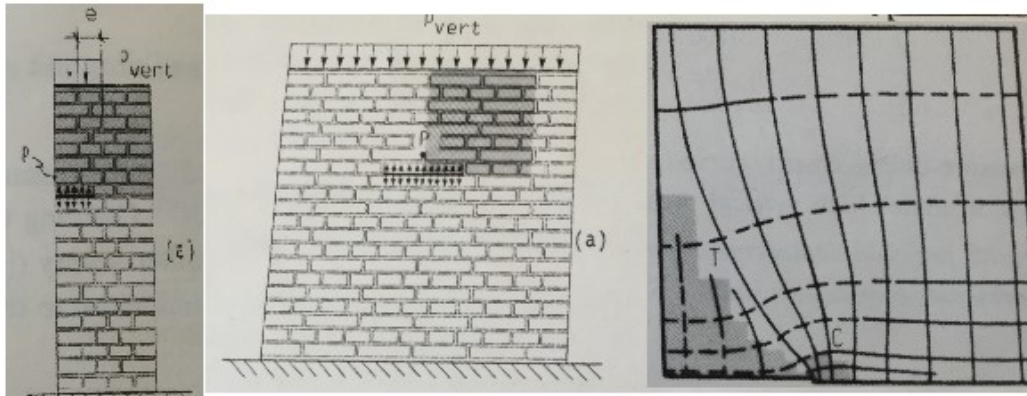
Primeiramente, Landriani e Taliercio (1986) analisaram os efeitos na alvenaria pela abertura do rasgo para inserção do macaco. Foram analisados dois casos principais: rasgo de pequeno e de grande comprimento. No rasgo de pequeno comprimento, um modelo considerava carga vertical uniforme, e outro modelo: carga excêntrica com relação ao rasgo. Já no rasgo de grande comprimento, apenas o carregamento excêntrico com relação ao rasgo foi considerado. A estratégia de análise da força vertical no rasgo foi de iniciar o modelo já com o rasgo, porém sem carregamento vertical e, a partir daí, incrementar o carregamento e analisar a resposta do modelo.

Algumas conclusões obtidas através dos modelos numéricos podem ser extrapoladas para situações do teste experimental. Observou-se a presença de escoamento nas extremidades do rasgo devido a tensões de compressão. Para rasgo de comprimento maior, esse escoamento foi de maior intensidade, concluindo que os danos causados pelo rasgo tendem a aumentar com o tamanho do mesmo.

Como conclusão, Landriani e Taliercio (1986) afirmam que os resultados numéricos obtidos apresentaram ótima concordância com os resultados experimentais. Destaca-se que o modelo em duas dimensões com comportamento perfeitamente elastoplástico apresentou resultados confiáveis. Assim, a conclusão final é de que o modelo numérico com macacos planos pareceu ser muito satisfatório, já que resultou em valores adequados para o estado de tensão da alvenaria e para a resistência à compressão da mesma.

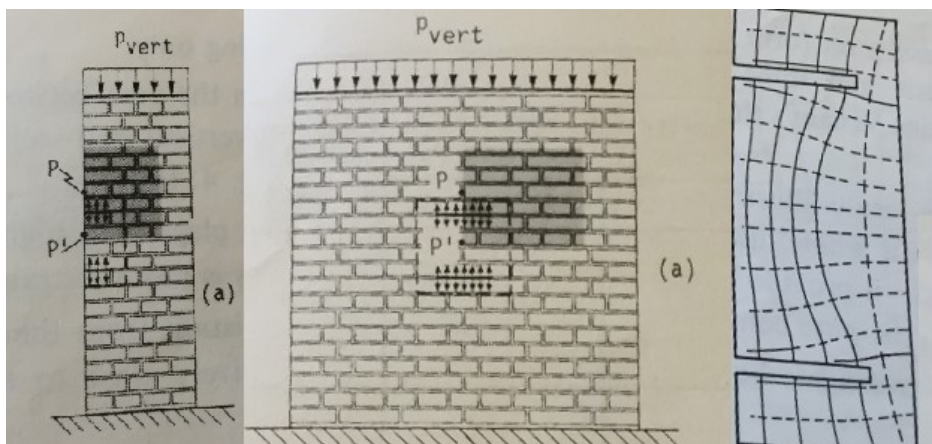
As Figura 7 e Figura 8 apresentam os modelos estudados por Landriani e Taliercio (1986). A Figura 7 apresenta modelos referentes ao teste de tensão, nesse caso, o carregamento é aplicado com excentricidade com relação ao centro da parede, também é possível verificar a malha deformada pela abertura do rasgo (região escura). Já a Figura 8 apresenta os modelos referentes ao teste de deformabilidade, sendo também o caso de carregamento excêntrico, em que também é possível verificar a malha deformada entre os dois rasgos.

Figura 7: Modelos representativos do teste de tensão com macacos planos.



Fonte: Landriani e Taliercio (1986).

Figura 8: Modelos numéricos do teste de deformabilidade com macaco planos.



Fonte: Landriani e Taliercio (1986).

2.4 Desenvolvimento da técnica de macacos planos

Macacos planos são parte de uma técnica bastante estudada e utilizada em todo o mundo para avaliações de estruturas de alvenaria. Essa técnica foi desenvolvida para avaliação de estruturas de rochas, sendo adaptada para estruturas de alvenaria.

Trata-se de uma técnica não destrutiva que tem como proposta a obtenção de dados e propriedades da estrutura de alvenaria de maneira não destrutiva, ou seja, sem causar danos permanentes. Os testes que utilizam a técnica são feitos “in situ”, na própria estrutura, sem a necessidade de remoção e transporte de amostras. Além disso, diversos autores a consideram como sendo bastante eficiente, obtendo propriedades com boa aproximação.

Segundo Roque e Lourenço (2003), “ensaios com macacos planos constituem uma versátil e poderosa técnica, de caráter essencialmente não destrutivo, que permite identificar, “in situ”, o estado local de tensão instalado numa parede, bem como estimar o módulo de elasticidade e a capacidade resistente à compressão da alvenaria. ”

Parivallal, et al. (2011) definem macacos planos como: “célula fina de carga hidráulica para inserção em juntas de argamassa, quando um rasgo é formado”, além disso afirmam que: “informações do estado de tensão existente, bem como resistência e rigidez da alvenaria podem ser obtidos”.

Macacos planos são muito aplicados em avaliações estruturais de alvenarias antigas, além de serem alvos constantes de pesquisas. A técnica costuma ser aplicada em alvenarias de tijolos, pedras ou elementos maciços, como terra batida que não admitem danos, características comuns em estruturas antigas. Os estudos sobre a técnica são realizados para verificar sua eficiência e precisão com testes realizados em laboratório, e também para propor melhorias nos equipamentos e procedimentos de teste. Assim, apresentam-se alguns dos principais trabalhos sobre macacos planos baseados tanto em aplicações, quanto em estudos experimentais.

2.4.1 Classificação da técnica

A técnica de macacos planos pode ser considerada como sendo não destrutiva, uma vez que não causa danos permanentes à estrutura analisada, apenas pequenos danos temporários. Entretanto, essa classificação diverge entre diferentes autores. A discordância ocorre devido a diferenças no próprio conceito de destrutibilidade.

Para que o teste com macacos seja realizado em uma alvenaria, é necessário inseri-lo no elemento. Para isso, um rasgo na junta deve ser realizado, removendo-se toda a espessura da junta no comprimento do macaco (geralmente 40 cm). Quando o teste é finalizado, os macacos são removidos da alvenaria e as juntas podem ser restauradas.

Autores que classificam a técnica como sendo não destrutiva alegam que o dano causado à amostra é muito pequeno frente ao elemento estrutural como um todo, além de ser temporário, pois permite reparação logo após o teste ser interrompido, não havendo danos permanentes à estrutura. Gregorczyk e Lourenço (2000) afirmam que: "o dano é temporário e facilmente reparado após o teste". Noland, Atkison, Kingsley e Schuller (1990) que "o dano é reparado por simples reposição da argamassa no rasgo, não deixando marcas do teste realizado". Segundo Epperson e Abrams (1989), "após o teste ser completado, a junta removida pode ser

reparada por injeção de argamassa". Assim, autores como: Epperson e Abrams (1989), Noland, Atkinson, Kingsley e Schuller (1990), Gregorczyk e Lourenço (2000), Roque e Lourenço (2003), Parivallal, et al. (2011), além das normas ASTM C1196-09 e ASTM C1197-09 consideram a técnica como sendo não destrutiva.

Já os que a denominam como semidestrutiva alegam que há a necessidade de remoção da junta, o que altera as condições iniciais da amostra, além de ser invasivo na estrutura. São exemplos de autores que classificam a técnica como semi ou parcialmente destrutiva: Miha (2001), Carvalho (2010) e Filipe (2012).

Entre a classificação de não e semidestrutiva, há a levemente ou minimamente destrutiva, essa classificação é baseada no fato de que, mesmo que mínima, uma destruição é necessária. De acordo com de Versey (2001), "técnicas minimamente destrutivas causam danos localizados, mas reparáveis, sendo os mesmos limitados, de modo a não prejudicar a integridade estrutural". Autores que defendem essa classificação são: Rossi (1990), de Versey (2001), Binda e Tiraboschi (2013) e Lombillo, et al. (2014).

2.4.2 Histórico

A técnica de macacos planos foi, inicialmente, desenvolvida para a aplicação em estruturas de rochas, em minas, com o objetivo de se obter a tensão de compressão presente em diferentes localidades da estrutura. Segundo Bernardo (2011), na década de 60, houve o surgimento de macacos planos de grande área, tal fato representou um avanço na análise de grandes maciços rochosos. Esses macacos de grande área continuam sendo utilizados em análises de rochas. A Figura 9 apresenta um modelo desse macaco, o qual possui 1 metro de largura e 6 mm de espessura.

Na década de 60, além dos macacos de grande área, macacos retangulares pequenos também começaram a ser utilizados para análises de estruturas rochosas. Segundo Miranda (2011) eram realizados furos consecutivos para a inserção do macaco, enquanto seu encunhamento no corte era feito com argamassa.

Figura 9: Modelo de macaco de grande área.



Fonte: Bernardo (2011).

Gregorcyk e Lourenço (2000) afirmam que as primeiras aplicações da técnica em alvenaria ocorreram na década de 1980, pelo pesquisador italiano Paolo Rossi. No início da década de 80, a técnica foi adaptada para permitir a sua aplicação em estruturas de alvenaria compostas por tijolos, esse estudo foi apresentado por Rossi (1982). Rossi (1982) apresentou aplicações da técnica em monumentos históricos, concluindo que a mesma mostrou um ótimo potencial. Binda e Tiraboschi (2001) citam que teste com um e dois macacos planos foram aplicados pela primeira vez em 1981 em alvenarias de tijolos. Pelas demandas de avaliação e pela potencialidade identificada nas primeiras aplicações, inúmeros outros estudos foram realizados.

Maier, Rossi e Landriani (1983) apresentaram os dois ensaios realizados até hoje com macacos planos: ensaio com um macaco e com dois macacos. Também nesse trabalho, um estudo de aplicação da técnica prática em uma estrutura histórica foi apresentado, sendo a catedral S. Eustorgio Cloister, em Milão. Valores da tensão de compressão atuante foram calculados e estimados, sendo comparados com os valores obtidos com os testes, como resultado, a potencialidade da aplicação em alvenarias foi confirmada. Nesse estudo, foram testados macacos retangulares de diferentes dimensões: 40x20 cm, 24x12 cm e 12x12 cm.

Miranda (2011) apresenta resultados e análises fornecidos por Rossi (1985). Rossi (1985) utilizou macacos retangulares com dimensões de 40 x 20 cm, estabelecendo o uso de equipamentos de pequenas dimensões. A precisão obtida para a tensão presente foi considerada como adequada, com erros de até 12%.

Landriani e Taliércio (1986) realizaram análise numérica com elementos finitos dos testes com macacos planos, resultando em importantes contribuições sobre a interpretação dos seus funcionamentos. Através do modelo numérico, os autores apresentaram esquemas de como se

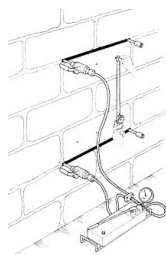
dá a distribuição de tensões na alvenaria durante a abertura do rasgo na junta, assim como durante a aplicação de cargas pelos macacos planos já inseridos na alvenaria.

No modelo de Landriani e Taliercio (1986), houve aplicação de cargas na estrutura, gerando tensões de compressão. O teste foi simulado, obtendo valores de tensão presente e de módulo de elasticidade através do teste numérico, de modo que os resultados apresentaram uma concordância muito boa com os estipulados no modelo. Os autores também afirmam que em 1986, inúmeros ensaios em laboratório já haviam sido feitos, citando que "a confiabilidade do teste com dois macacos planos já foi largamente evidenciada em testes de laboratório, em que se conheciam as propriedades mecânicas".

O pesquisador Paolo Rossi continuou a estudar a técnica através de aplicações em estruturas de alvenaria, publicando trabalhos nos anos seguintes: 1987, 1990, 1993. Binda e Saisi (2001) afirmam que Rossi (1987) está entre as primeiras aplicações da técnica em monumentos históricos, o que demonstra o ótimo potencial da técnica.

Em Rossi (1990), os procedimentos para a realização dos ensaios já são apresentados de maneira muito bem definida, com sugestões de equipamentos e exemplos de monumentos históricos avaliados com a técnica. Rossi discute as principais técnicas de análise não destrutiva utilizadas na Europa, dando importante ênfase para a técnica de macacos planos, considerando-a como uma técnica confiável para obtenção de importantes propriedades mecânicas. Para o teste com um macaco, a equação que relaciona a tensão na parede com a pressão no macaco é apresentada através dos coeficientes de área e rigidez interna do macaco. Para o teste com dois macacos, todo o procedimento a ser realizado é discutido, sugerindo a leitura de deformações por "strain-gauge" removíveis. Um exemplo de ensaio com dois macacos e com a leitura das deformações sendo feita por "strain-gauges" é apresentado na Figura 10. O autor define o ensaio como um teste de compressão uniaxial realizado numa área grande e imperturbável.

Figura 10: Esquematização de ensaio com dois macacos planos.



Fonte: Rossi (1990).

Gelmi, Modena, Rossi e Zanienetti (1993) estudaram a aplicação de macacos planos em alvenarias antigas, construídas com pedras, em edifícios do centro de Trento, na Itália. Devido à grande heterogeneidade das alvenarias, os autores tiveram que adaptar os procedimentos e alterar algumas ferramentas para possibilitar a aplicação dos macacos planos. Esse é um exemplo da evolução da técnica de acordo com novas demandas de avaliação e dificuldades de aplicação encontradas, o que possibilita aumentar a gama de estruturas possíveis de serem analisadas com a técnica.

Nota-se que a técnica foi amplamente estudada, logo após a sua adaptação para alvenarias, sendo realizados vários estudos na Itália, concluindo que a Europa se tornou um importante centro de estudo sobre o tema.

Logo no início da aplicação da técnica em alvenarias, um outro centro de estudo foi formado, nesse caso, nos Estados Unidos. De acordo com Noland, Atkinson e Schuller (1990), em 1985 a técnica já era estudada através de pesquisas, para avaliar estruturas antigas compostas por tijolos nos Estados Unidos.

Noland, Atkinson e Schuller (1990) apresentaram uma revisão da técnica de macacos planos, apresentando os equipamentos e os procedimentos adotados na época, além de alguns resultados práticos de trabalhos feitos nos Estados Unidos. Durante esse trabalho, as normas da ASTM sobre o tema ainda estavam em desenvolvimento. Os autores citam que foram necessárias adaptações da técnica da Itália para a aplicação nos Estados Unidos, devido a técnicas construtivas diferentes nas edificações antigas de alvenaria nos dois países. Exemplos dessas diferenças para as estruturas dos Estados Unidos são: espessura mais fina de junta e presenças de vazios no interior da alvenaria.

Como orientações gerais para a realização de um bom teste, Noland, Atkinson e Schuller (1990) citam a necessidade da retirada total da argamassa na junta em que o macaco será inserido para melhorar a distribuição de tensões. Também ressaltam a necessidade do encunhamento completo do macaco na junta para permitir o contato total do macaco com a superfície do tijolo, evitando expansões excessivas do equipamento. Ainda nesse trabalho, os testes de estado de tensão (com um macaco) e de deformabilidade (com dois macacos) são comentados. Para o teste de tensão, cita-se que o princípio é a relaxação de tensão na alvenaria, ocorrido pelo rasgo na junta, enquanto para o teste de deformabilidade é o isolamento da amostra de alvenaria entre os dois macacos. Para o ensaio de deformabilidade, sugere-se utilizar transdutores de deslocamentos entre os dois rasgos, para assim obter a curva tensão por deformação da amostra analisada.

Como resultados práticos, Noland, Atkinson e Schuller (1990) apresentam algumas obras históricas dos Estados Unidos analisadas com macacos planos. Comenta-se que as primeiras aplicações foram em ensaios de laboratório, em que paredes e prismas foram construídos com tijolos antigos e argamassa fraca para simular estruturas antigas e, assim, validar os procedimentos de teste. Para os ensaios em laboratório, conseguiu-se boa precisão nos dois testes (de tensão e de deformabilidade), de modo que a precisão para estimativa do módulo foi de 10% para os casos gerais.

Desde as primeiras aplicações em alvenaria, diversos estudos foram realizados para confirmar a potencialidade da técnica e para o seu aperfeiçoamento. Na década de 90 surgiram as primeiras recomendações e normas sobre o tema. Em 1990 foram lançadas as recomendações europeias da RILEM, as RILEM LUM.D.2-90 e RILEM LUM D.3-90, envolvendo os dois ensaios com macacos: teste de tensão e teste de deformabilidade. Em 1991, foram lançadas as normas norte-americanas, as ASTM C1196-91 e ASTM C1197-91, respectivamente para os dois ensaios citados.

Os inúmeros ensaios e o surgimento da recomendação RILEM em 1990 mostram que a técnica já estava consolidada para análises de alvenarias, mostrando que em menos de 10 anos da adaptação da técnica, essa já era considerada eficiente e confiável. Rossi (1990) confirma isso, citando que até 1990, mais de 50 monumentos históricos já haviam sido avaliados com macacos planos.

Desde então, inúmeros outros estudos sobre a técnica foram realizados. Muitos desses estudos focaram em solucionar os principais problemas encontrados durante os testes, sugerindo novos equipamentos e ferramentas. Como exemplo, tem-se o surgimento de macacos retangulares de diferentes dimensões, macacos semicirculares e novas ferramentas de corte para argamassas compostas por cimento.

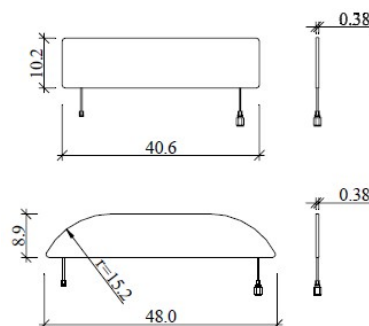
2.5 Testes com a técnica de macacos planos

Macacos planos são conhecidos internacionalmente por “flatjacks”. Essa nomenclatura se deve ao fato do equipamento principal utilizado na técnica é inflável, como um macaco hidráulico, ao mesmo tempo que é considerado plano por sua espessura ser muito pequena em relação às outras duas dimensões. A questão das dimensões do macaco é ilustrada na Figura 11, em que um dos macacos apresenta formato retangular, com dimensões de 10,2 por 40,6

cm e espessura de 0,38 cm. A razão para a pequena espessura é a de permitir a inserção do equipamento nas juntas de alvenaria.

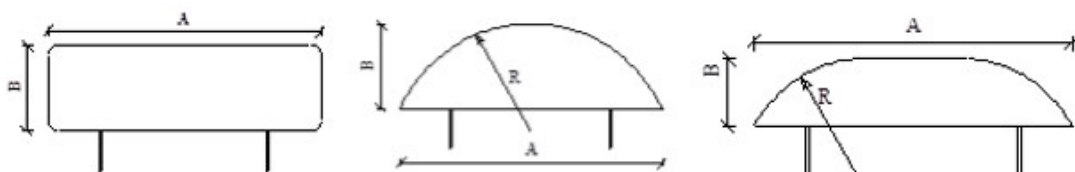
Os macacos têm funcionamento hidráulico, podendo ser preenchidos e bombeados com óleo ou água. Segundo a ASTM C1196-09, macacos planos são uma espécie de envelope fino com entrada e saída e que podem ser pressurizadas, são tipicamente retangulares ou semirretangulares. Noland, Atkinson, Kingsley e Schuller (1990) definem o equipamento como "chapas finas de metal soldadas, pressurizado com óleo para aplicar tensão uniforme sobre a sua área plana". A Figura 12 apresenta os três modelos de macacos mais comuns.

Figura 11: Modelos de macacos planos com as dimensões mas utilizadas



Fonte: Gregorcyk e Lourenço (2000).

Figura 12: Três formatos disponíveis de macacos planos.



Fonte: Miranda (2011).

A escolha do tipo de macaco é feita de acordo com o tipo de ferramenta para o rasgo na junta. Caso o rasgo seja feito com ferramentas manuais ou com furadeira (furos consecutivos), o modelo retangular pode ser utilizado.

Caso haja dificuldade para realização do rasgo com meios citados, uma serra elétrica pode ser utilizada, porém as extremidades do rasgo ficarão arredondadas de acordo com o diâmetro da serra. Nesses casos, os modelos semirretangulares ou circulares são, usualmente, aplicados.

Macaco plano é o principal equipamento da técnica. O equipamento é inserido na alvenaria, estando conectado a uma bomba externa. A bomba pressuriza óleo hidráulico para o macaco,

através de mangueiras, o qual transmite a pressão para a alvenaria na qual está confinado. Há dois principais testes realizados com a técnica, o teste de tensão e o teste de deformabilidade.

2.5.1 Teste de tensão

O teste de tensão é realizado com apenas um macaco plano e tem como objetivo principal conhecer o estado de tensão da alvenaria, obtendo valores da tensão de compressão vertical presente no local. Para a execução do teste, um rasgo é realizado em uma junta escolhida. Assim, admite-se que a alvenaria se deforma ao redor do rasgo, não transmitindo tensões de compressão para a região abaixo do mesmo. O princípio de execução desse teste é a relaxação de tensões de compressão pelas deformações da alvenaria ao redor do rasgo realizado.

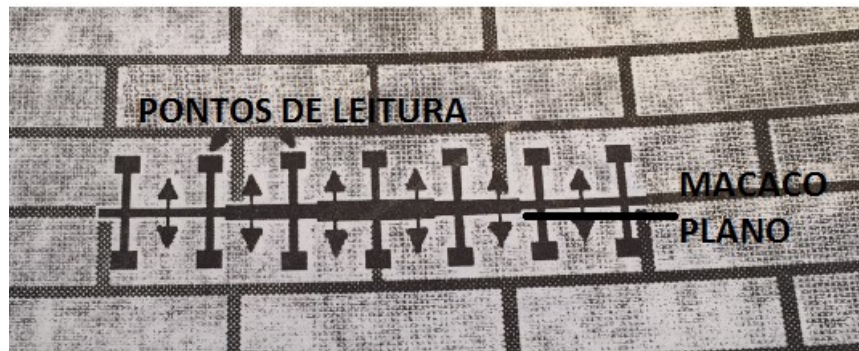
Para iniciar o teste, primeiramente deve-se escolher a região da alvenaria a ser testada. O teste obtém o valor de compressão apenas para o local, por isso a sua escolha deve ser representativa. Outro ponto importante é evitar cantos de parede e aberturas, como janelas, já que podem afetar a distribuição de tensões na alvenaria.

Após a escolha do local, define-se a junta na qual será feito o rasgo. Pontos de referência são posicionados simetricamente, acima e abaixo da junta horizontal escolhida. A distância vertical entre os pontos é medida, servindo de referência para as demais leituras. O rasgo é feito com dimensão igual à do macaco, removendo-se toda a argamassa nesse comprimento. Com isso, as tensões atuantes da região superior do rasgo fazem com que a alvenaria se deforme sobre ele. Esse processo leva a uma diminuição da distância vertical entre os pontos de referência, devido às deformações ocorridas.

O macaco é, então, inserido na junta e conectado à bomba externa. Quando o macaco é bombeado, ele transfere parte da sua pressão interna (proveniente da bomba) para a parede, assim como indicado na Figura 13. Conforme as pressões são aplicadas na alvenaria, há a tendência de se retornar à situação inicial (antes do rasgo), uma vez que a distância vertical entre os pontos começa a aumentar. Considera-se que, quando a distância vertical retorna à inicial, a situação pré-rasgo foi restaurada e, portanto, a pressão que o macaco está aplicando é equivalente à tensão presente no local do rasgo.

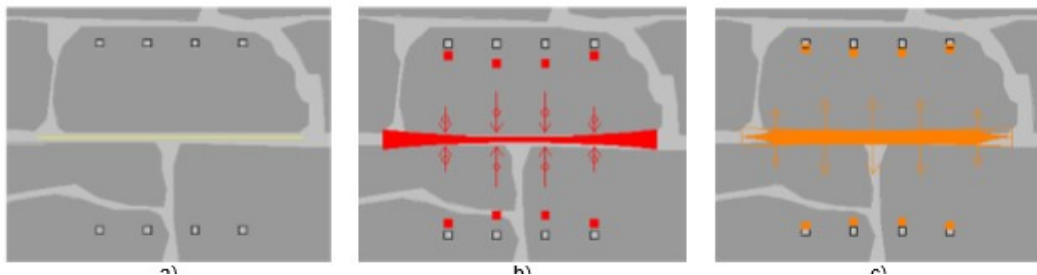
A pressão utilizada para obter a tensão de compressão é a necessária para se chegar à situação de equilíbrio. A Figura 14 ilustra as três principais etapas do teste: o posicionamento dos pontos de referência simetricamente à junta escolhida, realização do rasgo na junta, assim como a deformação da alvenaria com fechamento parcial do rasgo e a aplicação de pressão pelo macaco com tendência de abertura do rasgo.

Figura 13: Aplicação de pressão pelo macaco na alvenaria.



Fonte: Epperson e Abrams (1989).

Figura 14: Etapas do teste de tensão.



Miranda (2011).

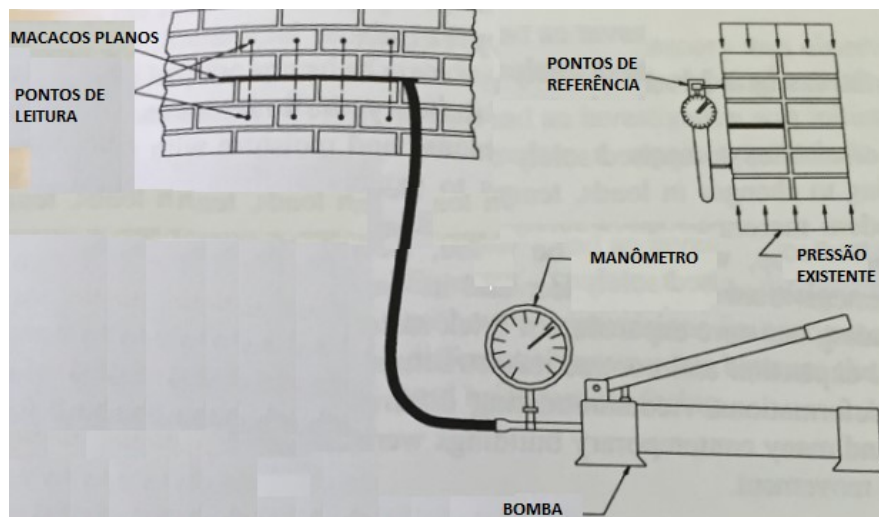
Na situação de equilíbrio, a pressão aplicada pela bomba é obtida pela leitura do manômetro. Porém, essa pressão não pode ser diretamente considerada como sendo a tensão presente na alvenaria, já que é necessário o uso de fatores. Esses fatores irão correlacionar a pressão da bomba com a pressão aplicada pelo macaco na alvenaria. Dois coeficientes devem ser utilizados, um de rigidez interna e outro de área. O de rigidez interna é referente à rigidez inerente ao macaco plano, enquanto que o de área relaciona as áreas do macaco e do rasgo no qual ele está inserido.

A Figura 15 apresenta um esquema da instrumentação mais comum para o teste em questão. Na figura, observa-se o macaco plano inserido na alvenaria e ligado à bomba externa, assim como os pontos de referência acima e abaixo do macaco (“gage point”).

A Figura 16 apresenta um exemplo de dados obtidos com o teste de tensão. Nesse caso foram utilizados 7 pares de pontos de referência para medida da distância entre os pontos. Na figura, são apresentadas as deformações em cada par de pontos para cada nível de pressão aplicada. Observa-se que, para uma mesma pressão aplicada, os pontos se comportam de maneira

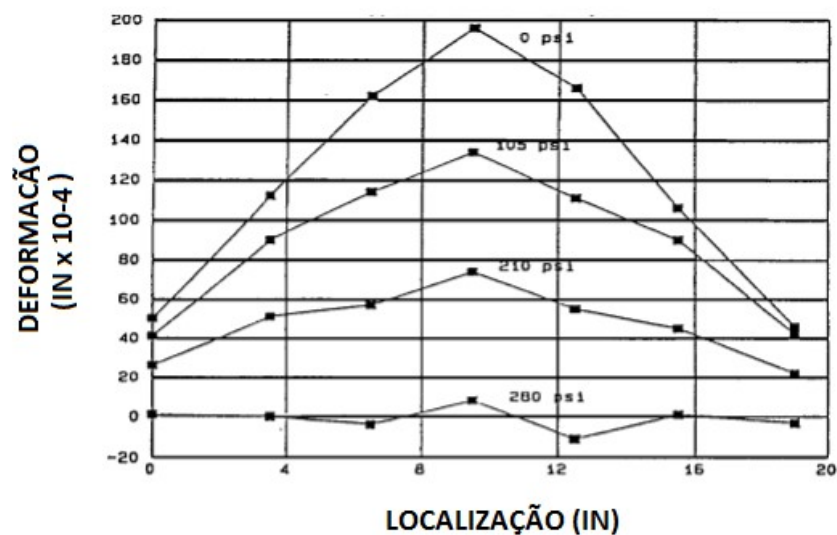
diferente dependendo de sua posição em relação ao rasgo, ou seja, os pontos centrais sofrem deformações bem maiores que os mais extremos. A tensão presente obtida pela figura é aquela necessária para que a linha de deformação esteja próxima do eixo horizontal, no exemplo, 200 psi.

Figura 15: Instrumentação de teste de tensão presente.



Fonte: Schuller (2001).

Figura 16: Exemplo de valores obtidos com o teste de tensão.



Fonte: Noland, Atkinson e Schuller (1990).

2.5.2 Teste de deformabilidade

O teste de deformabilidade é realizado com dois macacos planos posicionados paralelamente entre si a uma distância vertical quando se deseja coletar informações do comportamento vertical. O objetivo desse teste é o de obter a curva tensão por deformação da alvenaria, calculando o módulo de elasticidade e uma estimativa da resistência à compressão através curva. Nesse teste, dois rasgos horizontais são feitos em juntas paralelas, um superior e um inferior, ambos com a mesma dimensão do macaco a ser inserido. Admite-se que a parte da alvenaria entre os dois rasgos está isolada verticalmente do restante do elemento, não recebendo e nem transmitindo tensões das outras partes. Assim, o princípio desse teste é o de isolamento da amostra confinada entre os dois macacos.

Assim como no teste de tensão, os dados a serem obtidos são locais, ou seja, correspondentes apenas ao local testado e, a partir desse será extrapolado para uma região maior. Desse modo, a escolha do local do teste é uma etapa importante, devendo evitar regiões com trincas ou falhas que possam alterar as propriedades a serem obtidas.

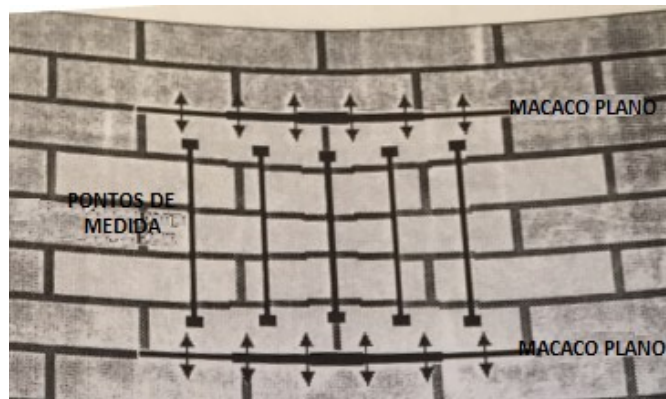
Com a região definida, os dois rasgos são feitos. A distância entre eles varia de 3 a 5 fiadas de tijolos, em alvenarias desse tipo. Os pontos de referência para leitura das deformações são fixados na parede na região entre os dois macacos, pois essa será a região testada. Os macacos são inseridos nos rasgos, assim como as cunhas para mantê-los bem justos na junta. Após, as conexões com as mangueiras hidráulicas são feitas, conectando-se o macaco inferior à bomba e o macaco inferior ao superior, conectando todo o sistema, assim como apresentado na Figura 19.

Conforme a bomba pressuriza o sistema, os macacos transmitem tensões para a alvenaria, como ilustrado na Figura 17. A região entre os dois macacos está confinada e livre de carregamentos verticais provenientes de outras regiões da parede, sendo carregada apenas pelas ações dos macacos. Para cada pressão aplicada pela bomba, uma leitura de deformação é feita, conforme indicado na Figura 18. A pressão aplicada pelo macaco na alvenaria pode ser calculada pelo uso de coeficientes de área e de rigidez do equipamento com base na pressão da bomba. Enquanto que a relação entre da pressão na alvenaria com a deformação possibilita desenvolver a curva tensão por deformação da região ensaiada.

Analisando a curva tensão por deformação desenvolvida com os dados do teste, o módulo de elasticidade pode ser obtido, assim como a estimativa da resistência à compressão da alvenaria. O módulo pode ser calculado pela inclinação do trecho linear da curva. Já a

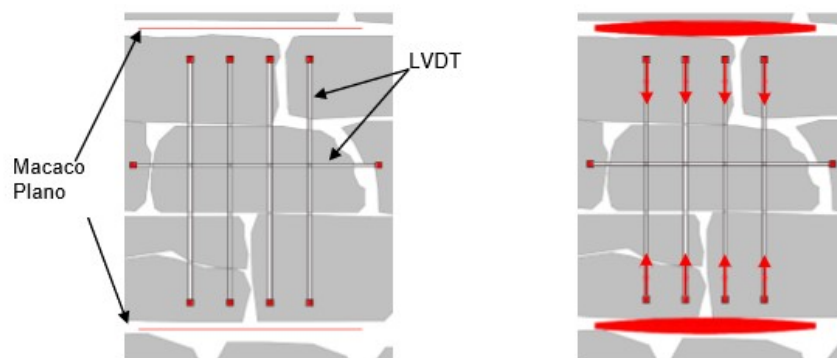
resistência pode ser obtida sem a necessidade de ruptura da amostra, analisando o comportamento da curva, ou seja, quando a mesma iniciar um comportamento altamente não linear, indicando ruptura próxima. Curvas obtidas com o teste são apresentadas nas: Figura 20, Figura 21 e Figura 22.

Figura 17: Aplicação de pressão por macacos planos no teste de deformabilidade.



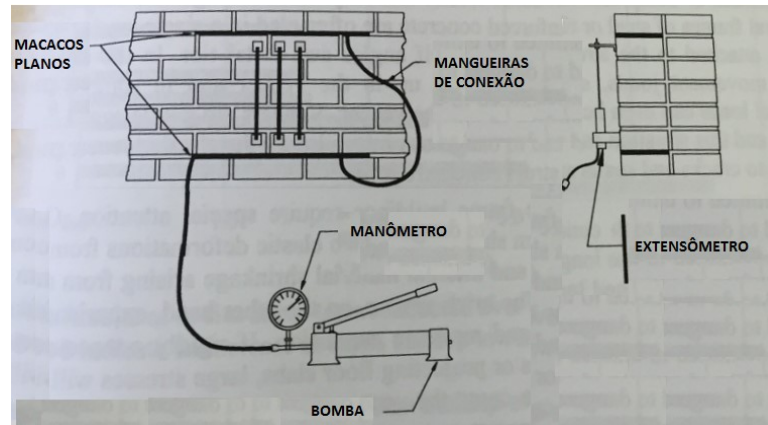
Fonte: Epperson e Abrams (1989).

Figura 18: Etapas do teste de deformabilidade.



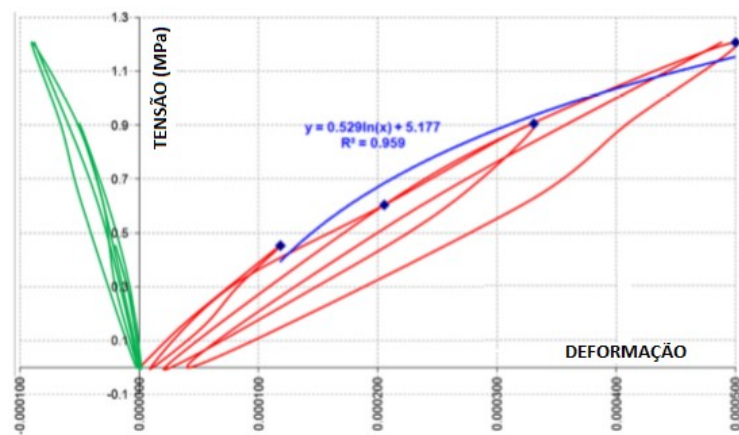
Fonte: Miranda (2011).

Figura 19: Instrumentação do teste de deformabilidade.



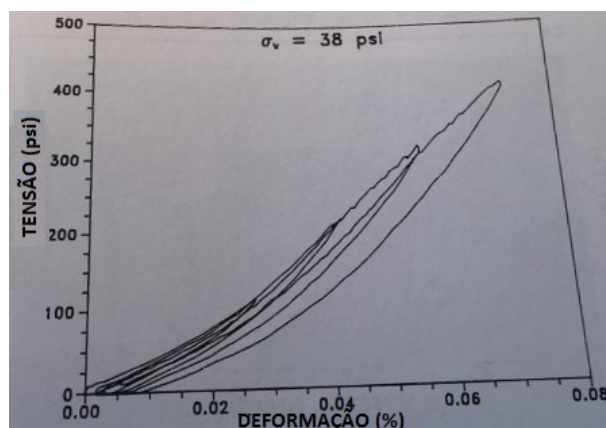
Fonte: Schuller (2001).

Figura 20: Resultados obtidos com o teste de deformabilidade.



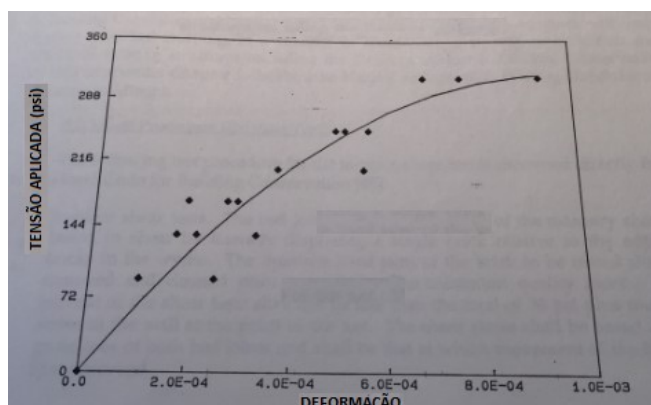
Fonte: Lombillo, et al. (2014).

Figura 21: Resultado do teste de deformabilidade com carregamento cíclico.



Fonte: Epperson e Abrams (1989).

Figura 22: Curva tensão por deformação obtida pelo teste de deformabilidade.



Fonte: Noland, Atkinson, Kingsley e Schuller (1990).

2.6 Calibração do macaco plano

Nos testes de tensão e de deformabilidade com macacos planos, a informação da pressão aplicada pelo macaco à alvenaria é essencial. Durante o teste, a pressão que está sendo aplicada ao macaco pela bomba externa difere da pressão que o macaco aplica em sua superfície. Essa diferença se deve à rigidez interna do equipamento.

A rigidez interna é inerente ao macaco porque ocorre devido à rigidez da chapa em se deformar e das restrições laterais impostas pela solda, o que dificulta a expansão do macaco. Como o macaco transmite pressão pela tendência em se expandir, a restrição à expansão afeta a pressão que o macaco aplica. O valor de rigidez do macaco é considerado como um fator

constante para o equipamento. Porém a ASTM C1197-09 sugere que o valor pode sofrer alteração se o macaco se expandir muito (em que as chapas sofreram deformações plásticas) ou quando o macaco é utilizado por mais de cinco vezes. O valor de rigidez será considerado num coeficiente que reduz a pressão aplicada pela bomba para se obter a pressão aplicada pelo macaco.

O coeficiente pode ser obtido num ensaio de calibração do macaco, que ocorre numa prensa hidráulica. Os procedimentos para o teste são apresentados na ASTM C 1197-09. Segundo a norma, o macaco deve ser inserido entre os pratos metálicos da prensa, devendo ser encunhado neles, ao mesmo tempo que está conectado à bomba. Pressões são aplicadas pela bomba, de modo que, para cada pressão, a prensa deve aplicar uma força que equilibre o sistema, ou seja, que mantenha a distância entre o prato superior e inferior constante. Assim, uma curva é traçada com a relação entre a pressão aplicada pela bomba e a força correspondente da prensa. Como a distância entre os pratos é mantida constante, considera-se que a força aplicada pela prensa é igual à força que o macaco aplica.

Pela área do macaco, calcula-se a pressão que o macaco aplica com base na força da prensa. Já as pressões aplicadas pela bomba são obtidas pela leitura do manômetro. Logo, uma nova curva é obtida, relacionando a pressão aplicada pela bomba e a aplicada pelo macaco. Através da curva, obtém-se o coeficiente de rigidez. Noland, Atkinson, Kingsley e Schuller (1990) afirmam que os valores de coeficiente do macaco atualmente utilizado variam de 0,75 a 0,85.

2.7 Precisão dos testes

Conhecer a precisão de um teste é importante para conhecer a margem potencial de erro no resultado obtido. Alguns autores apontam as precisões encontradas em testes com macacos planos, essas precisões foram calculadas pela comparação entre resultados obtidos com a técnica e valores já conhecidos ou estimados.

Gregorcyk e Lourenço (2000) afirmam que, conforme o estado da arte consultado, o teste de tensão tem precisão de 20%, sendo o mesmo valor citado pela ASTM C1196-09. Suprenant e Schuller (1994) citam que a comparação entre testes de laboratório e modelos analíticos apontaram uma margem de erro de até 20% na estimativa da tensão presente. Noland, Atkinson, Kingsley e Schuller (1990) sugerem a aplicação de carregamentos cíclicos durante o

teste, pois "conduzir múltiplas repetições de carregamentos cíclicos com macacos planos pareceu aumentar a precisão do teste de tensão".

Já com relação ao teste de deformabilidade, há duas precisões a serem consideradas, a da estimativa da resistência à compressão e do módulo de elasticidade. Gregorcyk e Lourenço (2000) e ASTM C1197-09 apontam precisão de 24% para a resistência e de 15% para o módulo (em geral superestimado). Noland, Atkison, Kingsley e Schuller (1990) apresentam resultados experimentais de inúmeras amostras e concluem que, em geral, o módulo de elasticidade é superestimado de 15 a 20%. Para a estimativa à compressão, os autores citam que comparações entre testes com macacos planos e testes em prismas retirados de alvenarias mostram uma precisão razoável. Esses valores são referentes a análises feitas em alvenarias de tijolos.

2.8 Vantagens e desvantagens

Quando se compara a técnica de macacos planos com outras técnicas de avaliação disponíveis, vantagens e desvantagens podem ser apontadas.

Como vantagens principais, pode-se citar a possibilidade de se obterem dados e propriedades mecânicas importantes para uma avaliação estrutural, não causando danos permanentes à estrutura. Os dois testes feitos com a técnica permitem obter as solicitações na alvenaria (através da tensão atuante) e uma estimativa de sua resistência. A análise conjunta desses dois valores permite avaliar a segurança estrutural da alvenaria, verificando se está supercarregada ou subcarregada, verificando se necessita de reforços localizados ou se suporta novas cargas.

Além disso, o teste é realizado no próprio local, fato que traz vantagens técnicas e econômicas. Essas vantagens ocorrem devido a não necessidade de remoção e transporte de amostras para futuro teste em laboratório. Na remoção de amostras, há o risco de danificar a alvenaria ao redor. Já no manuseio da amostra retirada, também há a possibilidade de danificação, fato alteraria suas propriedades. As vantagens econômicas ocorrem, pois, para a remoção e transporte de amostras, equipamentos específicos e caros são necessários, como equipamentos de transporte até o laboratório, além do maior tempo consumido nesse processo, que também o encarece.

Hamid (2013) cita que as vantagens dos testes com macacos são: estabelecer o estado de compressão "in loco", estabelecer propriedades de deformação, baixo custo de operação e

simplicidade na execução do teste. Suprenant e Schuller (1994) comentam que o teste permite obter propriedades, causando perturbação mínima na alvenaria.

Parivallal, et al. (2011) e Ahmed, et al. (2013) citam que o teste de tensão tem uma diferença importante sobre outros testes que obtêm a tensão atuante, uma vez que não necessita de informação prévia sobre o valor do módulo de elasticidade para ser realizado. Noland, Atkinso, Kingsley e Schuller (1990) afirmam que o valor da tensão presente pode ser obtido de maneira precisa e simples. Quanto ao valor da tensão, os autores citam que conhecer esse valor para diferentes localidades da alvenaria permite compreender a distribuição de tensões em uma parede com carregamento desconhecido. Já quanto à deformabilidade do material e à resistência, os autores afirmam que são dados importantes para uma análise de segurança estrutural.

Como desvantagem, o alto custo inicial pelo investimento com equipamentos pode ser citado. O custo também é desvantagem quando se deseja aumentar a produtividade do ensaio, com a aquisição de ferramentas automáticas de corte (para rasgo na junta) e de instrumentação digital para leituras das deformações.

Há também o risco de pequenos danos serem causados à amostra testada durante o ensaio. No teste de tensão, caso a pressão aplicada pelo macaco supere a tensão presente, há o risco de haver o levantamento da região de parede superior ao macaco. Já no teste de deformabilidade, caso sejam aplicadas pressões muito altas, trincas e fissuras podem surgir.

O teste é feito em uma parte da alvenaria, obtendo dados apenas daquele local específico. Esses valores são extrapolados para toda a parede ou, em alguns casos, para um conjunto de paredes. Assim, como desvantagem, pode-se citar a obtenção de valores muito localizados, os quais nem sempre podem ser representativos para uma amostra maior.

A relação entre o tempo necessário para a preparação do ensaio e para a sua execução em si também pode ser citada. O tempo consumido em atividades de preparo como: transporte dos equipamentos até o local do teste, retirada do revestimento parede, preparação do rasgo, acabamento do rasgo para retirada total da argamassa e inserção do macaco com bom encunhamento consomem alto tempo. Carvalho (2010) e Hamid (2013) citam o alto tempo necessário para executar o ensaio como desvantagem, considerando-o como um processo lento de ser feito. Carvalho (2010) também afirma que a técnica não é eficiente para materiais muito frágeis. Noland, Atkinso, Kingsley e Schuller (1990) citam a necessidade de reparos após a finalização do teste.

Suprenant e Schuller (1994) apresentam alguns dados sobre o tempo consumido nos ensaios. Para o teste de estado de tensão, os autores citam que o tempo necessário para a preparação do teste é de 4 a 8 horas/homem (dependendo das condições de acesso do local), enquanto que o tempo para a execução do teste em si é de 1 hora/homem, aproximadamente. Para o teste de deformabilidade, a preparação consome cerca de 4 a 6 homens/hora e o teste em si pode ser feito em menos de 1 hora/homem, enquanto que o reparo da alvenaria demora em torno de 0,5 hora.

2.9 Fontes de erros

A técnica de macacos planos possui variabilidade e precisão próprias, entretanto alguns procedimentos devem ser evitados para que não alterem os resultados a serem obtidos e, assim, diminuam a precisão dos testes realizados. Pode-se identificar procedimentos da escolha do local do teste, qualidade do rasgo, remoção da argamassa e encunhamento do macaco como sendo críticos para que um bom teste seja feito.

Primeiramente, a escolha do local em que o teste será feito é decisiva para que se obtenham resultados representativos. Regiões próximas de cantos da parede, de aberturas como janelas, com fissuras pré-existentes ou com material diferente do restante devem ser evitadas. Essa recomendação ocorre pois tais situações podem alterar a distribuição de tensões na alvenaria, fato que alteraria os resultados obtidos no teste, não sendo representativos para a parede como um todo.

O rasgo na alvenaria é feito para que possibilite a inserção do macaco. O rasgo deve remover a argamassa da junta escolhida, porém o comprimento do rasgo é fator crítico. A ASTM C 1197-09 diz que o comprimento do rasgo pode ser no máximo 1,25 cm maior que o comprimento do macaco. Caso o rasgo seja muito maior, a distribuição de pressão do macaco para a alvenaria pode ser alterada.

Durante a execução do rasgo, cuidados devem ser tomados para que a ferramenta de corte não entre em contato com a unidade de alvenaria para que não remova nenhuma parte da unidade e nem faça cortes na sua face. Caso isso ocorra, o rasgo pode ter espessura variável, o que torna difícil encunhar o macaco, ou tornar a face da unidade irregular, o que dificulta a transmissão homogênea de pressão.

Ainda quanto ao rasgo, a ASTM C 1197-09 e Noland, Atkinson e Schuller (1990) afirmam que deve estar totalmente limpo de argamassa. Essa recomendação é feita para que o macaco aplique pressão diretamente na unidade de alvenaria. Caso uma pequena camada de argamassa continue, isso pode afetar os dados de deformabilidade da amostra. Caso o teste seja feito sem uma limpeza final adequada do rasgo, pequenos pontos de argamassa podem continuar presentes, o que afetaria a região de contato do macaco com a alvenaria, reduzindo a área efetiva de transmissão de pressão.

O macaco deve estar completamente encunhado no rasgo da junta. Para isso, a ASTM C 1197-09 prevê o uso de cunhas metálicas caso seja necessário. Caso o macaco não esteja bem encunhado, o mesmo receberá pressão da bomba, irá se expandir, mas não irá transmitir pressão para a alvenaria imediatamente. Não transmitindo pressão para a alvenaria, essa não se deforma. Logo, a rigidez da estrutura é superestimada, pois considera-se que a mesma recebeu pressão e não se deformou, fato falso. Noland, Atkinso, Kingsley e Schuller (1990) afirmam a importância do encunhamento adequado do macaco no rasgo como fator decisivo para a precisão dos testes. Os autores também citam que se existir folga do macaco no rasgo, torna-se difícil aplicar uma carga vertical uniforme.

Encunhar o macaco evita que o mesmo se expanda excessivamente, fato que altera o valor de rigidez interna do equipamento e, conseqüentemente, a análise dos resultados, além do que a expansão muito grande irá dificultar a retirada do equipamento do rasgo. Noland, Atkinso, Kingsley e Schuller (1990) afirmam que a deformação excessiva do macaco é uma fonte de erros, citando que "grandes deformações no macaco durante os testes irão causar imprecisões nos resultados obtidos".

Como solução, a ASTM C 1197-09 cita o uso de cunhas metálicas de dimensões iguais às do macaco. As cunhas são inseridas acima e abaixo do macaco até encunhá-lo completamente. Miranda (2011) sugere o uso de chapas metálicas para evitar uma distribuição de tensão excêntrica entre o macaco e a unidade de alvenaria, já que as chapas possuem uma rigidez maior que o macaco. O macaco pode aplicar pressões altas na alvenaria, devido à pequena espessura de sua chapa, haveria o risco de furo se em contato com uma irregularidade pontiaguda da unidade de alvenaria. Assim, o uso de chapas também ajuda a proteger a integridade do equipamento.

Schuller (2001) sugere a utilização de um outro macaco plano para ser utilizado como cunha no teste, estando em contato com o macaco que será ativo no teste. O uso de um outro macaco como cunha é considerado como eficiente, já que seria uma cunha flexível, esse seria

levemente pressurizado, expandindo até encunhar o macaco do teste. Tuner (1992) aponta que com essa solução de encunhamento, há melhor distribuição de tensão, porque o macaco tende a ocupar as irregularidades da face do tijolo, entretanto alerta para os custos adicionais de se utilizar um outro equipamento para tal função.

Binda e Tiraboschi (2001) citam que uma análise prévia deve ser feita em edifícios baixos quando o teste de deformabilidade será realizado. A recomendação é que se faça uma estimativa da tensão de compressão na região do macaco superior do teste, pois prédios baixos podem ter baixa solicitação de compressão. Caso a resistência da alvenaria seja alta e se deseja aplicar uma tensão próxima à de ruptura, cuidados devem ser tomados para que a pressão aplicada não supere a tensão presente. Caso a pressão aplicada seja muito maior, há a possibilidade de levantamento da região da parede acima ao macaco superior, logo deve-se limitar a pressão a ser aplicada.

2.10 Normas e recomendações

Há recomendações internacionais sobre os testes realizados com a técnica de macacos planos. As normas norte americanas da ASTM atuais são: ASTM C1196-09 e C1197-09, sendo atualizações da primeira versão: ASTM C1196-91 e C1197-91. As recomendações europeias da RILEM são: RILEM MDT.4-04 e RILEM MDT.5-04, as quais também são atualização da versão: RILEM Lum D.2-90 e RILEM Lum D.3-90. Os documentos sobre a técnica são referentes a alvenarias com unidades maciças apenas.

A ASTM C1196-09 e a RILEM MDT.4-04 são referentes ao teste de tensão. Já a ASTM C 1997-09 e a RILEM MDT.5-04 são sobre o teste de deformabilidade. Os documentos apresentam o procedimento recomendado, os equipamentos com precisão para cada etapa do teste e recomendações sobre a análise dos dados.

Um breve resumo de cada norma e recomendação é apresentado, permitindo realizar uma comparação entre eles.

2.10.1 ASTM C 1196-09 e C 1197-09

Apesar de serem normas referentes a testes diferentes, a ASTM C 1196-09 e C 1197-09 apresentam semelhanças quanto a recomendações dos equipamentos a serem utilizados.

O macaco plano é definido como um envelope fino fabricado com duas chapas de inox soldadas. Recomenda-se que o equipamento apresente dimensões congruentes referentes às

unidades da alvenaria que será avaliada. O comprimento do macaco deve ser maior que o comprimento da unidade da alvenaria e maior que 20 cm, enquanto que sua largura deve ser maior ou igual à largura da unidade e maior que 7,5 cm.

O sistema hidráulico é composto pela bomba externa, mangueiras e conexões. O sistema deve apresentar capacidade apropriada para a aplicação. A medição da pressão aplicada deve apresentar precisão de 1% da pressão máxima a ser aplicada. O sistema deve ser capaz de manter a pressão constante por, pelo menos, 5 minutos.

A medição da distância dos pontos de referência é utilizada para cálculo das deformações da estrutura. O instrumento de medida deve ser capaz de medir deslocamento de 5 mm ao menos e ter precisão de, pelo menos, 0,005% da distância inicial dos pontos superior e inferior. Caso a distância seja 40 cm, a precisão deve ser de 0,02 mm.

O rasgo realizado na junta deve estar totalmente limpo de argamassa para permitir que o macaco aplique pressão diretamente na unidade de alvenaria. Além disso, o rasgo pode ter, no máximo, 1,25 cm a mais que o comprimento do macaco.

É apresentada uma equação que relaciona a pressão aplicada pela bomba com a pressão aplicada na alvenaria. Essa relação ocorre pelo uso de dois fatores minoradores. Um fator é referente à rigidez interna do macaco, que relaciona a pressão que a bomba aplica com a pressão aplicada pelo macaco. O outro fator é referente à relação entre as áreas do macaco e do rasgo, representando a distribuição de pressão do macaco para a alvenaria. A equação (1) é apresentada a seguir, sendo P_{alv} : a pressão na alvenaria, K_m : o fator de rigidez interna do macaco, K_a : a divisão entre a área do macaco pela área do rasgo; P : a pressão aplicada pela bomba.

$$(1) P_{alv} = K_m \times K_a \times P$$

2.10.2 RILEM MDT.4-04 E RILEM MDT.5-04

Apesar de também serem referentes a testes diferentes, as recomendações RILEM MDT.4-04 E MDT.5-04 apresentam conceitos semelhantes.

O equipamento de macaco plano é definido como um diafragma plano, composto por duas chapas de metal, que devem apresentar espessura de 0,5 a 1 mm, sendo soldadas em todo o contorno do macaco, além de apresentar um ponto de entrada e saída de óleo. A resistência mínima a que o macaco deve suportar é de 6 MPa. Quanto às dimensões do macaco, recomenda-se que o comprimento seja maior que duas vezes a largura da unidade da alvenaria

e que a área do macaco seja maior que a área da unidade. Ressalta-se que áreas menores são permitidas, desde que um estudo prévio de calibração seja realizado. Alguns modelos de macacos são apresentados, em que a espessura do equipamento varia de 5 a 8 mm.

Para o sistema de medição da distância vertical dos pontos de referência, a precisão de 0,0025 mm costuma ser suficiente. Sobre o sistema hidráulico, a norma afirma que deve possuir alta capacidade de pressão, mangueiras flexíveis e conexões de engate rápido.

Para o cálculo dos resultados, as recomendações também ressaltam a necessidade de correlação entre a pressão aplicada pela bomba e a pressão na alvenaria, conforme equação (2). São três fatores minoradores utilizados nessa relação. A equação é apresentada a seguir, sendo S_r : tensão na alvenaria, K_e : constante de eficiência geométrica, P : pressão aplicada pela bomba, A_{slot} : a área do rasgo no plano de aplicação da face do macaco, A_{je} : área efetiva do macaco.

A área efetiva do macaco é uma representação da rigidez interna do macaco, o cálculo da área efetiva é realizado pela relação entre a força aplicada pelo macaco e a pressão aplicada pela bomba. Alguns modelos de macacos são apresentados, de modo que a relação entre a área efetiva e a área total do macaco variou de 0,73 a 0,78. A constante de eficiência geométrica é referente a cada alvenaria testada, esse valor leva em consideração as dimensões da unidade da alvenaria, o tipo e as dimensões do macaco utilizado. A obtenção da constante exige um estudo prévio da relação entre esses valores, quando não se tem valores, pode-se adotar como sendo igual 1. A constante para aplicação do macaco retangular em tijolos típicos de alvenarias antigas da Europa costuma ser próximo de 0,83.

$$(2) S_r = K_e \times P \times A_{slot} / A_{je}$$

Recomenda-se recalibrar o macaco após cinco ensaios realizados ou quando esse apresentar distorções excessivas, verificando alterações para o valor de A_{je} .

2.10.3 Comparação geral entre ASTM e RILEM para os testes com a técnica de macacos planos

Sobre a recomendação das dimensões do macaco plano, a norma da ASTM sugere comprimento maior ou igual ao comprimento da unidade da alvenaria. Enquanto que a RILEM cita que a área do macaco deve ser maior que a área da unidade e que o comprimento seja maior que duas vezes a largura da unidade. A ASTM cita que o macaco é fabricado com chapas de espessura de 0,6 a 1,2 mm, enquanto a RILEM sugere espessuras de 0,5 a 1,0 mm para as chapas.

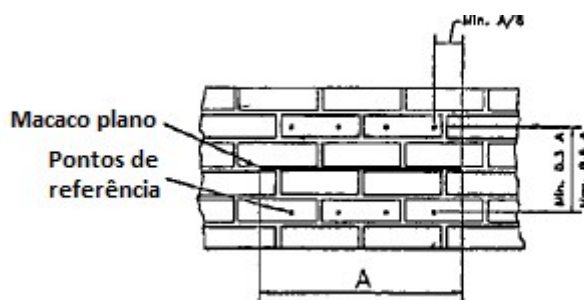
Na precisão do aparelho de medida, a ASTM recomenda 0,005% da distância entre os pontos. Já a RILEM recomenda 0,0025 mm.

No cálculo dos resultados, a equação apresentada pela RILEM e pela ASTM são semelhantes, ambas utilizam coeficientes que minoram a pressão aplicada pela bomba para calcular a tensão na alvenaria. Os coeficientes de rigidez interna do macaco e da relação entre área do macaco e área do rasgo são utilizados nas duas equações. Porém, a RILEM sugere um outro fator, o K_e , sendo a constante de eficiência geométrica, que depende do macaco a ser utilizado e das unidades da alvenaria testada.

2.10.4 ASTM C1196:09

O teste se inicia com a marcação da junta horizontal a qual o macaco será inserido. Pelo menos, quatro pares de pontos para medida de deformação devem ser utilizados. A distância horizontal entre cada par de pontos deve ser constante, de modo que haja uma distância mínima do primeiro e último par de pontos com a extremidade do rasgo, sendo essa distância igual a $1/8$ do comprimento do macaco (Figura 23). Num par de pontos, um ponto é posicionado acima da linha em que será realizado o rasgo, e outro, abaixo, estando eles posicionados simetricamente em relação a essa junta. A distância vertical sugerida para os pontos de um mesmo par é de 0,3 e 0,6 do comprimento do macaco, ou seja, caso o macaco tenha 40 cm de comprimento, a distância sugerida varia entre 12 a 24 cm.

Figura 23: Sugestão do posicionamento dos pontos de referência no teste de tensão.



Fonte: ASTM C1196:09.

O procedimento para execução do teste se inicia com a recomendação da medida vertical inicial entre os pontos de referência, execução do rasgo da junta selecionado, repetindo a medição entre os pontos. O macaco é inserido na junta com as necessárias cunhas metálicas, sendo conectado com o sistema hidráulico. Uma pressão inicial de 50% da tensão presente estimada é aplicada para que o macaco se conforme às irregularidades possíveis no rasgo da junta, zerando a pressão após isso. Com base na tensão presente estimada, aplica-se 25%,

50% e 75% da tensão, medindo a distância vertical entre os pontos para cada nível de pressão. Após os 75%, pequenos incrementos de pressão são aplicados até que a distância vertical inicial seja restaurada, zerando-se a pressão aplicada. Com relação à posição restaurada, há uma tolerância de 0,013 mm na média da posição dos pontos de referência em comparação com a posição inicial (antes do rasgo), enquanto que a tolerância de diferença na posição inicial para cada par é de 0,025 mm. A norma recomenda que o procedimento seja repetido uma segunda vez.

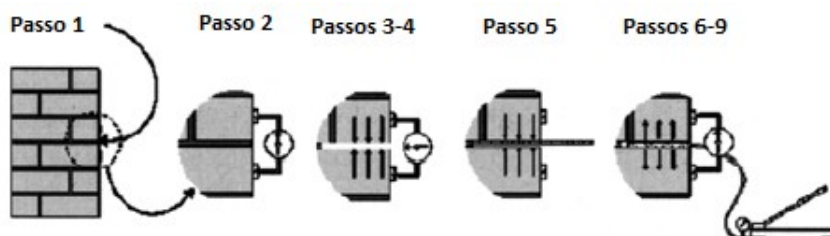
Após a posição restaurada, o sistema hidráulico é desconectado e o macaco retirado do rasgo. A junta de argamassa deve ser restaurada com as mesmas características da argamassa removida.

A norma aponta que estudos sobre o tema indicam que o ensaio possui um coeficiente de variação de cerca de 20%. Recomenda-se que seja feita uma recalibração do macaco plano a cada 5 utilizações ou quando aparecerem grandes distorções nos resultados.

2.10.5 RILEM MDT.D.4

A recomendação sobre o teste apresenta a sugestão para os procedimentos através de uma ilustração (Figura 24), em que cada fase do teste é separada.

Figura 24: Procedimentos para teste de tensão com macaco plano.

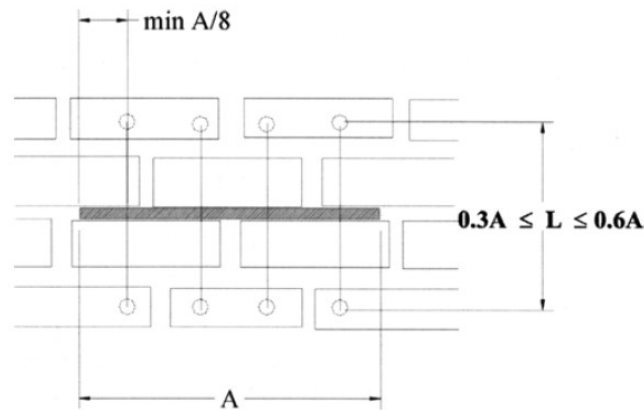


Fonte: RILEM MDT.D.4-04.

O passo 1 representa a escolha do local em que o teste será realizado, seguido da fixação dos pontos de referência. Os pontos são colados em pares, sendo que em cada par, um ponto deve estar acima do rasgo e outro abaixo, de maneira simétrica a ele. A distância vertical entre os pontos deve ser de 0,3 a 0,6 vezes o comprimento do macaco. O primeiro e o último ponto de referência devem ser afastados das extremidades do rasgo em, pelo menos, 1/8 do comprimento do macaco. Recomendam-se 4 pares de pontos, de modo que sejam

equidistantes horizontalmente, assim como indicado na Figura 25. Após o posicionamento dos pontos de referência, a distância entre eles é medida.

Figura 25: Posicionamento dos pontos de referência para o teste de tensão.



RILEM MDT.D.4-04.

No passo 2 o rasgo na junta selecionada é realizado. Cuidados devem ser tomados para não danificar a alvenaria ao redor. O rasgo deve ser limpo, retirando toda a argamassa.

O passo 3 representa a leitura da distância vertical entre os pontos de referência, constatando o fechamento parcial do rasgo.

No passo 4, as medidas de largura e profundidade do rasgo são feitas para calcular a área do rasgo, a qual será utilizada na análise dos resultados.

O passo 5 é referente à inserção do macaco no rasgo. Ressalta-se a importância do adequado encunhamento do macaco no rasgo, indicando o uso de cunhas metálicas para isso.

O passo 6 ilustra a aplicação de uma pressão inicial para assentamento das cunhas e acomodação do macaco às imperfeições da face do corte. A pressão indicada para essa etapa é de 50% da tensão presente estimada na localidade, zerando-se a pressão após isso.

O passo 7 é referente aos incrementos de cargas posteriores e às respectivas medidas da distância vertical entre os pontos. A sugestão é que incrementos de 1/8 da pressão presente estimada sejam aplicados, sendo menor que 0,05 MPa.

O passo 8 representa o retorno para a posição inicial dos pontos de referência (medida no passo 3), interrompendo o teste. A tolerância apresentada para a diferença da posição entre os pares de pontos é de 10%, permitindo desconsiderar um par de pontos.

O passo 9 é referente a repetição do teste para obter um segundo valor de tensão atuante.

Por fim, o passo 10 é a finalização do teste, zerando a pressão do macaco, desconectando o sistema hidráulico e removendo o macaco do rasgo.

2.10.6 Comparação entre ASTM C1196-09 e RILEM MDT.4-04

ASTM C1196:09 E RILEM MDT.D.4-04 se mostram bastante semelhantes quanto aos procedimentos e requisitos de equipamentos. Notam-se pequenas diferenças nas recomendações apresentadas.

Para os incrementos de pressão da bomba, a ASTM recomenda aplicação de 25%, 50%, 75% da pressão estimada e, após isso, pequenos incrementos até a interrupção do teste, já a RILEM define incrementos iguais de 1/8 da carga estimada.

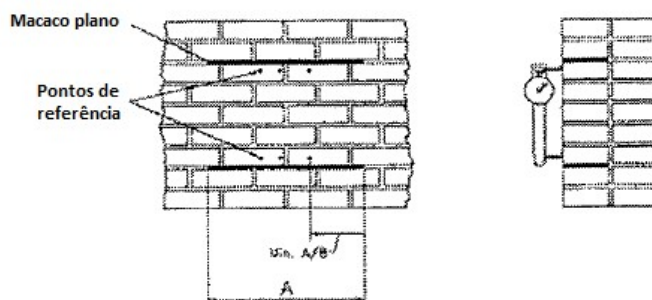
Diferenças são observadas quanto à tolerância da posição dos pontos de referência no final do teste. A ASTM afirma que a diferença média da posição final dos pontos com a posição inicial deve ser de até 0,013 mm, de modo que nenhuma diferença individual seja maior que 0,025 mm. Já a RILEM cita que a tolerância para diferença entre um par de pontos com relação aos demais é de 10% e que é permitido ignorar um dos pontos na análise, caso seja destoante.

2.10.7 ASTM C1197:09

O processo se inicia com a escolha do local em que o teste será realizado, devendo ser representativo para a alvenaria como um todo. O rasgo é feito em duas juntas horizontais, paralelas entre si, de modo que estejam espaçadas em, pelo menos, 5 fiadas de blocos, desde que a distância vertical entre elas seja menor que 1,5 vezes o comprimento do macaco.

Após os cortes, os pontos de referência são posicionados na alvenaria. São necessários, pelo menos, 3 pares de pontos, os quais devem ser igualmente espaçados entre si na horizontal. Os dois pontos de um par devem estar entre os dois macacos, centralizados com relação a eles. Esses pontos são fixados sempre na unidade da alvenaria e não na junta. A norma recomenda uma distância mínima de 1/8 do comprimento do macaco do primeiro e do último par com relação às extremidades do rasgo (Figura 26). A distância vertical mínima entre os pontos de referência é de 20 cm.

Figura 26: Posicionamento dos pontos de referência no teste de deformabilidade.



Fonte: ASTM C 1197-09

Os macacos são inseridos nas juntas horizontais junto com as cunhas necessárias, sendo conectados ao sistema hidráulica. Uma pressão inicial de 50% da tensão resistente estimada da alvenaria é aplicada para que o macaco se conforme às irregularidades da junta, sendo a pressão zerada após isso. A distância vertical entre os pontos de referência é medida.

Para os incrementos de carga, a norma recomenda que seja um processo lento, com pequenos incrementos. Para cada incremento, a leitura da distância vertical dos pontos é feita. O ensaio pode ser realizado até a ruptura da região analisada ou, caso essa não seja desejada, até o momento em que a relação de tensão por deformação começa a cair. Com isso, o teste é interrompido, a pressão zerada, o sistema hidráulico é desconectado e o macaco retirado.

As deformações podem ser obtidas pela divisão do deslocamento obtido pelo comprimento de referência. O módulo de elasticidade para um determinado ponto é obtido pela divisão da tensão pela deformação no ponto.

A norma afirma que ensaios de alvenarias antigas em laboratório obtiveram variação de 24%, sendo considerada aceitável para alvenarias antigas, quando comparada com o valor da variação encontrada em testes destrutivos de prismas, igual a 32%. Com relação à precisão na obtenção do módulo de elasticidade, cita-se que, em geral, o módulo é superestimado em até 15%.

2.10.8 RILEM MDT.D.5

O procedimento para o teste de deformabilidade, segundo a recomendação da RILEM, é iniciado com a escolha de um local representativo, que não apresente heterogeneidades. Com a escolha da região, as duas juntas a serem rasgadas são definidas e marcadas.

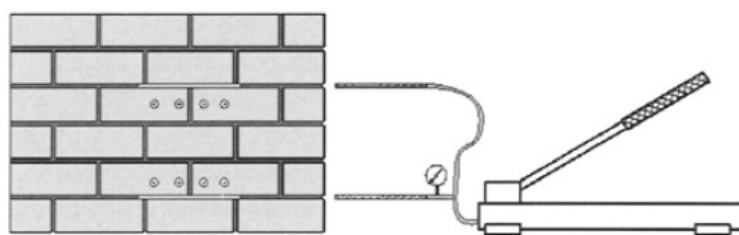
A distância vertical entre as duas juntas verticais é de 5 fiadas para unidades da alvenaria com altura de até 10 cm, e de 3 fiadas para os demais casos. Também se recomenda que a distância

vertical seja entre 1 a 1,5 vezes o comprimento do macaco e que seja maior que 2,5 vezes a largura do macaco.

Os pontos de referência são posicionados na face da parede entre as duas juntas, sendo recomendados 4 pares de pontos. A distância vertical entre os pontos de um mesmo par é de 75% a 90% da distância entre os dois macacos.

Os dois rasgos são realizados e a argamassa é totalmente removida. As dimensões do rasgo são medidas para serem utilizadas no cálculo dos resultados posteriormente. Os macacos, assim como as cunhas metálicas são inseridos nos dois rasgos, conectando os equipamentos ao sistema hidráulico. A Figura 27 apresenta uma ilustração do posicionamento dos macacos planos e dos pontos de referência na alvenaria.

Figura 27: Esquemática do teste de deformabilidade.



Fonte: RILEM MDT.5-04.

Antes de se iniciar a pressurização, a distância vertical inicial dos pontos de referência é medida. A pressão é aplicada em incrementos, sendo que para cada incremento, a distância dos pontos de referência é medida, para o cálculo das deformações. Os incrementos são de 10% da tensão resistente estimada para a alvenaria, podendo ser menos. Durante a aplicação de pressão, monitora-se a relação entre o aumento de pressão com o aumento de deformação, quando a relação deixa de ser linear, o teste é interrompido para evitar danos na estrutura. Os macacos são removidos do rasgo e a argamassa reparada com características similares à original.

O módulo de elasticidade para um valor de tensão pode ser obtido pela divisão da tensão pela deformação. Essa relação tende a superestimar o módulo de elasticidade da estrutura, assim recomenda-se que o valor obtido seja multiplicado pelo coeficiente K_e .

2.10.9 Comparação entre ASTM C 1197-09 e RILEM MDT.5-04

A ASTM cita que a distância entre os macacos seja de, pelo menos, 5 fiadas, devendo ser menor que 1,5 vezes o comprimento do macaco. Já a RILEM cita de 3 a 5 fiadas, de modo

que a distância vertical seja igual a um valor entre 1 e 1,5 vezes o comprimento do macaco e maior que 2,5 vezes a largura do macaco.

Quanto aos pontos de referência, a ASTM recomenda que sejam utilizados ao menos 3 pares. A RILEM recomenda 4 pares de pontos.

A ASTM recomenda que a distância vertical entre os pontos de cada par de referência seja maior que 20 cm. Já a RILEM recomenda que a distância vertical seja um valor que esteja entre 75% e 90% da distância entre os dois macacos.

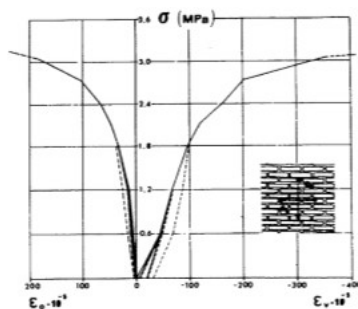
Sobre os incrementos de pressão durante o teste, a ASTM cita que pequenos incrementos devem ser feitos, não especificando valores. A RILEM sugere que incrementos de 10% da tensão resistente estimada da alvenaria sejam feitos.

2.11 Macacos planos em avaliações estruturais

A técnica de macacos planos tem sido largamente utilizada para analisar e avaliar estruturas históricas de alvenaria. A literatura apresenta algumas obras em que a técnica já foi utilizada como parte experimental na obtenção de dados de alvenarias históricas.

Maier, Rossi e Landriani (1983) aplicaram a técnica nos mosteiros da igreja de S. Estorgio, em Milão, Itália. A construção data dos séculos XIII e XIV. A estrutura sofreu diversos danos durante a sua existência, passando por várias reparações. Os testes de tensão e de deformabilidade foram realizados nessa análise, obtendo valores de tensões nas alvenarias, estimativa do módulo de elasticidade e resistência à compressão, os dois últimos obtidos com a curva apresentada na Figura 28.

Figura 28: Curva obtida com o teste de deformabilidade da igreja de S. Estorgio.



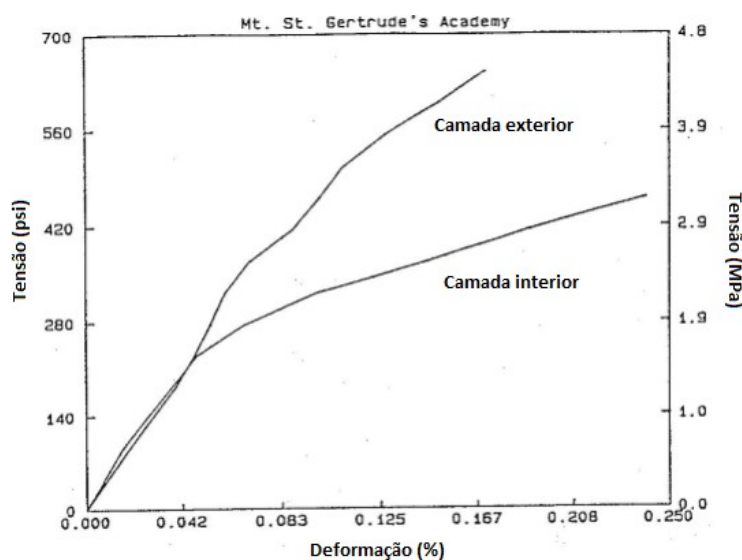
Fonte: Maier, Rossi e Landriani (1983).

Rossi (1990) cita que na Catedral de Orvieto, na Itália, a técnica para determinação do estado de tensão foi aplicada em inúmeros pontos de diferentes paredes. Também afirma que a Igreja de São Francisco, em Arezzo, Itália, foi avaliada com o teste de deformabilidade.

Noland, Atkinson e Schuller (1990) apresentam o caso da escola St Gertrude's Academy, no Colorado, Estados Unidos, a qual foi construída no final do século 19. Com base nessa obra, uma situação muito comum em edifícios históricos dos Estados Unidos é citada, paredes construídas com mais de uma camada de blocos, aumentando a sua espessura. O problema relatado é que, como a camada externa é aparente, era construída com maior qualidade e com materiais melhores, já as intermediárias e a interna não ficariam expostas e assim eram construídas com qualidade inferior. Esse fato faz com que a parede tenha uma resposta diferente dependendo da face que é testada (interna ou externa). Assim, o teste de deformabilidade foi aplicado tanto na camada externa, quanto na interna, comparando os resultados (Figura 29).

Noland, Atkinson e Schuller (1990) também cita a Raybon House in Colonial Williamsburg, em Virginia, Estados Unidos, construção que possui mais de 200 anos. Nessa edificação, o teste de deformabilidade foi aplicado para se obter estimativa do módulo de elasticidade.

Figura 29: Curvas para camada externa e interna da parede.

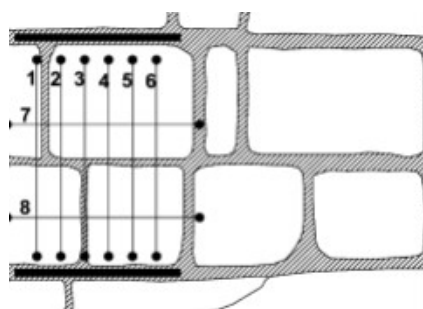


Fonte: Noland, Atkinson e Schuller (1990).

Binda, Saisi e Zanzi (2003) estudaram o templo de S. Nicolo l' Arena, na Itália, cuja construção começou no século 17. A construção sofreu inúmeros danos por dois terremotos e por efeitos de bombeamentos da 2ª Guerra Mundial. O segundo terremoto ocorreu em 1990, gerando colapso em alguns elementos da edificação e colocando em dúvida a segurança da

estrutura como um todo. Os testes de tensão e de deformabilidade com macacos planos foram utilizados como forma de se realizar uma avaliação, testes foram aplicados nas paredes e pilares de pedras. O esquema do ensaio de deformabilidade em uma estrutura de pedra pode ser conferido na Figura 30. Outras técnicas também foram utilizadas em conjunto, como a tomografia sônica e radar.

Figura 30: Localização dos macacos e dos pontos de referência em um pilar.

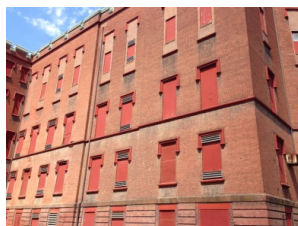


Fonte: Binda, Saisi e Zanzi (2003).

Simões, et al. (2012) estudaram alvenarias estruturais de pedras, do século 18, tratando-se de uma construção histórica típica portuguesa. Testes de deformabilidade foram utilizados em diferentes pontos. Como conclusão, aponta-se que o teste de macacos levou a resultados satisfatórios, com valores de módulo de elasticidade e de resistência compatíveis com os apontados pela literatura para esse tipo de construção.

A empresa Atkinson-Noland & Associates, Inc. já realizou diversos ensaios com macacos planos em edificações dos Estados Unidos, sendo uma das pioneiras na aplicação da técnica no país. Exemplos de aplicação dos testes em avaliações de estruturas antigas são apresentados pela empresa. O teste de tensão foi aplicado em edificações como: Basilica of the National Shrine of Assumption of the Blessed Virgin Mary, em Baltimore (finalizada em 1821), Colorado State Building, no Colorado (século XIX) e o prédio sede da Organização das Nações Unidas, em Nova York. O teste de deformabilidade foi aplicado em: Colton Elementary School e Louisiana Center Building. O teste também foi aplicado no St. Elizabeths Hospital (Figura 31), em Washington, DC, construção de 1850.

Figura 31: Prédio central do St Elizabeths Hospital, em Washington-DC (Estados Unidos).



Fonte: Próprio autor

Ahmed, et al. (2013) também comentam algumas obras analisadas com a técnica. O estádio de baseball Montgomery River Walk Stadium, no Alabama, construído em alvenaria foi analisado para verificar se as paredes suportariam novas cargas, sendo utilizado o teste de deformabilidade. A Torre dell'Orologio, em Veneza, na Itália teve suas paredes submetidas ao teste de tensão, em um processo de restauração.

2.12 Aplicação de macacos planos em estruturas não convencionais

A técnica foi parte de inúmeras avaliações estruturais de alvenarias antigas, construídas com tijolos ou pedras. Avaliações foram necessárias em diferentes tipos de alvenarias, de modo que macacos planos foram aplicados em alguns casos, tratando-se do uso não convencional da técnica, já que as paredes eram constituídas por elementos diferentes.

Carvalho (2010) utilizou os dois testes de macacos planos tradicionais (para unidades maciças) em um edifício de alvenaria com blocos cerâmicos vazados, do tipo caixão, no Recife. Os blocos possuíam 8 furos horizontais (Figura 32). Trata-se de uma aplicação não convencional, já que os blocos possuíam furos horizontais e, em virtude disso, os testes não foram bem-sucedidos, pois problemas na distribuição de tensões foram apontados. Outras técnicas não destrutivas foram aplicadas em conjunto, como: emissão acústica e ensaios dinâmicos. Modelagem numérica também foi realizada para entender a distribuição de cargas pelas paredes.

Figura 32: Paredes de blocos vazados ensaiadas com macacos planos.



Fonte: Carvalho (2010).

Ahmed, et al. (2013) afirmam que, assim como paredes de alvenaria necessitam de avaliações, elementos de concreto também necessitam. A proposta dos autores foi a de adaptar o equipamento para se obter propriedades em estruturas de concreto. Assim, um novo macaco foi desenvolvido (Figura 33), com as dimensões de 10 x 5 x 0,8 cm. No estudo, o equipamento não foi testado em estruturas de concreto, mas a sua aplicabilidade foi comprovada pelo teste de calibração, em que se obteve um coeficiente de rigidez interna.

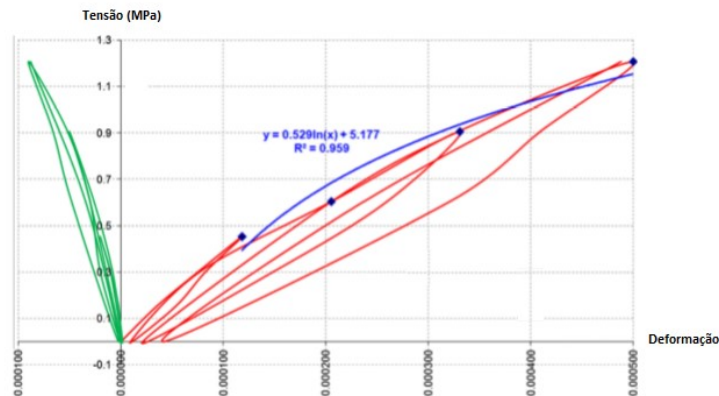
Figura 33: Macaco plano especial desenvolvido para estruturas de concreto.



Fonte: Ahmed, et al. (2013).

Lombillo, et al. (2014) realizaram um estudo com amostras de paredes construídas com terra batida em laboratório. Foram utilizados os dois testes de macacos planos, o de tensão e o de deformabilidade. Os resultados obtidos com esses testes foram comparados com valores de referência para terra batida. A tensão presente obtida apresentou uma diferença de 22% com a estimada, a qual foi calculada com o peso próprio. O teste de deformabilidade obteve a curva tensão por deformação, apresentada na Figura 34. A partir da curva, propriedades foram obtidas, sendo comparadas com os valores obtidos através de testes destrutivos em corpos de prova cilíndricos. A precisão foi muito boa para a resistência à compressão, igual a 3%, porém o módulo de elasticidade se mostrou inadequado quando comparado com o valor teórico. Como conclusão, os autores afirmaram que a técnica apresenta precisão compatível com a necessária para uma análise estrutural em alvenarias de terra batida.

Figura 34: Curva obtida com o teste de macacos duplos.



Fonte: Lombillo, et al. (2014).

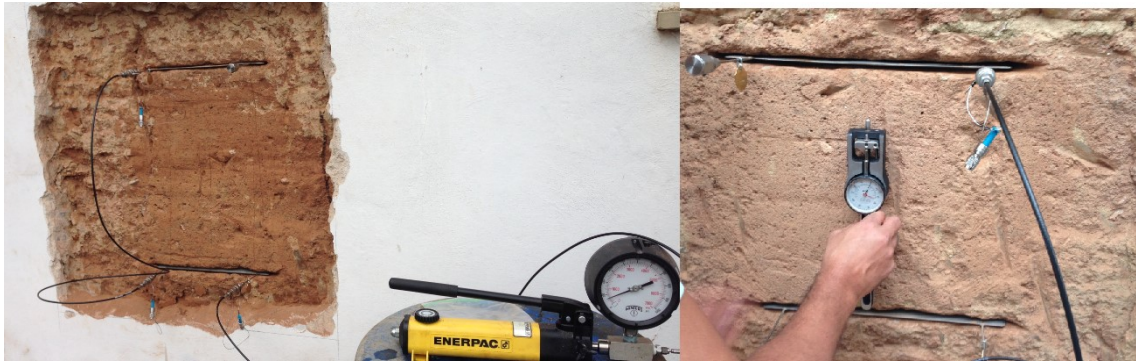
O sobrado Solar Manuel de Aguiar Vallin (Figura 35), construído no século 19, na cidade de Bananal, em São Paulo, foi analisado por Soriani, et al. (2014). O teste de deformabilidade foi aplicado nas paredes de taipa para a obtenção do módulo de elasticidade e da resistência à compressão. Foram realizados três ensaios em paredes diferentes, de modo que as amostras foram ensaiadas até o surgimento de pequenas fissuras. As deformações foram calculadas pelo controle da posição dos pontos de referência. Um esquema geral do ensaio é apresentado Figura 36, podendo notar a bomba externa conectada ao sistema, assim como o controle da deformação na região entre os macacos. A validação do ensaio ocorreu pela aproximação dos valores obtidos com os esperados, a resistência à compressão média foi de 0,81 MPa e o valor médio para o módulo de elasticidade 320 MPa. As três curvas de tensão por deformação obtidas na análise estão presentes na Figura 37.

Figura 35: Sobrado Aguiar Vallin, em Bananal.



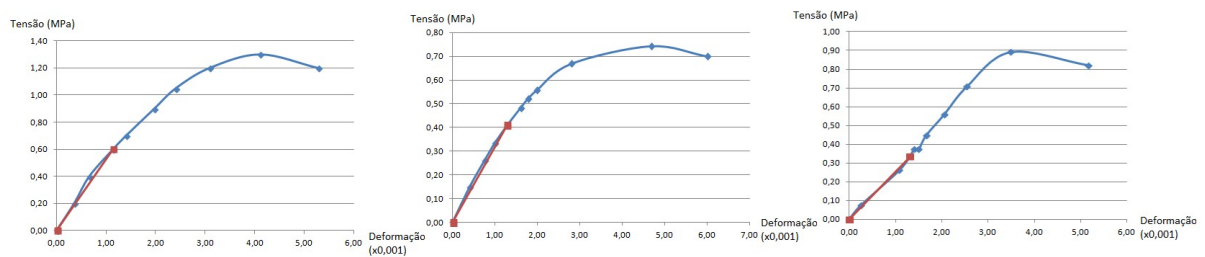
Fonte: Soriani, et al. (2014).

Figura 36: Esquemática do ensaio em parede de taipa.



Fonte: Soriani, et al. (2014).

Figura 37: Curva obtida com o teste de macacos duplos.



Fonte: Soriani, et al. (2014).

2.13 Estudos sobre macacos planos

Estudos foram realizados para verificar a eficiência dos testes de macacos, obtendo valores de precisão, indicando fontes de erros e valores médios segundo análise estatística.

Landriani e Taliércio (1986) estudaram modelos numéricos em elementos finitos dos testes com macacos planos, enquanto a técnica ainda estava em desenvolvimento. Algumas conclusões obtidas foram fundamentais para um melhor entendimento do funcionamento dos testes. O teste de tensão e de deformabilidade foram simulados numericamente, enquanto que os valores obtidos com esses testes foram comparados com as cargas aplicadas e as propriedades atribuídas aos modelos.

No teste de tensão, os autores concluíram que a ideia de se obter a tensão presente através da pressão que restaura a posição inicial dos pontos de referência se mostrou adequada. Afirmaram que: "em todos os casos considerados, a pressão de cancelamento provê informações confiáveis sobre o estado de tensão na área não danificada da alvenaria".

Já com relação ao teste de deformabilidade, Landriani e Taliércio (1986) concluíram que no procedimento adotado existe uma tendência de superestimar o módulo de elasticidade. Citaram que "a curva tensão-deformação obtida não se desviou muito dos valores elásticos, mesmo para altos valores da pressão vertical".

Em alguns testes com macacos planos não é possível medir diretamente a resistência à compressão da alvenaria. Em casos de edifícios históricos, nenhum tipo de dano é permitido, assim, uma maneira segura de se evitar isso é limitar o carregamento para que a estrutura se mantenha no comportamento elástico. Schuller (2001) comentou: "em muitas vezes, a alvenaria não pode ser testada até a inicialização do comportamento não linear e, assim, uma estimativa da resistência à compressão deve ser feita baseada na rigidez inicial". Com base nessa questão, alguns trabalhos foram realizados avaliando maneiras de se estimar a resistência com base em outros dados.

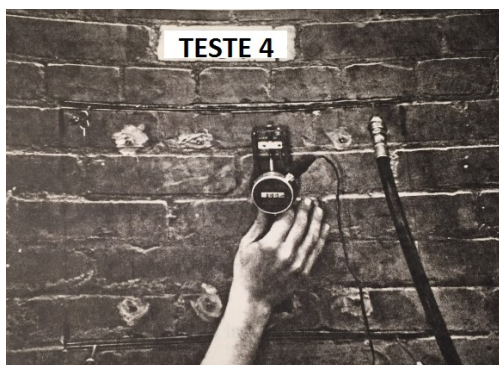
Wo e Schuller (2008) utilizaram um banco de dados de ensaios de prisma e de paredes compostas por tijolos cerâmicos, fazendo uma análise estatística de mais de 200 resultados. Ao plotar esses dados, os autores obtiveram a linha de tendência, relacionando o módulo de elasticidade e a resistência à compressão, obtendo que o módulo é 435 vezes a resistência à compressão. Porém, como conclusão, os autores afirmaram que possuir um fator de correlação fixo entre os dois valores é difícil, uma vez que o módulo tem dependência do nível de qualidade da construção, fato variável nas construções antigas, e da presença de fissuras.

Schuller (2001) analisou mais de 1000 valores obtidos por ensaio de prisma de tijolos maciços e sugeriu que o módulo seja obtido através da inclinação da reta que se inicia em 5% a 33% da carga máxima. Tal sugestão resultou numa relação de, aproximadamente, 460 vezes entre o módulo e a resistência.

Turner (1992) aplicou teste de deformabilidade em um edifício histórico da School of Civil Engineering of Georgia com o objetivo de obter o módulo de elasticidade e a resistência à compressão da alvenaria. No teste, o carregamento foi aplicado em três ciclos, até a fissura da alvenaria, sendo realizados 5 testes em locais diferentes. Outras técnicas também foram

utilizadas, como: análise química da argamassa, teste de compressão de tijolos e ensaios à compressão de amostras retiradas da parede. Assim, foi possível comparar os resultados obtidos pelo macaco plano com os obtidos destrutivamente. O teste de deformabilidade pode ser visualizado na Figura 38, em que se observa a leitura da distância entre os pontos de referência para cálculo da deformação.

Figura 38: Teste de deformabilidade em amostra de parede.



Fonte: Turner (1992).

A precisão obtida por Turner (1992) foi considerada como muito boa para a resistência à compressão, variando de 2,3 a 3,3% de erro, e ruim para o módulo de elasticidade, variando de 16,4 a 207%. Segundo o autor, a precisão do módulo foi menor porque essa propriedade é mais afetada pela expansão excessiva do macaco, o que ocorre em casos de fissuração excessiva do tijolo, enquanto que a resistência não é tão afetada por tais fatos.

Epperson e Abrams (1989) aplicaram o teste de tensão e de deformabilidade com macacos planos em amostras retiradas de uma edificação histórica. O teste de tensão foi feito com duas análises, uma em que apenas um par de pontos de referência foi utilizado e outra com três pares de pontos. Analisando os resultados, afirmaram que a variação no valor da tensão vertical obtida diminuiu quando se utilizou o valor médio de mais pontos, e que houve boa precisão na estimativa da tensão atual com um erro menor de 5%.

Para o teste de deformabilidade, Epperson e Abrams (1989) aplicaram uma tensão máxima de 25% da média da resistência à compressão obtida por ensaios dos prismas, repetindo o teste sob diferentes carregamentos verticais. O módulo de elasticidade obtido foi comparado com o obtido pelos testes dos prismas. A relação entre os dois valores variou de 1 a 1,6. Os autores concluíram que o módulo obtido com a técnica aumenta com tensões verticais maiores na parede, a explicação é que o aumento na tensão vertical, aumenta o confinamento lateral da alvenaria ao redor da região testada. Os autores afirmam que "a seção de alvenaria entre os

dois macacos foi afetada pelas condições de contorno impostas pela alvenaria ao redor, portanto, não se tratou de uma amostra totalmente isolada".

Noland, Atkinson, Kingsley e Schuller (1990) realizaram diversos ensaios de laboratório com a técnica de macacos planos. Inicialmente os testes com macacos foram aplicados em paredes construídas de maneira muito similar à construção de alvenarias antigas, porém resultados conclusivos não foram obtidos. Como forma de se aumentar o número de dados, os testes com macacos foram aplicados em prismas, economizando recursos e tempo que a construção de novas paredes iriam consumir. Os prismas foram confinados na prensa, inserindo um macaco na parte superior do prisma e um outro na inferior, seguindo as mesmas etapas de um teste comum. Os prismas utilizados possuíam dimensões de 20 x 40 x 40 cm e a prensa hidráulica foi utilizada para manter o nível de carregamento constante. A medição das deformações foi feita pela leitura de nove pares de pontos de referência. O módulo de elasticidade foi calculado pela regressão linear dos pontos experimentais obtidos. Assim, uma nova forma de avaliar a técnica foi apresentada, o uso de prismas simulando a região entre macacos, isso é possível pois considera-se que essa região está isolada do restante da parede. Tal sugestão permite aumentar os dados experimentais de maneira rápida e econômica.

2.14 Desenvolvimento de novos modelos de macacos

As normas ASTM C1196-09, ASTM C1197-09 e as recomendações RILEM MDT.4-04, MDT.5-04 definem o equipamento de macaco plano como um envelope composto por chapas metálicas. Porém, devido a limitações desse modelo, propostas de diferentes equipamentos de macaco foram desenvolvidas ou sugeridas.

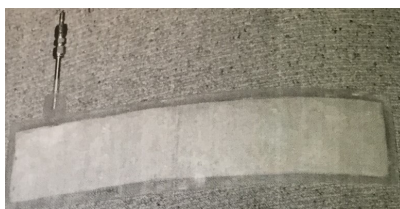
Uma dificuldade na execução do ensaio, principalmente em alvenarias mais deformáveis, é a retirada do macaco plano do rasgo feito, após o fim do teste. Quando a alvenaria se deforma consideravelmente, o macaco infla proporcionalmente, o que dificulta a sua retirada, podendo levar à danificação do equipamento ou da alvenaria.

Woodham e Schuller (2003) apresentaram a proposta de um novo equipamento de macaco plano, fabricado com borracha ao invés de chapas metálicas, assim como apresentado na Figura 39. Isso teria como razão facilitar a retirada do macaco do rasgo da alvenaria, pois seria bem mais deformável. Além disso, nas aplicações do macaco em unidades com face irregular, o equipamento poderia se conformar a essas irregularidades e aplicar pressão de

uma maneira mais uniforme. O macaco de borracha seria mais flexível, possuindo uma rigidez interna muito baixa.

No macaco desenvolvido pelos autores, sensores de deslocamento foram incorporados dentro do macaco, já realizando medições de deformação da alvenaria. O macaco foi testado em amostras de alvenaria de tijolos cerâmicos em laboratório com o teste de deformabilidade. Como conclusão, aponta-se que o macaco possui capacidade de se conformar a formatos diferentes, alta capacidade de expansão (dispensa cunhas) e facilidade de remoção do rasgo. Porém, o macaco apresentou baixa capacidade de pressão (aplicação limitada a alvenarias com baixa resistência). O módulo obtido apresentou boa concordância com ensaios destrutivos, em torno de 10%.

Figura 39: Equipamento de macaco plano flexível.



Fonte: Woodham e Schuller (2003).

2.15 Posição dos pontos de referência para medida de deformação nos testes com macacos planos

Com relação ao teste de estado de tensão, podem ser apresentadas diferentes sugestões. A ASTM C1196-09 e a RILEM MDT.4-04 concordam quanto a esse item, afirmando que os pontos devem ser posicionados simetricamente com relação ao rasgo. Quanto à distância horizontal entre os pontos, ambos citam que devem estar distribuídos ao longo do rasgo, de modo que os pontos extremos (primeiro e último) estejam distantes a, pelo menos, $1/8$ do comprimento do macaco da extremidade do rasgo.

Os pontos de referência são posicionados na superfície da alvenaria analisada. A partir da comparação entre as medidas da distância vertical inicial entre os pontos e da distância durante o teste, deformações são calculadas. Para tanto, considera-se que a deformação da superfície é representativa quanto a deformação da estrutura de alvenaria.

Landriani e Taliercio (1986) analisaram essa questão em modelos de elementos finitos. Os autores concluíram que, a partir do modelo analisado, as leituras na superfície são

representativas. Afirmam que "a modelagem tem mostrado que a deformação da superfície é, razoavelmente, uniforme e provê uma boa representação da resposta da alvenaria entre um quarto e um terço da região central carregada pelo macaco".

2.15.1 Estudos realizados para o teste de tensão

Para o ensaio de tensão, Epperson e Abrams (1989) analisam duas opções. Uma opção com apenas um par de pontos de referência localizado no centro do rasgo, outra com três pares posicionados na região central do rasgo. Através dessa análise, concluíram que o macaco possui tendência de se deslocar mais no seu centro, levando a erros no modelo com apenas um ponto. Assim, sugeriram a utilização de, pelo menos, de três pares de pontos para que se considere a média entre eles. Os autores afirmaram que: "erros na estimativa da tensão foram reduzidos pelo uso da média das medições de três pares centrais para a determinação da tensão de equilíbrio".

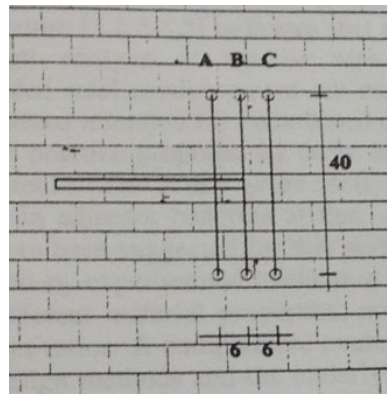
Ainda quanto ao teste de tensão, Ronca (1996) ensaiou amostras de paredes com diferentes configurações na posição dos pontos de referência. Uma das configurações foi feita de acordo com a recomendação da RILEM LUM.D.2-90, em que um ponto é posicionado no centro do rasgo e outros dois, um de cada lado, simetricamente ao ponto central. A distância horizontal adotada foi de 10 cm. O valor de tensão obtido foi comparado com a tensão aplicada na parede e um erro de 40% foi encontrado. Além disso, deformações plásticas na região central do rasgo e residuais nas duas extremidades foram observadas.

A segunda configuração analisada por Ronca (1996) foi montada para verificar a diferença da deformação nas regiões central e extremas do rasgo. Assim, um ponto foi posicionado no centro do rasgo e um outro em cada uma das extremidades. Com essa configuração, um erro menor que 7% foi obtido. No ponto central, deformações residuais plásticas e deformações não lineares foram observadas.

Identificando que a região central do rasgo é a mais afetada por deformações inelásticas, Ronca (1996) estudou uma terceira configuração com os pontos de referência. Nesse caso, a proposta era de controlar as deformações apenas na região final do rasgo. Segundo o autor, a concentração de deformação inelástica que ocorre no centro do rasgo pode resultar em maiores deslocamentos dessa região, assim deseja-se verificar a precisão do teste sem medir deformações nessa região. Pontos de referência foram posicionados na extremidade do rasgo, a 6 cm da extremidade para o lado interior e a 6 cm da extremidade para o lado exterior, conforme indicado na Figura 40.

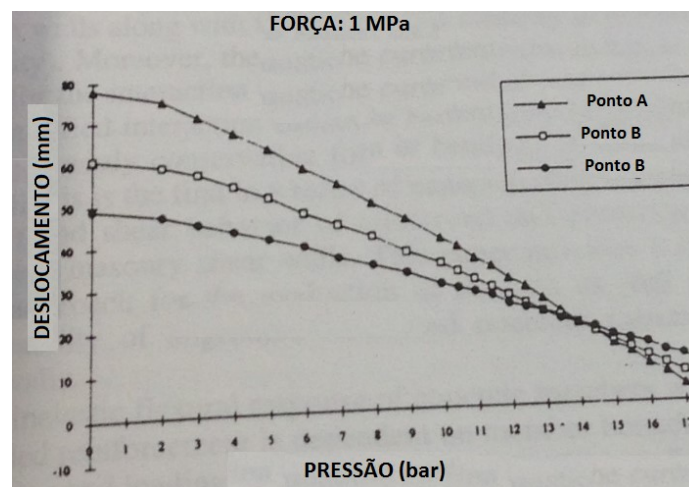
Para a terceira configuração, as três curvas (uma de cada par de ponto) tiveram intersecção no mesmo ponto (Figura 41). A intersecção dos pontos indica que a deformação residual é igual para os três pares. A recomendação do trabalho foi que a tensão a ser obtida com o teste não deveria ser aquela necessária para que a média das deformações seja zero, mas sim a que resulta em deformações residuais iguais. Os resultados obtidos tiveram boa precisão, com erros menores que 10% para a obtenção da tensão presente.

Figura 40: Configuração dos pontos de referência proposta.



Fonte: Ronca (1996).

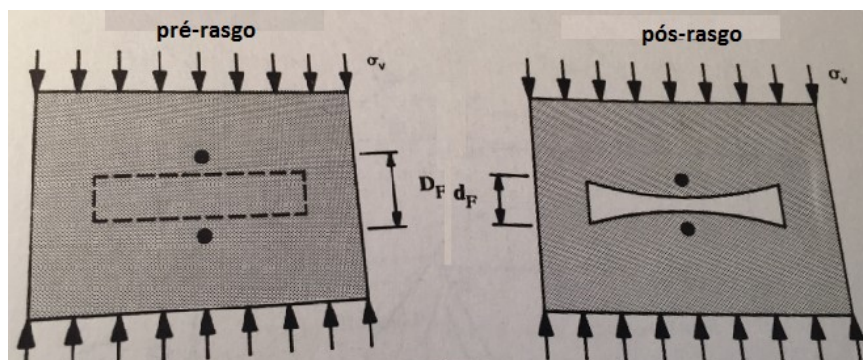
Figura 41: Indicação das curvas se interceptando.



Fonte: Ronca (1996).

A questão da concentração de tensões no centro do rasgo já foi tema de estudo de diversos outros autores, como Epperson e Abrams (1989), que ilustram deformações muito maiores no centro do rasgo (Figura 42) e Schuller (2001).

Figura 42: Deformação da alvenaria ao redor do rasgo.



Fonte: Epperson e Abrams (1989).

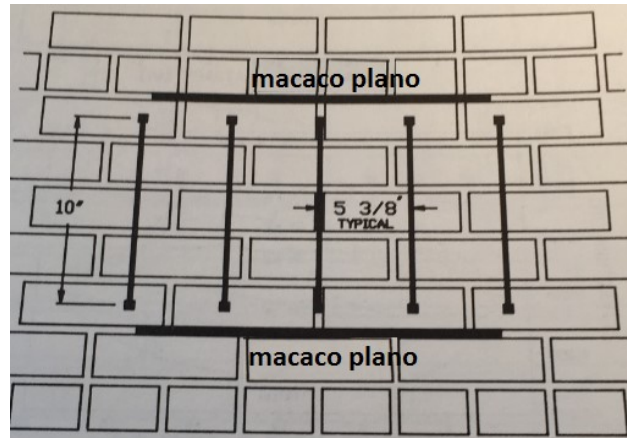
Suprenant e Schuller (1994) sugeriram apenas que os pontos sejam distribuídos entre o rasgo, respeitando as extremidades desse. Essa recomendação concorda com às apresentadas pela ASTM e RILEM correspondentes à técnica, porém os autores não citaram uma distância mínima necessária com relação à extremidade do rasgo.

Já Binda e Tiraboschi (2001) defenderam que a deformação deve ser medida na região mais central, evitando as regiões de extremidade do rasgo. Para tal, os autores afirmaram que "haverá concentração de tensões no meio do rasgo e maiores valores de tensão devem ser aplicados nas extremidades do rasgo para se recuperar do efeito de relaxação".

2.15.2 Estudos realizados para o teste de deformabilidade

Com relação ao teste de deformabilidade, a ASTM C1197-09 e a RILEM MDT.5-04 apresentam a mesma sugestão do teste de tensão para a configuração dos pontos de referência, ou seja, que estejam distribuídos com relação ao rasgo, mantendo-se uma distância mínima das extremidades do rasgo igual a 1/8 do comprimento do macaco. Epperson e Abrams (1989) também sugerem essa configuração dos pontos, mas incluem a possibilidade de serem posicionados nas extremidades (Figura 43).

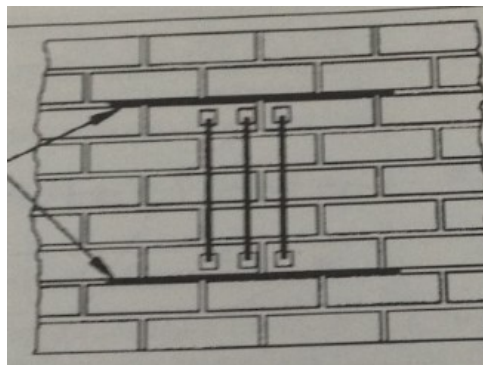
Figura 43: Exemplo de distribuição dos pontos de referência.



Fonte: Epperson e Abrams (1989).

Entretanto, Suprenant e Schuller (1994) sugerem que a deformação seja lida apenas no centro do rasgo e, assim, que os pontos sejam posicionados o mais próximo horizontalmente entre si na região central (Figura 44). Os autores argumentam que as leituras nessa região levam a resultados mais consistentes, já que fora dessa área, a tensão pode ser afetada pela restrição lateral proveniente da região da parede ao redor, o que levaria a erros na leitura de deformação.

Figura 44: Recomendação da configuração dos pontos de referência.

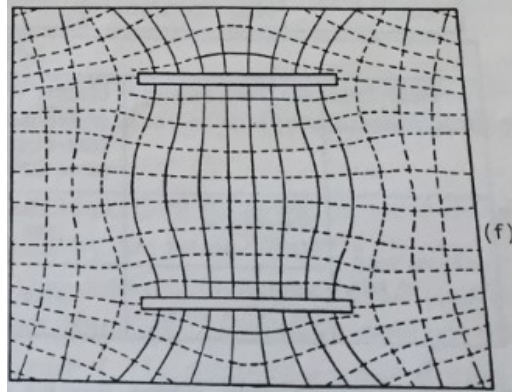


Fonte: Suprenant e Schuller (1994).

A recomendação de Suprenant e Schuller (1994) pode ser reforçada pelo trabalho de Landriani e Taliércio (1986), que analisou o teste de deformabilidade por modelagem numérica. Sobre a região central do rasgo, os autores afirmam que "o efeito transversal de restrição nessa parte da estrutura diminui tanto que o teste com dois macacos planos lembra, de maneira muito próxima, um teste de compressão uniaxial". Essa conclusão é confirmada pela Figura 45, que apresenta a deformação obtida pelo modelo numérico. Observa-se na

figura que na região central da área entre os macacos, os elementos não sofrem deformações horizontais, diferente das regiões próximas às extremidades dos rasgos.

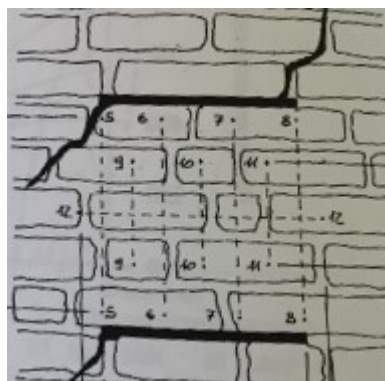
Figura 45: Deformação da região entre os macacos no teste de deformabilidade.



Fonte: Landriani e Taliercio (1986).

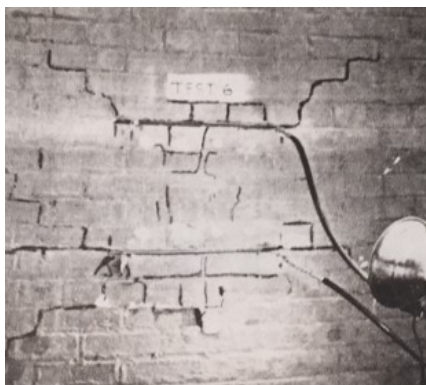
Turner (1992) analisou os modos de falha nos testes de deformabilidade. O autor observou que: "o teste com macacos planos tipicamente falha de uma maneira similar, fissuras iniciais são observadas na parede na região próxima aos cantos dos macacos, essas fissuras se expandem diagonalmente para fora da região testada". Esse mesmo modo de falha foi apresentado por Schuller (2001) na Figura 46. Essa falha também é apresentada na Figura 47, que retrata um teste prático com macacos planos, que foi realizado até a ruptura da alvenaria para se obter informações da resistência.

Figura 46: Danos decorrentes de altas tensões aplicadas no teste de deformabilidade.



Fonte: Schuller (2001).

Figura 47: Trincas observadas em teste de deformabilidade realizado até a ruptura da alvenaria.



Fonte: Noland, Atkinson, Kingsley e Schuller (1990).

2.16 Estudos sobre consideração da área efetiva dos macacos planos

Além da posição dos pontos de referência, o cálculo da área efetiva de contato do macaco com a unidade de alvenaria é frequentemente estudado. A área de contato é importante porque é parte de um dos coeficientes aplicados na correlação da pressão na bomba e da tensão na alvenaria.

Teoricamente, a área de transmissão da tensão do macaco para a alvenaria seria a própria área do macaco. Isso ocorre desde que: o macaco esteja totalmente encunhado na junta, o rasgo seja de ótima qualidade (com espessura homogênea e totalmente plano), ausência de deformações excessivas do macaco durante o teste e transmissão de pressão homogênea entre o macaco e a unidade da alvenaria. Entretanto é comum a concentração de tensões em apenas algumas regiões da superfície do macaco, seja por irregularidades na superfície do tijolo ou da pedra, por rasgo de baixa qualidade com espessura variável ou por não ser possível retirar toda a argamassa do rasgo. Tais concentrações diminuem a área efetiva de transmissão de pressão.

Visando diminuir as incertezas sobre o tema, Filipe (2012) realizou testes em paredes de adobes construídas em laboratório, aplicando o teste de tensão. Dois métodos de identificação da área de contato foram utilizados: método tradicional e método de rede de marcação. O método tradicional é aquele em que se utiliza um papel carbono entre o macaco e a parede, conhecendo a área de transmissão de pressão pelas marcas no papel. O método de rede de marcação é aplicado na superfície do macaco e é apresentado na Figura 48. O valor da tensão

presente obtido com o teste foi comparado com a tensão vertical aplicada, calculando o desvio para cada um dos dois casos.

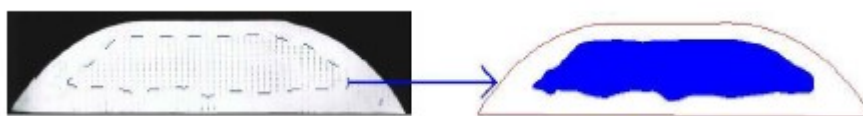
Como resultado, o uso do papel carbono levou a um desvio de 37% no valor da tensão presente, já o uso da rede de marcação levou a um desvio de 27%, aumentando a precisão do teste. Além disso, a rede de marcação resultou em uma imagem mais nítida da área de contato, podendo ser calculada por programas de desenho computacional (Figura 49). Um problema identificado com o uso de papel carbono é que o atrito na remoção do macaco da junta, pode alterar a imagem da área de contato. A comparação da área de contato obtida pelo uso do papel carbono e da rede de marcação é apresentada na Figura 50.

Figura 48: Macaco semioval com rede de marcação.



Fonte: Filipe (2012).

Figura 49: Área de contato obtida através da rede de marcação.



Fonte: Filipe (2012).

Figura 50: Área de contato obtida com papel carbono e com rede de marcação.



Fonte: Filipe (2012).

2.17 Leitura da deformação

A leitura das deformações é um dado essencial para interpretação dos dados obtidos nos ensaios de tensão e de deformabilidade. A deformação é calculada através da diferença na distância vertical dos pontos de referência. Assim, a precisão do instrumento que realiza as medidas para o cálculo de deformação é um fator impactante na análise dos resultados do teste. A precisão necessária pela ASTM C1197-09 é de 0,005% da distância vertical inicial dos pontos de referência, já pela RILEM MDT.5-09 é de 0,0025 mm. Suprenant e Schuller (1994) também recomenda uma precisão mínima de 0,005 mm.

Rossi (1990) indica que a leitura da distância vertical dos pontos de referência pode ser feita através da utilização de um extensômetro mecânico. As normas da ASTM e as recomendações da RILEM referentes à técnica também citam a possibilidade de utilização desse aparelho (Figura 51). Nesse caso, os pontos de referência apresentam pequeno orifício central, o que permite o encaixe do extensômetro em dois pontos de um mesmo par para que meça a distância vertical entre eles (Figura 52). O processo de encaixe do aparelho e de leitura deve ser feito em todos os pontos, em cada nível de pressão aplicada. Isso torna o processo lento e mais sujeito a erros, já que a pressão aplicada deve ser mantida constante durante todo o processo de leitura. A vantagem na sua utilização é o menor custo dos equipamentos.

Figura 51: Leitura através de extensômetro mecânico.



Fonte: ASTM C1196-09.

Figura 52: Leitura com extensômetro.



Fonte: Soriani, et al. (2014).

Outra opção para medida da distância vertical dos pontos e, assim, para o cálculo das deformações, é o uso de um relógio comparador com uma haste vertical. Nesse caso, um relógio comparador é fixado no ponto de referência superior e uma base no ponto inferior. Na base inferior, uma haste é posicionada na vertical, com a ponta fixada. A haste deve ter comprimento tal que esteja apoiada na base inferior e entre em contato com o apalpador do relógio. Com a deformação da alvenaria, a distância entre o relógio superior e a base inferior é alterada, fazendo com que a haste vertical altere a posição do apalpador do relógio. A vantagem nesse caso é que há uma leitura individual para cada ponto e os relógios já estão fixados, não necessitando de encaixes para cada leitura, fato que torna o processo mais rápido. Apesar do custo baixo para aquisição dos equipamentos, é necessário o uso de um relógio para cada par de pontos, encarecendo a opção frente ao extensômetro mecânico.

Uma terceira opção é o uso de LVDTs, ou “Linear Variable Differential Transformews”. Nessa opção, a leitura da deformação é feita eletronicamente, aumentando a precisão e agilidade do processo, como indicado na Figura 53. Além disso, podem ser conectados a um aquisitor de dados, permitindo ter acesso às deformações em tempo real durante o teste. Suprenant e Schuller (1994) ainda relatam a não necessidade de um operador na leitura das deformações. Porém, o sistema é mais caro, necessitando de um investimento maior, Suprenant e Schuller (1994) relatam que o equipamento apresenta custo de duas vezes ou mais quando comparado com o equipamento de leitura mecânico.

Figura 53: Teste de deformabilidade com LVDTs para obtenção da deformação.



Fonte: Próprio autor.

Filipe (2012) estudou uma outra alternativa para obter as deformações na alvenaria, analisando o uso de redes de Bragg. Nessas redes, sensores de fibra ótica são utilizados na superfície do macaco. Entretanto, tal método não se mostrou adequado pois o núcleo de vidro das fibras não resistiu às tensões impostas pelo macaco. O autor, porém, aponta que novas gerações de fibra ótica apresentam bom potencial para essa finalidade, já que possuem núcleo polimérico, que é mais flexível.

2.18 Macacos planos em alvenarias modernas

A técnica de macacos planos é largamente estudada e aplicada para avaliação de alvenarias antigas, porém, alvenarias modernas também possuem demanda de avaliação. Como a técnica de macacos planos permite a obtenção de importantes propriedades mecânicas, a mesma poderia ser aplicada nas alvenarias modernas. Entretanto, limitações nos atuais equipamentos e procedimentos impedem tal aplicação.

Schuller (2001) cita que um novo modelo de macaco plano é necessário para a aplicação da técnica em alvenarias modernas, citando propriedades desejáveis desse novo equipamento. Como exemplo, o autor cita um macaco mais flexível (para facilitar sua retirada do rasgo na alvenaria), alta capacidade de pressão e possibilidade de aplicação em unidades vazadas sem graute.

São duas as principais limitações da atual técnica em alvenarias moderna: a resistência da parede e o formato das unidades. Quanto à resistência, Schuller (2001) afirma que "uma das limitações no teste de construções modernas de alvenaria é que a resistência à compressão

tipicamente excede a capacidade de carregamento do macaco". Além disso, afirma que melhor que utilizar correlações para obter a resistência seria que "o macaco plano possuísse uma capacidade de pressão interna maior que a resistência à compressão da alvenaria, de modo que a parede poderia ser carregada até uma situação próxima à ruptura". Soriani, et al. (2015) também cita a necessidade do desenvolvimento de um novo macaco plano, sugerindo um modelo que atuasse apenas nas faces maciças dos blocos, evitando que inflasse nas regiões vazias.

De acordo com Schuller (2001), as alvenarias modernas possuem alto módulo de elasticidade, devido à argamassa cimentícia e a blocos de alta resistência, isso faz com que as deformações na alvenaria sejam pequenas durante o teste. Logo, o autor recomenda o uso de ferramentas precisas para a leitura da deformação, sugerindo, por exemplo, o uso de medidores eletrônicos. Outra questão comentada pelo autor é que, geralmente, nas alvenarias modernas, o valor da tensão presente é maior, assim, o efeito comentado por Ronca (1996) sobre as deformações plásticas no centro do rasgo como fonte de erro do teste podem ser mais significativas nesse caso.

3 Estudo experimental

A utilização de macacos planos já é largamente aplicada em análises não destrutivas de alvenarias de unidades maciças. Deseja-se verificar se é possível o desenvolvimento de equipamentos que possibilitem sua aplicação também em alvenarias de blocos vazados e saber a eficiência da técnica na obtenção de propriedades dessas estruturas.

A alvenaria de blocos vazados melhor representa a alvenaria estrutural moderna, que apresenta inúmeras situações em que a técnica de macacos planos poderia ser aplicada. Apesar do conceito da técnica e de boa parte do procedimento atual poder ser diretamente aplicado em alvenarias modernas, os equipamentos disponíveis possuem limitações que impossibilitam essa aplicação. Logo, a adaptação da técnica para blocos vazados cria demandas para um novo macaco.

3.1 Demanda de um novo equipamento

O macaco atual é confeccionado para atuar em tijolos ou pedras. A ASTM C1197-09 apresenta alguns requisitos para a fabricação do macaco, ressaltando que o equipamento sempre deve ser compatível com a alvenaria a ser testada. Segundo a norma referida, o comprimento do macaco deve ser maior ou igual ao comprimento da unidade da alvenaria, devendo ser maior que 20 cm. Já com relação à largura do equipamento, essa deve ser maior ou igual à largura da unidade da alvenaria, devendo ser maior que 7,5 cm. A norma também traz recomendações sobre o material utilizado na fabricação do macaco, sugerindo chapas de INOX S 304 com espessura de 0,6 mm a 1,2 mm, apresentando a solda como solução para união entre as duas chapas.

A Atkinson-Noland é uma importante companhia na fabricação de macacos planos, fabricando em torno de 400 equipamentos por ano. A empresa fabrica diferentes modelos de macacos, porém o mais comum e mais utilizado é o modelo retangular, com dimensões de: 40,6 cm de comprimento, 10,2 cm de largura e 3,8 mm de espessura final (já com solda). A pressão interna máxima de ser aplicada é de 6,9 MPa. A Figura 54 apresenta o modelo retangular fabricado pela Atkinson-Noland (ANA).

Figura 54: Macaco plano retangular da ANA.

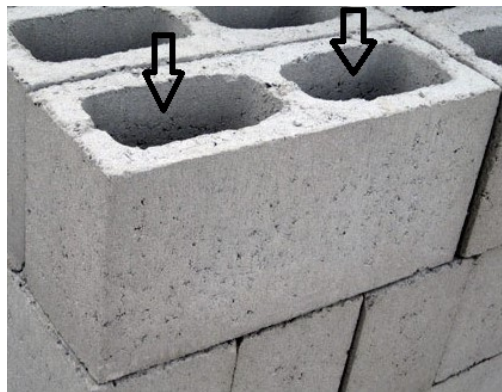


Fonte: Próprio autor.

O princípio de funcionamento do macaco plano é que uma bomba hidráulica seja conectada ao macaco, de modo que a bomba aplique uma pressão interna a ele. Devido à pequena espessura da chapa de metal que o compõe (em geral 0,6 mm), há a tendência de deformação da chapa. Porém, estando o macaco em contato com a unidade da alvenaria (no caso da figura, o tijolo), há uma reação, impedindo que o macaco se deforme e, através dessa reação, o macaco aplica uma pressão à alvenaria.

No caso do bloco de concreto, existem duas regiões vazadas, conforme indicado na Figura 55. Assim, caso o macaco atual fosse diretamente aplicado no bloco, haveria uma expansão das chapas do macaco em torno da região vazada (onde não há reação), resultando na ruptura do equipamento, bem como na falha de transmissão de tensão para o bloco.

Figura 55: Bloco vazado de concreto.



Fonte: Próprio autor.

Um outro fator limitante do equipamento é a pressão máxima possível de se aplicar. Devido à rigidez interna do macaco, a pressão interna (aquela aplicada pela bomba) é menor que a pressão externa (aplicada pelo macaco). As recomendações gerais são de que não se ultrapasse a pressão de 7 MPa na bomba, de maneira que o macaco aplicaria uma pressão menor que 7 MPa na alvenaria. Mas, tratando-se de blocos de concreto e de alvenarias modernas, as resistências tendem a superar e muito esse valor, de maneira que pressões de trabalho maiores são desejáveis em tal aplicação.

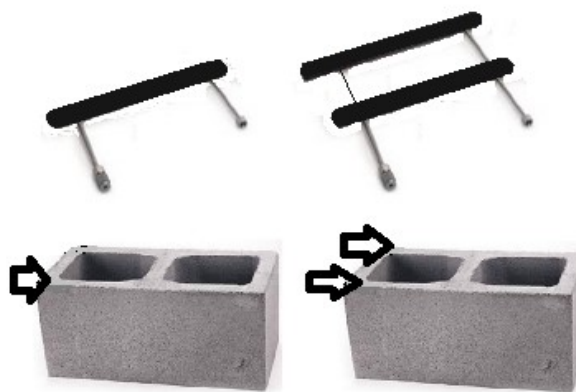
Logo, os dois principais fatores limitantes encontrados para a utilização do equipamento atual são: formato e capacidade de pressão. Com base nesses dois fatores, protótipos foram desenvolvidos para resolver essa questão.

3.2 Idealização de um novo macaco plano

Parte essencial deste trabalho foi desenvolver um novo macaco de maneira que fosse possível sua aplicação em blocos vazados.

Para resolver a questão do contato, o macaco idealizado teria o comprimento de apenas uma face do bloco (aproximadamente $2,7 \times 39$ cm), para que reagisse apenas na parte maciça. Desse modo, dois modelos foram projetados, um com apenas uma aba, que seria aplicado em apenas uma face horizontal do bloco. O outro modelo seria composto por duas abas conectadas por tubos, atuando nas duas faces horizontais do bloco. Os modelos, assim como a região de atuação de cada um podem ser conferidos na Figura 56.

Figura 56: Modelos de macaco de uma aba e de duas abas com as respectivas área de atuação.



Fonte: Próprio autor.

Edificações altas são cada vez mais comuns devido ao encarecimento dos lotes urbanos. Tais edifícios podem ser construídos em alvenaria estrutural. Um edifício de 20 pavimentos, por exemplo, poderia utilizar um bloco de cerca de 20 MPa nos primeiros pavimentos, para blocos de espessura de 14 cm. Nesse caso, as paredes dos primeiros pavimentos teriam resistência à compressão de, aproximadamente, 11 MPa considerando a área bruta do bloco, ou de 22 MPa considerando a área líquida.

Blocos de concreto acima de 30 MPa teriam uma aplicação muito específica, de altíssima solicitação. Uma parede de blocos dessa resistência apresentaria, em tese, uma resistência à compressão igual a 17 MPa. Logo, para que o teste com macacos pudesse ser aplicado com eficiência, obtendo dados da estrutura até valores próximos da carga de ruptura, o macaco deveria suportar uma pressão interna tal que aplicasse uma pressão externa acima de 15 MPa.

Como dito anteriormente, a pressão aplicada pela bomba conectada ao macaco é diferente da pressão que o macaco aplica na alvenaria. Essa diferença se deve à rigidez interna do equipamento. Parte da pressão aplicada "se perde" na deformação da chapa e outra parte é transferida por contato. Assim, teoricamente, quanto maior a espessura da chapa, maior seria a rigidez do macaco e, portanto, menor a eficiência do sistema. Tal fato é a razão para se fabricar o equipamento com chapas finas (o macaco atual é fabricado com chapa de 0,6 mm).

O teste de calibração do macaco define a constante do equipamento que relaciona a pressão interna do macaco (aquela aplicada pela bomba) com a externa (a que o equipamento aplica). Segundo a Atkinson-Noland & Associates, o macaco atual possui coeficiente próximo a 0,8, ou seja, 80% da pressão aplicada pela bomba é transmitida pelo macaco.

Para que o macaco aplique uma pressão externa de aproximadamente 15 MPa, o mesmo deve resistir à uma pressão interna maior. Diferentemente do modelo tradicional, estima-se que o coeficiente do novo macaco seja de 40% a 50%, já que a largura será muito menor (cerca de 2,5 cm), fato que restringe a deformação da chapa. Assim, o novo equipamento deve suportar uma pressão interna de, pelo menos, 40 MPa.

3.2.1 Desenvolvimento para o teste de deformabilidade

Há dois testes principais realizados com a técnica de macacos planos: teste de tensão e teste de deformabilidade. O teste de tensão tem como objetivo obter a tensão de compressão presente numa localidade da alvenaria. Já o teste de deformabilidade visa obter o módulo de elasticidade da estrutura e uma estimativa da resistência à compressão.

Para este trabalho, focou-se no teste de deformabilidade. A razão para isso é que, uma vez validados os equipamentos e os procedimentos para o teste de deformabilidade, a validação futura do teste de tensão é mais simples, já que o mesmo equipamento pode ser utilizado. Além disso, numa avaliação estrutural prática, a tensão presente em uma localidade pode ser obtida de maneira indireta. Uma maneira de se obter esse valor é calculando o peso próprio da estrutura acima da região desejada, adicionado as cargas acidentais previstas, enquanto que o módulo de elasticidade e a resistência seriam propriedades prioritárias e de mais difícil estimativa em uma análise estrutural.

Desse modo, os equipamentos e os testes foram ensaiados apenas para o teste de deformabilidade, tendo como objetivos obter o módulo de elasticidade das amostras construídas e uma estimativa da resistência à compressão.

3.2.2 Testes de verificação dos protótipos

Para atestar a funcionalidade dos protótipos, dois testes iniciais foram propostos. O primeiro teste a que os equipamentos foram submetidos é o de estanqueidade. Os modelos aprovados no primeiro, foram submetidos ao de resistência.

O teste de estanqueidade visa atestar a ausência de vazamento no macaco. Para esse teste, a mangueira foi conectada na ponta de um dos tubos, enquanto a ponta do segundo tubo foi fechada. Ao aplicar pressão com a bomba, o macaco tende a se inflar levemente já que o tubo de saída está fechado. Nesse processo, o equipamento não deve apresentar nenhum vazamento, nem perda de pressão para ser aprovado nesse teste.

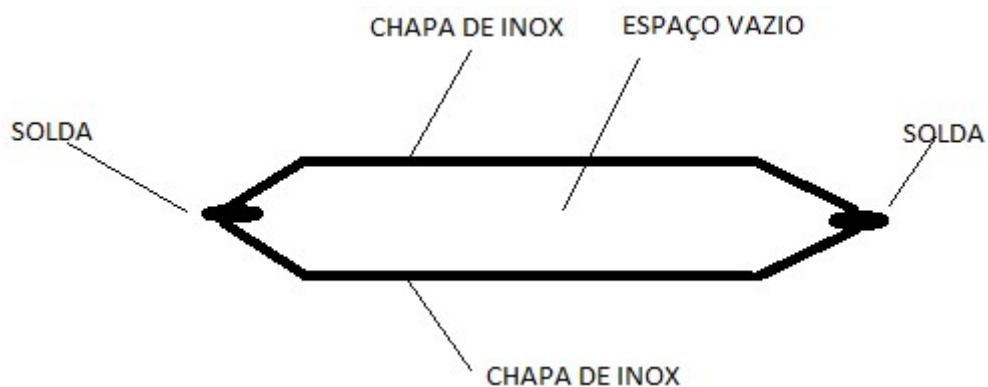
Já o teste de resistência tem como objetivo identificar a capacidade de pressão do macaco, ou seja, a máxima pressão que o macaco suporta, ou então se suporta uma pressão mínima que permita sua aplicação em alvenarias. Para esse teste, o macaco foi colocado na prensa hidráulica, estando conectado com bomba manual. O macaco fica confinado nos pratos da prensa, enquanto é bombeado com óleo. A função da prensa é a de equilibrar o sistema, ou seja, aplicar uma força correspondente de modo que anule a pressão aplicada pelo macaco, evitando a sua expansão.

3.3 Protótipo 1

O protótipo 1 foi desenvolvido com os mesmos materiais utilizados na confecção do macaco atual. As chapas de INOX S304, com espessura de 0,6 mm, foram recortadas na dimensão de

27 x 390 mm. As chapas foram sobrepostas, enquanto dois tubos foram inseridos entre elas. O tubo utilizado também era de INOX S304, com diâmetro externo de 3,2 mm e parede de espessura de 0,6 mm. A união das chapas foi feita com solda do tipo TIG, sem a adição de material (apenas com a fusão das chapas). Para possibilitar a solda, uma leve dobra em 45 graus foi feita nas bordas da chapa, permitindo um contato pontual entre as chapas superior e inferior. O esquema da seção transversal do protótipo 1 pode ser visto na Figura 57.

Figura 57: Esquema transversal do protótipo 1.



Fonte: Próprio autor.

A fabricação ocorreu na própria UFSCar, com auxílio da Oficina Mecânica do Departamento de Engenharia de Materiais. Foram fabricados dois modelos: de uma aba e de duas abas. O macaco de duas abas apresentou largura final igual à do bloco: 14 cm. Os macacos do protótipo 1 podem ser visualizados nas Figura 58 e Figura 59. Cada aba do macaco apresentou as medidas de: 2,5 x 39 x 0,3 cm para largura x comprimento x espessura.

Figura 58: Macaco de uma e duas abas do protótipo 1.



Fonte: Próprio autor.

Figura 59: Macaco de duas abas posicionado no bloco.



Fonte: Próprio autor.

Foram fabricados dois macacos de uma aba e um de duas abas. No teste de estanqueidade, vazamentos foram observados nos modelos de duas abas, invalidando-o para o teste seguinte, enquanto que os dois macacos de uma aba não apresentaram problemas. A configuração do teste pode ser conferida na Figura 60.

No teste da prensa, houve a ruptura dos macacos com uma pressão extremamente baixa. A resistência variou de 1,6 a 1,8 MPa para pressão interna. Houve separação das chapas, ou seja, a ruptura ocorreu na região de solda.

Devido à tensão baixa de ruptura, os modelos do protótipo 1 foram invalidadas tecnicamente. No protótipo 2, alterações foram realizadas afim de se melhorar a estanqueidade e a resistência da solda.

Analisando a ruptura desse protótipo, observou-se que uma causa provável da separação entre as chapas foram a existência de micro descontinuidades da solda, que sob a pressão do óleo hidráulico, se conectaram, resultando no vazamento de óleo. Além disso, o contato das chapas para a solda foi pontual (no corte transversal), resultando num cordão de solda muito fino.

Figura 60: Teste de resistência do macaco 1 na prensa hidráulica.



Fonte: Próprio autor.

3.4 Protótipo 2

A partir das conclusões obtidas com o protótipo 1, o protótipo 2 foi desenvolvido de modo a melhorar o contato entre as chapas e, assim, aumentar a quantidade e a qualidade da solda na união entre as chapas. Essa proposta teve o objetivo de reduzir as possibilidades de microfalhas e aumentar a resistência da solda. O corte transversal do protótipo 2 pode ser visto na Figura 61. Nesse caso, o contato entre as chapas deixou de ser pontual para ser linear. As dimensões de cada aba desse macaco foram: $3,3 \times 40,0 \times 0,4$ cm. Os materiais utilizados continuaram sendo exatamente os mesmos dos que foram utilizados no protótipo 1, a principal diferença é ocorreu na concepção do modelo, alterando a dobra das chapas para melhorar a capacidade de pressão do equipamento.

Figura 61: Corte transversal do macaco modelo 2 com medidas em centímetros.



Fonte: Próprio autor.

As chapas foram cortadas e dobradas na própria universidade, no Laboratório de Sistemas Estruturais (LSE) do Departamento de Engenharia Civil. Com relação à solda, identificou-se que esse seria um procedimento crítico para o bom funcionamento do macaco. Identificou-se que na Escola SENAI Antônio Adolpho Lobbe, de São Carlos, possuía uma equipe especializada no tipo de solda a ser aplicado, de modo que uma parceria foi formada.

Nessa parceria, a equipe de diretoria e coordenação da Escola mostrou-se muito solícita e interessada em auxiliar no projeto. O Senai disponibilizou um instrutor de solda (professor Amair Coelho), em horários agendados, para realizar as soldas TIG nos protótipos de macacos. A Figura 62 ilustra a execução da solda para a união entre as chapas e a solda para união da chapa com o tubo.

Figura 62: Solda TIG executada no SENAI.



Fonte: Próprio autor.

Ao todo, 6 macacos de uma aba e 3 macacos de duas abas foram fabricados. Essa etapa envolveu fabricação, testes, reparos e identificação de melhorias. A fabricação dos macacos ocorreu pelos processos de: dobra das bordas das chapas, sobreposição das mesmas, inserção dos tubos entre elas e execução de solda TIG para a união.

Os testes de estanqueidade e de resistência foram realizados nos 9 macacos fabricados. As Figura 63 e Figura 64 apresentam os macacos do protótipo 2.

Figura 63: Macaco de uma aba do protótipo 2.



Fonte: Próprio autor.

Figura 64: Dois modelos estudados de macacos do protótipo 2 sobre os blocos.



Fonte: Próprio autor.

De maneira geral, os macacos apresentaram bom comportamento no teste de estanqueidade. Quando algum ponto de vazamento era identificado, o mesmo era separado para que a solda fosse retrabalhada.

Figura 65: Teste de estanqueidade do protótipo 2.



Fonte: Próprio autor.

No teste de resistência na prensa, as pressões em que os macacos romperam ou que vazamentos se iniciaram foram significativamente maiores que aquelas obtidas no protótipo anterior. As rupturas ocorreram entre as pressões internas de 2 a 4 MPa. Nota-se que apesar do aumento da capacidade, a pressão máxima aplicada continuava sendo baixa e insuficiente para permitir a aplicação do macaco em testes de alvenaria moderna.

Na ruptura, os vazamentos de óleo deixaram de ocorrer ao redor do macaco (entre as chapas) para ocorrer apenas na ligação entre os tubos e as chapas. Tal fato indicou melhoria na resistência e na qualidade da solda entre as chapas, mas falhas na região específica de vazamento.

A região de ligação do macaco com o tubo era bastante crítica no momento da solda. Para total vedação dessa região, era necessário adicionar material de solda. Caso houvesse excesso de solda nesse ponto, o superaquecimento resultava no derretimento da parede interna do tubo, vedando o orifício. Já em caso de falta de solda, micro falhas ocorriam, resultando em vazamentos.

Desse modo, o protótipo 2 também não foi viabilizado para a aplicação de testes na alvenaria. Um terceiro protótipo foi projetado para superar as dificuldades encontradas nos dois protótipos anteriores.

3.5 Protótipo 3

Apesar do formato do macaco ter sido readequado para blocos vazados nos protótipos 1 e 2, os mesmos não apresentam a funcionalidade requisitada para tal aplicação, sendo invalidados. Um novo modelo de macaco teve de ser desenvolvido, alterando os procedimentos de fabricação para resolução dos problemas encontrados. O principal fator limitante tinha sido a capacidade de pressão do equipamento, já que rompia com tensões abaixo do desejado.

Outro ponto que poderia ser melhorado num novo protótipo seria a espessura final do macaco. O macaco plano atualmente disponível apresenta 3 mm de espessura. Isso é necessário devido à variação de espessuras de juntas existentes nas construções antigas. Porém, na alvenaria estrutural moderna, há uma uniformidade muito maior. De acordo com a ABNT NBR 15961:2-11, as juntas devem apresentar espessura de 1 cm com tolerância de mais ou menos 3 mm. Assim, a menor espessura encontrada deve ser de 7 mm. O macaco plano deve estar completamente encunhado na junta de alvenaria, porém, havendo um macaco com espessura menor, cunhas metálicas são necessárias. Logo, um macaco com espessura maior que 4 mm (do protótipo 2) e menor que 7 mm seria mais adequado.

3.5.1 Aumentando a resistência do macaco

A análise do protótipo 2 permitiu concluir que o aumento da região de solda não foi suficiente para garantir a resistência desejada. Devido à pequena largura do equipamento, pequenas deformações da chapa do macaco resultam em grandes solicitações nas restrições laterais, no caso, a solda. Assim, a concepção de fabricação do macaco foi alterada para criar um reforço nessa região.

O novo modelo foi desenvolvido e fabricado em parceria com a empresa Fameth Espaçadores Plásticos e Metálicos para Construção Civil. A solda TIG continuou sendo realizada pela parceria com a escola SENAI de São Carlos.

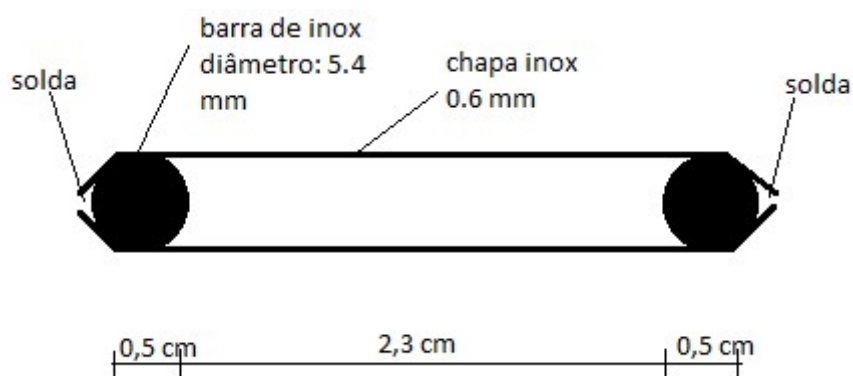
A chapa, assim como nos demais casos, era de INOX S304, mantendo-se a espessura de 0,6 mm. As chapas foram recortadas com as dimensões de: 3,3 x 40 cm. Nessa primeira fase, não foram realizadas dobras nas bordas das chapas.

A ideia para reforçar a ligação entre as chapas foi a de utilizar uma barra de inox entre as chapas. A esquemática do corte transversal pode ser conferida na Figura 66.

A barra com diâmetro de 5,4 mm de INOX S304 foi utilizada como reforço. Essa barra foi cortada e dobrada, adquirindo formato retangular com dimensões ligeiramente inferiores às da chapa. O quadro retangular metálico formado pela barra pode ser visto na Figura 67, a figura também apresenta o processo de solda MIG usado para fechar o quadro.

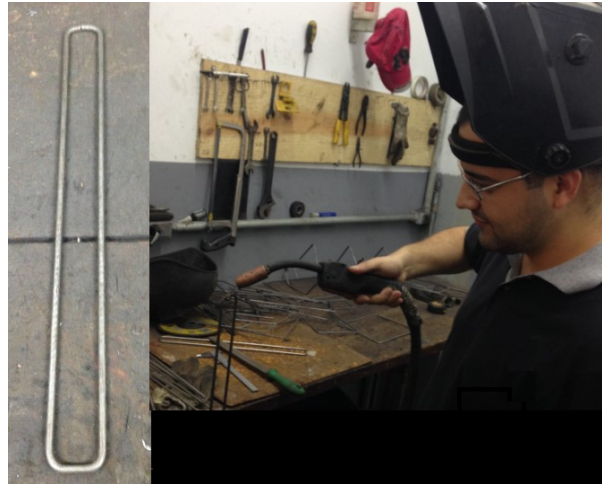
O processo de inserção do quadro metálico entre as duas chapas pode ser observado na Figura 68. Cada chapa tinha a espessura de 0,6 mm e o diâmetro da barra era de 5,4 mm, assim, o macaco apresentou uma espessura final igual a 6,6 mm, fato que pode ser conferido na Figura 70. A espessura final está dentro da desejada, já que está abaixo do limite inferior da espessura da junta de 7 mm, reduzindo o número necessário de cunhas metálicas para confinar os equipamentos nas juntas.

Figura 66: Esquemática do corte transversal do protótipo 3.



Fonte: Próprio autor.

Figura 67: Quadro retangular metálico e solda para fechamento do quadro.



Fonte: Próprio autor.

Figura 68: Inserção do quadro retangular entre as duas chapas de inox.



Fonte: Próprio autor.

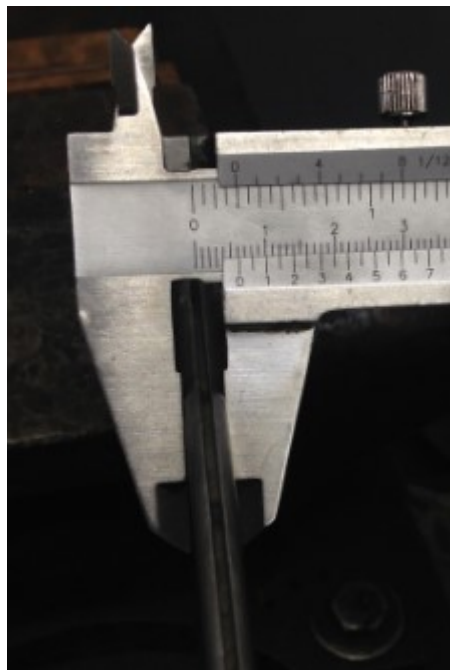
Para fixação dessa estrutura, assim como para auxiliar na vedação, a Solda Ponto foi utilizada. A solda foi aplicada ponto a ponto, consecutivamente até completar todo o comprimento da estrutura. A Solda Ponto auxiliou na vedação do sistema, contribuindo para a resistência à pressão interna do macaco, de maneira a reduzir a sollicitação na solda TIG. A Figura 69 retrata o processo de solda ponto sendo realizado no equipamento.

Figura 69: Solda ponto realizada em toda a borda do equipamento.



Fonte: Próprio autor.

Figura 70: Medição da espessura do macaco.



Fonte: Próprio autor.

Para evitar concentração de tensões nos cantos do equipamento, os mesmos foram recortados e arredondados com o auxílio de uma esmerilhadeira manual. Esse procedimento é ilustrado na Figura 71.

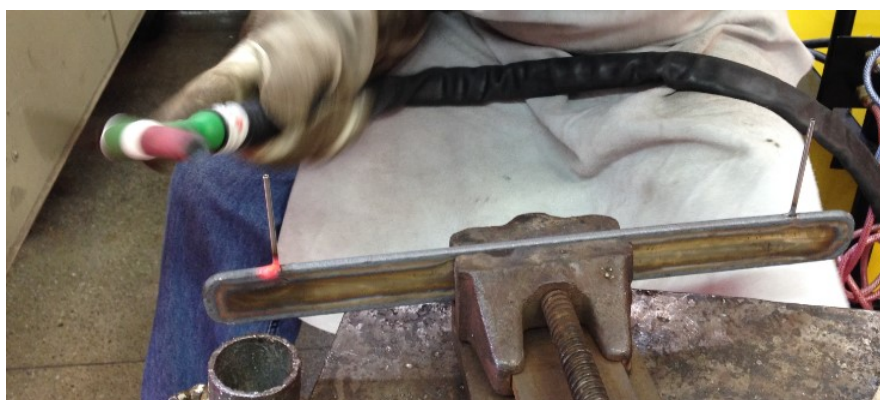
Figura 71: Processo de fabricação do modelo 3.



Fonte: Próprio autor.

Nota-se também que as chapas apresentaram dimensões ligeiramente maiores que a do quadro retangular. Uma dobra foi realizada nas bordas das chapas, conformando-as sobre o diâmetro da barra. Esse processo foi feito com o intuito de facilitar o procedimento da solda TIG. A solda TIG teve como objetivo unificar os dois elementos através da fusão (chapas e barra), fazendo a vedação final do sistema. A Figura 72 retrata o processo da solda TIG sendo realizada na região do tubo com o macaco.

Figura 72: Solda TIG realizada no protótipo 3.



Fonte: Próprio autor.

Um ponto crítico para vazamentos, conforme já havia sido identificado, era a ligação dos tubos com as chapas. Assim, ao invés de simplesmente inseri-los, um outro procedimento foi adotado. Com o uso de uma Furadeira Fresadora, dois orifícios foram feitos para a inserção

dos tubos, procedimento apresentado na Figura 73. Para auxiliar na vedação, os orifícios foram feitos de maneira que possuíssem, exatamente, o mesmo diâmetro do tubo, permitindo a inserção de maneira justa. A solda com adição de material foi utilizada nessa região para vedar completamente a ligação entre os dois elementos.

Figura 73: Realização do furo em fresadora.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 74 apresenta o protótipo 3 finalizado. No total, foram fabricados 5 macacos desse modelo. Os 5 macacos fabricados foram todos de uma aba, evitando a fabricação do macaco de duas abas devido às incertezas causadas pela união do tubo com o equipamento.

Figura 74: Modelo 3 do macaco plano.



Fonte: Próprio autor.

Todos os macacos foram aprovados no teste de estanqueidade, não apresentando nenhum vazamento nessa etapa. Assim, todos foram submetidos ao ensaio na prensa. Os mesmos foram submetidos à uma pressão máxima interna de 6 MPa, de modo que todos resistiram. Não se prosseguiu com o aumento de pressão afim de evitar danos nos equipamentos, uma vez que a resistência de 6 MPa já possibilitava a aplicação do macaco em testes nas alvenarias.

Devido ao bom comportamento de todos os macacos desse protótipo aos dois ensaios de verificação, o modelo foi validado para os testes seguintes.

3.6 Teste de Calibração

O teste de calibração foi realizado apenas para o modelo do protótipo 3, já que foi o único aprovado nos testes preliminares de desempenho. Esse teste teve como objetivo obter o fator que correlaciona as pressões interna e externa do macaco. A pressão interna do macaco é aquela aplicada pela bomba, já a pressão externa é aquela que o macaco aplica quando toda a sua face está transmitindo pressão. O teste também tem como objetivo conhecer a capacidade de pressão do macaco plano desenvolvido, ou seja, verificar qual a máxima pressão interna e externa que o macaco suporta.

O teste de calibração foi realizado na prensa hidráulica do Laboratório de Sistemas Estruturas da Engenharia Civil da UFSCar. O macaco, conectado à bomba, é posicionado entre os dois pratos de metal da prensa. Para aplicação de carga sem excentricidades, o macaco deve ser posicionado exatamente no centro dos pratos. A prensa é programada apenas para reagir à carga aplicada, mantendo a posição dos pratos metálicos como constante.

O macaco é pressurizado pela bomba, porém como está confinado na prensa, a mesma aplica uma força equivalente para equilibrar o sistema, evitando qualquer expansão do macaco. Logo, para cada pressão aplicada pela bomba, o macaco aplica uma força, de modo que a prensa reage com uma força equivalente. Desse modo, uma relação entre a pressão aplicada pela bomba e a pressão aplicada pelo macaco pode ser calculada.

A primeira relação resultante do teste é: pressão interna por força aplicada. O valor da pressão interna é obtido pela leitura do manômetro acoplado à bomba, enquanto a força aplicada pelo macaco é obtida pela leitura do sistema da prensa. A Figura 75 retrata o teste de calibração efetuado, mostrando o macaco com cunhas metálicas na prensa hidráulica. Já a Figura 76 apresenta todos os equipamentos do sistema: a bomba manual conectada ao macaco e esse confinado na prensa hidráulica. Através da força aplicada pela prensa para equilibrar o sistema e da área ativa do macaco (área que transmite esforços), um valor de pressão é obtido.

Figura 75: Teste de calibração na prensa hidráulica.



Fonte: Próprio autor.

Figura 76: Bomba conectada ao macaco confinado na prensa hidráulica durante o teste de calibração.



Fonte: Próprio autor.

A segunda relação obtida com o teste foi: pressão interna do macaco (pressão aplicada pela bomba) por pressão externa (pressão aplicada pelo macaco). Através dessa relação, o coeficiente de rigidez do macaco pode ser calculado. Esse é um dado fundamental pois é utilizado na análise dos resultados nos testes experimentais.

A área total do macaco é de $0,0129 \text{ m}^2$, porém devido às restrições de solda, apenas uma parte se expande e transmite esforços. A área ativa calculada, ou seja, a área correspondente à

região que se expande é de $0,0085 \text{ m}^2$. Para o cálculo dessa área, a bomba pressurizou o macaco, fazendo-o expandir, a região expandida foi marcada, após, o macaco foi despressurizado e voltou ao formato inicial, permitindo a coleta das dimensões da região destacada. Esses dados foram utilizados para cálculo da área ativa.

O teste foi realizado para apenas um macaco. O coeficiente de rigidez obtido para esse equipamento foi considerado para os demais macacos do modelo 3, já que todos eles foram fabricados com os mesmos materiais e seguindo exatamente os mesmos processos de fabricação.

Nos testes dos macacos nas paredes, um incremento de pressão de $0,5 \text{ MPa}$ é desejado, assim, um manômetro com capacidade de 20 MPa será acoplado à bomba, já que possui a precisão desejada. A pressão de 20 MPa também está dentro do intervalo de trabalho estipulado para o macaco nos testes nas paredes. Para simular as situações do teste na parede, o mesmo manômetro foi utilizado, de modo que a primeira parte do teste foi realizada até uma pressão muito próxima à capacidade máxima do manômetro, 18 MPa . Nessa primeira fase, pequenos incrementos de pressão foram aplicados para a obtenção de mais pontos de leitura.

Após atingir os 18 MPa na bomba, o teste foi interrompido. O manômetro foi substituído por um outro de maior capacidade e incrementos maiores de pressão foram aplicados até a ruptura do equipamento.

Assim, duas curvas foram obtidas com esse teste. Uma curva relaciona a pressão interna e a pressão externa de 0 a 18 MPa , em que o fator de rigidez foi obtido. A outra de 20 MPa até a ruptura, encontrando o valor máximo da pressão interna e externa do macaco.

3.6.1 Resultados do teste de calibração

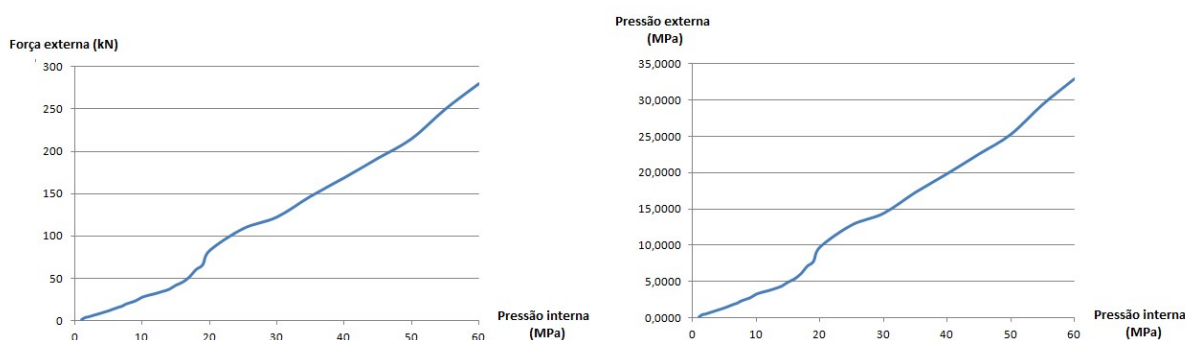
O macaco 1 do protótipo 3 foi ensaiado até sua ruptura. A ruptura ocorreu por vazamento de óleo na lateral do macaco, no lado de menor dimensão, ocorrendo a ruptura da solda. A pressão interna máxima foi de 60 MPa , correspondente a uma força de aplicação do macaco igual a 280 kN . Pela força aplicada, a pressão externa máxima calculada para o macaco foi igual a 33 MPa .

Os valores obtidos foram satisfatórios, superando a pressão objetivada inicialmente. O macaco se comportou muito bem até o momento da ruptura, não apresentando nenhum vazamento antes desse momento. Para possibilitar a aplicação do equipamento em uma alvenaria de alta resistência, o macaco deveria atingir uma pressão externa de pelo menos 20 MPa . Como 33 MPa foi a tensão de ruptura, pode-se afirmar que 20 MPa está dentro de um

limite seguro de trabalho para o equipamento, validando a sua aplicação mesmo para alvenarias de altas resistências.

Primeiramente, apresenta-se a curva com todos os pontos de leitura, sendo correspondente até a ruptura do macaco, compreendendo as duas fases citadas do ensaio. A curva retrata os dados obtidos, portanto relaciona a pressão interna (aplicada pela bomba) com a força externa (aplicada pela prensa) para equilibrar o sistema. A partir da consideração da área ativa do macaco, a curva que relaciona pressão interna e pressão externa também é apresentada. As duas curvas são apresentadas na Figura 77.

Figura 77: Curvas que relacionam a pressão interna do macaco desenvolvido com a força aplicada e com a pressão externa.



Fonte: Próprio autor.

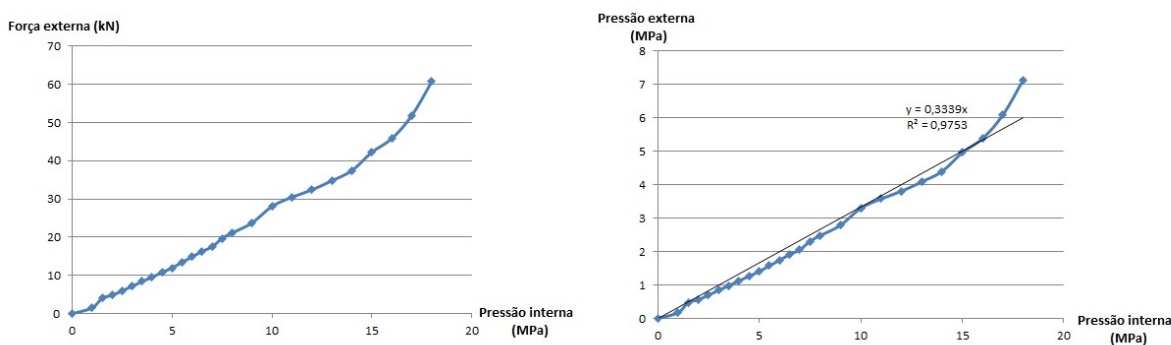
Analisando a Figura 77, observa-se um comportamento diferente do macaco no trecho próximo à pressão interna de 20 MPa e, após esse trecho, a inclinação da curva é alterada.

A possível razão para a mudança de comportamento logo após os 18 MPa pode ter sido o procedimento adotado nesse teste. Para permitir maior número de leituras até a pressão de 20 MPa, correspondente à primeira etapa do teste foi realizado com um manômetro de capacidade de 20 MPa. Para prosseguir com o teste e avançar para a segunda etapa, o mesmo foi interrompido e a pressão aplicada no sistema foi zerada para permitir a troca do manômetro por um de maior capacidade.

Já com relação à mudança da inclinação da curva, o fato que possivelmente justifica isso é a expansão do macaco. Nas pressões iniciais, o macaco tende a se expandir, acomodando-se nas cunhas metálicas, já nas pressões maiores, o macaco já se encontra acomodado, de modo que essas expansões apresentam menor magnitude. A expansão do macaco altera a pressão externa que o mesmo aplica.

A partir dos dados apresentados na Figura 77, as duas fases são apresentadas separadamente. A primeira fase é apresentada na Figura 78, em que a pressão máxima aplicada pela bomba foi de 18 MPa. A figura apresenta as relações entre a pressão interna com a força externa e a pressão interna com a pressão externa. Nessa fase houve 26 pontos de leitura.

Figura 78: Curva que relaciona a pressão interna e a força externa do macaco no teste de calibração.



Fonte: Próprio autor.

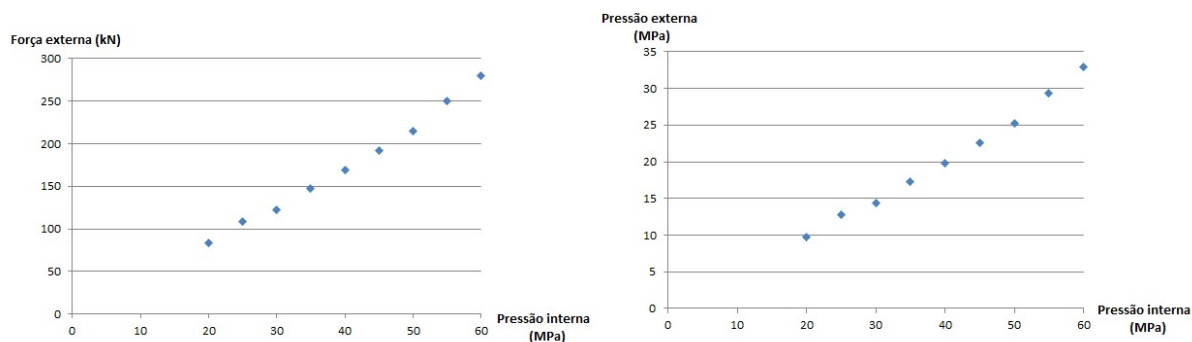
O coeficiente de rigidez do macaco é o valor que relaciona a pressão interna e a externa. Para cada ponto de leitura, um coeficiente foi obtido. Porém, para a obtenção de um valor único, é necessário avaliar o a curva como um todo.

Nota-se um comportamento linear do material, retratada pela aproximação de uma reta na curva. Uma linha de tendência foi traçada para que, através da sua inclinação, o coeficiente de correlação fosse obtido. O valor do coeficiente de ajuste (R^2) para essa aproximação é indicado na figura, igual a 0,975. Tal valor é bem próximo à unidade, indicando uma boa correlação da curva com a reta aproximada.

Através da inclinação da reta, o coeficiente que relaciona as duas pressões pode ser obtido. A inclinação da reta é identificada na equação da linha de tendência, a qual é apresentada na figura. O valor da inclinação e, assim, do fator que correlaciona as duas pressões é de 0,33. Da pressão aplicada pela bomba, considera-se que 33% é aplicada pelo macaco.

A segunda etapa do teste consistiu em identificar a resistência do macaco desenvolvido. Essa fase foi iniciada com a pressão interna de 20 MPa, indo até a ruptura do equipamento na pressão interna de 60 MPa. Nessa fase, 9 pontos de leitura foram obtidos. A primeira relação é obtida é a pressão interna com a força externa, enquanto que a segunda relaciona a pressão interna com a pressão externa, ambas as curvas são apresentadas na Figura 79

Figura 79: Curva que relaciona a pressão interna e a força externa do macaco no teste de resistência.



Fonte: Próprio autor.

Analisando a Figura 79, também se observa o comportamento linear do macaco nas pressões internas acima de 20 MPa, porém nota-se que a declividade da reta muda, sendo próxima a 0,48. A alteração do fator pode ser devido a pequenas expansões do macaco. Nas tensões iniciais, há provável expansão do macaco para acomodação nas cunhas, o que afeta a relação da pressão aplicada com a bomba e da força que o macaco aplica nos pratos da prensa. Na segunda etapa, como o macaco já está acomodado, expansões são menos prováveis.

Como o intervalo de trabalho de macaco será até 20 MPa e, como na primeira fase do teste, muito mais pontos de leitura foram obtidos, o coeficiente de rigidez foi adotado apenas pela primeira etapa do teste. Assim, o coeficiente de rigidez interna adotado para todos os macacos foi de 0,33.

3.7 Amostras de alvenaria

Os macacos do protótipo 3 foram utilizados em testes nas amostras de alvenaria. Desse modo, a funcionalidade prática do macaco foi verificada. Não só a validação do equipamento é necessária, mas sim a validação da técnica como um todo. Ou seja, objetivou-se a verificação da eficiência da técnica de macacos planos em alvenaria moderna, utilizando-se o novo equipamento desenvolvido. Os testes foram feitos em amostras de alvenaria construídas com as técnicas construtivas e materiais da alvenaria moderna. A eficiência da técnica para essa aplicação foi verificada pela precisão dos resultados obtidos, os quais foram comparados com valores de referência. Outro ponto de análise foi a uniformidade das propriedades obtidas com macacos para diferentes amostras de um mesmo lote.

O teste de deformabilidade tem como objetivo obter o módulo de elasticidade e a resistência à compressão da alvenaria. Nos testes, a estimativa da resistência costuma ser obtida por duas maneiras principais: quando se inicia o aparecimento de fissuras ou pela análise da curva tensão por deformação.

Quando tolerável, o teste pode ser feito até que se inicie o aparecimento de pequenas fissuras, identificando assim a tensão resistente da estrutura. Quando danos não são permitidos, pode-se realizar a análise pela curva tensão por deformação. Para esse caso, a curva deve ser obtida em tempo real durante o teste, de modo que se analise o seu comportamento, o teste é interrompido quando a curva começa a apresentar um comportamento altamente não linear, indicando ruptura iminente. Assim, através da tensão máxima aplicada, obtém-se uma estimativa da resistência.

Uma outra alternativa pode ser adotada para estimativa da resistência em alvenarias modernas, sendo a adotada nesta pesquisa: utilizar uma correlação do módulo de elasticidade com a tensão resistente. Essa correlação não é utilizada pois pode apresentar grande fonte de erros em alvenarias antigas, devido à variabilidade de materiais e técnicas empregados. Entretanto, em alvenarias modernas, existem procedimentos e materiais padronizados, e diversas pesquisas já foram realizadas para se encontrar um fator que correlacione o módulo de elasticidade e a resistência de maneira confiável.

ABNT NBR 15961:1-11 apresenta correlações (equações (3), (4), (5) e (6)) para alvenarias de blocos de concreto obtida através do ensaio de milhares de amostras, esses valores são indicados para utilização na falta de ensaios. Tais correlações são apresentadas a seguir:

$$(3) E = 800 \times f_p;$$

$$(4) f_m = 0,7 \times f_p;$$

Sendo, E: módulo de elasticidade da alvenaria;

$$(5) f_p: \text{resistência à compressão do prisma};$$

$$(6) F_m: \text{resistência à compressão da parede}.$$

Ainda segundo os autores, a resistência à compressão é reduzida em 20% do caso de preenchimento total para o preenchimento parcial. O preenchimento total é aquele em que toda a face do bloco é preenchida por argamassa de assentamento, enquanto o parcial é aquele em que apenas as duas faces horizontais do bloco são preenchidas.

Através das correlações apresentadas, é possível fazer uma estimativa da resistência da alvenaria a partir de um valor de módulo de elasticidade. Assim, obtendo um valor de módulo experimentalmente, uma estimativa da resistência pode ser obtida por tais correlações. Desse modo, os testes com macacos planos foram realizados para se obter o módulo de elasticidade e, a partir dele, a resistência será calculada.

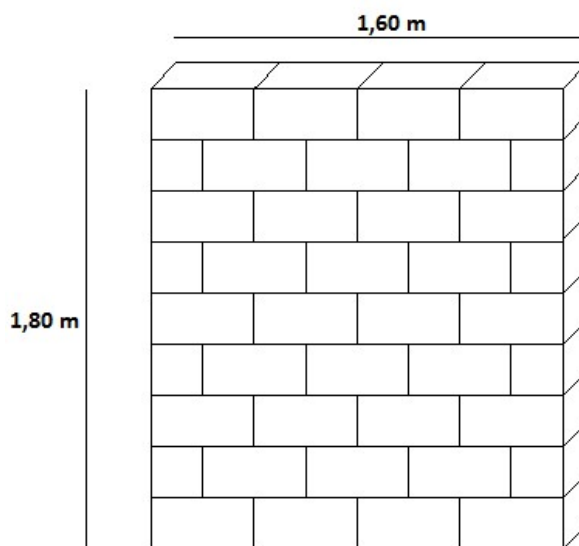
O teste de deformabilidade obteve propriedades da alvenaria. Porém, para se checar a confiabilidade da técnica, é necessário conhecer tais informações, possibilitando a comparação. Esses dados foram conhecidos através de testes de controle da alvenaria.

3.7.1 Amostra utilizada

Ao todo, quatro paredes de alvenaria com blocos vazados de concreto foram construídas para serem testadas com a técnica de macacos planos. As paredes ensaiadas eram compostas por blocos de concreto com dimensões de $19 \times 14 \times 39$ cm ($h \times l \times c$) e resistência característica de 6,0 MPa. Os blocos foram gentilmente doados pela empresa Glasser.

Cada parede possuía as dimensões de $1,60 \times 1,80$ m ($l \times h$), sendo construída com 9 fiadas de 4 blocos cada. A configuração da parede foi definida para permitir adequada distribuição da tensão aplicada pelo macaco. A Figura 80 ilustra a configuração citada.

Figura 80: Configuração da amostra de alvenaria a ser testada macacos planos.



Fonte: Próprio autor.

Para distribuição simétrica de tensão, os macacos foram posicionados na região central da parede. O teste de deformabilidade é executado com dois macacos planos: um superior e um inferior.

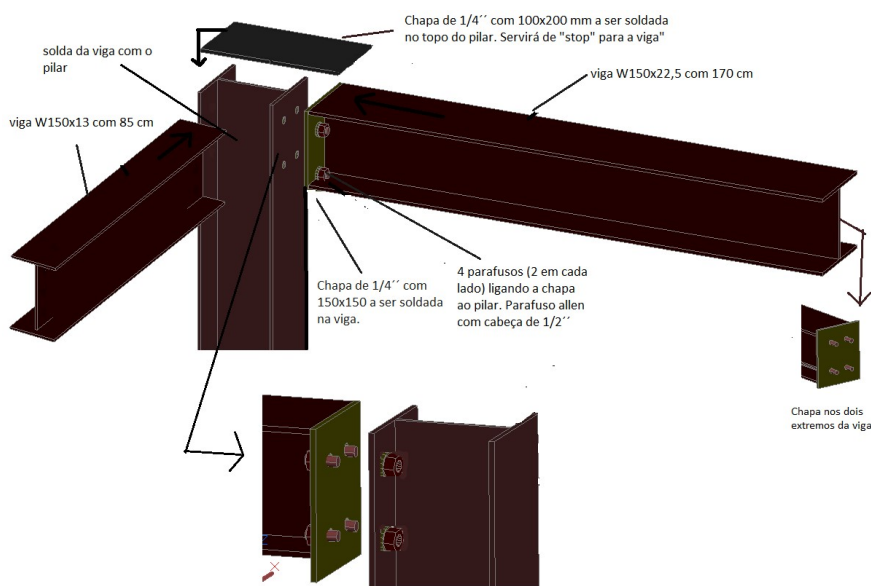
A parede deve apresentar um sistema de reação vertical. Caso a parede não esteja confinada, corre-se o risco de haver movimentação da parede ao redor do macaco, como o levantamento da região da parede acima do macaco superior. Isso ocorre quando a força aplicada pelo macaco supera as cargas verticais da parede. Para evitar tais fontes de erro, a parede foi construída dentro de um sistema de travamento. O sistema de travamento era um pórtico metálico dimensionado para confinar verticalmente a parede e reagir às cargas verticais aplicadas pelo macaco.

3.7.2 Projeto do pórtico metálico

Para a montagem do pórtico, foi necessário realizar o seu dimensionamento e detalhamento. Foram levantadas as solicitações decorrentes do teste com macacos planos, com os devidos coeficiente majoradores. Com o levantamento das solicitações, os perfis metálicos e as ligações necessárias foram dimensionados. Após esse processo, o detalhamento foi feito por desenhos para orientar a fabricação e montagem da estrutura.

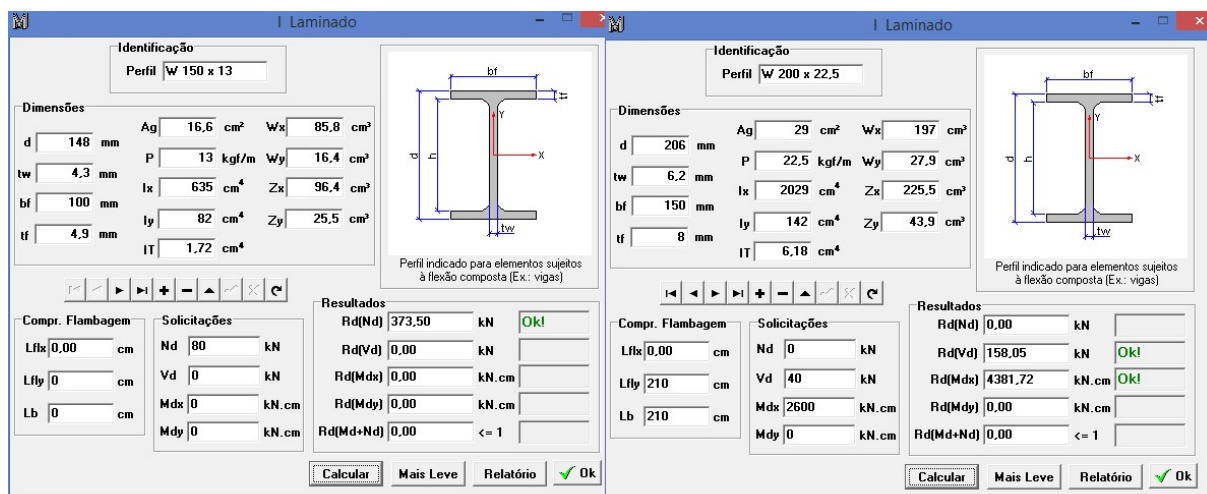
A Figura 81 apresenta alguns desenhos feitos para orientar a correta montagem do pórtico. Já a Figura 82 apresenta a tela de verificação dos perfis para os esforços calculados, utilizando-se o programa Visual Metais.

Figura 81: Desenhos para ilustração de montagem do pórtico.



Fonte: Próprio autor.

Figura 82: Verificação dos perfis.



Fonte: Próprio autor.

O pórtico é formado por dois quadros (para abrigar duas paredes por vez). Os dois quadros são conectados por vigas que travam e equilibram a estrutura. Cada quadro tem os vãos internos de: 1,70 x 1,80 m para largura e altura. Nota-se que, para a largura, deixou-se um pequeno vão, evitando que a parede transmita ações laterais para os pilares, enquanto que, na altura, a parede se encontra encunhada.

A Figura 83 apresenta o pórtico metálico com os dois quadros preenchidos por paredes, notam-se também as vigas de travamento entre os quadros.

Figura 83: Pórtico metálico e amostra da alvenaria construída.



Fonte: Próprio autor.

3.7.3 Controle da alvenaria

Para se conhecer a precisão da técnica adaptada é importante conhecer as propriedades da alvenaria em questão para então comparar com os valores obtidos de maneira não destrutiva. Assim, o controle da alvenaria é essencial.

Para realizar o controle da alvenaria, amostras e testes complementares foram realizados. Todos os blocos pertencem a um mesmo lote de fabricação, de modo que 6 blocos foram separados para teste de resistência à compressão. As paredes foram construídas e ensaiadas em dois lotes, sendo que cada lote era composto por duas paredes. No primeiro lote, seis prismas foram moldados com a mesma argamassa utilizada para assentamento da parede, enquanto que no segundo lote, três prismas. No primeiro lote de paredes, uma parte da parede foi removida para ser testada na prensa hidráulica e, assim, obter propriedades da mesma estrutura testada pelos macacos.

3.7.4 Ensaios dos blocos

Os seis blocos de concreto foram capeados com pasta de cimento (composição de cimento e água) nas duas faces com o objetivo de melhorar a distribuição de pressão durante o ensaio na prensa. O teste de compressão foi realizado para se conhecer a resistência média dos blocos, assim como permitir estimativas da resistência da parede, além de possibilitar a verificação da uniformidade do lote de blocos. A Figura 84 apresenta testes de compressão em amostras de blocos de concreto.

Figura 84: Teste de resistência à compressão nos blocos de concreto.



Fonte: Próprio autor.

A Tabela 1 apresenta os resultados de resistência dos 6 blocos ensaiados. A média dos valores foi de 7,4 MPa.

Tabela 1: Resistência à compressão dos blocos.

Amostras	Resistência à compressão (MPa)
bloco 1	7,6
bloco 2	8,4
bloco 3	7,8
bloco 4	6,2
bloco 5	6,9
bloco 6	7,3
Média	7,4

Observando-se os valores de resistência dos blocos, nota-se boa uniformidade. A variância calculada foi de 0,48. Tal análise é positiva pois, uma vez que todo o lote pode ser considerado como uniforme, a representatividade desses valores é válida.

3.7.5 *Ensaio dos prismas*

No primeiro lote de paredes, seis prismas foram construídos com a mesma argamassa de assentamento da alvenaria, enquanto que no segundo, apenas três. Os prismas não foram ensaiados com 28 dias, mas sim com a mesma idade da parede para se obter melhor representatividade, uma vez que o objetivo era a comparação de valores. Como os prismas foram construídos no mesmo dia das paredes, também foram ensaiados no mesmo dia em que as paredes foram testadas pelos macacos planos. Os prismas foram capeados com pasta de cimento nas duas faces, assim como indicado na Figura 85. Para os ensaios, houve preenchimento total de argamassa no bloco.

O primeiro lote de paredes foi testado com 43 dias, devido ao tempo necessário para validação técnica do macaco. Já o segundo lote foi testado com 16 dias. Dos seis prismas do lote 1, um foi danificado no capeamento, o mesmo ocorreu em um prisma do lote 2. A Tabela 2 apresenta os valores de resistência à compressão para os prismas do lote 1 e 2. A tensão de ruptura é obtida considerando-se a área total do bloco (14 x 39 cm). Os prismas do primeiro lote apresentaram média de resistência de 5,8 MPa, enquanto que do segundo, 5,6 MPa. A diferença na média de resistência entre os lotes pode ser justificada pela diferença no tempo de cura e por possíveis alterações na argamassa empregada.

Os valores de resistência foram obtidos considerando a área bruta do bloco, ou seja, considerando a área total do bloco ($0,14 \times 0,39$ m). Porém, para efeito de comparação posterior, a resistência por área líquida também será apresentada, nesse caso, apenas a região de aplicação de carga é considerada no cálculo da tensão. No caso, a área líquida seria a área das faces horizontais e verticais do bloco. A correlação é de que a área bruta é igual a 2 vezes a área líquida, de modo que a tensão resistente por área líquida é o dobro da área bruta.

O ensaio dos prismas pode ser visto na Figura 86, enquanto que os valores de ruptura são apresentados na Tabela 2.

Figura 85: Caapeamento dos prismas com pasta de cimento.



Fonte: Próprio autor.

Figura 86: Teste dos prismas na prensa.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 2: Valores de resistência à compressão dos prismas segundo área bruta e área líquida.

Amostras	Resistência à compressão (MPa)			
	Lote 1		Lote 2	
	área bruta	área líquida	área bruta	área líquida
Prisma 1	5,8	11,6	5,5	11
Prisma 2	5,7	11,4	5,7	11,4
Prisma 3	5,7	11,4		
Prisma 4	5,9	11,8		
Prisma 5	5,7	11,4		
Média	5,8	11,5	5,6	11,2

Assim como ocorreu nos testes de blocos, as resistências dos prismas mostraram-se bastante próximas, indicando boa uniformidade do lote testado. A variância obtida para esses valores foi de apenas 0,007.

3.7.6 Ensaio de parte da parede

Após a realização do teste de macacos planos no primeiro lote de parede, parte de cada uma das duas paredes foi removida para realização de testes destrutivos. Esses testes foram feitos na prensa hidráulica com o objetivo de se obter o módulo de elasticidade e a tensão de ruptura.

Primeiramente, a parede foi ensaiada com a técnica de macacos planos, após a finalização do teste, uma região foi removida e testada destrutivamente. O objetivo desse processo foi de obter propriedades da mesma estrutura testada pelos macacos, facilitando a comparação dos resultados obtidos de duas maneiras diferentes: por macacos planos e por prensa.

A região da parede removida e testada foi escolhida de modo que estivesse o mais distante possível da região onde os macacos atuaram, já que as possibilidades de danos sofridos pelas cargas do macaco eram menores. A região do canto inferior esquerdo foi a escolhida para tais testes, por ser uma das partes mais afastadas do centro da parede, além de permitir a coleta de três fiadas de bloco (configuração próxima à testada pelos macacos).

A parte testada na prensa era constituída por 3 fiadas de blocos, sendo a primeira e a terceira fiada compostas por um bloco inteiro e a segunda por um bloco mais meio bloco, conforme indicado na Figura 87. A região testada pelos macacos era composta por 3 fiadas, sendo a primeira e a última compostas por um bloco e a segunda por dois blocos. Desse modo, a parede removida se trata de uma aproximação da parte testada pela técnica de macacos.

Figura 87: Amostra da parede testada na prensa com sistema de medição de deformação.



Fonte: Próprio autor.

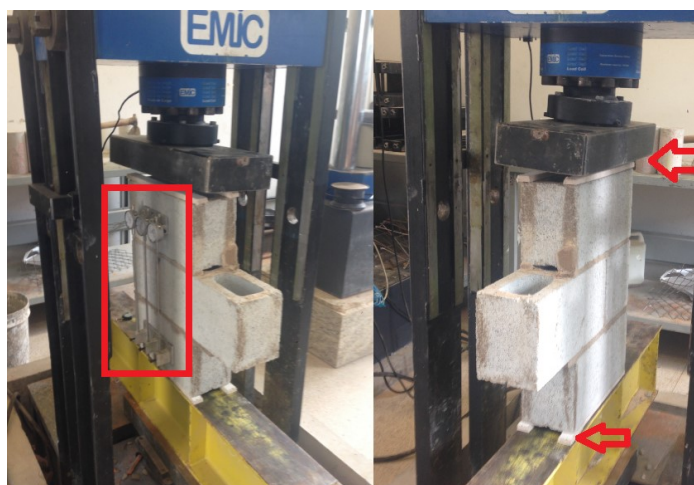
Figura 88: Região removida da parede para teste na prensa.



Fonte: Próprio autor.

O capeamento não foi realizado nessas amostras, uma vez que as movimentações das amostras necessárias para isso poderiam danificá-las. A medida adotada para garantir uniformidade na distribuição de pressão na prensa foi o uso de tiras de forro pacote. As tiras foram aplicadas apenas nas faces horizontais do bloco para, assim, simular a ação do macaco, o que pode ser conferido na Figura 89.

Figura 89: Amostra sendo ensaiada na prensa, indicando o sistema de medição da deformação utilizado e as tiras de forro pacote.



Fonte: Próprio autor.

A principal proposta do teste na prensa era o de obter o valor do módulo de elasticidade para essa amostra. Por se tratar de parte da amostra original, torna-se bastante representativa. O módulo foi calculado através da curva tensão por deformação da amostra ensaiada. A curva foi obtida através da leitura da deformação da parede para cada pressão aplicada pela prensa.

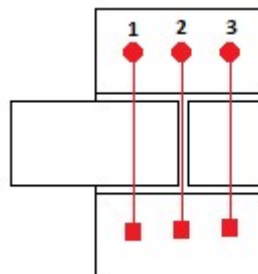
O teste se iniciou com a aplicação de pressões de baixa intensidade, com a finalidade de acomodar o forro pacote. Após a acomodação, pressões eram aplicadas à amostra pela prensa, enquanto que as deformações eram lidas. A deformação foi lida de maneira idêntica à utilizada na parede testada com macacos (com o mesmo sistema), buscando-se simular o teste da maneira mais próxima possível. Nos testes com macacos, a deformação considerada será a média da leitura de três medições.

As amostras de paredes testadas na prensa são uma aproximação da região a ser testada pelos macacos, já que possui um bloco inteiro e um meio bloco na segunda fiada (Figura 90), ao invés de dois blocos inteiros. Para buscar uma melhor representatividade da região da parede testada pelos macacos, apenas os pontos 1 e 2 de leituras foram considerados (apresentados na Figura 90), desconsiderando o ponto 3. Assim, busca-se minimizar o efeito da aproximação pela presença do meio bloco.

As deformações foram calculadas com base nos deslocamentos das hastes de relógios comparadores fixados na face dos blocos. A amostra foi ensaiada até a sua ruptura, mas as leituras de deformação foram realizadas até uma força equivalente à uma pressão de

aproximadamente 4 MPa (considerando área líquida). Após essa tensão, o sistema de leitura de deformação foi removido da parede, para que a ruptura da amostra não o afetasse.

Figura 90: Amostra de parede testada na prensa com indicação dos pontos de medição da deformação.

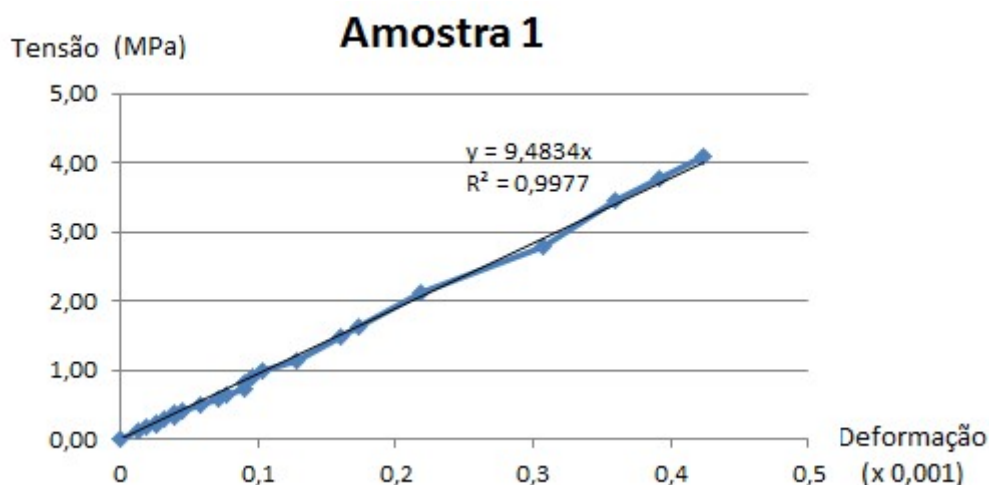


Fonte: Próprio autor.

A parede 1 rompeu com uma força de 175 kN aplicada pela prensa, enquanto que a parede 2 rompeu com força de 194 kN. A área de aplicação da carga foi referente às duas faces laterais do bloco, sendo essa a área considerada para o cálculo das tensões, de modo a obter a resistência por área líquida.

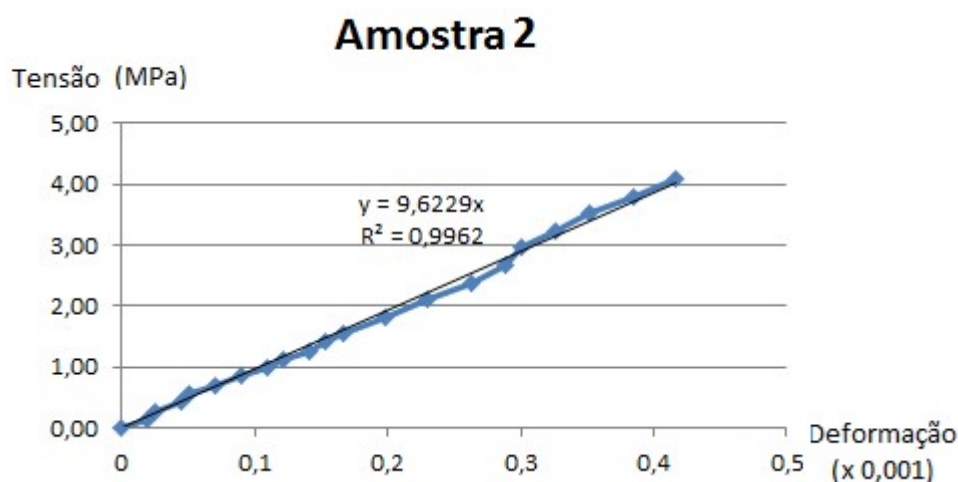
Assim, a resistência por área líquida da parede 1 foi de 8,01 MPa e para a parede 2 de 8,89 MPa. A Figura 91 apresenta a curva de tensão por deformação obtida pela amostra 1, enquanto que a Figura 92 apresenta a curva pela amostra 2.

Figura 91: Curvas tensão por deformação para a amostra 1.



Fonte: Próprio autor.

Figura 92: Curva tensão por deformação para a amostra 2.



Fonte: Próprio autor.

Analisando-se as duas curvas, nota-se um comportamento praticamente linear até o ponto em que as deformações foram lidas. Assim, uma linha de tendência foi traçada em ambas, obtendo-se a inclinação da reta. A partir da inclinação, o módulo de elasticidade foi encontrado.

A Tabela 3 apresenta os valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade obtidos com os testes na prensa com as amostras retiradas das paredes 1 e 2.

Tabela 3: Propriedades das amostras retiradas das paredes.

Amostras	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
Amostra 1	8,01	9483
Amostra 2	8,89	9623
Média	8,45	9558

3.7.7 Valores de referência

Os dados a serem obtidos com a técnica de macacos planos nas paredes não possuiriam significado de validação sem a comparação com valores de referência. Assim, os dados obtidos através das paredes foram comparados com dois valores, um obtido através do teste dos prismas e outro do teste das amostras de paredes pela prensa.

Os resultados obtidos pelos testes com amostras de parede na prensa foram apresentados quanto ao módulo de elasticidade e resistência da parede. Os valores de referência para essas amostras são apresentados na Tabela 3.

Porém, os resultados apresentados sobre os testes dos prismas são referentes à resistência à compressão da amostra. Para efeito de comparação, é necessário calcular a resistência da parede e o módulo de elasticidade estimados com base na resistência dos prismas. Assim, duas correlações precisam ser feitas.

Segundo a norma ABNT NBR 15961:1-11, para alvenarias de blocos vazados de concreto, uma correlação possível é de que o módulo de elasticidade é 800 vezes a resistência do prisma (equação (7)), enquanto que a resistência à compressão da parede é 70% da resistência do prisma (equação (8)). Assim, essas equações são apresentadas, de modo que, E: módulo de elasticidade, f_p : resistência do prisma, f_m : resistência da parede.

$$(7) E = 800 \times f_p;$$

$$(8) f_m = 0,7 \times f_p$$

Com base nessas equações, a resistência à compressão da parede pode ser estimada a partir da resistência do prisma, assim como o módulo de elasticidade. Esses valores são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Dados de referência segundo testes dos prismas.

Amostras	Resistência do prisma (MPa)	Resistência da parede (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
Prisma lote 1	11,6	8,12	9280
Prisma lote 2	11,2	7,84	8960

3.8 Alvenaria para teste com macacos

As alvenarias foram construídas conforme as recomendações da norma ABNT NBR 15961:2-11. A argamassa utilizada foi industrializada com resistência de 4 MPa, gentilmente doada pela empresa produtora Argafacil.

Fotos da execução da parede podem ser vistas nas Figura 93 e Figura 94. Já a Figura 95 apresenta um par de paredes após a sua construção.

Figura 93: Construção das paredes.



Fonte: Próprio autor.

Figura 94: Parede sendo construída.



Fonte: Próprio autor.

Figura 95: Lote de paredes prontas.



Fonte: Próprio autor.

4 Teste com macacos planos

O teste de deformabilidade com a técnica de macacos planos foi realizado em alvenaria de blocos vazados de concreto. O objetivo principal do teste era o de obter o módulo de elasticidade da parede e, assim, uma estimativa da resistência à compressão.

O teste de deformabilidade é realizado com dois macacos inseridos na alvenaria, de maneira paralela. A região de alvenaria entre os dois macacos é a parte testada. Os dois macacos são conectados em um mesmo sistema hidráulico, aplicando-se a mesma pressão, de maneira simultânea. Enquanto os macacos aplicam pressão, a deformação na região testada da parede é lida. Assim, a relação entre tensão e deformação é feita para vários níveis da pressão aplicada, permitindo desenhar a curva tensão por deformação. O módulo de elasticidade pode ser obtido através da inclinação dessa curva. Para se conseguir um módulo mais confiável, o ideal é que o ponto final da curva seja referente a, pelo menos, um terço da tensão de ruptura da parede. Através do módulo, a estimativa da resistência à compressão da parede pode ser feita.

4.1 Aplicação de carga

O teste é realizado com dois macacos: um inferior e um superior, de modo que cada macaco possui dois tubos: um de entrada e um de saída. Um dos macacos é conectado à bomba externa (responsável por pressurizar o sistema), esse mesmo macaco é conectado ao segundo macaco. Assim a pressão é transmitida da bomba para os dois macacos. Os macacos tendem a inflar, porém como estão encunhados na junta, transmitem os esforços através de uma área de contato para os blocos. Como existe uma região confinada entre os dois macacos, essa região recebe a pressão aplicada por eles.

A leitura da pressão aplicada pela bomba é feita através de um manômetro. Já para se conhecer a tensão aplicada pelo macaco na alvenaria, coeficientes devem ser aplicados sobre o valor da pressão na bomba. Essa equação (equação (9)) é fornecida pela ASTM C1197-09, sendo que:

$$(9) P_{alv} = K_m \times K_a \times P, \text{ sendo:}$$

K_m : coeficiente de rigidez interna do macaco;

K_a : coeficiente que relaciona as áreas do macaco plano e a área do corte;

P: pressão aplicada pela bomba.

4.1.1 Leitura das deformações

As deformações consideradas no cálculo do módulo são as que ocorreram na região testada (entre os dois macacos). A ASTM C1197-09 cita que são necessários, pelo menos, 3 pontos de leitura de deformação na região. A norma também cita que a distância vertical entre um par de pontos (que mede a deformação vertical) deve ser de, pelo menos, 20 cm. Quanto à precisão do instrumento de medida, a ASTM C1197-09 relata que deve ser de, pelo menos, 0,005% da distância vertical entre os pontos de medida.

Landriani e Taliércio (1986) realizaram um estudo numérico, através de micromodelagem com elementos finitos e concluíram que as leituras de deformação podem, seguramente, serem feitas na superfície da parede, de modo que representarão as deformações da parede como um todo. Outra conclusão dos autores foi obtida analisando as distribuições de tensão no teste de deformabilidade, indicando que a precisão da deformação seria maior caso as leituras fossem realizadas na região central do rasgo. Os autores afirmaram que as regiões mais próximas ao fim do rasgo são mais influenciadas pelo efeito de restrição da parede ao redor.

Suprenant e Schuller (1994) realizaram uma análise experimental com base na sugestão de Landriani e Taliércio (1986). Os autores concluíram que, levando-se em consideração apenas as deformações obtidas na região central, resultados mais congruentes foram obtidos.

4.2 Procedimentos de ensaio

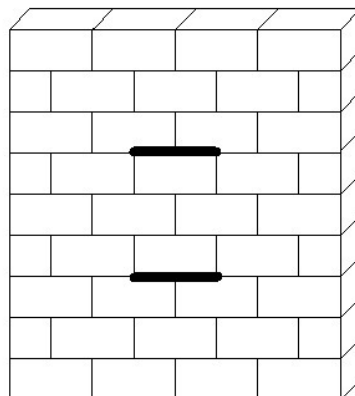
4.2.1 Posição dos macacos planos

Os macacos foram posicionados na região central da parede. Assim, a região testada (entre os macacos) apresentaria menor possibilidade de concentração de tensões, como poderia acontecer nos cantos da parede, assim como menor influência das vigas superior e inferior do quadro metálico.

Os macacos foram separados por três fiadas de bloco. Isso permitiu que os dois macacos aplicassem carga sobre um bloco inteiro e não em duas metades de blocos diferentes, resultando em maior homogeneidade de cargas aplicadas. A distância entre eles foi de 59 cm, o que respeita a recomendação da ASTM C1197-09, que afirma que a distância máxima deve

ser 1,5 vezes o comprimento do macaco, no caso 1,5 x 40 igual a 60 cm. A Figura 96 indica a posição dos dois macacos na parede durante a realização do teste.

Figura 96: Indicação da posição dos macacos planos na alvenaria.



Fonte: Próprio autor.

4.2.2 Dois diferentes testes executados

Um dos objetivos deste trabalho é fazer a comparação entre testar a alvenaria com macacos nas duas faces horizontais do bloco e em apenas uma face. De modo que os dois testes foram executados. No lote 1 (paredes 1 e 2), o teste foi feito com macacos planos em apenas uma face horizontal do bloco. Já no lote 2 (paredes 3 e 4), o teste foi feito nas duas faces do bloco.

A vantagem em testar apenas uma face do bloco é a maior facilidade na execução dos procedimentos. Nesse caso, o rasgo na junta seria necessário em apenas uma das faces da parede. Realizar o segundo rasgo (correspondente à argamassa de assentamento da outra face horizontal do bloco) pode ser complicado, visto que é necessário ter acesso à outra face da parede ou possuir uma ferramenta de rasgo com longo alcance.

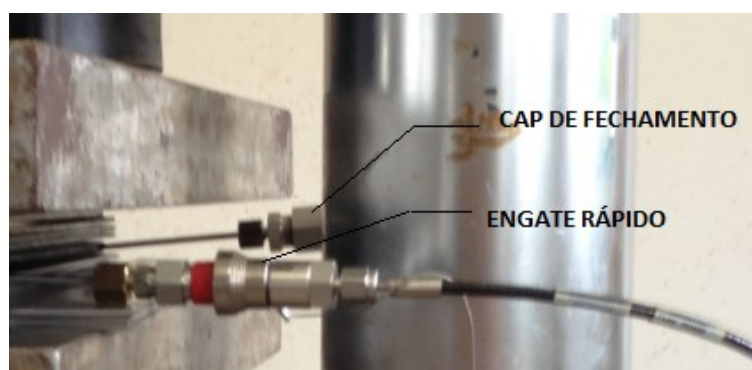
Nem sempre é fácil ter acesso às duas faces da parede, como é o caso de paredes externas de pavimentos altos. Ferramentas de rasgo com longo alcance poderiam ser utilizadas, como serras de disco ou furadeiras. Porém, no caso de parede com espessura de 14 cm, por exemplo, o diâmetro da serra deveria ser de, pelo menos, 30 cm, tornando difícil o controle preciso da ferramenta. Já no caso de furadeiras, o uso de brocas longas dificulta o processo, já que furos consecutivos devem ser realizados. Um outro ponto é que para inserir o macaco nas duas faces horizontais do bloco, o revestimento da parede deveria ser removido nas duas faces da parede, exigindo maior retrabalho pós ensaio, encarecendo todo o processo. Desse modo, caso viabilizado tecnicamente, o teste realizado com macacos em apenas uma face do bloco seria mais econômico e prático.

4.2.3 Equipamentos e materiais

A bomba utilizada para aplicar pressão ao sistema é da marca Enerpac, com capacidade de pressão de até 70 MPa. O manômetro utilizado nesses ensaios tinha capacidade de 20 MPa, com precisão de 0,5 MPa. Já as mangueiras hidráulicas eram de trama dupla de aço inox revestidas por borracha, com capacidade de 80 MPa.

As mangueiras eram conectadas nas extremidades dos tubos dos macacos através de conexões hidráulicas da marca Swagelok. Essas conexões eram industriais do tipo engate rápido, não necessitando de apertos no momento do teste. As conexões são retratadas na Figura 97.

Figura 97: Conexões dos macacos.



Fonte: Próprio autor.

Para a realização do rasgo nas juntas da alvenaria, uma furadeira portátil com brocas de 6 e 8 mm foi utilizada, assim como uma fita de serra metálica com 5 dentes por polegada para fazer o acabamento do rasgo.

As deformações foram definidas por leituras realizadas pelos relógios comparadores. Os relógios eram da marca Digimess, com curso de 10 mm e precisão de 0,005 mm. O sistema de leitura foi fixado à parede por um sistema de base. A fixação dessas bases com os blocos foi realizada com o uso de cola bi componente Araldite com pega de 2 minutos.

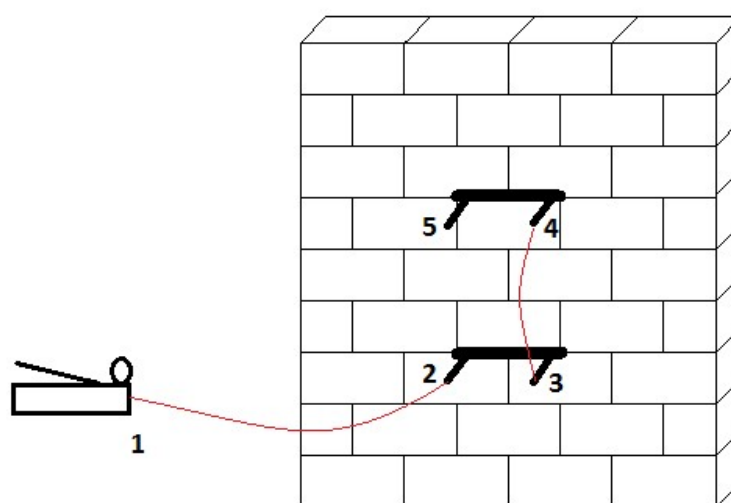
Os dados do ensaio foram anotados a mão, sendo posteriormente transmitidos para o computador. O programa Excel foi utilizado para o armazenamento dos resultados e para gerar as curvas tensão por deformação.

4.2.4 Conexão entre os macacos

Como dito, apenas macacos de uma aba foram fabricados no protótipo 3. Isso foi feito pois a região de ligação do macaco com os tubos é crítica para vazamentos.

O teste realizado em apenas uma face do bloco pode ser feito diretamente utilizando o macaco de uma aba. A Figura 98 ilustra o processo de conexão entre os macacos. Na figura, a linha vermelha representa as mangueiras hidráulicas. Nesse tipo de teste, a bomba externa (1) é conectada ao macaco inferior (2), o óleo preenche todo o macaco e, então, sai pelo segundo tubo (3), o qual está conectado com o macaco superior (4), o óleo também preenche todo o macaco superior até que encontra o segundo tubo com a saída fechada (5), iniciando a pressurização do sistema.

Figura 98: Ilustração das conexões no teste em uma face do bloco.



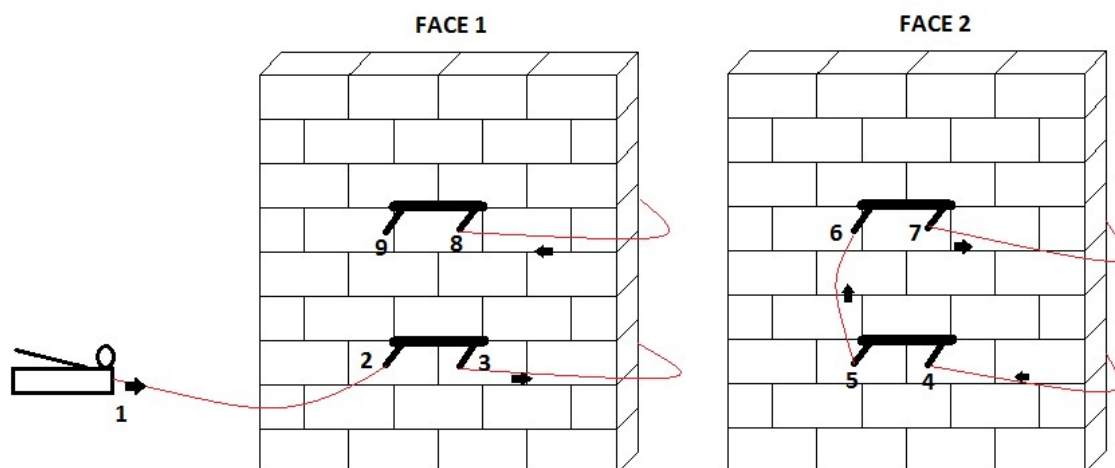
Fonte: Próprio autor.

Já para o teste em que há macacos nas duas faces do bloco, outra estratégia foi adotada. Para esse caso, utilizou-se um macaco de uma aba em cada uma das faces do bloco. Entretanto, é necessário que os dois macacos posicionados em um mesmo bloco apliquem exatamente a mesma pressão e, para isso, é essencial que exista uma conexão entre eles, visto que bombeá-los separadamente complicaria esse controle. A conexão por tubos metálicos foi evitada devido à maior possibilidade de vazamentos, de modo que uma outra conexão foi utilizada.

Os macacos de um mesmo bloco foram conectados entre si através de mangueiras, do mesmo modo que o macaco inferior e o superior foram conectados. A Figura 99 ilustra as conexões entre a bomba e os macacos, de modo que as linhas vermelhas representam as mangueiras hidráulicas e as setas indicam o sentido de encaminhamento do óleo. Nessa esquemática, a bomba encaminha o óleo (1) para o macaco inferior da face 1 (2), uma mangueira conecta o macaco inferior da face 1 (3) com o da face 2 (4), transmitindo o óleo para ele, o macaco inferior (5) é ligado ao superior da mesma face (6), enquanto que o macaco superior da face 2

(7) é conectado com o superior da face 1 (8), já esse apresenta o tubo de saída fechado (9), fechando todo o sistema hidráulico.

Figura 99: Esquema de conexão entre os macacos para o teste com duas as duas faces do bloco.



Fonte: Próprio autor.

4.2.5 Sistema de medição de deformação

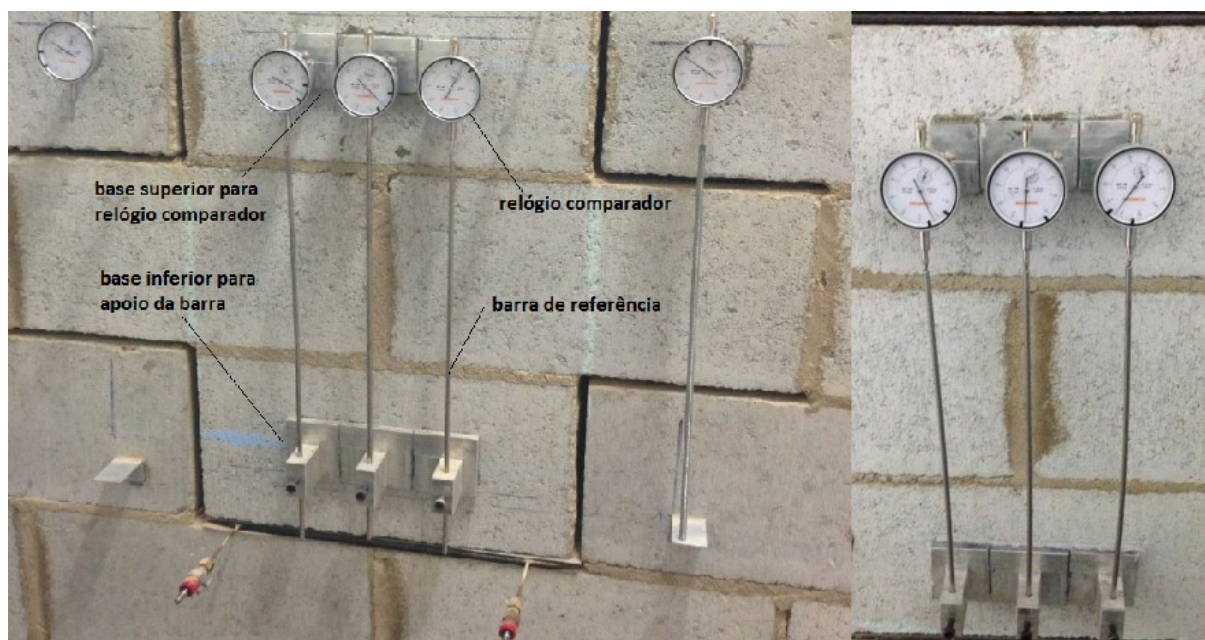
A deformação linear é obtida através da seguinte equação: $\Delta L/L$, sendo ΔL a variação de comprimento e L o comprimento inicial. A deformação desejada para cálculo do módulo é a vertical.

Pares de pontos para leitura da deformação foram definidos, de modo que estivessem completamente alinhados na vertical. A distância vertical entre os centros dos pontos superior e inferior foi definida como sendo o comprimento inicial, ou seja, o L .

Um sistema de fixação foi montado, sendo que o relógio comparador foi posicionado no ponto superior, enquanto que uma base com uma haste vertical foi posicionada no ponto inferior. A haste foi apoiada na base inferior de modo que estivesse em contato com o apalpador do relógio, acionando-o. Antes do início do ensaio, a leitura da posição do relógio era feita, tendo aquele valor como zero. Conforme a região entre os macacos se deformava, a distância entre o relógio e a base inferior diminuía, fazendo com que a barra alterasse o curso do apalpador do relógio, gerando um novo valor de leitura. Através da diferença entre esse novo valor e o valor da leitura inicial, a variação de comprimento era obtida, ou seja, o ΔL . Logo, para cada leitura, a deformação era calculada pela diferença apontada pelo relógio e pelo comprimento inicial (medido antes do início do ensaio).

As medidas principais do teste foram referentes à deformação da alvenaria na região entre os macacos, pois, através delas, a curva tensão por deformação seria obtida. Assim, para esses pontos, um sistema diferenciado foi desenvolvido. A empresa Fameth Espaçadores gentilmente desenvolveu e doou um sistema usinado de alumínio. Esse sistema permitia um rápido posicionado dos pontos de medida, uma vez que continha marcadores da distância horizontal e vertical desses pontos. Esses marcadores de distância permitiram que os pontos de leitura de um mesmo par estivesse perfeitamente alinhados verticalmente. Outra vantagem desse sistema era que possibilitava regular o comprimento livre da haste vertical, facilitando o seu posicionamento. O sistema é apresentado na Figura 100.

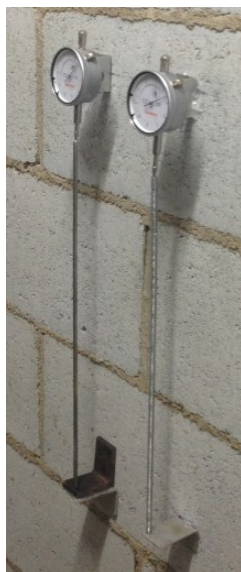
Figura 100: Sistema de medição de deformação para a alvenaria entre os macacos.



Fonte: Próprio autor.

Outros pontos de medida de deformação foram utilizados, sendo essas as medidas periféricas. O objetivo dessas demais medidas era o de se obter informações sobre a região externa aos macacos, bem como sobre a face oposta da alvenaria. Para tais pontos, um sistema mais simples foi utilizado, apresentado na Figura 101.

Figura 101: Sistema de medição para os demais pontos de leitura.



Fonte: Próprio autor.

4.2.6 Posição dos pontos de leitura de deformação

A posição dos pontos principais de leitura, ou seja, os três pares de pontos entre os macacos, foi escolhida segundo a recomendação de Landriani e Taliércio (1986), medindo a deformação na região central do rasgo. A distância horizontal entre os pontos foi de 7,5 cm, respeitando a recomendação da ASTM C1197-09, de que deve ser superior a 1/8 do comprimento do macaco, no caso, 5 cm e a de Suprenant e Schuller (1994) de que os pontos devem estar o mais próximo possível da região central. Já com relação à posição vertical, os pontos foram alocados no centro do bloco superior e do bloco inferior, gerando uma distância aproximada de 40 cm.

Os pontos de leitura complementares variaram do teste 1 para o teste 2. O teste 1 foi o que houve aplicação da pressão em apenas uma face do bloco, enquanto que o teste 2 foi o que houve aplicação nas duas faces.

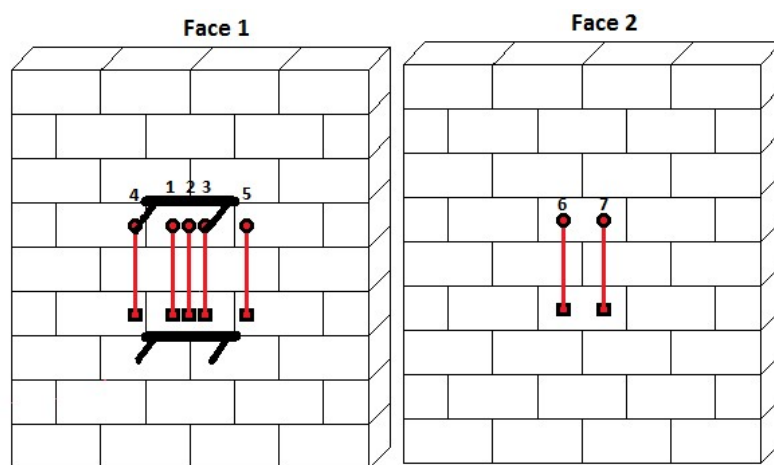
Para o teste 1 era importante saber o comportamento da parede na face oposta à que estava sendo aplicada carga, para checar os efeitos do carregamento assimétrico. Já na face em que se aplicava o carregamento, desejava-se saber o comportamento da alvenaria nas áreas externas à região confinada pelos macacos, verificando a transmissão de tensões para essa região. Para isso, um par de pontos foi posicionado junto a cada uma das extremidades do

macaco. Dois outros pares de pontos foram posicionados no centro da face oposta da parede. Essa configuração pode ser conferida na Figura 102.

Como a questão de deformações da alvenaria na região externa ao macaco já havia sido estudada no teste 1, tais leituras não foram repetidas no teste 2, visando simplificar sua execução. Ainda sobre o teste 2, como a pressão estava sendo aplicada nas duas faces do bloco, admitiu-se que ocorria um carregamento simétrico, muito próximo nas duas faces da parede.

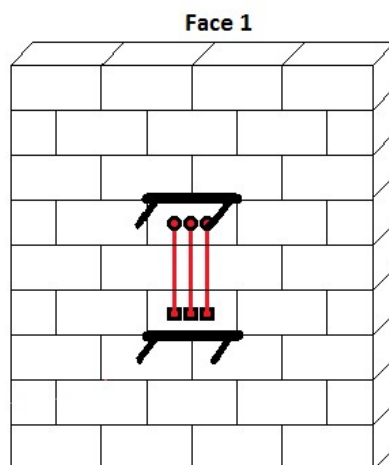
O sistema principal de leituras ocorreu em apenas uma das faces da parede, a face 1. Assim, admitiu-se que as deformações eram muito semelhantes nas duas faces. Para confirmar tal hipótese, um sistema de medida mais simples foi montado na face 2, para controlar as deformações nessa face e verificar a proximidade com a face 1. As deformações consideradas foram as obtidas na face 1, já que possuía o sistema principal de medidas, com mais pontos de leitura. A configuração dos pontos de leitura da deformação é apresentado na Figura 103.

Figura 102: Pontos de leitura de deformação para o teste 1.



Fonte: Próprio autor.

Figura 103: Pontos de leitura de deformação para o teste 2.



Fonte: Próprio autor.

4.2.7 Preparação para início dos testes

Teoricamente, o teste se inicia quando os macacos começam a transmitir pressão para a alvenaria. Entretanto, diversas atividades preliminares devem ser feitas.

Inicialmente, deve-se identificar as juntas em que o macaco será alocado, fazendo-se as devidas marcações. Todas as marcações nas paredes foram feitas com giz, um exemplo dessa marcação é apresentado na Figura 104. Outra marcação necessária é a da posição dos pontos de referência, que farão a leitura da deformação.

Figura 104: Marcação da região a ser testada.



Fonte: Próprio autor.

Em seguida, os rasgos superior e inferior foram feitos, retirando-se a junta de argamassa. Nessa etapa, toda a argamassa deve ser retirada, para que o macaco entre em contato

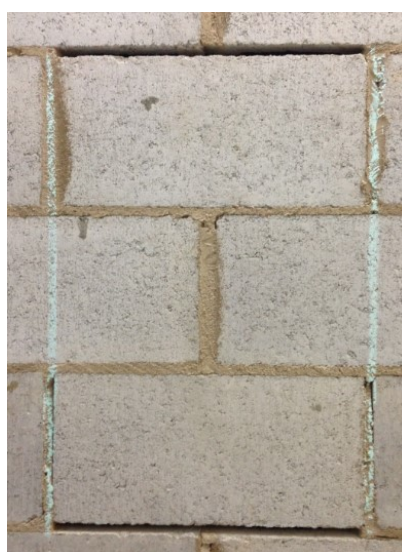
diretamente com o bloco. No laboratório, o acesso às duas faces da parede era possível, de modo que a realização de rasgos de pequena profundidade foi optada, ou seja, igual à profundidade da argamassa, cerca de 2,5 cm. Uma furadeira com broca de 8 e 6 mm foi utilizada, realizando-se furos consecutivos. Para acabamento e limpeza final do rasgo, usou-se fita de serra metálica com dentes de grande profundidade. Tanto o processo com a furadeira, quanto com a fita de serra são apresentados na Figura 105, enquanto que o rasgo acabado pode ser conferido na Figura 106. Recomenda-se que o rasgo seja feito imediatamente antes do teste, para que não haja acomodações de tensão ao redor dele e, portanto, deformações prévias.

Figura 105: Processo de remoção da argamassa na junta



Fonte: Próprio autor.

Figura 106: Rasgo acabado, com ausência total de argamassa.



Fonte: Próprio autor.

Os pontos de leitura de deformação foram definidos com a colagem das bases de alumínio para suportar o relógio e a haste vertical. A colagem foi feita com cola bi componente de pega rápido, sendo esse processo mostrado na Figura 107. Os relógios foram fixados na base superior com parafusos, arruelas e porcas, enquanto que a barra foi posicionada na base inferior com um parafuso de travamento.

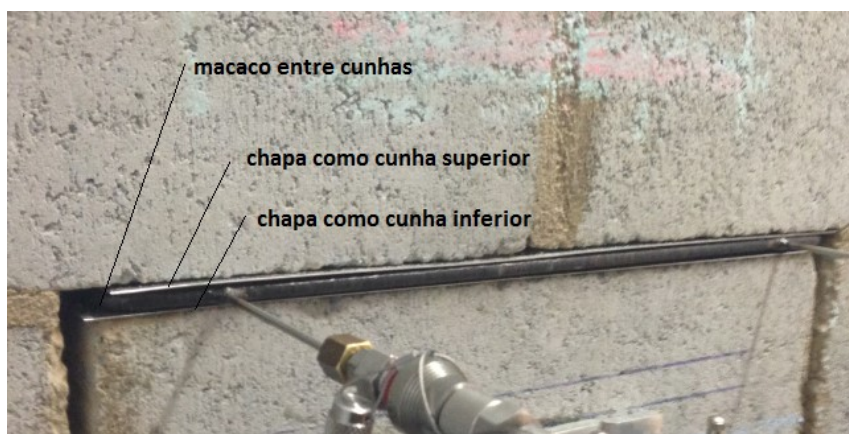
Figura 107: Colagem e montagem do sistema de leitura de deformação.



Fonte: Próprio autor.

Com os rasgos executados, os macacos foram inseridos. A espessura da junta era de 10 mm nas paredes construídas, enquanto o macaco tinha espessura de 6,6 mm. Caso o macaco fosse simplesmente inserido, haveria uma pequena abertura, exigindo que o macaco se expandisse, preenchesse o espaço e, somente após isso, entrasse em contato com os blocos. Isso poderia afetar os resultados do teste, pois o sistema estaria sendo pressurizado sem que a pressão fosse transmitida para a alvenaria. Assim, peças metálicas deveriam ser utilizadas para encunhar completamente o macaco no rasgo. No caso, as cunhas eram chapas de inox de 0,5 mm de espessura. O macaco juntamente com as chapas como cunha superior e inferior são retratados na Figura 108.

Figura 108: Macaco encunhado na junta.



Fonte: Próprio autor.

A bomba externa foi posicionada próxima à parede para que fosse conectada com o macaco inferior, outra mangueira conectava o macaco inferior com o superior. O reservatório da bomba manual foi preenchido com óleo hidráulico H 68.

Iniciava-se o bombeamento para que o óleo preenchesse todo o sistema, essa atividade continuava até que o óleo saísse pelo último ponto de abertura (ponto em que o sistema era fechado). Após a saída do óleo, o último ponto era fechado com um tampão do tipo CAP, assim como indicado na Figura 109. Esperava-se a saída do óleo para que todo o ar fosse removido do sistema.

Figura 109: Processo de preenchimento do sistema com óleo.



Fonte: Próprio autor.

Mesmo com as cunhas, poderia existir alguma folga do macaco no rasgo devido à superfície irregular dos blocos ou por impossibilidade de inserir mais cunhas para preencher o espaço

completamente. Desse modo, inseria-se uma pressão inicial, antes do início do teste, para que o macaco inflasse, adaptando seu formato à abertura existente e ficando completamente encunhado. Para isso, aplicava-se uma pressão interna de 2 MPa para que o macaco inflasse o necessário e preenchesse todo o espaço faltante, de modo que a pressão era zerada após isso. Esse processo foi repetido duas vezes por teste. Após isso, o teste era iniciado com aplicação de pressão e leitura de deformações.

4.2.8 Procedimento do teste

Estando os macacos completamente encunhados na junta, iniciava-se o teste com o bombeamento do sistema. O sistema era bombeado até que se atingia uma pressão inicial de 1,0 a 1,5 MPa segundo o manômetro, sendo esse o primeiro ponto de leitura dos relógios. A leitura era feita relógio por relógio, consumindo 1 minuto aproximadamente para a leitura de todos pontos. Durante esse período, a pressão na bomba era mantida constante.

O segundo ponto de leitura era feito com a pressão de 2,0 MPa. Depois, incrementos de pressão de 0,5 MPa foram feitos, sendo essa a precisão do manômetro. Essas atividades se repetiam até a interrupção do teste.

Os testes foram interrompidos após que a alvenaria estivesse com uma tensão mínima que permitisse sua análise. O valor da tensão na bomba deveria ser acima de 4,5 MPa, resultando numa pressão de aplicação do macaco de 1,1 MPa (os fatores de correlação serão explicados a seguir), sendo equivalente a um terço da tensão resistente prevista da alvenaria. Em geral, o teste foi interrompido quando o início de microfissuras na interface bloco-argamassa era observado.

4.2.9 Fatores da calibração

Conforme já apresentado, a pressão aplicada pelo macaco à alvenaria é diferente da pressão aplicada pela bomba e lida pelo manômetro. Uma correlação entre os dois valores pode ser obtida através do emprego de dois coeficientes: de área e de rigidez interna.

Segundo os ensaios já realizados com macaco na prensa hidráulica, o coeficiente de rigidez interna adotado para o macaco foi de 0,33, ou seja, 33% da pressão aplicada pela bomba é aplicada pelo macaco. Para essa conclusão, apenas a área útil do macaco foi considerada. A área útil do macaco é a região na qual as chapas inflam e, efetivamente, transmitem pressão, sendo menor que a sua área total. A área ativa do macaco considerada foi de 0,008851 m².

O fator de área é obtido através da relação entre a área do macaco e a área do rasgo a qual o macaco está inserido. Nesse caso, a área do macaco a ser utilizada é a área efetiva, uma vez que foi através dela que o fator anterior foi calculado. A área do rasgo considerada foi igual para todos os testes realizados, já que se manteve um padrão e um controle bastante rígido sobre tais dimensões. O rasgo apresentou profundidade de 2,7 cm e comprimento de 40 cm, resultando em uma área igual a 0,01107 m². Logo, a relação entre áreas resulta em um fator de 0,77.

A sobreposição dos dois fatores pode ser obtida pela sua multiplicação. Um fator comum para todos os testes pode ser definido através do produto: 0,77 x 0,33, sendo igual a 0,255. Assim, 25,5% da pressão aplicada pela bomba será considerada como sendo a pressão aplicada pelo macaco na alvenaria.

4.3 Teste 1 e teste 2

O teste 1 foi realizado nas duas primeiras paredes (parede 1 e parede 2), ambas com a idade de 43 dias. Nesse teste, o macaco de uma aba foi inserido em apenas uma face horizontal do bloco. Em cada ensaio, sete pontos de leitura de deformação foram utilizados, sendo 5 na face da parede em que os macacos estavam inseridos e 2 na face oposta.

Já o teste 2 foi realizado nas paredes 3 e 4, fazendo parte do segundo lote de paredes, ambas ensaiadas com 14 dias. Esse foi o teste executado com os macacos aplicando pressão nas duas faces horizontais do bloco. O sistema de leitura de deformação foi diferente do praticado no teste 1, sendo utilizados apenas 3 pontos em uma das faces.

4.3.1 Ensaio A e B

Dois tipos de ensaios foram realizados em um mesmo teste, os ensaios A e B. A diferença entre eles foi a configuração de rasgos feitos na parede. O objetivo dessa diferenciação foi avaliar a influência de cada configuração na resposta da estrutura durante o teste com macacos planos.

Nas paredes 1 e 2, tanto o ensaio A, quanto o ensaio B foram realizados. Já nas paredes 3 e 4, apenas o ensaio A foi feito, uma vez que a comparação entre eles já havia sido feita no primeiro lote de paredes.

No ensaio A, 6 rasgos foram feitos, sendo dois na horizontal (para inserção dos macacos) e 4 em juntas verticais. No macaco superior, as duas juntas verticais abaixo foram rasgadas,

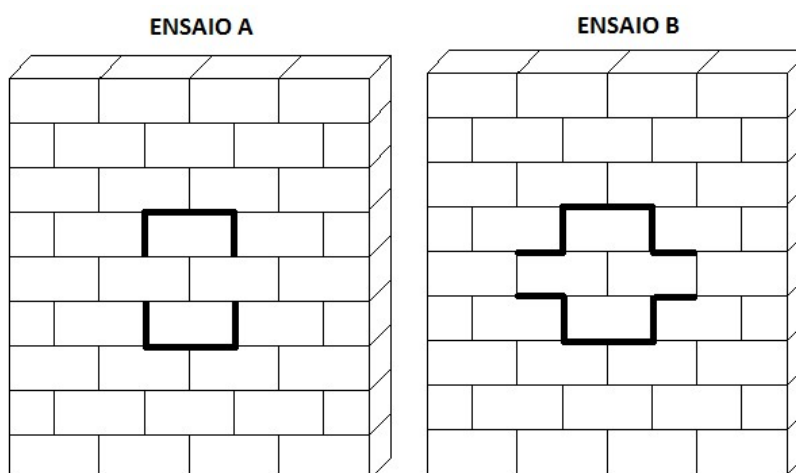
enquanto que no macaco inferior, isso ocorreu para as duas superiores. Essa configuração é ilustrada na Figura 110.

Os rasgos nas juntas verticais não costumam ser realizados no teste convencional, nem é citado nas normas e recomendações internacionais. O ideal é que as tensões aplicadas pelo macaco estejam confinadas à região entre eles. Devido ao fato dos macacos estarem a uma distância vertical considerável (59 cm), haveria a possibilidade da criação de um "bulbo" de tensões, distribuindo tensões para a parcela de alvenaria externa à parte ensaiada (confinado entre os macacos). Com o "bulbo", haveria influência das restrições da alvenaria ao redor nos dados do ensaio.

A ideia do bulbo pode ser observada na Figura 111. A figura também apresenta a limitação esperada para o bulbo para cada configuração de rasgo. Ressalta-se que a distribuição de tensões apresentada é a esperada, os diferentes ensaios foram feitos para checar tal hipótese.

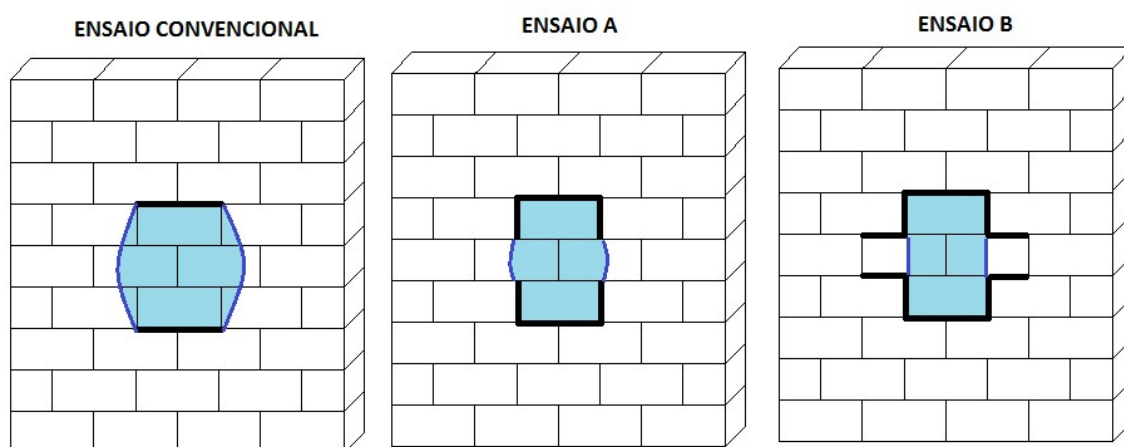
Já no ensaio B, 10 rasgos foram feitos ao todo. Além dos rasgos feitos no ensaio A, outros 2 rasgos em cima e outros 2 embaixo foram acrescentados. Os 2 rasgos foram feitos nas juntas horizontais sequenciais às verticais, estando essa configuração apresentada na Figura 110.

Figura 110: Indicação dos rasgos nas juntas para os ensaios A e B.



Fonte: Próprio autor.

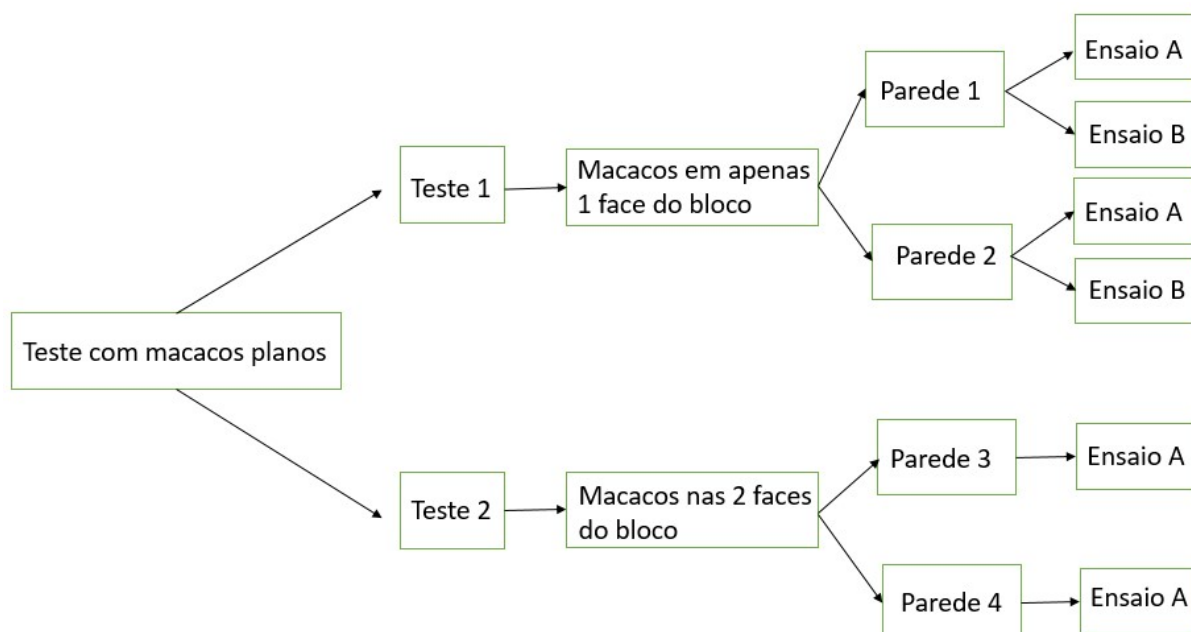
Figura 111: Bulbos de tensão esperados para cada ensaio.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 112 ilustra todos os testes realizados com macacos planos, apresentando os tipos de testes realizados para cada parede.

Figura 112: Ilustração dos testes realizados com macacos planos.



Fonte: Próprio autor.

4.3.2 Parede 1 - Ensaio A (teste 1)

O ensaio A foi realizado até o manômetro indicar a pressão de 7,0 MPa. O teste foi interrompido nesse valor de pressão para que não houvessem danos ou tensões residuais para

o ensaio B, que seria realizado logo na sequência, na mesma parede. A distância vertical entre os pares de pontos de leitura de deformação foi de 41 cm.

Os dados obtidos durante o ensaio são apresentados na Tabela 5. A numeração dos pontos de leitura é apresentada na Figura 102, de modo que os pontos 1, 2 e 3 são referentes à região central da amostra entre os macacos, e os pontos 6 e 7 são da face oposta da parede.

A Figura 113 apresenta o sistema hidráulico completo utilizado no teste com macacos planos, contendo a bomba conectada ao macaco inferior, o inferior ao macaco superior e esse com a saída fechada, além de conter o sistema de medição de deformação. A figura é referente ao ensaio A realizado na parede 1.

Figura 113: Realização do ensaio A da parede 1.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 5: Dados obtidos no ensaio A da parede 1.

Pressão aplicada (MPa)	Leitura do relógio (mm)						
	1	2	3	4	5	6	7
0,0	2,000	7,000	1,000	3,000	1,000	5,000	5,000
1,5	2,005	7,010	1,010	3,000	1,000	4,990	5,000
2,0	2,010	7,015	1,015	3,000	1,000	4,985	5,000
2,5	2,020	7,025	1,020	3,000	1,000	4,980	4,995
3,0	2,030	7,030	1,030	3,000	0,990	4,980	4,990
3,5	2,040	7,040	1,040	3,000	0,980	4,970	4,990
4,0	2,050	7,050	1,050	3,000	0,980	4,965	4,985
4,5	2,060	7,060	1,060	3,000	0,980	4,960	4,980
5,0	2,070	7,075	1,070	3,000	0,980	4,955	4,975
5,5	2,080	7,090	1,080	3,000	0,980	4,950	4,965
6,0	2,095	7,100	1,095	2,950	0,980	4,945	4,955
6,5	2,100	7,110	1,100	2,980	0,980	4,940	4,955
7,0	2,110	7,120	1,110	2,980	0,980	4,935	4,950

4.3.3 Parede 1 -Ensaio B (teste 1)

O ensaio B foi realizado logo na sequência do término do ensaio A, de modo que os novos rasgos foram feitos e o ensaio já foi iniciado. O ensaio prosseguiu até a pressão do manômetro atingir 7,0 MPa. Observou-se que a parede começou a apresentar um efeito de flexão, assim como com aberturas de fissuras na interface do bloco com a argamassa. Como se tratou de um ensaio contínuo ao anterior, as distâncias verticais dos pontos de leitura continuaram as mesmas (41 cm). Os dados obtidos durante o ensaio são apresentados na Tabela 6.

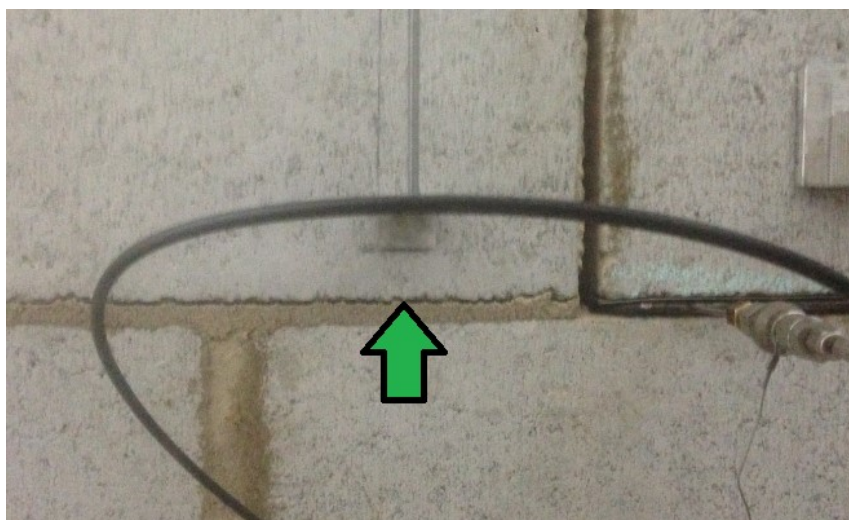
Os rasgos feitos nas juntas no ensaio B podem ser conferidos na Figura 114. Já a Figura 115 apresenta uma fissura que se repetiu para os demais testes, sendo alinhada com o macaco com sentido para a extremidade da parede.

Figura 114: Ensaio B da parede 1.



Fonte: Próprio autor.

Figura 115: Fissuras na alvenaria ao redor da região testada.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 6: Dados obtidos no ensaio B da parede 1.

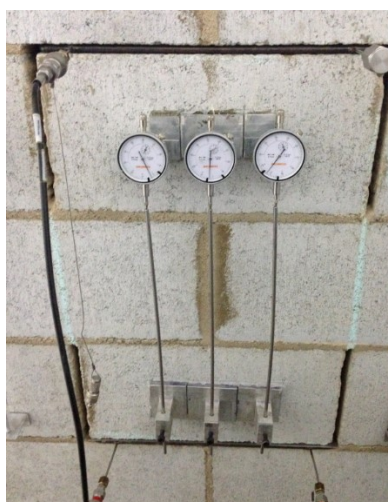
Pressão aplicada (MPa)	Leitura do relógio (mm)						
	1	2	3	4	5	6	7
0,0	2,000	7,000	1,000	0,000	2,000	4,000	4,030
1,6	2,010	7,010	1,010	0,000	2,000	4,000	4,030
2,0	2,015	7,015	1,015	0,000	2,000	4,000	4,025
2,6	2,020	7,025	1,025	0,000	2,000	4,000	4,020
3,0	2,025	7,030	1,030	0,000	2,000	4,000	4,020
3,5	2,035	7,040	1,035	0,000	2,000	3,995	4,020
4,0	2,045	7,045	1,045	0,000	2,000	3,995	4,015
4,5	2,050	7,055	1,055	0,000	2,000	3,990	4,015
5,0	2,060	7,060	1,065	0,000	2,000	3,990	4,010
5,5	2,070	7,070	1,075	0,000	2,000	3,985	4,005
6,0	2,080	7,080	1,085	0,000	2,000	3,980	4,000
6,5	2,090	7,090	1,090	0,000	1,990	3,975	4,000
7,0	2,100	7,100	1,100	0,020	1,990	3,970	3,995

4.3.4 Parede 2 - Ensaio A (teste 1)

O ensaio A na segunda parede ocorreu até a pressão interna de 6,0 MPa. Assim como na parede 1, não se desejava nenhum dano na parede para que não afetasse o ensaio B. Nesse caso, a distância vertical entre os pares de pontos de leitura era de 40,5 cm.

Os dados obtidos durante o ensaio são apresentados na Tabela 7. Observa-se que as leituras do ponto 6 foram anuladas, já que a haste vertical de referência se movimentou durante o ensaio. O sistema de leitura da região testada pode ser visto na Figura 116, sendo esse o sistema da parede 2.

Figura 116: Ensaio A da parede 2.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 7: Dados obtidos no ensaio A da parede 2.

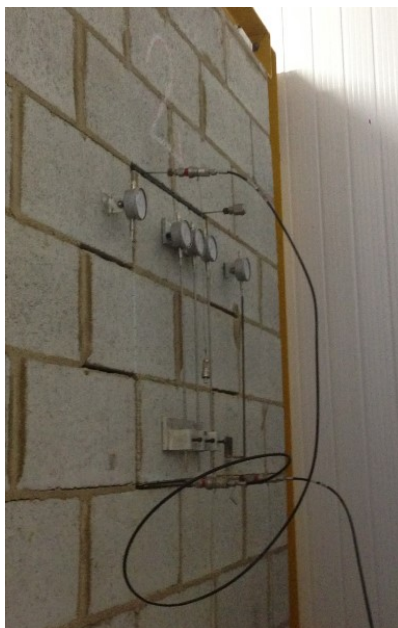
Pressão aplicada (MPa)	Leitura do relógio (mm)						
	1	2	3	4	5	6	7
0,0	4,000	3,000	5,000	0,000	5,140	1,000	1,030
1,0	4,005	3,005	5,010	0,990	5,135	1,000	1,025
1,5	4,010	3,010	5,015	0,990	5,135	1,000	1,025
2,0	4,020	3,020	5,025	0,990	5,135	0,995	1,020
2,5	4,030	3,025	5,030	0,990	5,135	0,995	1,020
3,0	4,035	3,035	5,035	0,990	5,135	0,995	1,020
3,5	4,045	3,040	5,045	0,990	5,135	0,990	1,020
4,0	4,050	3,050	5,055	0,990	5,135	0,985	1,015
4,5	4,060	3,055	5,060	0,990	5,130	0,985	1,015
5,0	4,070	3,065	5,070	0,990	5,130	0,980	1,010
5,5	4,080	3,075	5,075	0,990	5,130	0,975	1,010
6,0	4,090	3,085	5,085	0,990	5,130	0,970	1,000

4.3.5 Parede 2 - Ensaio B (teste 1)

O ensaio B na segunda parede prosseguiu até a iminente ruptura da parede, já que se tratava do último ensaio do teste 1. A possibilidade de ruptura foi identificada pelo deslocamento horizontal da parede e pela abertura das fissuras, possivelmente devido ao efeito de flexão decorrente do carregamento em apenas uma face da parede. Assim, o ensaio foi realizado até a pressão interna de 11,0 MPa. A distância vertical entre os pares de pontos, assim como no ensaio A, era de 40,5 cm. Os dados obtidos durante o ensaio são apresentados na Tabela 8. Também ocorreu uma falha em um dos pontos de leitura, nesse caso, no ponto 5, já que a base havia descolado da parede.

A Figura 117 retrata o ensaio B realizado na parede 2. Já as Figura 118 e Figura 119 apresentam as condições da alvenaria quando os macacos aplicavam a pressão máxima do teste, notando a abertura de fissuras na primeira figura e o deslocamento horizontal da parede na segunda. Apesar das fissuras com abertura considerável, não foram observadas fissuras nem outros danos na região da alvenaria entre os dois macacos.

Figura 117: Ensaio B da parede 2.



Fonte: Próprio autor.

Figura 118: Fissuras na parede ao redor da região testada.



Fonte: Próprio autor.

Figura 119: Flexão na parede 2.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 8: Dados obtidos durante o ensaio B da parede 2.

Pressão aplicada (MPa)	Leitura do relógio (mm)						
	1	2	3	4	5	6	7
0,0	4,005	3,005	5,005	0,985	ERRO	1,000	1,010
1,0	4,010	3,010	5,010	0,985		0,995	1,010
1,5	4,015	3,015	5,020	0,985		0,995	1,010
2,0	4,020	3,025	5,025	0,985		0,990	1,010
2,5	4,030	3,030	5,030	0,985		0,990	1,005
3,0	4,040	3,030	5,035	0,985		0,985	1,005
3,5	4,045	3,040	5,040	0,985		0,985	1,005
4,0	4,050	3,050	5,050	0,985		0,980	1,005
4,5	4,060	3,050	5,055	0,985		0,980	1,005
5,0	4,070	3,060	5,065	0,985		0,975	1,000
5,5	4,075	3,070	5,070	0,985		0,975	1,000
6,0	4,085	3,080	5,075	0,985		0,970	1,000
6,5	4,090	3,090	5,085	0,985		0,965	1,000
7,0	4,095	3,100	5,095	0,985		0,960	1,000
7,5	4,105	3,105	5,100	0,985		0,960	1,000
8,0	4,115	3,120	5,110	0,980		0,950	0,995
8,5	4,125	3,125	5,115	0,975		0,950	0,995
9,0	4,135	3,130	5,125	0,970		0,945	0,995
9,5	4,145	3,135	5,135	0,960		0,945	0,990
10,0	4,150	3,145	5,140	0,945		0,940	0,990

4.3.6 Parede 3 - Ensaio A (teste 2)

Nas paredes 3 e 4, apenas o ensaio A foi aplicado. Na parede 3, o teste foi interrompido na pressão da bomba igual a 6,0 MPa. O teste encerrou nessa pressão pois observou-se esmagamento da junta superior da parede e, conseqüentemente, levantamento da região da parede acima do macaco superior. Tal situação fez com que o macaco se deformasse em excesso, o que poderia afetar os dados seguintes. A distância vertical entre os pontos verticais de leitura de deformação era de 43 cm.

Os dados coletados no teste são apresentados na Tabela 9. O sistema hidráulico como um todo é retratado na Figura 120, indicando as conexões entre os macacos em cada uma das faces da parede. Já a Figura 121 apresenta as fissuras ao redor da região testada, observadas após o fim do ensaio. Nota-se que apesar das fissuras também ocorrerem, essas apresentaram abertura muito menor das apresentadas na Figura 115.

Figura 120: Ensaio realizado nas duas faces da parede 3.



Fonte: Próprio autor.

Figura 121: Fissuras na parede 3 após o ensaio.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 9: Dados coletados no teste na parede 3.

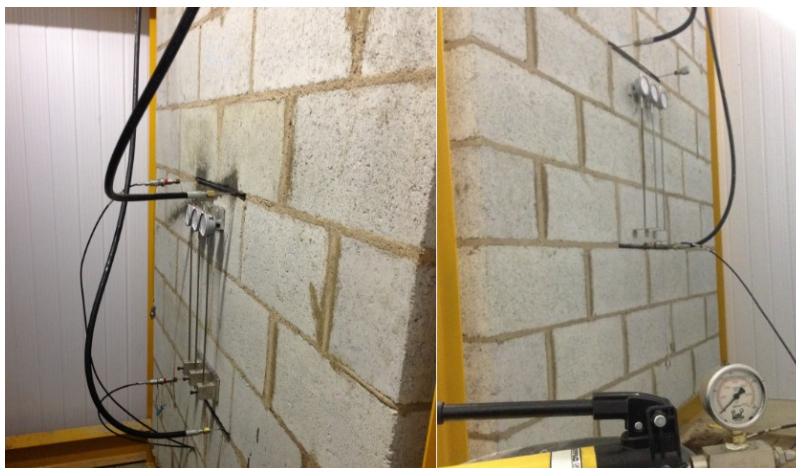
Pressão bomba (MPa)	Leitura do relógio		
	1	2	3
0,0	2,000	4,005	3,750
1,0	2,005	4,015	3,755
2,0	2,015	4,025	3,765
2,5	2,020	4,030	3,770
3,0	2,030	4,035	3,775
3,5	2,035	4,045	3,780
4,0	2,040	4,055	3,785
4,5	2,050	4,060	3,790
5,0	2,055	4,065	3,800
5,5	2,060	4,070	3,805
6,0	2,065	4,080	3,810

4.3.7 Parede 4 - Ensaio A (teste 2)

O teste na quarta e última parede foi realizado até a pressão da bomba atingir 10,0 MPa, sendo considerada uma pressão segura de se trabalhar. O teste poderia ser estendido até a ruptura da parede ou das conexões, mas, por segurança, optou-se por interrompê-lo. A distância vertical entre os pontos verticais de leitura de deformação foi de 41 cm.

Os dados coletados nesse teste são apresentados na Tabela 9. A Figura 122 retrata as conexões em cada uma das duas faces da parede, indicando também a conexão com a bomba externa. A Figura 123 apresenta as conexões dos macacos entre uma face e outra, através das mangueiras que passam acima da viga. Já a Figura 124 é referente às fissuras observadas ao redor da região testada na parede 4.

Figura 122: Duas faces da parede 4.



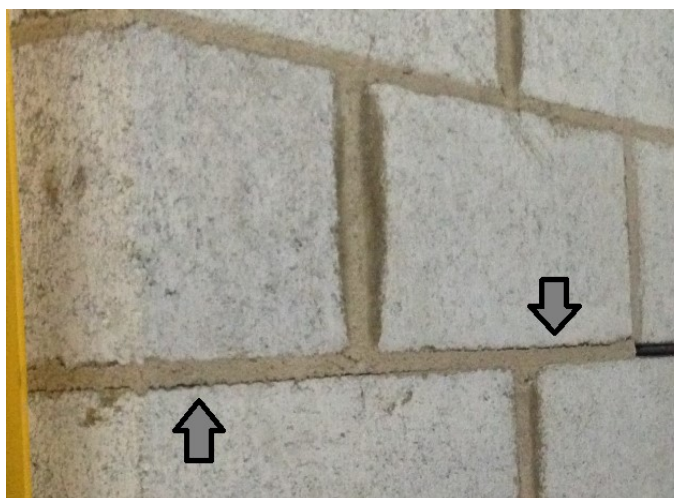
Fonte: Próprio autor.

Figura 123: Conexões entre os 4 macacos na parede 4.



Fonte: Próprio autor.

Figura 124: Fissuras após o ensaio na parede 4.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 10: Dados obtidos no teste com a parede 4.

Pressão bomba (MPa)	Leitura do relógio (mm)		
	1	2	3
0,0	6,985	3,985	6,035
1,0	6,990	3,990	6,040
2,0	7,000	3,995	6,050
2,5	7,005	4,000	6,055
3,0	7,010	4,005	6,060
3,5	7,015	4,010	6,065
4,0	7,015	4,015	6,080
4,5	7,020	4,020	6,085
5,0	7,030	4,020	6,090
5,5	7,035	4,025	6,095
6,0	7,040	4,035	6,100
6,5	7,045	4,040	6,105
7,0	7,050	4,045	6,110
7,5	7,055	4,050	6,115
8,0	7,065	4,055	6,120
9,0	7,075	4,065	6,130
10,0	7,080	4,075	6,140

4.4 Resultados dos testes

As Tabela 5, Tabela 6, Tabela 7, Tabela 8, Tabela 9 e Tabela 10 apresentam os dados obtidos durante o ensaio. Caso as deformações fossem medidas por instrumentação de LVDT, seria possível conhecer o comportamento da estrutura em tempo real durante o ensaio. Porém, as informações obtidas durante o ensaio ficaram limitadas às apresentadas nas tabelas citadas.

Em outro momento, os dados apresentados nas tabelas foram analisados para se calcular e conhecer as propriedades desejadas.

4.4.1 Considerações sobre a tensão e a deformação considerada nos testes

No teste de deformabilidade, dois rasgos horizontais são realizados para a inserção dos macacos planos. Pela presença desses rasgos, a região de alvenaria confinada por eles está isolada do restante da parede quanto a solicitações verticais. Ou seja, o peso próprio e possíveis carregamentos verticais da parede acima do macaco superior não são consideradas como presentes na região testada. Considera-se que as tensões que resultam nas deformações dessa região são provenientes unicamente das pressões aplicadas pelos macacos.

As paredes 3 e 4 foram testadas com macacos aplicando pressão nas duas faces do bloco, resultando num carregamento simétrico na estrutura. Esse carregamento resulta em compressão simples na região de parede entre os dois macacos. Como as duas faces do bloco estão sendo carregadas pela mesma pressão e de modo simultâneo, considera-se que toda a espessura da parede contribui para a rigidez a ser obtida no controle de deformação. Desse modo, admite-se que as deformações nas duas faces da parede são iguais. Nesse caso, as curvas tensão por deformação resultaram das pressões aplicadas pelo macaco e das deformações lidas em uma das faces e confirmadas pela face oposta.

Já as paredes 1 e 2 foram testadas com macacos em uma das faces do bloco apenas, resultando num carregamento excêntrico. O carregamento excêntrico resultou em flexão na parede, o que pode ser conferido na deformação de flexão da parede, conforme indicado nas fotos referentes a essas paredes. Como será apresentado posteriormente, deformações de encurtamento foram notadas na face de aplicação do macaco, enquanto que deformações de alongamento foram obtidas na face oposta, fortalecendo a ideia sobre a presença de tensões provenientes de flexão. Logo, admite-se que as deformações de encurtamento são provenientes das tensões de compressão aplicadas pelo macaco e pelas tensões de compressão

provenientes da flexão. Há duas maneiras de se calcular a deformabilidade da estrutura nesse teste. A primeira considera que as duas faces contribuem para a rigidez da estrutura, enquanto que a segunda considera apenas uma.

Na primeira maneira, a tração presente na face oposta deveria ser tal que não a fissurasse, não alterando o momento de inércia do elemento. Desse modo, é que como se a pressão aplicada pelo macaco estivesse sendo absorvida por ambas as faces da parede. Por essa hipótese, a tensão na face em que os macacos estão posicionados pode ser calculada pela equação (10), já a tensão na face oposta: pela equação (11).

$$(10) \quad (f / A) + (f_x e_x y / I);$$

$$(11) \quad (f / A) + (f_x e_x y / I).$$

Sendo que, f: força aplicada pelo macaco; A: área de aplicação da força; e: excentricidade da força aplicada; y: distância até o eixo; I: momento de inércia.

A partir do uso das equações (10) e (11), as tensões nas duas faces são obtidas. As deformações são conhecidas, já que foram medidas em ambas as faces. Com esses dados, a curva tensão por deformação é traçada e o módulo pode ser calculado.

Na segunda maneira, considera-se que a tração que ocorre na face oposta é suficiente para resultar em fissuras. Admitindo-se que a face oposta esteja completamente fissurada, essa não irá contribuir para a rigidez do elemento, nem irá absorver as pressões de compressão aplicadas pelos macacos. Assim, considera-se que as deformações de tração ocorrem exclusivamente da tração proveniente da flexão, já que as tensões aplicadas pelo macaco não são transmitidas para essa região. Conhecendo-se as deformações de alongamento, obtém-se as deformações provenientes da flexão. Admite-se que as deformações ocorridas pela tensão de flexão são iguais nas duas faces da parede, logo, a deformação de alongamento da face oposta é considerada igual à deformação de encurtamento da face de aplicação.

A partir da deformação total medida na face do macaco e da deformação de encurtamento pela flexão (igual a de alongamento), encontra-se a deformação por compressão pura proveniente da pressão do macaco. Com as deformações decorrentes da compressão e com as pressões aplicadas pelos macacos, a curva tensão por deformação é desenhada, e o módulo é calculado.

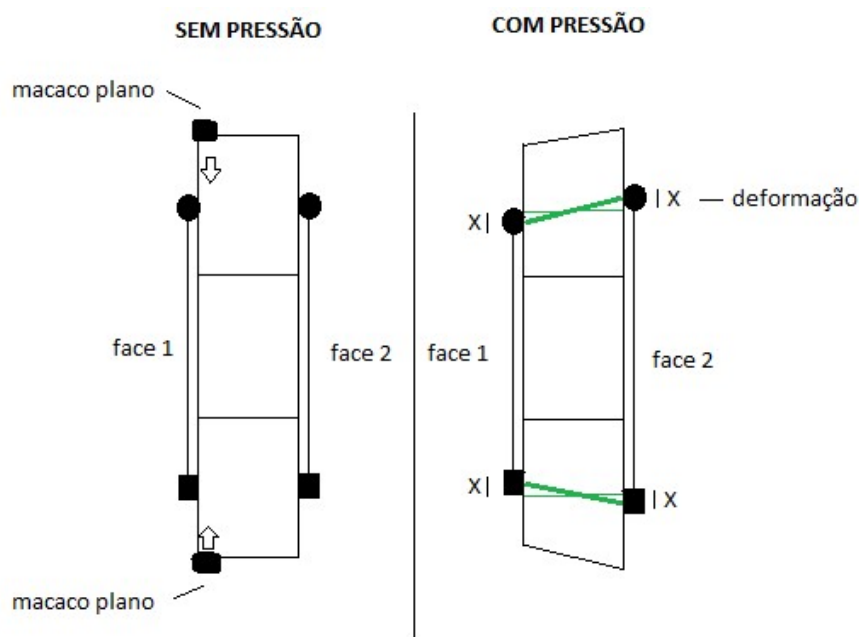
Neste trabalho, para as paredes 1 e 2, a segunda hipótese será a adotada. O módulo será calculado considerando a curva a partir do segundo ponto de leitura. Nos testes, estima-se que

o segundo ponto seja referente à aplicação de pressão próxima a 0,4 MPa. Para esse valor, considera-se que a face oposta se encontra totalmente fissurada, admitindo-se que apenas a face comprimida contribui para a rigidez do elemento.

Nos dados a serem apresentados, nota-se que as deformações de alongamento na face oposta à de aplicação de pressão aumenta de maneira não linear com relação aos incrementos de pressão. Esse fato confirma a hipótese de fissura nessa fase.

Portanto, nas paredes 1 e 2, a curva tensão por deformação será obtida com as pressões aplicadas pelos macacos e pelas deformações provenientes apenas dessas pressões. Essas deformações foram calculadas subtraindo-se a deformação total na face de aplicação do bloco pela deformação de encurtamento proveniente da flexão. A deformação proveniente da flexão foi considerada como tendo o mesmo valor nas duas faces da parede, porém sendo uma de encurtamento e outra de alongamento, conforme indicado na Figura 125

Figura 125: Deformações provenientes da flexão da parede.



Fonte: Próprio autor.

4.4.2 Parede 1: ensaio A

Através dos dados coletados durante o ensaio A da parede 1 e apresentados na Tabela 5, outros resultados são obtidos. A Tabela 11 apresenta as deformações calculadas com base nas leituras dos relógios, bem como a pressão efetivamente aplicada pelo macaco, calculada com o uso dos fatores mencionados. As duas últimas colunas apresentam a média de deformações dos pontos em parênteses.

Tabela 11: Deformações no ensaia A da parede 1.

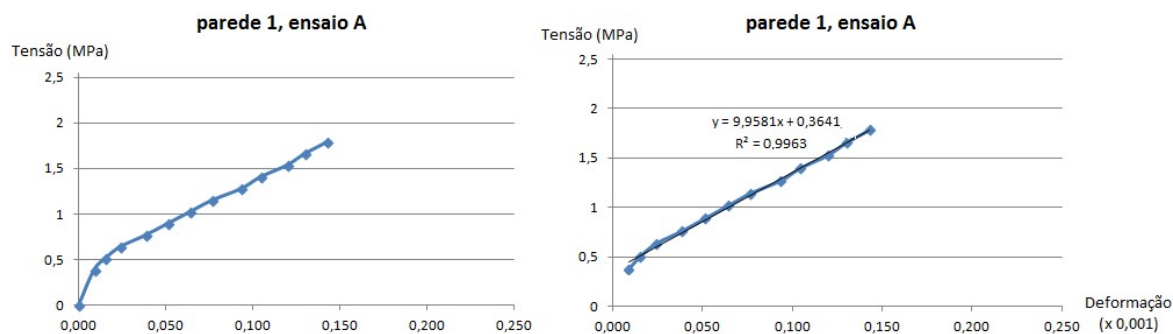
Pressão bomba (MPa)	Pressão macaco (MPa)	Deformação (x 0,001)							Média	
		1	2	3	4	5	6	7	(1,2,3)	(6 e 7)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,50	0,38	0,01	0,02	0,02	0,00	0,00	-0,02	0,00	0,02	-0,01
2,00	0,51	0,02	0,04	0,04	0,00	0,00	-0,03	0,00	0,03	-0,02
2,50	0,64	0,05	0,06	0,05	0,00	0,00	-0,05	-0,01	0,05	-0,03
3,00	0,77	0,07	0,07	0,07	0,00	-0,02	-0,05	-0,02	0,07	-0,03
3,50	0,89	0,10	0,10	0,10	0,00	-0,05	-0,07	-0,02	0,10	-0,05
4,00	1,02	0,12	0,12	0,12	0,00	-0,05	-0,08	-0,03	0,12	-0,06
4,50	1,15	0,15	0,15	0,15	0,00	-0,05	-0,09	-0,05	0,15	-0,07
5,00	1,28	0,17	0,18	0,17	0,00	-0,05	-0,10	-0,06	0,17	-0,08
5,50	1,40	0,20	0,22	0,20	0,00	-0,05	-0,12	-0,08	0,20	-0,10
6,00	1,53	0,23	0,24	0,23	-0,12	-0,05	-0,13	-0,10	0,24	-0,12
6,50	1,66	0,24	0,27	0,24	-0,05	-0,05	-0,14	-0,10	0,25	-0,12
7,00	1,79	0,27	0,29	0,27	-0,05	-0,05	-0,15	-0,12	0,28	-0,13

Analisando a tabela, nota-se que houve considerável alongamento na face oposta à da aplicação de cargas pelo macaco. Isso indica que parte das deformações sofridas na face principal foram devido à flexão da parede. Conforme apresentado no item anterior, deseja-se conhecer as deformações decorrentes apenas da carga compressiva do macaco. Essas deformações foram calculadas subtraindo-se a deformação da face 2 (pela flexão) pela deformação total da face 1, já que se considera que as deformações por flexão da face 1 é igual da face 2.

Esse cálculo é feito pela soma das duas últimas colunas da tabela apresentada. Ou seja, as deformações referentes aos pontos 6 e 7 tem a flexão como origem, enquanto que as deformações dos pontos 1, 2 e 3 tem a flexão e a compressão pelo macaco como origem. Através dessa operação, as deformações obtidas apenas pelos macacos são calculadas, servindo como base para desenho da curva tensão por deformação, a qual é apresentada na Figura 126.

A figura também apresenta a linha de tendência da curva com a sua equação. Para a determinação de todas as linhas de tendência, desconsiderou-se o primeiro ponto de leitura, já que um comportamento diferente é observado no início de todas as curvas.

Figura 126: Curva tensão por deformação e linha de tendência do ensaio A da parede 1.



Fonte: Próprio autor.

4.4.3 Parede 1: ensaio B

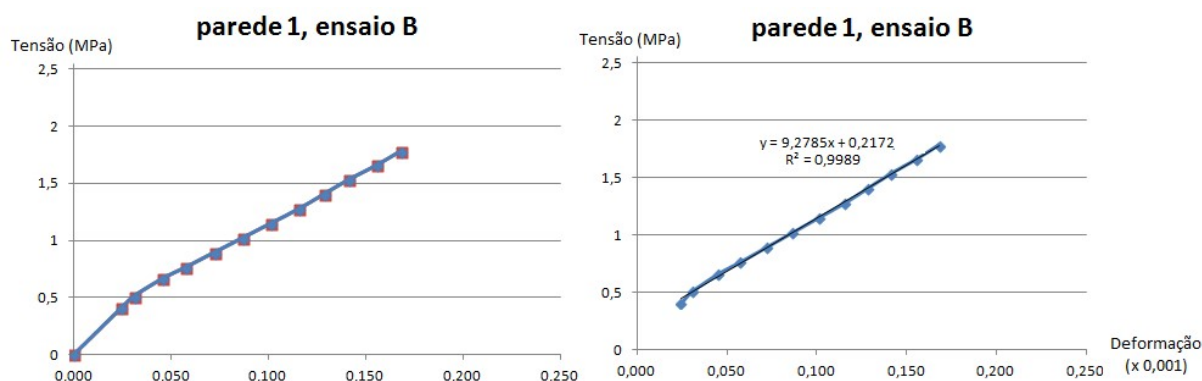
Os dados do teste são apresentados na Tabela 6. As deformações calculadas através dos pontos de leitura são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12: Deformação e pressão na alvenaria do ensaio B da parede 1.

Pressão bomba (MPa)	Pressão macaco (MPa)	Deformação (x0,001)							Média	
		1	2	3	4	5	6	7	(1,2,3)	(6 e 7)
0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,000
1,60	0,41	0,02	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,024	0,000
2,00	0,51	0,04	0,04	0,04	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,037	-0,006
2,60	0,66	0,05	0,06	0,06	0,00	0,00	0,00	-0,02	0,057	-0,012
3,00	0,77	0,06	0,07	0,07	0,00	0,00	0,00	-0,02	0,069	-0,012
3,50	0,89	0,09	0,10	0,09	0,00	0,00	-0,01	-0,02	0,089	-0,017
4,00	1,02	0,11	0,11	0,11	0,00	0,00	-0,01	-0,03	0,110	-0,023
4,50	1,15	0,12	0,13	0,13	0,00	0,00	-0,02	-0,03	0,130	-0,029
5,00	1,28	0,15	0,15	0,16	0,00	0,00	-0,02	-0,05	0,150	-0,035
5,50	1,40	0,17	0,17	0,18	0,00	0,00	-0,03	-0,06	0,175	-0,047
6,00	1,53	0,20	0,20	0,21	0,00	0,00	-0,05	-0,07	0,199	-0,058
6,50	1,66	0,22	0,22	0,22	0,00	0,00	-0,06	-0,07	0,220	-0,064
7,00	1,79	0,24	0,24	0,24	0,05	0,00	-0,07	-0,08	0,244	-0,076

Para o cálculo da deformação referente apenas à aplicação de pressão do macaco, a mesma consideração do ensaio A foi aplicada, em que se subtraiu a média dos pontos 6 e 7 da média dos pontos 1, 2 e 3. A curva tensão por deformação para esse teste, assim como a linha de tendência do trecho considerado são apresentados na Figura 127.

Figura 127: Curva tensão por deformação e linha de tendência do ensaio B da parede 1



Fonte: Próprio autor.

4.4.4 Parede 2: ensaio A

O ensaio A da parede 2 tem seus dados apresentados na Tabela 7, enquanto que a Tabela 13 apresenta as deformações calculadas, assim como a pressão aplicada pelo macaco na alvenaria.

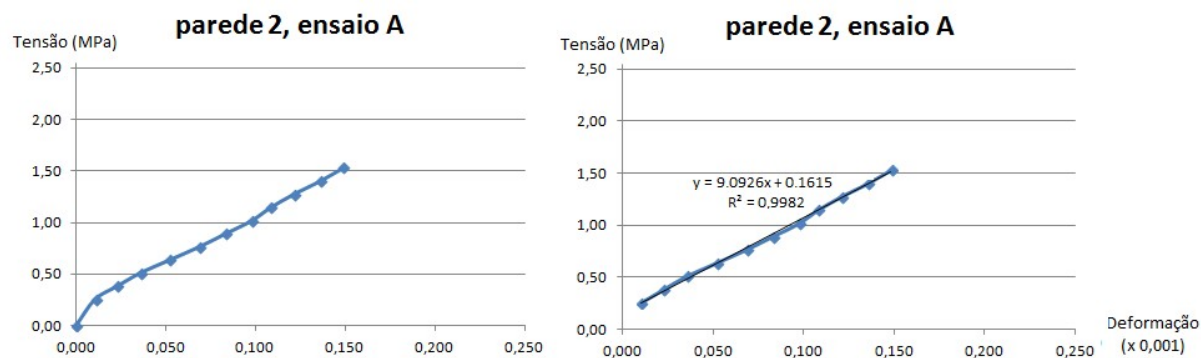
Tabela 13: Deformação e pressão na alvenaria do ensaio A da parede 2.

Pressão bomba (MPa)	Pressão macaco (MPa)	Deformação (x0,001)							Média	
		1	2	3	4	5	6	7	(1,2,3)	(6 e 7)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,00	0,26	0,01	0,01	0,02	2,36	-0,01	0,00	-0,01	0,02	-0,01
1,50	0,38	0,02	0,02	0,04	2,36	-0,01	0,00	-0,01	0,03	-0,01
2,00	0,51	0,05	0,05	0,06	2,36	-0,01	-0,01	-0,02	0,05	-0,02
2,50	0,64	0,07	0,06	0,07	2,36	-0,01	-0,01	-0,02	0,07	-0,02
3,00	0,77	0,09	0,09	0,09	2,36	-0,01	-0,01	-0,02	0,09	-0,02
3,50	0,89	0,11	0,10	0,11	2,36	-0,01	-0,02	-0,02	0,11	-0,02
4,00	1,02	0,12	0,12	0,14	2,36	-0,01	-0,04	-0,04	0,13	-0,04
4,50	1,15	0,15	0,14	0,15	2,36	-0,02	-0,04	-0,04	0,14	-0,04
5,00	1,28	0,17	0,16	0,17	2,36	-0,02	-0,05	-0,05	0,17	-0,05
5,50	1,40	0,20	0,19	0,19	2,36	-0,02	-0,06	-0,05	0,19	-0,05
6,00	1,53	0,22	0,21	0,21	2,36	-0,02	-0,07	-0,07	0,21	-0,07

Para a parede 2, como a pressão continuou a ser aplicada em apenas uma face da parede, a flexão continuou a acontecer. Continuou admitindo-se que as deformações por flexões eram iguais nos dois lados da parede, de modo que a deformação devido à pressão do macaco era a deformação total menos a deformação por flexão. A deformação por flexão foi obtida pela

deformação da face 2. A Figura 128 apresenta a curva tensão por deformação obtida com o ensaio A, assim como a equação da linha de tendência.

Figura 128: Curva tensão por deformação e linha de tendência do ensaio A da parede 2.



Fonte: Próprio autor.

4.4.5 Parede 2: ensaio B

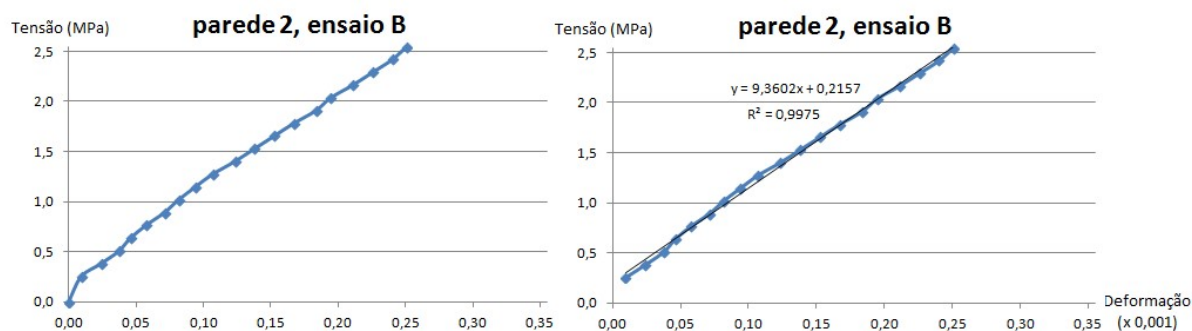
A Tabela 8 apresenta os dados coletados durante o teste, já a Tabela 14 apresenta os dados processados. A

Figura 129 apresenta a curva tensão por deformação e a equação da linha de tendência para o trecho considerado para o cálculo do módulo de elasticidade.

Tabela 14: Deformação e pressão aplicada na alvenaria no ensaio B da parede 2.

Pressão bomba (MPa)	Pressão macaco (MPa)	Deformação (x0,001)							Média	
		1	2	3	4	5	6	7	(1,2,3)	(6 e 7)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	ERRO	0,00	0,00	0,00	0,00
1,00	0,26	0,01	0,01	0,01	0,00		-0,01	0,00	0,01	0,00
1,50	0,38	0,02	0,02	0,03	-0,02		-0,01	0,01	0,03	0,00
2,00	0,51	0,04	0,04	0,04	-0,02		-0,02	0,01	0,04	-0,01
2,50	0,64	0,06	0,06	0,06	-0,02		-0,02	0,00	0,06	-0,01
3,00	0,77	0,08	0,06	0,07	-0,02		-0,03	0,00	0,07	-0,01
3,50	0,89	0,10	0,09	0,10	0,00		-0,04	-0,01	0,09	-0,02
4,00	1,02	0,11	0,11	0,11	0,00		-0,05	-0,01	0,11	-0,03
4,50	1,15	0,14	0,11	0,12	0,00		-0,05	-0,01	0,12	-0,03
5,00	1,28	0,16	0,14	0,15	0,00		-0,06	-0,02	0,15	-0,04
5,50	1,40	0,17	0,16	0,16	0,00		-0,06	-0,02	0,16	-0,04
6,00	1,53	0,20	0,19	0,17	0,00		-0,07	-0,02	0,19	-0,05
6,50	1,66	0,21	0,21	0,20	0,00		-0,08	-0,02	0,21	-0,05
7,00	1,79	0,22	0,23	0,22	0,00		-0,10	-0,02	0,23	-0,06
7,50	1,91	0,25	0,25	0,23	0,00		-0,10	-0,02	0,24	-0,06
8,00	2,04	0,27	0,28	0,26	-0,01		-0,12	-0,04	0,27	-0,08
8,50	2,17	0,30	0,30	0,27	-0,02		-0,12	-0,04	0,29	-0,08
9,00	2,30	0,32	0,31	0,30	-0,04		-0,13	-0,04	0,31	-0,08
9,50	2,42	0,35	0,32	0,32	-0,06		-0,13	-0,05	0,33	-0,09
10,00	2,55	0,36	0,35	0,33	-0,10		-0,14	-0,05	0,35	-0,10

Figura 129: Curva tensão por deformação e linha de tendência para o ensaio B da parede 2.



Fonte: Próprio autor.

4.4.6 Parede 3

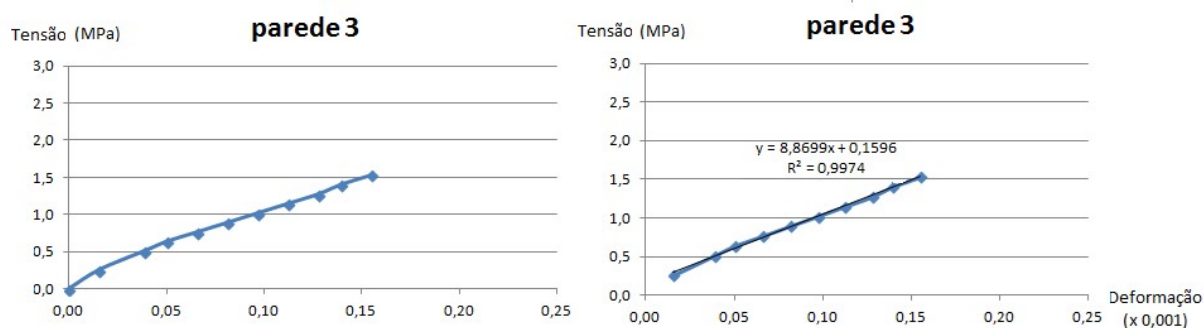
Nas paredes 3 e 4, apenas o ensaio A foi realizado. Em ambas as paredes, a pressão dos macacos foi aplicada nas duas faces horizontais do bloco, não havendo deformações por flexão. Logo, as deformações calculadas foram diretamente aplicadas nas curvas.

A Tabela 15 apresenta as deformações calculadas para as pressões aplicadas na alvenaria. A Figura 130 apresenta a curva tensão por deformação obtida pelos dados da tabela, assim como a equação da linha de tendência, desconsiderando o primeiro ponto de leitura.

Tabela 15: Deformação e pressão na alvenaria no teste na parede 3.

Pressão macaco (MPa)	Pressão bomba (MPa)	Deformação (x0,001)			
		1	2	3	Média
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,00	0,26	0,01	0,02	0,01	0,02
2,00	0,51	0,03	0,05	0,03	0,04
2,50	0,64	0,05	0,06	0,05	0,05
3,00	0,77	0,07	0,07	0,06	0,07
3,50	0,89	0,08	0,09	0,07	0,08
4,00	1,02	0,09	0,12	0,08	0,10
4,50	1,15	0,12	0,13	0,09	0,11
5,00	1,28	0,13	0,14	0,12	0,13
5,50	1,40	0,14	0,15	0,13	0,14
6,00	1,53	0,15	0,17	0,14	0,16

Figura 130: Curva tensão por deformação e linha de tendência do teste na parede 3.



Fonte: Próprio autor.

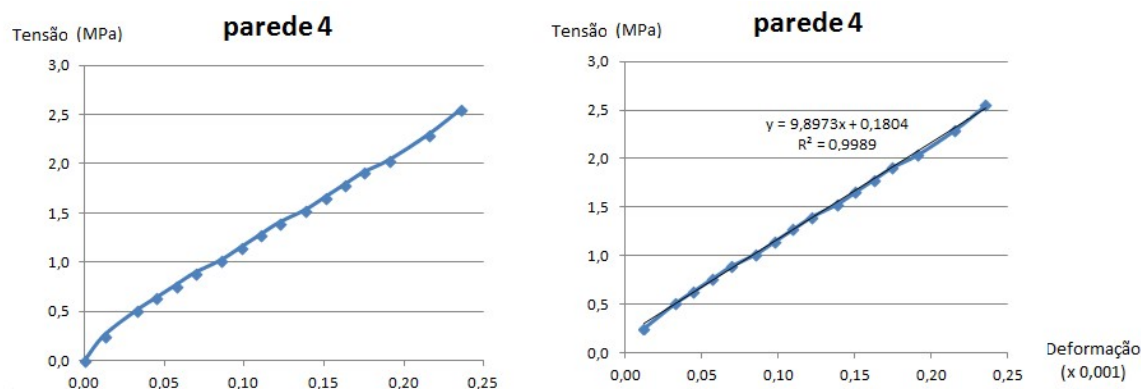
4.4.7 Parede 4

A Tabela 16 apresenta as deformações calculadas para as pressões aplicadas na parede. A Figura 131 apresenta a curva tensão por deformação obtida para a parede 4, bem como a equação da linha de tendência.

Tabela 16: Deformação e pressão na alvenaria do teste da parede 4.

Pressão bomba (MPa)	Pressão macaco (MPa)	Deformação (x0,001)			
		1	2	3	Média
0,00	0,00	0	0	0	0,00
1,00	0,26	0,01	0,01	0,01	0,01
2,00	0,51	0,04	0,02	0,04	0,03
2,50	0,64	0,05	0,04	0,05	0,04
3,00	0,77	0,06	0,05	0,06	0,06
3,50	0,89	0,07	0,06	0,07	0,07
4,00	1,02	0,07	0,07	0,11	0,09
4,50	1,15	0,09	0,09	0,12	0,10
5,00	1,28	0,11	0,09	0,13	0,11
5,50	1,40	0,12	0,10	0,15	0,12
6,00	1,53	0,13	0,12	0,16	0,14
6,50	1,66	0,15	0,13	0,17	0,15
7,00	1,79	0,16	0,15	0,18	0,16
7,50	1,91	0,17	0,16	0,20	0,17
8,00	2,04	0,20	0,17	0,21	0,19
9,00	2,30	0,22	0,20	0,23	0,22
10,00	2,55	0,23	0,22	0,26	0,24

Figura 131: Curva tensão por deformação e linha de tendência para teste da parede 4.



Fonte: Próprio autor.

4.5 Análise dos resultados

Nos itens anteriores, foram apresentados os dados coletados durante cada teste, como a pressão aplicada pela bomba e as leituras dos relógios. Também constam a pressão aplicada

pelo macaco e a média da deformação para cada ponto de leitura. Com essa relação, a curva tensão por deformação foi obtida e apresentada nas figuras.

Com base na curva, uma linha de tendência foi definida, excluindo-se o primeiro ponto de leitura, obtendo a sua equação. Pela inclinação da reta, o módulo de elasticidade é definido para cada parede.

4.5.1 Comportamento da curva

Seis curvas de tensão por deformação foram obtidas: duas para cada uma das paredes 1 e 2 e uma para cada uma das paredes 3 e 4. Comparando-se todas as curvas, observa-se que todas apresentam praticamente o mesmo comportamento.

O comportamento notado em cada curva foi de um segmento de reta com uma inclinação diferente entre o zero e o primeiro ponto de leitura do segmento de reta para os demais pontos. A partir do segundo ponto de leitura, uma reta representou bem a distribuição dos pontos, indicando um comportamento altamente linear até a interrupção do ensaio, mostrando que o teste não ultrapassou o comportamento linear da alvenaria.

Sobre a mudança na inclinação do segmento de reta que representa a curva, identifica-se que isso ocorreu para pressão que variou de 0,3 a 0,4 MPa para as paredes 1 e 2 e 0,2 para as paredes 3 e 4. Nota-se que no primeiro trecho, a curva apresentou comportamento mais rígido do que no segundo.

A hipótese levantada é que o macaco superior elevou a parte da parede acima dele. O deslocamento poderia acontecer até que essa parte da parede encontrasse a viga superior, o que limitaria a continuidade dos deslocamentos. Esse levantamento pode ter ocorrido por pequenas falhas no encunhamento da parede com a viga superior ou por esmagamento da junta que encunha a parede na viga superior.

Essa hipótese responde à questão do trecho inicial da curva ser mais inclinado. Enquanto a parede superior estivesse sendo levantada, parte da pressão aplicada pelo macaco superior estaria sendo utilizada para isso e apenas uma parte estaria sendo transmitida para a região testada da parede, camuflando um comportamento mais rígido.

A hipótese será testada comparando-se o peso próprio da alvenaria acima do macaco e da força correspondente da pressão aplicada pelo macaco. Considera-se que metade da pressão aplicada pelo macaco superior seja direcionada para baixo e metade para cima. A força aplicada na direção superior então seria: $0,35 \times 0,027 \times 0,39 \times 1000 / 2 = 1,84 \text{ kN}$, sendo 0,35 a

pressão média do macaco para mudança da curva (entre 0,3 a 0,4 MPa), 0,027 e 0,39 cm as dimensões da face do bloco que o macaco agia.

Enquanto que o peso próprio da parte superior da parede era: $14 \times 1,60 \times 0,59 \times 0,14 = 1,85$ kN, sendo: 14 kN/m^3 o peso específico da alvenaria de blocos de concreto e 1,60, 0,59 e 0,14 as medidas em metro da parcela da parede. Nas paredes 3 e 4, a pressão a que isso ocorreu foi menor, cerca de 0,2 MPa, porém a área de atuação de força era maior (duas faces do bloco). Logo, pela comparação de valores entre a força teórica a que o macaco estaria aplicando na direção superior e o peso da alvenaria, é possível confirmar a hipótese inicialmente levantada (1,84 kN da força aplicada e 1,85 kN do peso da parede).

Já com relação à linearidade do segundo trecho da curva, avalia-se a proximidade da pressão máxima aplicada com a tensão resistente calculada da parede. A parede 2 apresentava resistência teórica de 3,25 MPa (conforme já discutido anteriormente) e a pressão máxima aplicada na alvenaria foi de 2,55 MPa. Assim, teoricamente, alcançou-se 78% da tensão de ruptura, proporção em que o comportamento linear da alvenaria ainda é usualmente mantido.

4.5.2 Fissuras após os ensaios

Em todos os ensaios realizados, fissuras foram observadas durante e após a sua execução. A abertura dessas fissuras dependeu se a carga era ou não excêntrica e da intensidade da pressão aplicada.

Em geral, essas fissuras ocorreram alinhadas com o macaco, tanto o superior, quanto o inferior, sendo essas resultantes da separação do bloco com a argamassa, ocorrendo nessa interface. Não foram identificadas fissuras na região de alvenaria analisada (confinada pelos dois macacos), apenas na alvenaria ao redor dessa região.

A causa mais provável para isso é a movimentação da parede ao redor da região testada, ocasionada pelo levantamento da parte superior da alvenaria. Outro fator que pode ter contribuído nas paredes 1 e 2 é a flexão decorrente do carregamento excêntrico, gerando esforços de tração.

4.5.3 Módulo de elasticidade

Através das curvas tensão por deformação apresentadas, observa-se que, em todos os casos, ocorreu um comportamento linear. Desse modo, a curva tensão por deformação foi aproximada por uma reta obtida pela linha de tendência dos pontos da curva. O módulo de elasticidade pode ser calculado pela inclinação dessa reta. Esses módulos são referentes à área

líquida, ou seja, as tensões consideradas foram calculadas com o valor apenas da área de aplicação das pressões.

Para a parede 1, os módulos considerados são 9958 MPa e 9279 MPa para os ensaios A e B, respectivamente. Para a parede 2, os módulos são: 9093 MPa e 9390 MPa para A e B. Para a parede 3: 8867 MPa. Para a parede 4: 9897 MPa.

Os valores de módulo obtidos com os testes de macacos planos foram comparados com os valores de referência para encontrar a precisão da técnica sobre os valores esperados. Os valores de referência foram os valores teóricos (obtidos a partir da resistência dos prismas) e dos resultados obtidos com os testes das amostras de parede na prensa hidráulica.

4.5.4 Estimativa da resistência da parede

Conforme discutido, há várias maneiras de se estimar a resistência à compressão de uma parede em alvenaria estrutural pela técnica de macacos planos sem a necessidade de ruptura da parede. Neste trabalho, a estimativa da resistência será obtida com base em correlação com o valor do módulo de elasticidade.

Wo e Schuller (2008) e Schuller (2001) analisaram inúmeros ensaios práticos, apontando a relação entre 435 e 460 entre o módulo e a resistência à compressão para amostras de tijolos. Hamid (2013) aponta a sugestão do valor de 900 para correlacionar o módulo e a resistência. A ABNT NBR 15961:1-11 cita coeficientes que variam com a unidade da alvenaria estrutural, para blocos de concreto, o valor sugerido é de 800, ou seja, que o módulo é, aproximadamente, 800 vezes a resistência do prisma. Por se tratar da alvenaria utilizada neste trabalho, essa será a correlação utilizada.

Assim, a resistência do prisma pode ser diretamente calculada pelo módulo de elasticidade obtido nos testes. Porém, a propriedade de interesse é a obtenção da resistência da parede como um todo. ABNT NBR 15961:1-1 cita que uma correlação possível de resistências do prisma e da parede é de 0,7.

As equações a serem utilizadas são apresentadas a seguir, sendo as equações (12), (13), (14) e (15). Sendo, E: módulo de elasticidade, f_p : resistência do prisma, f_m : resistência da parede.

$$(12) \quad E = 800 \times f_p;$$

$$(13) \quad f_m = 0,7 \times f_p;$$

$$(14) \quad f_m = 0,7 \times E / 800$$

$$(15) \quad f_m = E / 1142,9$$

Assim, a estimativa da resistência à compressão da parede será calculada para cada um dos testes realizados.

Parede 1, ensaio A, $E = 9958$ MPa. $f_m = 8,71$ MPa.

Parede 1, ensaio B, $E = 9279$ MPa. $f_m = 8,12$ MPa.

Parede 2, ensaio A, $E = 9093$ MPa. $f_m = 7,96$ MPa.

Parede 2, ensaio B, $E = 9390$ MPa. $f_m = 8,22$ MPa.

Parede 3, $E = 8867$ MPa. $f_m = 7,76$ MPa.

Parede 4, $E = 9897$ MPa. $f_m = 8,66$ MPa.

4.5.5 Propriedades obtidas com os testes experimentais

As propriedades obtidas com os testes experimentais com macacos planos e já apresentados são resumidos na Tabela 17. Na tabela, apresentam-se os valores de módulo de elasticidade calculados pela área bruta do bloco, assim como uma estimativa da resistência à compressão da parede, calculada com base no módulo.

Tabela 17: Propriedades obtidas através da técnica de macacos planos.

		Módulo de elasticidade	Resistência estimada da parede
		(MPa)	(MPa)
Parede 1	Ensaio A	9958	8,71
	Ensaio B	9279	8,12
Parede 2	Ensaio A	9093	7,96
	Ensaio B	9390	8,22
Parede 3	Ensaio A	8867	7,76
Parede 4	Ensaio A	9897	8,66

Os resultados resumidos na tabela podem ser avaliados pela comparação dos valores para uma mesma parede, para paredes diferentes com ensaios iguais e entre as paredes como um todo.

A primeira comparação feita é entre os ensaios A e B das paredes 1 e 2, verificando a influência da configuração do rasgo. Outra comparação é entre os valores do mesmo ensaio, ou seja, ensaio A das paredes 1 e 2 e o ensaio B das duas paredes. Por fim, pode-se comparar

os valores das paredes 3 e 4. Não é possível uma comparação entre as paredes 1 e 2 com as 3 e 4, já que tratam de testes com princípios diferentes de aplicação de pressão.

Os dois ensaios da parede 1 apresentaram uma variação de cerca de 7% entre eles, sendo que o ensaio A levou a uma resposta mais rígida da estrutura. Já os dois ensaios da parede 2 apresentaram uma variação bem menor, cerca de 3%, mas nesse caso, o ensaio B levou a um comportamento mais rígido.

Comparando o ensaio A da parede 1 com o A da parede 2, houve uma diferença de aproximadamente 9%. Já comparando os valores do ensaio B nas duas paredes, os módulos foram muito próximos, com uma diferença próxima de 1%.

As paredes 3 e 4 também foram construídas no mesmo dia e utilizaram os mesmos materiais. Porém a variação dos resultados obtidos entre elas foi de cerca de 12%.

Os valores comparados são resumidos na Tabela 18, em que se apresenta a diferença percentual entre os testes com macacos planos.

Tabela 18: Diferenças entre os valores obtidos com macacos planos nos testes nas paredes.

Parede	Ensaio	Diferença
1 e 2	A	9,5%
1 e 2	B	1,2%
1	A e B	7,3%
2	A e B	3,3%
3 e 4	A	11,6%

As diferenças entre os ensaios A e B não foram conclusivas, não permitindo verificar qual configuração de rasgo levou a uma resposta mais ou menos rígida. Espera-se que a configuração B leve a resultados mais precisos, pela restrição do bulbo, porém nesse caso a destrutividade do teste aumenta, aumentando também os retrabalhos a serem feitos após o fim do teste.

Porém, a diferença entre eles é relativamente pequena, de modo que análises posteriores foram feitas com base na média entre os valores obtidos em A e em B, obtendo-se um valor único para a parede 1 e um valor para a parede 2. Esses valores são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19: Valores médios obtidos com macacos planos.

	Módulo de elasticidade	Resistência estimada da parede
	(MPa)	(MPa)
Parede 1	9619	8,42
Parede 2	9242	8,09
Parede 3	8867	7,76
Parede 4	9897	8,66

Para uma análise mais geral, a média entre os valores das paredes 1 e 2 pode ser feita, assim como a média das 3 e 4. A média é justificável pois se tratam de paredes construídas e testadas no mesmo dia, com o mesmo tipo de teste (pressão em uma aba do bloco e nas duas abas). A média visa diminuir a variabilidade natural da técnica, obtendo um valor mais consistente para comparar com os valores de referência.

4.5.6 Comparação entre os testes

Nos testes com macacos planos, o módulo de elasticidade foi obtido através da curva tensão por deformação encontrada nos dados de leitura. A partir do módulo, a resistência à compressão da alvenaria foi estimada. Os valores médios foram apresentados na Tabela 19.

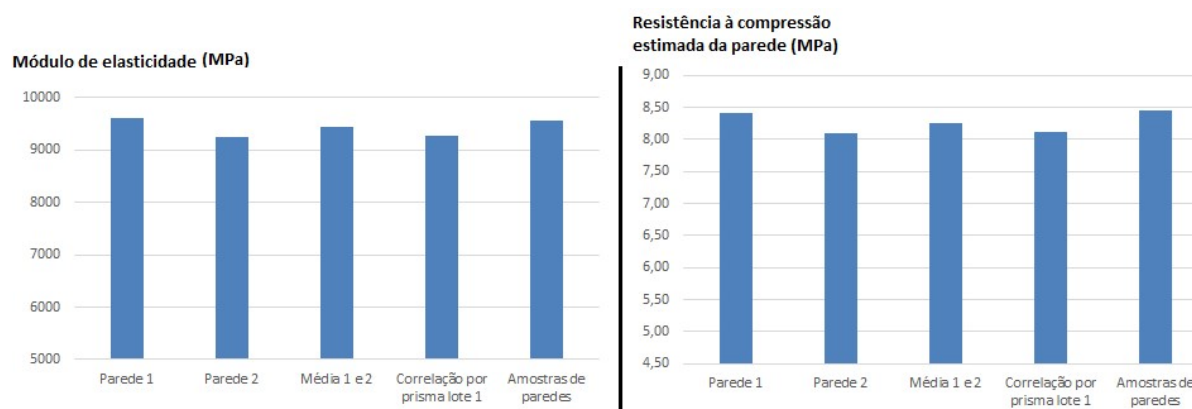
Para verificar a precisão dos testes, é necessário realizar a comparação das propriedades obtidas com valores de referência. A Tabela 20 resume os dados obtidos nos diferentes testes realizados. Os dados das paredes 1, 2, 3 e 4 são referentes aos testes com macacos. Os dados obtidos nos prismas foram calculados por correlações sugeridas na literatura, de modo que o lote 1 representa as paredes 1 e 2, e o lote 2, as paredes 3 e 4. Propriedades foram obtidas com as amostras retiradas das paredes, uma média entre as duas amostras foi feita, sendo apresentada na tabela.

Tabela 20: Propriedades da alvenaria pelos diferentes testes.

	Módulo de elasticidade (MPa)	Resistência estimada da parede (MPa)
Parede 1	9619	8,42
Parede 2	9242	8,09
Parede 3	8867	7,76
Parede 4	9897	8,66
Média paredes 1 e 2	9431	8,26
Média paredes 3 e 4	9382	8,21
Correlação por prisma lote 1	9280	8,12
Correlação por prisma lote 2	8960	7,84
Amostras de paredes	9558	8,45

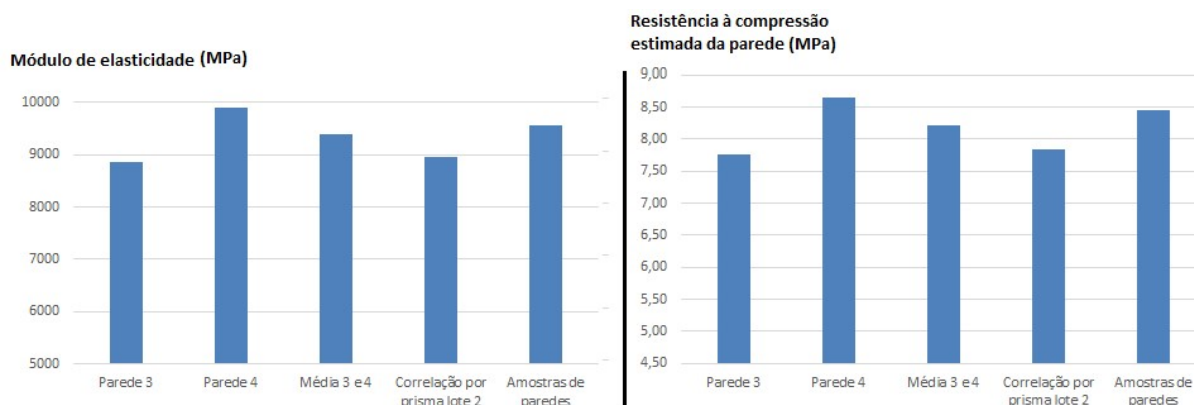
A comparação visual desses valores é facilitada pela apresentação em histogramas. O histograma referente às paredes 1 e 2 é apresentado na Figura 132. Já o histograma referente às paredes 3 e 4 é apresentado na Figura 133.

Figura 132: Valores de módulo e resistência obtidos em diferentes testes para as paredes 1 e 2



Fonte: Próprio autor.

Figura 133: Valores de módulo e resistência obtidos diferentes testes para as paredes 3 e 4.



Fonte: Próprio autor.

A partir dos valores apresentados na Tabela 20, a diferença entre os testes pode ser calculada pela variação entre os valores. Os valores das paredes 1 e 2 foram comparados com os valores da correlação por prisma do lote 1 e da média das amostras das paredes testadas na prensa. Já os dados das paredes 3 e 4 foram comparados com os valores da correlação por prisma do lote 2 e da média das amostras das paredes.

A Tabela 21 apresenta a diferença entre os valores obtidos nos testes com macacos planos e os valores de referência. A diferença foi positiva quando o valor obtido por macacos foi superior ao valor de referência, e negativa quando foi inferior.

Tabela 21: Diferenças entre os valores obtidos pelos macacos planos com os valores de referência.

	Com relação ao valor por prisma		Com relação ao valor por amostras	
	Para módulo	Para resistência	Para módulo	Para resistência
Parede 1	2,0%	2,0%	0,6%	-0,4%
Parede 2	-2,0%	-2,0%	-3,3%	-4,3%
Parede 3	-5,5%	-5,5%	-7,2%	-8,2%
Parede 4	5,5%	5,5%	3,5%	2,5%
Média 1 e 2	1,6%	1,7%	-1,3%	-2,3%
Média 3 e 4	4,7%	4,7%	-1,8%	-2,8%

4.5.7 Análise comparativa

Através dos resultados apresentados na Tabela 18, a variabilidade da técnica pode ser verificada quando se comparam as propriedades obtidas em paredes com características semelhantes.

A primeira comparação feita para os ensaios A e B, que foram realizados com configurações de rasgos diferentes nas juntas da alvenaria. A maior diferença obtida foi de 7,3%, podendo ser considerada uma diferença pequena. O ensaio A ora levou a um módulo maior e ora a um módulo menor, não permitindo conclusões a esse respeito. A configuração A já é considerada como eficiente para limitar o bulbo de tensões, de modo a ser a recomendada, já que necessita de uma região de rasgo menor, resultando em menores alterações das condições iniciais da alvenaria.

A segunda comparação é verificar a diferença de valores para paredes com características semelhantes, ou seja, a parede 1 com a 2, e a parede 3 com a 4. Com essa avaliação, a variabilidade da técnica pode ser medida. A maior diferença ocorreu entre as paredes 3 e 4, com uma variação de 11,6%.

A média das paredes 1 e 2 pode ser comparada com a média das paredes 3 e 4. Apesar de serem amostras ensaiadas com dias de cura diferentes, uma comparação pode ser feita, permitindo avaliar a diferença entre os resultados obtidos com macacos em uma face apenas e nas duas faces. Os valores foram extremamente próximos, com uma variação de, aproximadamente, 0,5%, indicando a concordância de ambos os princípios de teste.

Analisando os dados da Tabela 21, observa-se que tanto os valores de módulo de elasticidade, quanto de resistência à compressão das paredes apresentaram resultados muito próximos aos valores de referência.

Analisando-se as paredes individualmente, nota-se que a técnica de macacos planos ora superestimou o módulo e a resistência e ora subestimou com relação aos valores de comparação.

Para o teste com macacos em uma face do bloco (paredes 1 e 2), a máxima variação com os valores de comparação foi de 3,3% para o módulo de elasticidade e 4,3% para a resistência da parede. Quando se considera a média entre as duas paredes, a variação máxima cai para ambas as propriedades, sendo 1,6% para o módulo e 2,3% para a resistência.

Já para o teste com macacos nas duas faces do bloco (paredes 3 e 4), a maior diferença quanto aos valores de referência para o módulo foi de 7,2%, e para a resistência foi de 8,2%. Considerando a média entre as duas paredes, a diferença máxima foi de 4,7% para o módulo de elasticidade e para a resistência à compressão.

Nota-se que os valores obtidos pela média entre paredes com características semelhantes se mostraram mais próximos aos valores de comparação: obtidos pelo prisma e pelas amostras

testadas na prensa. A possível razão para isso é que a média reduz a variabilidade natural da técnica, obtendo valores mais confiáveis. Assim, recomenda-se que em análises com macacos planos, mais de um ponto da parede deve ser testado, para que a média entre os valores seja calculada.

Esses valores se mostram extremamente próximos, visto os valores de referência apresentados na literatura. Noland, Atkinson, Kingsley e Schuller (1990) afirmam que, segundo inúmeros resultados práticos, a precisão costuma ser de 15% para o valor do módulo de elasticidade. Já Gregorczyk e Lourenço (2000) apresentam a variação de mais ou menos 24% para o módulo obtido pela técnica convencional.

Apesar dos valores obtidos no teste em que se aplica carga em apenas uma face apresentar boa concordância com os valores de referência, para este trabalho, recomenda-se o teste em que se aplica nas duas faces. O teste realizado nas duas faces é mais trabalhoso e demorado, porém, o fato de se carregar a parede de maneira simétrica, reduz as incertezas do comportamento da parede, tendendo a esforços de compressão pura na região analisada da parede.

5 CONCLUSÕES

Através das informações obtidas neste trabalho e das análises dos resultados de ensaios, algumas conclusões podem ser apresentadas. As conclusões são divididas por temas.

5.1 *Equipamento de macaco plano desenvolvido*

- A fabricação e a validação de um novo modelo de macaco plano para a aplicação em blocos vazados de concreto de concreto foram possíveis. O fator de rigidez interno pode ser obtido, relacionando as pressões internas e externas do macaco; e
- O modelo desenvolvido teve comportamento eficiente para a aplicação de pressão de até 30 MPa. No teste com macacos nas duas faces do bloco, a força aplicada pelos macacos permitiria ensaiar até valores próximos da ruptura paredes de blocos com resistência de 20 MPa. Assim, há a possibilidade de testes com macacos planos em alvenarias de alta resistência.

5.2 *Testes de macacos planos em alvenarias de blocos vazados*

- A aplicabilidade da técnica de macacos planos em alvenaria de blocos vazados com o equipamento desenvolvido foi comprovada com os testes em paredes. Nesses testes, os macacos não aplicaram pressão em áreas fora do bloco e nem apresentaram vazamentos;
- Duas configurações de rasgos na alvenaria foram verificadas, não sendo identificadas diferenças significativas entre elas. A configuração do ensaio A, em que se adicionam rasgos nas juntas verticais é sugerido, pois limita o bulbo de tensões e danifica menos a parede a ser testada;
- Dois tipos de testes com macacos planos foram possíveis de serem realizados: macacos aplicados em apenas uma face horizontal do bloco e macacos nas duas faces do bloco;
- No teste com macacos em uma face horizontal, a remoção das juntas foi necessária em uma face da parede apenas, além disso, o teste se mostrou mais rápido e prático. Entretanto, houve necessidade de controle de deformações nas duas faces da parede,

tensões associadas à flexão foram observadas na parede, além da presença de fissuras em uma das faces; e

- No teste com macacos nas duas faces do bloco, as deformações foram lidas em uma das faces apenas, sendo observadas flexões e as fissuras apresentaram abertura muito pequena. Porém, o rasgo nas juntas deve ser feito nas duas faces da parede, tornando o teste mais trabalhoso, com alterações maiores na configuração original da parede.

5.3 Valores obtidos com os testes de macacos planos

- O valor do módulo de elasticidade nas amostras de paredes pôde ser obtido com os dois testes distintos de macacos planos. Através desse valor, uma estimativa da resistência à compressão da parede foi calculada;
- Os valores obtidos com os testes de macacos planos foram avaliados quanto à variabilidade, comparando os valores obtidos nesses testes com outros obtidos em ensaios de prismas com características semelhantes. A maior diferença encontrada foi de 11,6%, considerada adequada para uma técnica não destrutiva;
- Os módulos de elasticidade e as estimativas de resistência obtidas com macacos planos foram comparados com os valores de referência obtidos por testes de prismas e por amostras de paredes em prensa. Os testes de macacos ora superestimaram e ora subestimaram as propriedades com relação aos valores de referência;
- Considerando os dois princípios de testes diferentes com macacos planos, a maior diferença de módulo de elasticidade com relação aos valores de referência foi 7,2%. Porém quando se considera a média de valores para paredes com características semelhantes, a maior diferença foi menor que 5%;
- Considerando os dois princípios de testes diferentes com macacos planos, a maior diferença de resistência à compressão com relação aos valores de referência foi 8,2%. Porém quando se considera a média de valores para paredes com características semelhantes, a maior diferença foi menor que 5%; e
- Assim, recomenda-se a realização de, pelo menos, dois testes para paredes com características semelhantes, permitindo obter um valor médio, o qual se mostrou mais próximo dos valores de referência.

5.4 Conclusões gerais

- O estudo como um todo demonstrou a funcionalidade do equipamento desenvolvido e dos procedimentos adotados para o teste, mostrando a viabilidade da técnica de macacos planos em alvenarias de blocos vazados de concreto.

5.5 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Existe uma demanda prática de avaliação estrutural para alvenarias de blocos vazados, de modo que macacos planos poderiam ser aplicados nesse caso. Um equipamento e procedimentos capazes para essa avaliação foram desenvolvidos. Isso indica a potencialidade da técnica para avaliações não destrutivas em alvenarias modernas. Trabalhos futuros podem ser realizados afim de validar a técnica, apresentando mais valores de precisão e variabilidade para o teste de deformabilidade com os equipamentos propostos.

- A aplicação da técnica em um número grande de amostras de paredes com as mesmas propriedades de blocos vazados é desejável. Essa aplicação permitiria um estudo mais completo sobre a variabilidade dos resultados obtidos com os novos equipamentos em estruturas praticamente semelhantes;
- Testar destrutivamente uma amostra de parede com a mesma configuração da utilizada no teste com macacos. Nesse teste, as propriedades de módulo de elasticidade e resistência seriam obtidas, podendo ser diretamente comparadas com as propriedades obtidas nos testes com macacos. Por ser uma parede com as mesmas dimensões, as propriedades de comparação não seriam estimadas, mas sim correspondentes à uma estrutura semelhante. Essa comparação permitiria verificar a precisão dos dados obtidos com os novos macacos;
- Análise do teste com o novo macaco plano envolvendo diferentes configurações de alvenaria. Nessa análise, testes com a técnica seriam realizados em diferentes paredes, alterando as dimensões e valor de resistência dos blocos entre elas. Uma outra opção é incluir paredes com blocos cerâmicos nesses testes. Assim, praticamente toda a gama usualmente utilizada de alvenaria estrutural estaria contemplada nessa análise, verificando a aplicabilidade da técnica em todos esses casos;
- Simulação do teste em alvenaria moderna em modelos numéricos. A análise desse modelo poderia facilitar o entendimento da distribuição de tensão na parede durante o

teste, assim como a influência de cada configuração de rasgo nas juntas. Nesse modelo, as diferentes fases do teste poderiam ser analisadas, verificando as consequências da abertura do rasgo nas juntas e a simulação de aplicação de tensão pelos macacos. Também seria mais fácil de identificar as diferenças na distribuição de tensão na parede entre os testes com macacos em uma das abas da parede e nas duas abas;

- Conexão entre as duas abas do macaco através de tubos de inox. Nos testes apresentados, a solução proposta para conexão entre os macacos que atuaram em faces diferentes das paredes foi o uso de mangueiras que passavam por fora da parede. A conexão por mangueiras exigiu o acesso aos dois lados da parede, sendo necessário realizar um número maior de conexões de mangueira e macaco, além de aumentar o risco de vazamentos nessas conexões. Com a conexão entre as duas abas por tubos de inox, a produtividade do teste tende a aumentar e o risco de vazamentos, diminuir;
- Desenvolver uma solução para facilitar a retirada do macaco da junta após a finalização do teste. Em alguns testes, houve grande dificuldade na remoção do macaco devido às expansões que o mesmo sofreu entre as juntas; e
- Aplicação do teste de tensão com o equipamento desenvolvido. Neste trabalho, apenas o teste de deformabilidade foi estudado, porém, uma vez que o equipamento apresentou funcionalidade, o teste de tensão também poderia ser verificado. Desse modo, os dois testes normalizados com a técnica estariam disponíveis para alvenarias de blocos vazados.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ahmed, A.K.F.; Ravisankar, K.; Sundaran, B. A.; Parivall, S.; Kesavan, K. Studies on calibration factor of flat-jack for measuring in-situ stress on concrete bers. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 4. 6 p. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, "Alvenaria estrutural - blocos de concreto. Parte 1: projeto. **NBR 15961-1:11**, 43 p. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, "Alvenaria estrutural - blocos de concreto. Parte 2: execução e controle de obra. **NBR 15961-2:11**, 14 p. 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, "In-situ compressive stress within solid unit masonry estimated using flat-jack measurements", ASTM Standard **C 1196-09**. 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, "In-situ measurement of masonry deformability properties using flat-jack method", ASTM Standard **C 1197-09**. 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, "Standard test method for in-situ compressive stress within solid unit masonry estimated using flat-jack measurements", ASTM Standard **C 1196-91**. 2001.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, "Standard test method for in-situ measurement masonry deformability properties using the flat jack method", ASTM Standard **C 1197-91**. 1991.

Bernardo, J.A. Modelagem numérica de ensaios de macacos planos de grande área (LFJ) para determinação da deformação de maciços rochosos. Dissertação de Mestrado em **Engenharia Civil**. Universidade Nova Lisboa. 171 p. 2011.

Binda, L.; Saisi, A. State of the Art of Research on Historic Structures in Italy. Department of **Structural Engineering of Politecnico of Milan**. 51 p. 2001.

Binda, L.; Saisi, A.; Zanzi, L. Sonic tomography flat-jack test as complementary investigation procedures for the stone pillars of the temple of S. Nicolo l' Arena (Italy). in **NDT&E International 36**. p. 215-227. 2003.

Binda, L.; Tiraboschi, C. **Flat-jack methods applied to historic masonry**. RILEM TC 177-MDT International Workshop On-site control and nondestructive evaluation of masonry structures, Itália. 2001.

Binda, L.; Tiraboschi, C. **Flat-jack test: a slightly destructive technique for diagnosis of brick and stone masonry**. 14 p. 2013. <<http://www.stru.polimi.it/home/binda/lav246.PDF>>

Bolhassani, M.; Hamid, A.; Lau, A.C.W.; Moon, F. Simplified micro modeling of partially grouted masonry assemblages. **Construction and Building Materials**. P. 159-173. 2015.

Carvalho, J. M. Investigação experimental e numérica aplicada a um edifício caixão da região metropolitana do Recife. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. **Universidade Federal de Santa Catarina**. 355 p. 2010.

Epperson, G.S. Abrams, D.P. Nondestructive evaluation of masonry buildings. **Advanced Construction Technology Center**, Document 89. 208 p. 1989.

Filipe, M. G. Caracterização de alvenarias antigas. Ensaios de flat Jack. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. **Universidade de Aveiro**. Portugal. 126 p. 2012.

Gelmi, A.; Modena, C.; Rossi, P.P.; Zaninetti, A. **Mechanical characterization of stone masonry structures in old urban nuclei**. in 6th North American Masonry Conference, United States of America. 13 p. 1993.

Gregorczyk, P.; Lourenço, P.B. A review on flat-jack testing. **Engineering Civil, UM, núm 9**. p. 39-50. 2000.

Hamid, A. NDT – Evaluation of masonry structures. in **Encontro Mensal da ABECE**, Brasil. 2013.

Khan, F. Multi-Sensing NDT Approaches for Inspection of Structural Components. Tese proposta para Doutorado na **Drexel University**. 81 p. 2014.

Khan, F.; Bolhassani, M.; Kotsos, A.; Hamid, A.; Bartoli, I. Modeling and experimental implementation of infrared thermography on concrete masonry structures. **Infrared Physics & technology**. p. 228-237. 2015.

Landriani, G.S.; Taliércio, A. Numerical analysis of the flat-jack test on masonry walls. **Journal of theoretical and applied mechanics**. Vol. 5, n. 13. P. 313-339. 1986.

Lombillo, L.; Villegas, L.; Fodde, E.; Thomas, C. In situ mechanical investigation of rammed earth: Calibration of minor destructive testing. **Construction and Building Materials**, n. 51. P. 451-460. 2014.

Maier, L.B.; Rossi, P.P.; Landriani, G.S. **Diagnostic analysis of masonry buildings.** In 1ASBE Symposium, Italia. 8 p. 1983.

McCann, D.M.; Forde, M.C. Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures. in **NDT&E International 34**, Italia. p. 74-81. 2001.

Miranda, L.F.B. Ensaaios acústicos e de macacos planos em alvenarias resistentes. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. **Faculdade do Porto.** 259 p. 2011.

Noland, J.L.; Atkinson, R.J.; Schuller, M.P. **A review of the flatjack method for nondestructive evaluation.** 15 p. 1990.

Noland, J.L.; Atkinson, R.J.; Kingsley, G.R.; Schuller, M.P. **Nondestructive evaluation of masonry structures.** 180 p. 1990.

Parivallal, S.; Kesavan, K.; Ravisankar, K.; Sundram, B.A.; Ahmed, A.K.F. Evaluation of in-situ stress in masonry structures by flat jack technique. in **Proceedings of the National Seminar & Exhibition on Non-destructive Evaluation**, India. 8 p. 2011.

RILEM Lum D.2: In-situ stress based on the flat jack. 1990.

RILEM Lum D.3: In-situ strength and elasticity test based on the flat jack. 1990.

RILEM MDT.D.4: Rilem Recommendation **MDT.D.4** - In situ stress tests behavior based on the flat jack. 2004

RILEM MDT.D.5: Rilem Recommendation **MDT.D.5** - In situ stress-strain behavior based on the flat jack. 2004.

Ronca, P. The Significance of the Gauging System in the Flatjack In-Situ Stress Test for Masonry: Experimental Investigation. **The Masonry Society Journal**, vol. 14, n. 1. 1996.

Roque, J.C.A.; Lourenço, P.B. Caracterização mecânica de paredes antigas de alvenaria. Um caso de estudo do centro histórico de Bragança. **Engenharia Civil – UM**, n. 17, p. 31-42. 2003.

Rossi, P.P. **Analysis of Mechanical Characteristics of Brick Masonry Tested by means of nondestructive in situ tests.** in 6th International Brick Masonry Conference. 1982

Rossi, P.P. Flat jack test for the analysis of mechanical behavior of brick masonry structures. 1985. in **Miranda 2011**.

Rossi, P.P. **Non destructive evaluation of the mechanical characteristics of masonry structures**. in Conference Non destructive evaluation of civil structures and materials, United States of America. 26 p. 1990.

Schuller, M.P. **Flat-jack methods for diagnosis of modern masonry**. RILEM TC 177-MDT International Workshop On-site control and nondestructive evaluation of masonry structures, Italia. P. 167-178. 2001.

Simões, A.; Gago, A.; Bento, R.; Lopes, M. **Flat-jack tests on old masonry buildings**. in 15th International Conference on Experimental Mechanics, Portugal. 14 p. 2012.

Soriani, M.O.; Sanches, E.R.; Parsekian, G.P.; Schuller, M.P. **An overview on the use of flatjack testing**. 12th North American Masonry Conference, United States of America. 12 p. 2015.

Soriani, M.O.; Canato, R.L.; Pasquantoni, R.D.; Parsekian, G.A. Teste de deformabilidade utilizando a técnica de macacos planos em patrimônio histórico de Bananal. **23112.000392/2014-59 Technical Report, UFSCar**. 2014

Suprenant, B.C.; Schuller, M.P. **Nondestructive evaluation & testing of masonry structures**. 194 p. 1994.

Targa L.A; Ballarin, L.W.; Biaggioni, M.A.M. Avaliação do módulo de elasticidade da madeira com uso do método não-destrutivo de vibração transversal. **Engenharia Agrícola, Jabotical**, vol. **25**. p. 291-299. 2005.

Turner, S.E. Evaluation of the flat-jack test as in-situ shear test of masonry. Tese de mestrado em Engenharia Civil apresentada a **Georgia Institute of Technology**. 104 p. 1992.

Vanniamparambil, P.A.; Bolhassani, M.; Carmi, R.; Khan, F.; Bartoli, I.; Moon, F.L.; Hamid, A.; Koutsos, A. A data fusion approach for progressive damage quantification in reinforced concrete masonry walls. **Smart Materials and Structures**. 11 p. 2014.

de Versey, B. **In situ evaluation of the physical and chemical state of masonry structures**. RILEM TC 177-MDT International Workshop On-site control and non destructive evaluation of masonry structures, Italia. 2001.

Wo, S.; Schuller, M.P. **Estimating compressive strength of historic unreinforced masonry using flat-jack deformability tests.** in Conference 12th International Structural Faults & Repair Conference, Escócia. 8 p. 2008.

Woodham, D.B.; Schuller, M.P. **Development of a flexible flat-jack for quantitative evaluation of masonry.** in Conference 9th North American Masonry Conference, United States of America. 8 p. 2003.