

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE PAREDES EM ALVENARIA ESTRUTURAL COM BLOCOS CERÂMICOS SOBRE BASE ELÁSTICA E RÍGIDA

Renata Peres Krum

Engenheira Civil, Cascavel/PR

Ricardo Bernardi

Engenheiro Civil, Cascavel/PR

Gilmar Fabro

Técnico ITAIPU, Foz do Iguaçu/PR

MEng. Fábio Luiz Willrich

Professor UNIOESTE, Cascavel/PR

Dr. Humberto Correia Lima Júnior

Professor UFPE, Caruaru/PE

RESUMO

Neste trabalho foi realizada uma análise experimental da resistência à compressão de paredes de alvenaria estrutural em blocos cerâmicos, em escala real, assentados sobre dois tipos de base: rígida e elástica. Foram ensaiadas seis paredes com as seguintes dimensões: 2,0 m de largura, 2,6 m de altura e largura de acordo com o tipo de unidade utilizada. Três tipos de blocos cerâmicos foram utilizados e caracterizados: blocos estruturais com 12 e 21 furos na vertical e blocos de vedação com 6 furos na horizontal. Medidas experimentais de carga-deformação foram realizadas durante os ensaios de compressão axial. Os resultados mostraram o comportamento diferenciado para as paredes sob base rígida e elástica. As paredes sob base rígidas apresentaram colapso por compressão uniforme, já as sob base elástica por ruptura nas extremidades sobre os apoios. Em adição, observou-se uma capacidade resistente muito inferior para as paredes sob base elástica.

ABSTRACT

In this work an experimental analysis of the compression strength of structural masonry was carried. The wall was made with ceramic blocks with two types of base: rigid and elastic. Six walls were cast with 2.0 m length, 2.6 m high and width in accordance with the type of used unity. Three types of ceramic blocks were used and characterized: structural blocks with 12 and 21 vertical holes and fence blocks with 6 horizontal holes. Experimental measures of load and displacement were carried out during the compression tests. The results showed different behavior between the walls on rigid and elastic base, for the first the collapse was characterized by uniform compression and for the second by extremities rupture in the supports. In addition, an inferior strength capacity of walls on elastic base was verified.

1. INTRODUÇÃO

Com o mercado mais competitivo a necessidade de otimização dos processos e redução dos custos levou os construtores a buscar soluções alternativas atraentes nos diversos segmentos da construção civil. O sistema construtivo em alvenaria estrutural apresenta-se simples e econômico quando utilizado integralmente e de forma racional na construção. Barbosa ¹ cita que apesar da larga utilização da alvenaria estrutural, os métodos de dimensionamento são ainda conservadores e não exploram todas as suas potencialidades. Neste processo construtivo, os elementos que desempenham a função estrutural são as paredes de blocos cerâmicos estruturais que são solicitados predominantemente por esforços de compressão, os quais geram tensões internas, normais e cisalhantes. Com isso, torna-se necessário o conhecimento da distribuição dos esforços e dos pontos de tensões máximas para um correto dimensionamento estrutural, Holanda Jr ².

A alvenaria estrutural é definida como sendo um componente conformado em obra, constituído por tijolos ou blocos unidos entre si por juntas de argamassa, formando um conjunto rígido e coeso, Silva ³. Segundo Camacho ⁴, é o processo construtivo no qual os elementos que desempenham a função estrutural são de alvenaria, sendo os mesmos projetados, dimensionados e executados de forma racional.

A alvenaria é uma das formas de construção mais antigas já utilizadas pelo ser humano, através do emprego de blocos de pedras utilizados pelos egípcios, gregos e romanos na construção de igrejas, fortalezas e pirâmides. Grandes obras foram construídas no decorrer dos séculos utilizando-se a alvenaria, entretanto, as construções daquela época eram executadas segundo regras puramente empíricas e intuitivas, baseadas nos conhecimentos adquiridos ao longo do tempo e somente no século passado foram desenvolvidas teorias racionais visando o dimensionamento das edificações. Um marco foi o Monadnock Building, o maior edifício comercial com 16 pavimentos (65m de altura), construído na cidade de Chicago, entre 1889 e 1891, cujas paredes do térreo possuem 180 cm de espessura.

A partir do século XX, com o advento do concreto armado, que possibilitou construir estruturas mais esbeltas, com grandes vãos e alturas, com peças de dimensões reduzidas, houve a redução da utilização da alvenaria estrutural como sistema construtivo. *A partir disso*, as pesquisas e o desenvolvimento da alvenaria se estagnaram e neste período a sua utilização ficou relegada às construções de pequeno porte. No *Brasil*, o estado de São Paulo, foi o seu precursor da alvenaria estrutural, em torno de 1966, com a construção dos primeiros prédios. A produção de blocos estruturais cerâmicos no Brasil, iniciou-se em 1980, quando foram instaladas as primeiras indústrias em solo nacional. A partir de então se inicia o estudo sistemático da alvenaria com a revisão de antigas normas de tijolos de barro cozido e a elaboração das normas específicas.

A utilização deste sistema na construção civil apresenta-se como uma técnica eficiente e econômica bastante aplicada em construções de conjuntos habitacionais e edifícios, além de ser empregada em obras de arte e estruturas sob cargas de compressão em forma de arcos. Sua utilização racional torna esta técnica muito vantajosa com relação à rapidez e economia, uma vez que sua execução é bem simplificada, devido à menor diversidade de materiais empregados e redução de mão-de-obra. Enquanto pilares, vigas, lajes e alvenaria de vedação são os principais elementos do sistema construtivo convencional, na alvenaria estrutural as paredes

desempenham a função de vedação e estrutura, havendo assim, uma considerável redução nas etapas e no tempo de execução.

O conveniente emprego da alvenaria estrutural pode trazer as seguintes vantagens técnicas e econômicas: a) simplificação das técnicas de execução; b) menor diversidade de materiais empregados; c) redução da mão-de-obra; d) economia de fôrmas; e) maior rapidez de execução.

De acordo com Manzione ⁵, o sistema construtivo de alvenaria estrutural apresenta as seguintes limitações: a) grandes vãos aumentam a carga nas paredes o que exigem blocos com maiores resistências; b) impossibilidade de eliminação de paredes, a não ser que esta seja prevista rigorosamente no projeto; d) índices de esbeltez elevados e balanços sucessivos requerem muita armadura para combater os esforços atuantes. Há ainda a limitação do projeto arquitetônico pela concepção estrutural, que não permite a construção de obras arrojadas e a impossibilidade de adaptação da arquitetura para novo uso.

A alvenaria estrutural é classificada de acordo com o processo construtivo e materiais utilizados, como: a) alvenaria estrutural armada; b) alvenaria estrutural não armada; c) alvenaria estrutural parcialmente armada; d) alvenaria estrutural protendida; e) alvenaria estrutural de tijolos ou de blocos e f) alvenaria estrutural cerâmica ou de concreto.

Com relação à função estrutural, as paredes de alvenaria podem estar sobre apoios contínuos, como sapatas corridas, ou discretos, como fundações sobre estacas e estruturas de pilotis. A transferência de carga vertical da parede para a fundação depende do tipo de apoio. Numa parede sobre apoio contínuo, a carga vertical se distribui de forma praticamente uniforme na sua base, com pequena transferência de carga do centro para as extremidades do vão. Em apoios discretos, a carga da parede tende a caminhar para os apoios de forma bem mais evidente e produzir uma concentração de tensões nesta região. Por essas razões, tenta-se evitar os apoios discretos, embora nem sempre isso seja possível. Muitas vezes, eles se tornam necessários para satisfazer imposições arquitetônicas. Para possibilitar a existência destes vãos livres, torna-se necessária a utilização de pavimentos de concreto armado.

Segundo Holanda Jr ², quando uma parede encontra-se sobre uma base deformável, além de suportar a parede, a viga passa a se comportar como um tirante, impedindo o deslocamento horizontal das extremidades inferiores da parede. Este fenômeno constitui o chamado *efeito arco*. No sistema parede-viga podem surgir tensões verticais de tração na interface entre ambas. Quando essas tensões atingem valores superiores à máxima resistência à tração local, pode ocorrer separação entre a parede e a viga, acentuando ainda mais o efeito arco. A porção dessa interface que permanece em contato é onde acontece a transferência de cargas. Em casos usuais, tanto as tensões verticais quanto as tensões cisalhantes são nulas na região central e crescentes em direção aos apoios. Com relação às tensões horizontais na linha vertical média do sistema, a linha neutra pode se localizar na viga ou na parede. Os fatores que influenciam na posição da linha neutra são basicamente o carregamento e a relação H/L. Para paredes com $H/L > 0,75$, tanto a armadura inferior quanto a armadura superior da viga, encontram-se tracionadas. Devido aos esforços de tração na viga, costuma-se dizer que uma parede sobre viga bi-apoiada sujeita a carregamento vertical comporta-se como um arco atirantado. O arco forma-se na parede e a viga funciona como tirante para impedir que o arco se abra. Geralmente paredes mais altas implicam em maiores

concentrações de tensões nos apoios. No entanto, à medida que a altura da parede vai aumentando, a sua influência na distribuição de tensões vai se tornando cada vez menor. Conforme, para paredes com alturas superiores a 70% do vão, mantendo constante a carga total sobre a viga, a configuração do arco permanece inalterada. Nestes casos, o peso da porção de parede acima de $0,7L$ seria considerada apenas como acréscimo de carga. As Figuras 1 e 2 mostram o modelo parede-viga bi-apoiada, Barbosa¹.

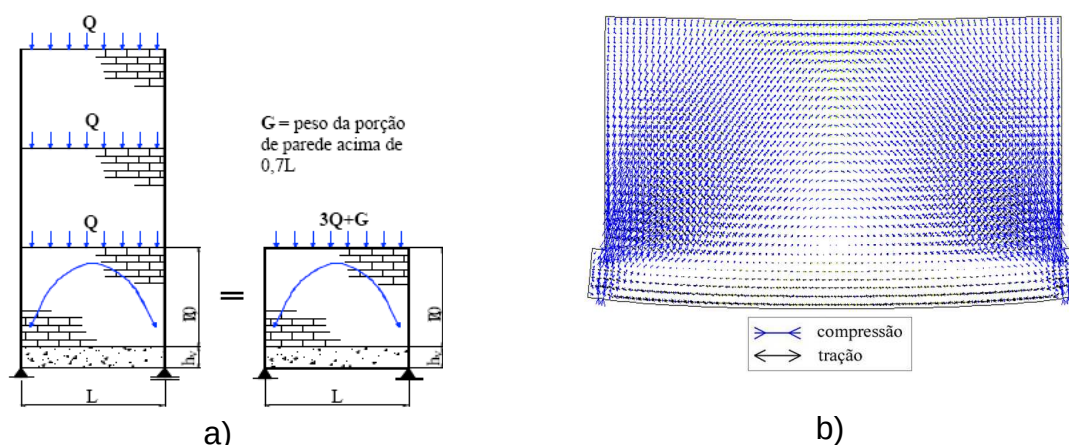


Figura 1 – Modelo parede-viga bi-apoiada: a) efeito arco; b) tensões internas

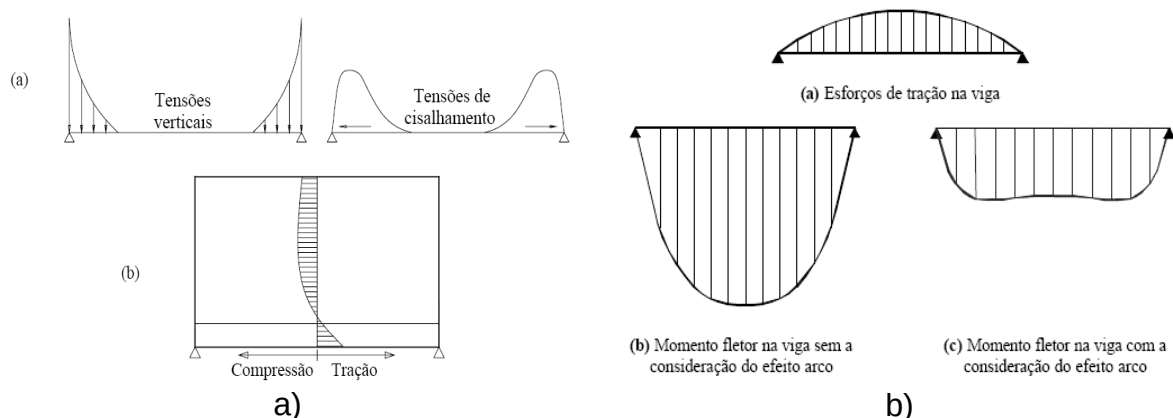


Figura 2 – Modelo parede-viga: a) tensões; b) esforços na viga bi apoiada

Em comparação com as estruturas convencionais em concreto armado, nota-se a necessidade de desenvolver pesquisas, normas e métodos para projeto em alvenaria estrutural, com ênfase para o comportamento em conjunto, da alvenaria de blocos cerâmicos estruturais com as estruturas em concreto armado. Um sistema estrutural com pequena ductilidade como a alvenaria, sofre de forma notável a influência das estruturas sobre as quais se apóiam, que podem apresentar-se como base elástica ou totalmente rígida.

O emprego de blocos cerâmicos estruturais com 12 e 21 furos na vertical e de vedação com 6 furos na horizontal, comumente disponíveis no mercado da região Oeste do Estado do Paraná, por profissionais da área despertou a necessidade de estudos em paredes de alvenaria. O presente trabalho teve como objetivo desenvolver uma avaliação experimental da resistência à compressão de paredes em alvenaria estrutural, utilizando blocos cerâmicos, em escala real. As paredes foram ensaiadas sobre dois tipos de bases: rígida (viga metálica), e elástica (viga em

concreto armado). Os blocos cerâmicos foram caracterizados e avaliados o comportamento estrutural das paredes quanto à capacidade de carga e forma de ruptura.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram confeccionadas um total de 6 paredes em escala real com dimensões de 2,0 m de largura com 2,6 m de altura, assentadas sobre dois tipos de base: rígida e elástica. Foram estudados 3 tipos de blocos cerâmicos: blocos cerâmicos estruturais com 12 e 21 furos na vertical e de vedação com 6 furos na horizontal, coletados de lotes destinados a construção de prédios em alvenaria estrutural na cidade de Cascavel-PR. Estes blocos foram caracterizados conforme NBR15270⁶, segundo suas dimensões e resistência à compressão axial. Em comparação com a resistência individual das unidades, optou-se em avaliar também a resistência à compressão do conjunto de dois blocos, formando um prisma. As características dos blocos utilizados são apresentadas na Tabela 1 e Figura 3.

Tabela 1 – Blocos cerâmicos – caracterização geométrica e mecânica

Bloco cerâmico	Dimensões médias L x H x C (cm)	Resistência à compressão das Unidades (MPa)	Resistência à compressão dos Prismas (MPa)
6 Furos na horizontal	14 x 19 x 9,0	4,02	2,47
12 Furos na vertical	13 x 18 x 9,0	20,56	14,31
21 Furos na vertical	11 x 23 x 9,5	18,254	-

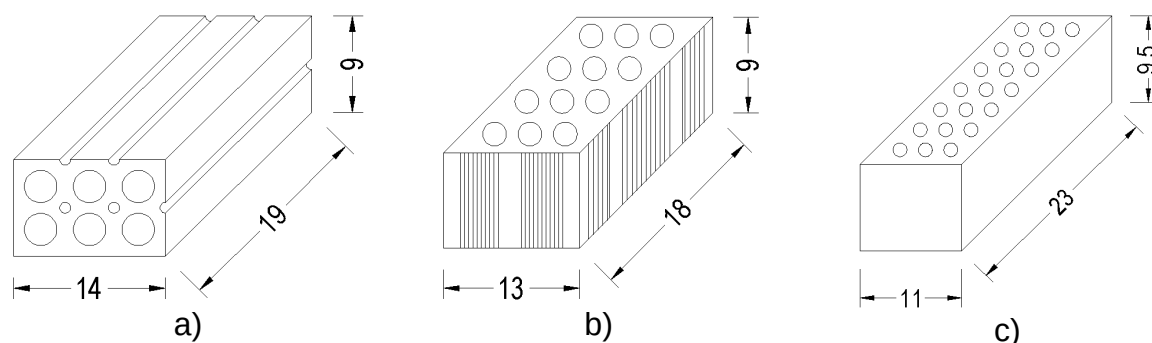


Figura 3 – Blocos na posição de assentamento: a) 6 furos; b) 12 furos ; c) 21 furos

A argamassa de assentamento das paredes foi confeccionada na proporção 1:5 (cimento: areia), com fator água/cimento de 0,70 com aditivo VEDALIT^R da marca Vedacit, em substituição à cal. A resistência à compressão média da argamassa de assentamento foi de 9,40 MPa.

As paredes foram confeccionadas sobre vigas metálicas (base rígida) e sobre vigas de concreto armado (base elástica).

As vigas de base elástica em concreto armado foram confeccionadas previamente com dimensões de 15x40x220 cm (largura x altura x comprimento). O concreto utilizado foi dosado em massa, com traço de 1: 2,2: 3,0 (cimento CII F-32: areia natural: brita 1), fator água/cimento de 0,53, slump 6,0 ± 1,0 cm, e resistência à compressão axial aos 28 dias de 25 MPa. A armadura destas vigas foi a mesma utilizada em um projeto estrutural de um prédio construído em alvenaria estrutural,

constituída de armadura longitudinal com de 3 barras de 12,5 mm de diâmetro na posição inferior e 2 barras de 10 mm de diâmetro posição superior, em aço CA-50, e a armadura transversal composta de estribos de 2 ramos com diâmetro de 6,3 espaçados a cada 15 cm, aço CA-60.

A base rígida foi composta de 2 vigas metálicas de seção caixão (13,5 cm de base por 30,5 cm de altura e 320 cm comprimento), que unidas por solda apresentaram grande rigidez ($EI \approx 70000 \text{ kN.m}^2$). Estas foram acopladas ao sistema de aplicação de carga da prensa, tanto na parte inferior fixa, quanto superior rotulada, para a distribuição uniforme do carregamento.

A mão-de-obra utilizada para o assentamento da alvenaria foi a mesma empregada em obras existentes executadas em alvenaria estrutural. O processo de levantamento das paredes foi realizado a partir do posicionamento, alinhamento e nivelamento das vigas de base previamente confeccionadas. O assentamento se deu sobre as vigas de base, tomando-se o cuidado de manter padronizadas as espessuras horizontais e verticais das juntas, bem como o prumo, nível e alinhamento das paredes. Durante a execução da alvenaria os blocos cerâmicos eram molhados antes do assentamento e ao final do dia, de modo a conferir uma cura mais adequada à argamassa. Os blocos visualmente defeituosos foram descartados, para evitar alterações e regiões enfraquecidas da alvenaria. A modulação das paredes é mostrada na Tabela 2, as quais apresentaram juntas verticais de aproximadamente 1 cm.

Tabela 2 – Modulação das paredes quanto aos blocos cerâmicos

<i>Bloco cerâmico</i>	<i>Altura da parede (cm)</i>	<i>Nº. de Fiadas</i>	<i>Espessura das juntas horizontais</i>	<i>Nº. de blocos por fiada</i>	<i>Total de blocos por parede</i>
6 furos na horizontal	260	25	1,40	10	250
12 furos na vertical	258	24	1,75	10,5	252
21 furos na vertical	260	24	1,35	8,3	204

As paredes receberam uma pintura de cal para melhorar a visualização das fissurações durante o ensaio de compressão. Após levantadas, foi realizado o capeamento da parte superior com vigotas de concreto armado com espessura da parede e altura de 10 cm moldadas sobre as paredes. As vigotas de capeamento apresentaram concreto com resistência à compressão de 25 MPa e taxa de armadura longitudinal de 0,72%. Na Figura 4 é mostrado o assentamento dos blocos, finalizando-se o levantamento das paredes e em seguida a pintura com cal.

O sistema de transporte adotado levou em consideração a necessidade de a parede ser transportada na vertical, sem qualquer inclinação, impactos ou esforços laterais, evitando-se possíveis fissuras ou descolamento entre seus componentes. O transporte ao local de ensaio foi realizado através de um guincho tipo cavalete com rodízios. Com auxílio de tirantes metálicos e uma viga de fixação superior, as paredes foram transportadas suspensas ao guincho. O posicionamento das paredes sobre o carrinho de base da prensa foi realizado com a utilização de uma ponte rolante, e com um sistema de guias acoplado na viga de fixação superior foram levadas à sua posição de ensaio, onde foram centralizadas e alinhadas. Nas Figuras 5 e 6 apresentam-se os procedimentos de transporte e posicionamento das paredes, respectivamente.



Figura 4 – Fase final do assentamento de blocos cerâmicos



Figura 5 – Paredes transportadas para o laboratório

Em virtude das grandes dimensões das paredes, elevado peso próprio e risco de acidentes, foram instalados alguns dispositivos de segurança. Barras laterais reguláveis foram instaladas em ambos os lados das paredes, as quais foram ajustadas com folgas de 20 mm entre suas extremidades e as faces laterais das paredes, permitindo a livre movimentação das paredes durante os ensaios. Além destas, foram ainda colocadas correntes de suspensão para impedir a queda das paredes e dos instrumentos de leitura de deslocamentos instalados. Estas correntes foram fixas na parte superior da prensa e nos pinos de fixação dos relógios com uma pequena folga sem prejudicar as leituras de deslocamentos, Figura 7.

No sentido de uniformizar o contato entre a viga metálica rígida e a vigota de capeamento superior foi disposta uma placa de borracha flexível, com 10 mm de espessura. A aplicação de carga se deu por meio de prensa hidráulica, com capacidade de aplicação de carga de 500 t, com placa inferior de aplicação de carga fixa e placa superior sistema rotulado.



Figura 6 – Posicionamento da parede na prensa hidráulica



Figura 7 – Barras laterais e correntes de segurança

Para o ensaio das paredes foram seguidas as recomendações da NBR8949⁷ e realizadas medidas de deslocamentos verticais, horizontais e diagonais, utilizando-se medidores de deslocamentos. A fixação destes foi feita através de 9 pinos (3 linhas de pinos com 3 pinos cada) introduzidos em cada uma das faces laterais das paredes e engastados com de resina epóxi. Os pinos foram posicionados a aproximadamente 15 cm dos cantos e a 45 cm das bordas superiores e inferiores, além das posições centrais.

Em cada parede foi instalado um total de 11 medidores de deslocamento, com precisão de 0,01 mm e curso de 12,7 mm, sendo 6 para as medidas de deslocamentos verticais, 3 para deslocamentos horizontais e 2 para deslocamentos diagonais. Foram acoplados aos medidores de deslocamento molas tensionadoras e fios de aço, para se obter os deslocamentos relativos entre os pinos. Os relógios e fios de aço foram fixados nos pinos a uma distância de 4,0 cm das faces da parede. As leituras entre pinos foram realizadas de acordo com a Figura 8, assim

representadas: verticais R7V (1-7), R8V (5-8), R9V (3-9), R16V, R18V e R19V; horizontais R6H (4-6), R10H (10-12) e R16H (16-18); e diagonais R7D (3-7) e R9D (1-9). Tais valores foram posteriormente corrigidos para os pontos nas faces das paredes, e divididos pelas distâncias verticais entre os pinos, para a obtenção das deformações específicas, conforme Figura 9.

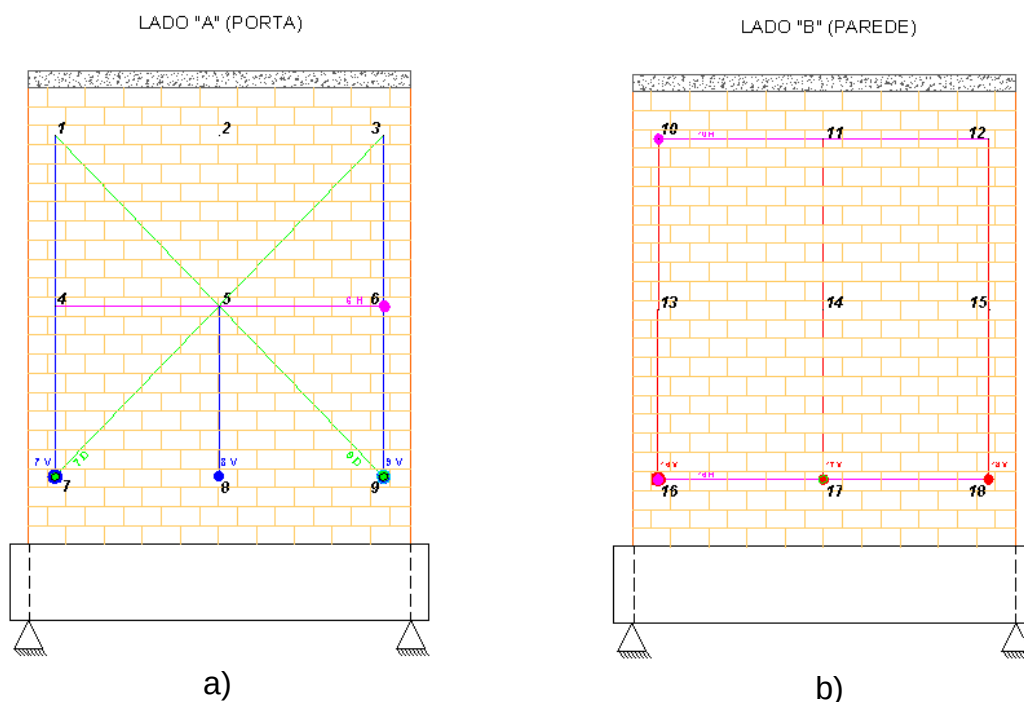


Figura 8 – Disposição dos relógios: a) Lado A, b) Lado B

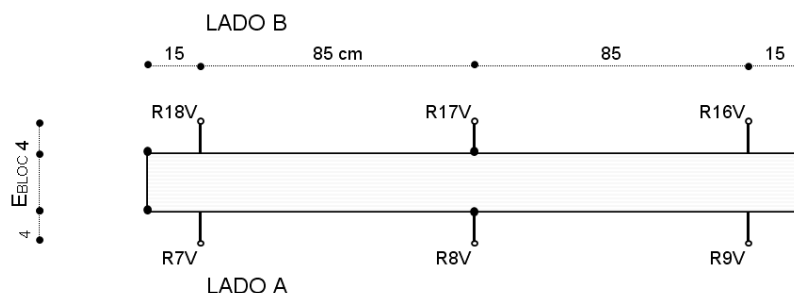
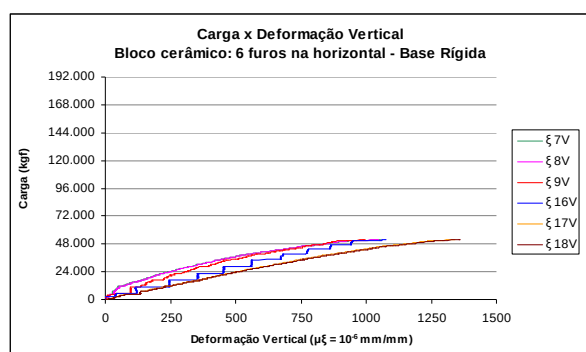


Figura 9 – Vista de topo: posições dos relógios verticais

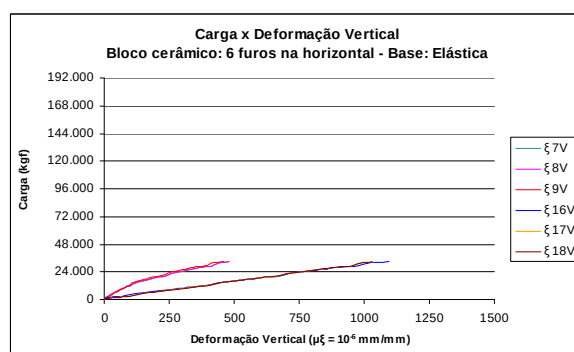
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Tecnologia do Concreto de Itaipu, através de uma prensa hidráulica com capacidade de 500 t com dimensões e sistemas de aplicação de carga adequados. As leituras de carga e deslocamentos relativos entre os pontos avaliados nas paredes foram realizadas manualmente, até atingir cargas próximas as de ruptura, sendo mantida a aplicação do carregamento até a ruptura. Os sistemas de contraventamento laterais e as correntes de suspensão foram determinantes com relação à segurança durante a execução do ensaio e principalmente quando da ruptura das paredes.

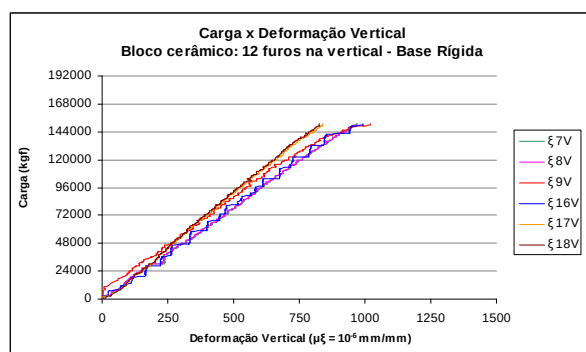
As curvas carga vs. deformações verticais das 6 paredes ensaiadas são mostradas na Figura 10, podendo-se verificar um comportamento elástico linear para todos os tipos de blocos. As deformações verticais das paredes sob base rígida apresentam valores aproximados em todos os relógios ao longo do ensaio, de acordo com o carregamento uniformemente distribuído, enquanto que nas paredes de base elástica as deformações nos trechos avaliados apresentaram maiores variações, causados pelo efeito arco. Verifica-se ainda que as paredes com blocos de 6 furos de vedação apresentaram menor rigidez, ou seja, maiores deformações verticais para uma mesma carga, para as duas situações de apoio.



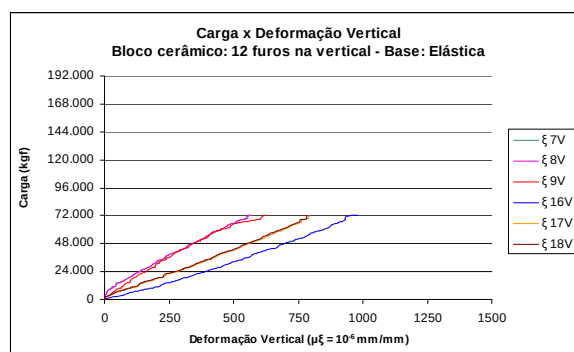
a)



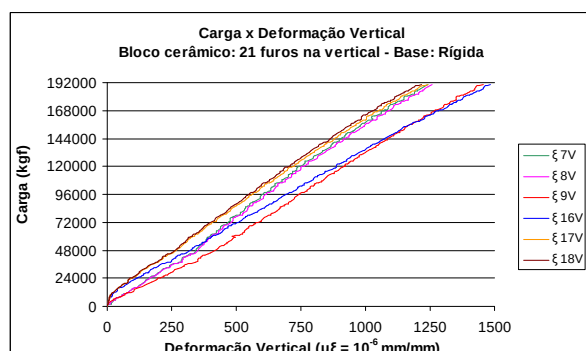
b)



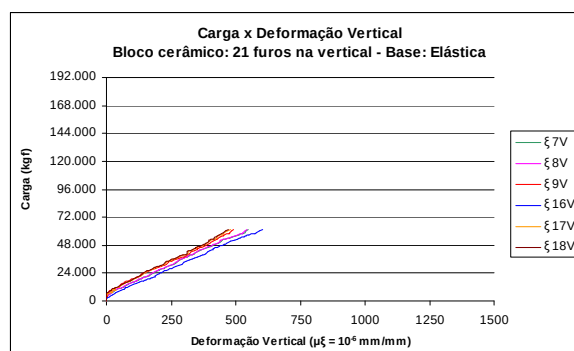
c)



d)



e)



f)

Figura 10 – Curvas carga vs. deformações verticais – Base rígida: a) blocos 6 furos, b) blocos de 12 furos, c) blocos de 21 furos; – Base elástica: d) blocos 6 furos, e) blocos de 12 furos, f) blocos de 21 furos

As deformações horizontais também mostram o comportamento diferenciado nos resultados obtidos para as das paredes ensaiadas sob base rígida e elástica. Os valores negativos representam alongamentos e os positivos representam encurtamentos. Verifica-se que as paredes sob base rígida com carregamento uniformemente distribuído apresentaram alongamentos horizontais, de acordo com o efeito de Poisson. Nas paredes sob base elástica ficam visíveis as deformações de encurtamento por compressão (efeito arco) registradas pelos relógios R16H e R6H conforme a Figura 11.

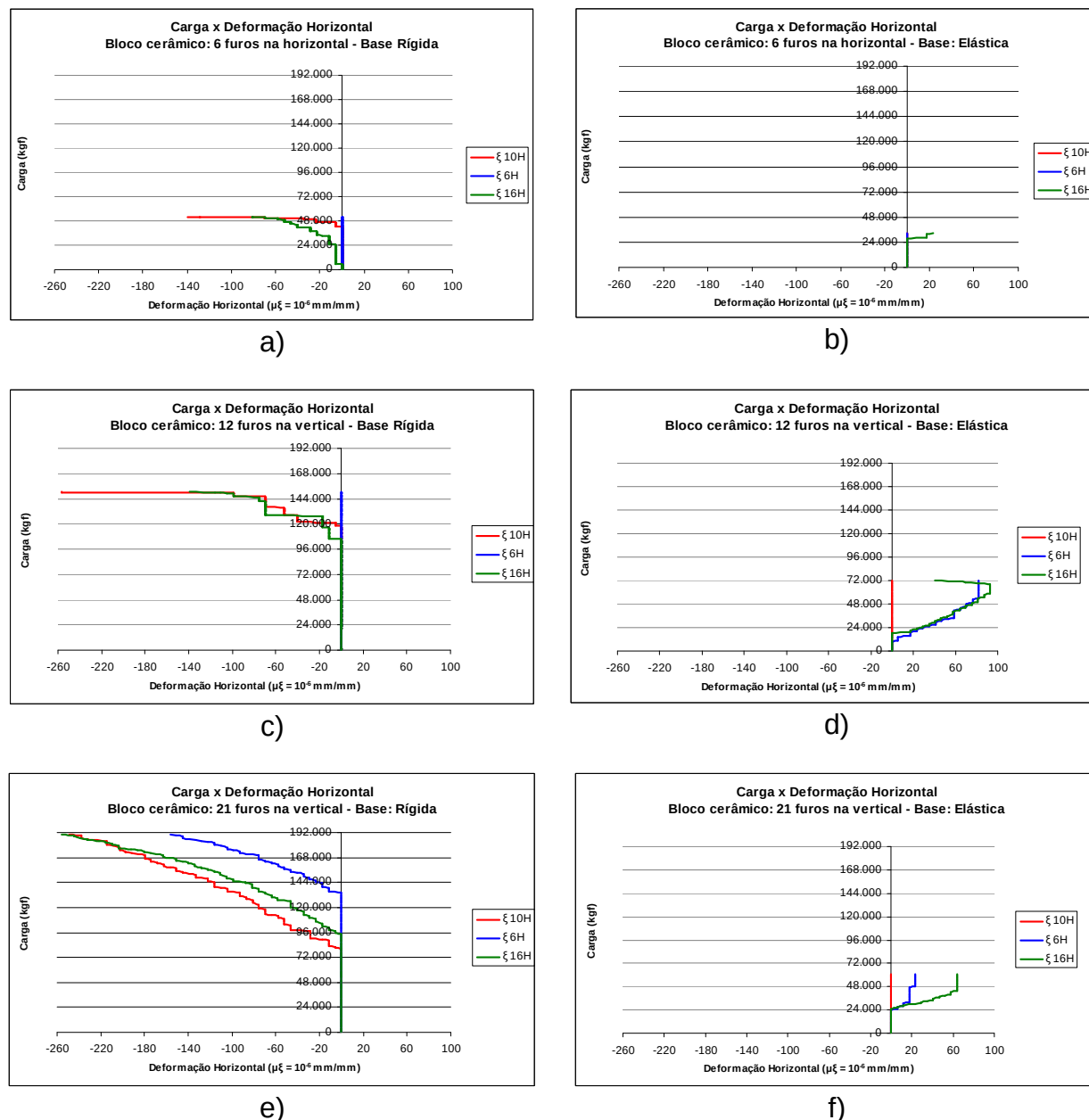


Figura 11 – Curvas carga-deformações horizontais – Base rígida: a) blocos 6 furos, b) blocos de 12 furos, c) blocos de 21 furos; – Base elástica: d) blocos 6 furos, e) blocos de 12 furos, f) blocos de 21 furos

Com relação às deformações diagonais notam-se valores de encurtamento, principalmente no caso das paredes sob base rígida, em função das maiores deformações de compressão verticais comparadas às horizontais de alongamento. Figura 12.

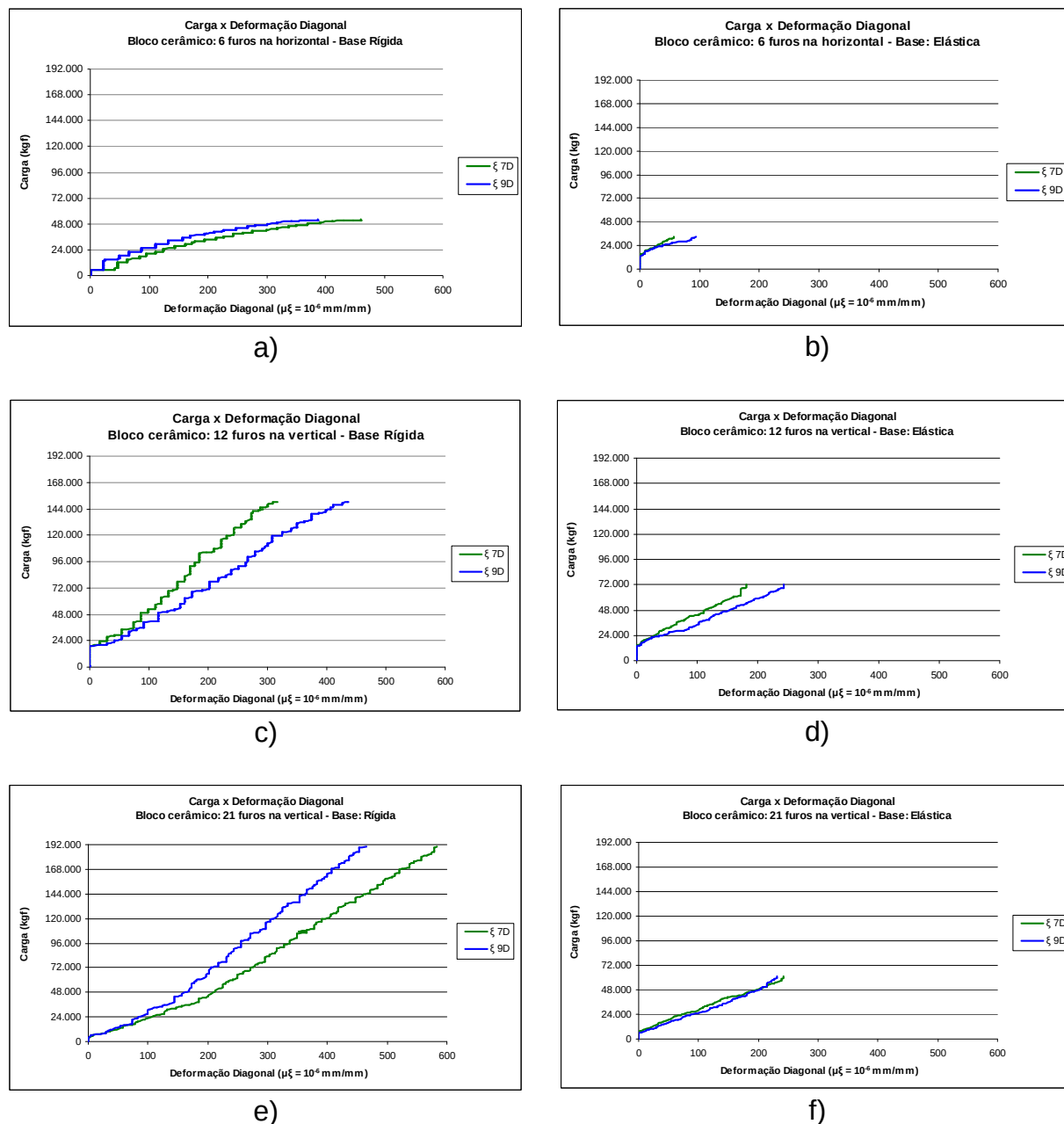


Figura 12 – Curvas carga-deformações diagonais – Base rígida: a) blocos 6 furos, b) blocos de 12 furos, c) blocos de 21 furos; – Base elástica: d) blocos 6 furos, e) blocos de 12 furos, f) blocos de 21 furos

Quanto à capacidade de carga, verifica-se que as paredes apoiadas sob base elástica, com blocos de vedação de 6 furos e estruturais de 12 e 21 furos na vertical, apresentaram cargas últimas muito inferiores, com reduções de 35%, 52% e 68%, respectivamente, em relação às ensaiadas sob base rígida para os mesmos tipos de

blocos. Tais reduções se devem às concentrações de tensões nas regiões de apoio das vigas de base, tipicamente ocasionadas pelo efeito arco.

As paredes ensaiadas sob base rígida apresentaram rupturas por esmagamento ao longo de toda a largura das paredes, ao passo que as paredes sob base elástica tiveram rupturas localizadas próximas aos apoios das vigas, além de se observar o desprendimento da alvenaria na parte central sobre a viga. Quando da ruptura das paredes nas regiões próximas aos apoios, as vigas de base passaram a receber cargas das paredes distribuídas no meio do vão, que solicitaram as vigas de maneira excessiva e as levaram ao colapso com fissuras de flexão e cisalhamento. Nas Figuras 13 a 18 são ilustrados os modos de ruptura das seis paredes ensaiadas.

A parede constituída por blocos de vedação com seis furos horizontais, assentados em uma vez, Figura 13, apresentou ruptura frágil por compressão dos blocos paralela aos furos, tal como se apresenta quando do ensaio individual destes blocos. As deformações verticais, medidas pelos relógios comparadores R7V, R9V, R16V, R17V e R18V apresentaram valores máximos de 0,99‰ a 1,35‰. A carga última atingiu 520 kN, resultando numa tensão normal média última de 1,97MPa e na região de maior compressão devido à pequena excentricidade, a tensão normal máxima resultou em 2,28 MPa. As deformações horizontais máximas de tração, medidas pelos relógios 10H (superior) e 16H (inferior), foram de 0,14‰ e 0,08‰, respectivamente. Observa-se que as deformações máximas horizontais apresentaram-se 9,3 vezes inferiores as verticais máximas, ou seja, a rigidez dos blocos com carga perpendicular aos furos é muito pequena e para os níveis de carga máxima atingidos não se apresentam deformações horizontais expressivas, podendo-se notar ainda que as mesmas mostraram-se nulas com 50% do carregamento aplicado. Na região de meia altura, posição do relógio 6H, não foram observadas deformações horizontais, sendo máxima na parte superior. As deformações diagonais máximas de encurtamento apresentaram-se entre 0,38‰ e 0,46‰, de acordo com o comportamento sob condição de carregamento uniformemente distribuído.

Constituída de blocos estruturais com doze furos na vertical sob base rígida, Figura 14, esta parede apresentou uma carga última de 1510,8 kN, correspondente a uma tensão normal média de compressão de $\sigma_{\text{méd}} = 5,82 \text{ MPa}$ e máxima na região de maior compressão de 6,45 MPa. As deformações verticais apresentaram valores máximos de 0,824‰ a 1,021‰. Todas as deformações verticais apresentaram comportamento semelhante. A ruptura ocorreu por esmagamento dos blocos, iniciando-se na região central, e estendendo-se imediatamente para um dos lados sob pequeno efeito de flexão. Devido a uma ruptura frágil e o impacto ocasionado, a parede partiu-se na diagonal, ficando a parte superior suspensa por correntes. As deformações horizontais últimas atingiram valores de tração de 0,139‰ (16H inferior) e 0,256‰ (10H superior), ficando esta 4 vezes inferior a máxima vertical. Assim como para as demais paredes sob base rígida, não foram observadas deformações horizontais na meia altura da parede (relógio comparador 6H). Também não foram observadas deformações para carregamento inferior a 70% do total. As deformações diagonais, medidas pelos relógios comparadores, 7D e 9D, apresentaram deformações últimas de compressão de 0,31‰ e 0,43‰, respectivamente.

Constituída por blocos de 21 furos na vertical, considerados como blocos de função estrutural, Figura 15, esta parede apresentou uma carga última de

1912,4 kN, correspondente a uma tensão normal média de compressão de $\sigma_{\text{méd}}=8,68$ MPa e na região de maior compressão de $\sigma_{\text{máxima}}=9,53$ MPa. As deformações verticais últimas ficaram entre 1,219‰ e 1,485‰. A ruptura também ocorreu por esmagamento dos blocos, iniciando-se na região central, e estendendo-se para um dos lados sob pequeno efeito de flexão. As deformações horizontais últimas atingiram valores de tração de 0,256‰ (16H inferior), 0,156 ‰ (6H intermediário), e 0,250‰ (10H superior), ficando 5,8 vezes inferior a máxima vertical. Não foram observadas deformações para carregamento inferior a 45% e 50% do total para as leituras superior (10H) e inferior (16H), respectivamente, e para carregamento inferior a 72% do total no caso intermediário (6H). As deformações diagonais, 7D e 9D, apresentaram deformações últimas de compressão de 0,582‰ e 0,465‰, respectivamente.

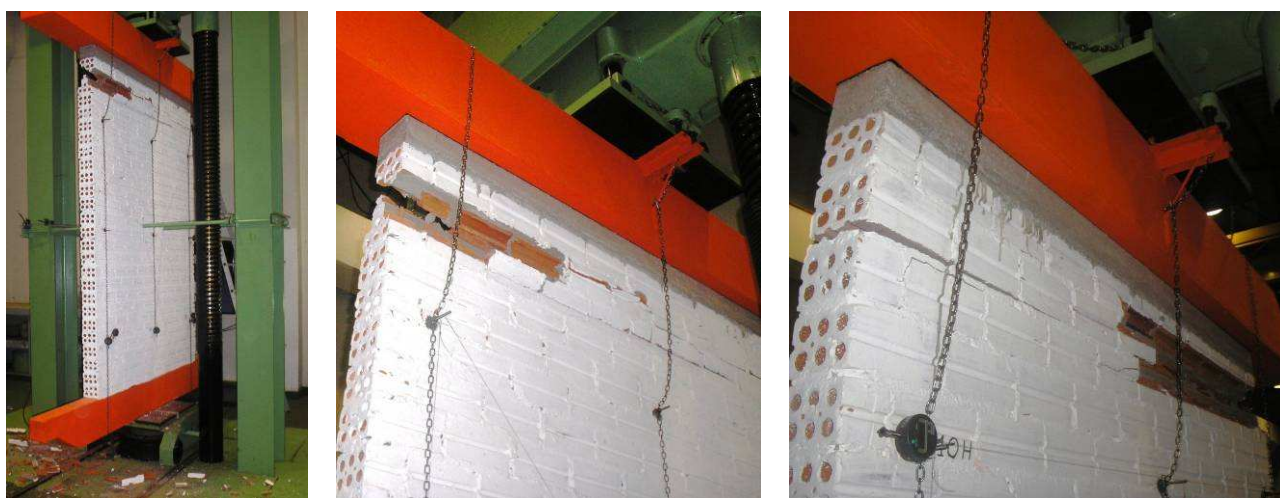


Figura 13 – Parede com blocos cerâmicos de vedação de 6 furos - base rígida



Figura 14 – Parede com blocos cerâmicos estruturais de 12 furos: base rígida



Figura 15 – Parede com blocos cerâmicos estruturais de 21 furos sob base rígida.

Nas paredes de base elástica o carregamento foi uniformemente distribuído na parte superior, através de viga metálica rígida acoplada ao sistema de aplicação de carga da máquina de ensaio, ficando a parede apoiada sobre viga bi-apoiada de concreto armado, como base elástica. Sob estas condições de contorno, as paredes romperam por esmagamento dos blocos nos extremos sobre os apoios das vigas, evidenciando o *efeito arco* gerado quando da deformação da viga. Observam-se maiores deformações verticais nos extremos e menores na parte intermediária, com descolamento na região central da parede sobre a viga. As deformações horizontais apresentaram efeito de compressão na parte superior e nula na parte inferior.

A Figura 16 mostra a ruptura da parede com blocos de vedação de seis furos apoiada sob base elástica. A carga última atingiu 339,6 kN, com tensão média última de 1,27 MPa. Devido ao efeito arco e excentricidade no carregamento, as deformações verticais apresentaram-se diferenciadas e resultaram entre 0,5‰ e 1,10‰. As deformações horizontais superiores (10H) permaneceram nulas até a carga de ruptura, como também ocorreu com as paredes sob base rígida para até estas cargas. A deformação horizontal inferior (R16H) apresentou efeito de tração com valor último de 0,023‰. As deformações diagonais também apresentaram pequenos valores em relação às verticais (0,057‰ em 7D e 0,094‰ em 9D).

Na Figura 17 pode-se visualizar o ensaio da parede confeccionada com blocos estruturais de 12 furos na vertical. A carga última foi de 722,40 kN com uma tensão média de última $\sigma_{méd} = 2,824$ MPa, resultando em apenas 47,8% da obtida com base rígida. A ruptura ocorreu por esmagamento dos blocos da parte inferior próximos aos apoios da viga de base. As deformações verticais de ruptura variaram entre 0,57‰ e 0,98‰. O valor da deformação vertical máxima (0,98‰) resultou muito próximo da encontrada para a parede com base rígida (de 1,02‰), indicando a ruína desta parede. Adotando-se os mesmos valores de tensão máxima da parede sob base rígida (5,82 MPa), encontra-se que a região de compressão sob os apoios teria comprimento aproximado de 43 cm em função do efeito arco. A viga de base apresentou fissuras de cisalhamento mais expressivas em relação às fissuras por flexão, com maiores aberturas, chegando-se próximo à ruptura da viga. As deformações horizontais correspondentes foram: nula para a superior (R10H),

0,082‰ de compressão para a intermediária (R6H) e 0,093‰ de compressão para a inferior. As deformações diagonais últimas obtidas apresentaram pequenos valores: 0,180‰ em 7D e 0,242‰ em 9D.

A Figura 18 mostra o ensaio de compressão da parede com blocos cerâmicos estruturais de 21 furos sob base elástica. A carga de ruptura foi de 611,8 kN (32% da carga da parede sob base rígida), com uma tensão média de 2,73 MPa. Considerando que as tensões últimas sejam de 9,53 MPa, (valor máximo para a parede de base rígida), estima-se que os comprimentos de concentração de tensões nos extremos da viga chegam a somente 29 cm, devido ao efeito arco, onde a distribuição dos carregamentos próximos aos apoios da viga e geram elevadas sollicitações de cisalhamento na viga. As deformações verticais máximas mostraram-se entre 0,47‰ e 0,60‰, bem inferiores aos da parede com base rígida. As deformações horizontais e diagonais apresentadas foram: em R10H = 0, R6H = 0,023‰ e 16H = 0,063‰ de encurtamento, e as diagonais R7D = 0,242‰ e R9D = 0,230‰ de encurtamento.



Figura 16 – Parede com blocos cerâmicos de vedação de 6 furos - base elástica.



Figura 17 – Parede com blocos cerâmicos estruturais de 12 furos - base elástica



Figura 18 – parede com blocos cerâmicos estruturais de 21 furos - base elástica

Nas Tabelas 3 e 4 são apresentados os resultados dos ensaios experimentais

Tabela 3 – Deformações próximas à carga de ruptura ocorridas nas paredes

Parede		Deformações Máximas (‰)			Deformações Mínimas (‰)		
Bloco	Base	Vertical	Horizontal	Diagonal	Vertical	Horizontal	Diagonal
6 furos	Rígida	1,355	-0,140	0,460	0,995	0,000	0,386
12 furos		1,021	-0,256	0,434	0,824	0,000	0,316
21 furos		1,485	-0,256	0,582	1,218	0,156	0,465
6 furos	Elástica	1,093	0,023	0,094	0,459	0,000	0,057
12 furos		0,981	0,082	0,242	0,567	0,000	0,180
21 furos		0,605	0,063	0,242	0,543	0,000	0,230

Tabela 4 – Resultados dos ensaios das paredes

Parede		Carga de ruptura	Tensão Média	Tensão Máxima	Apoio Comprim. (cm)
Bloco	Base	(kN)	(MPa)	(MPa)	(cm)
6 furos	Rígida	520,0	1,98	2,28	200
12 furos		1510,8	5,82	6,44	200
21 furos		1912,4	8,68	9,53	200
6 furos	Elástica	339,6	1,27	2,28*	55,9*
12 furos		722,4	2,82	6,44*	43,7*
21 furos		611,8	2,72	9,53*	28,6*

* Considerado valores de tensões máximas iguais em paredes base rígida e elástica.

4. CONCLUSÕES

Em relação à capacidade de carga, os resultados experimentais mostraram que as paredes sobre base elástica resistiram 65%, 47% e 32%, das cargas das paredes sobre base rígida, com blocos cerâmicos com 6, 12 e 21 furos, respectivamente.

Comparando-se a resistência entre as paredes e os blocos cerâmicos isolados, verificou-se que as paredes de base rígida suportam 49%, 56% e 96% da resistência média à compressão dos blocos individuais de 6, 12 e 21 furos, respectivamente; e as paredes sob base elástica suportaram 31%, 27% e 67% da resistência média dos blocos individuais de 6, 12 e 21 furos, respectivamente. Esses dados confirmam o que na prática vem sendo considerado em projetos de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos onde a resistência à compressão axial da parede é de apenas 30% (trinta por cento) da resistência à compressão dos blocos isolados.

Com relação às paredes, observou-se um comportamento carga-deformações verticais linear, com rupturas frágeis, principalmente para as paredes sob base rígida. O material utilizado na alvenaria (bloco cerâmico, tipo) demonstrou ser o fator determinante na resistência das paredes e nos modos de ruptura, sendo por compressão paralela aos furos no caso das paredes com blocos cerâmicos de 6 furos e esmagamento para os blocos estruturais de 12 e 21 furos. As paredes sob base rígida apresentaram rupturas de esmagamento da alvenaria ao longo da largura da parede por compressão uniforme. Já as paredes ensaiadas sob base elástica tiveram rupturas localizadas próximas aos apoios das vigas, além de se observar o desprendimento da alvenaria na parte central sobre a viga de base, verificando-se o efeito arco.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos à ITAIPU Binacional, que através do Laboratório de Tecnologia do Concreto, possibilitou a realização dos ensaios experimentais.

6. REFÊRENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BARBOSA, P. C. Estudo da interação de paredes de alvenaria estrutural com vigas de concreto armado. São Carlos, 110p. Dissertação de Mestrado, EESC - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2000.
2. HOLANDA Jr, O. G. Influência de Recalques em Edifícios de Alvenaria Estrutural. Tese de Doutorado – EESC, Universidade de São Paulo. São Carlos: 242p. 2002.
3. SILVA, W. J. Estudo experimental de ligações entre paredes de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos sujeitas às ações verticais: Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 144p. 2003.
4. CAMACHO, J. S. Projeto de Edifícios de Alvenaria Estrutural: parâmetros básicos a serem considerados no projeto de elementos resistentes. Dissertação de Mestrado em Engenharia das Estruturas – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: 161p. 2001.
5. MANZIONE, L. Projeto e Execução de Alvenaria Estrutural. São Paulo: O Nome da Rosa. p. 9-20. 2004.
6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15270/2005 – Componentes Cerâmicos. Rio de Janeiro: 2005.
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8949 – Paredes de Alvenaria Estrutural: Ensaio a Compressão Simples. Rio de Janeiro: 1985.