



MODO DE RUPTURA, DEFORMABILIDADE E RESISTÊNCIA DE PAREDES DE ESTRUTURAIS

Gihad Mohamad (1); Eduardo Rizzatti (2); Humberto R. Roman (3)

- (1) Curso de Engenharia Civil – Campus Alegrete – Universidade Federal do Pampa, Brasil – e-mail:
gihad@unipampa.edu.br
- (2) Departamento de Estruturas e Construção Civil – Centro de Tecnologia – Universidade Federa de
Santa Maria, Brasil – e-mail: edu_rizzatti@yahoo.com.br
- (3) Departamento de Engenharia Civil – Universidade de Federal de Santa Catarina, Brasil– e-mail:
humberto@ecv.ufsc.br

RESUMO

Um dos desafios da engenharia em geral é: como avaliar o comportamento do material perante uma solicitação sem levá-lo a ruptura. No entanto, nota-se que para certos materiais como o concreto existe a necessidade de uma simulação ao nível meso, pois a nível macro a simulação não condiz com a realidade experimental, principalmente se tratando de alvenarias compostas por blocos de concreto e argamassas. Esse fato ocorre em função da difícil representação da interação entre as partículas como a pasta, o agregado, a interface entre ambos e a pouca atenção aos mecanismos de fraturamento do concreto à tração, onde as variáveis mecânicas são de difícil determinação experimental. Para isso, realizou-se ensaios de resistência em peças de concreto extraídas dos blocos à tração direta, compressão e ensaios de pequenas paredes, obtendo as deformabilidades e modos de ruprtura dos materiais e do conjunto (alvenaria). Portanto, este trabalho visa associar as propriedades mecânicas dos materiais isolados aos componentes de alvenaria de blocos de concreto determinando as resistências, deformabilidades e modos de ruptura.

Palavras-chave: alvenaria estrutural, deformabilidade, paredes estruturais, modo de ruptura.

1 INTRODUÇÃO

Análises visuais em microscópio eletrônico de varredura realizadas confirmam que o concreto é uma mistura complexa entre o agregado (miúdo e graúdo), a pasta e a interface entre ambos e, o mecanismo de fraturamento acontece pela quebra das ligações entre a matriz e o agregado gerando, por consequência, um fluxo da pasta em torno do mesmo e produzindo forças laterais de separação (VANMIER (1997)). A Figura 1 mostra exemplos de imagens tiradas em argamassas de cimento e areia, destacando na foto (a) a região de interface entre o contorno de grão de areia e a pasta, com a presença de um macro-poro produzido pela exsudação de água de amassamento. A foto (b) da Figura 1 mostra a ampliação da imagem (a), onde se visualiza na interface a presença de macro e micro poros juntamente com uma rede de fissuras provocados pela retração entre a pasta e agregado, destacando a interface entre a pasta e o agregado. A foto (c) mostra a ampliação do poro da imagem (b), mostrando os vasos capilares.

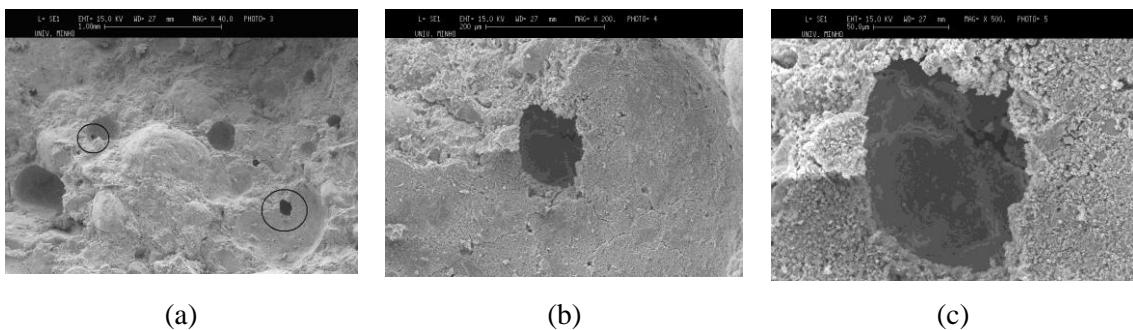


Figura 1 - Imagens obtidas do Microscópio eletrônico de varredura em amostras de argamassas

Para estudar o comportamento mecânico das paredes de alvenaria estrutural de blocos de concreto e se otimizar o potencial do componente estrutural, é necessário entender os mecanismos geradores de ruptura, onde as tensões de tração, devido as diferentes deformabilidades laterais entre o bloco e a argamassa, são responsáveis pela fratura e o baixo fator de eficiência entre o bloco e a parede. Por isso, existe a necessidade de se verificar a capacidade resistente a tração do bloco obtendo os principais parâmetros mecânicos utilizados nas simulações não-lineares, para se obter as correlações entre os resultados experimentais e os numéricos. Portanto, neste trabalho pretende-se determinar a energia a fratura do concreto dos blocos de alvenaria à tração uniaxial, comparando com os resultados experimentais obtidos em laboratório de paredes estruturais.

2 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DIRETA

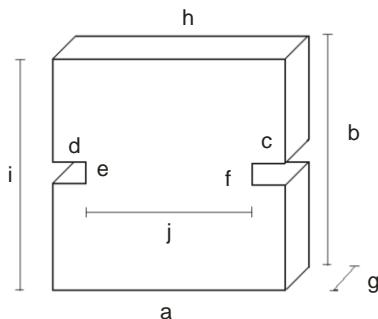
O ensaio de tração direta em amostras de concreto permite a obtenção do diagrama tensão-deformação, onde se verifica um ramo ascendente, um pico e um ramo descendente (amolecimento). Normalmente, os corpos de prova para o ensaio uniaxial são placas com cortes na lateral, onde são fixados os lvds para medir a abertura da trinca. Dessa forma, a iniciação da fissura ocorre em um dos extremos do entalhe percorrendo o comprimento da amostra até atingir o outro entalhe. O equipamento empregado nos ensaios experimentais deve permitir o controle do deslocamento a uma velocidade de 0,0001 mm/s. Essa velocidade mínima pode, teoricamente, ajudar a obter o comportamento pós-pico do material controlando o ritmo da abertura da trinca.

2.1 Ensaios experimentais de caracterização mecânica à tração

Amostras foram cortadas dos blocos de concreto para a determinação dos parâmetros mecânicos necessários para a caracterização do material à tração. O bloco de concreto possuía dois furos na vertical e era feita através da vibro-compactação mecânica do concreto seco. Os blocos foram utilizados posteriormente para a construção de prismas de três blocos e paredes. As dimensões da peça e do entalhe nas duas laterais da amostra são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Dimensões das amostras extraídas dos blocos de concreto

Amostra	a (mm)	b (mm)	c (mm)	d (mm)	e (mm)	f (mm)	g (mm)	h (mm)	i (mm)	j (mm)	Área (j.g) (mm ²)
1	87,9	79,4	14,7	14,2	4,1	4,1	26,3	88,1	79,0	57,2	1504,4
3	91,1	78,2	17,1	16,5	3,9	3,8	26,3	91,4	77,7	56,7	1491,2
5	88,7	79,6	14,4	14,5	3,9	3,9	26,5	89,3	78,9	59,0	1563,5
6	88,9	82,3	15,9	15,0	4,0	4,0	26,4	88,2	81,8	57,0	1504,8
7	93,0	79,9	16,0	15,8	3,8	3,8	27,6	93,4	80,0	58,7	1620,1
12	92,0	81,9	15,6	15,1	3,5	3,7	28,4	92,0	82,3	60,9	1729,6
13	92,2	81,0	14,4	14,4	3,8	3,8	27,8	91,5	81,8	60,0	1668,0



A amostra de concreto foi colada previamente sob uma base guia de aço, garantindo assim a ausência de erros de paralelismo entre a amostra e os pratos. Após isso, o corpo-de-prova era posicionado no equipamento, onde acontece o fechamento das garras superiores e inferiores (a), criando um engastamento entre a chapa e a amostra, como mostra a Figura 2. Dois lvdts com campo de $\pm 0,5$ milímetros foram colados nas extremidades dos entalhes (c), para determinar o deslocamento relativo à meia altura da amostra e obter a abertura de trinca.

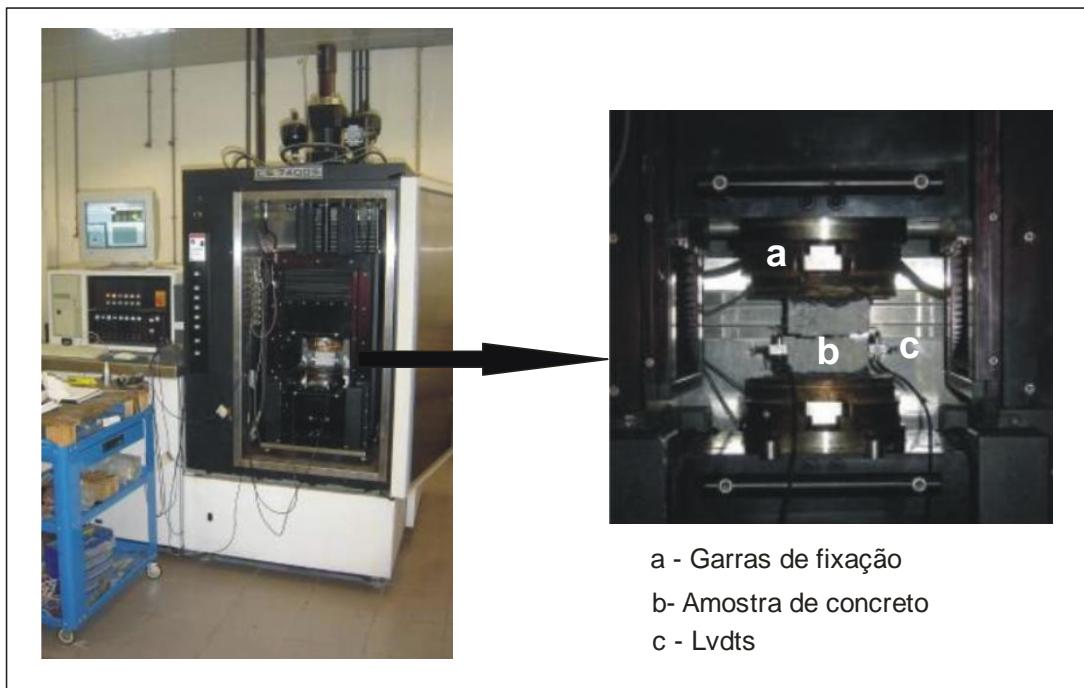


Figura 2 - Equipamento para o ensaio de tração direta em amostras retangulares de concreto.

Os resultados experimentais da força última de tração, resistência à tração e deformação de tração na ruptura são apresentados na Tabela 2. A resistência à compressão média da amostra de concreto foi de 23 MPa.

Tabela 2 – Resultados de resistência à tração de amostras de concreto

Amostra	Força de tração (N)	f_t (MPa)	ε_t
1	3183	2,12	0,00157
3	2858	1,92	0,00197
5	4100	2,62	0,00095
6	3621	2,41	0,00043
7	3595	2,22	0,00084
12	4134	2,39	-
13	4125	2,47	0,00153
Média	3659	2,31	0,00121
Desvio-padrão	501,8	0,24	0,00057
Coeficiente de variação	13,71%	10,23%	47,00%

A Gráfico 1 apresenta os resultados de força (N) em função do deslocamento médio a meia altura das amostras de concreto.

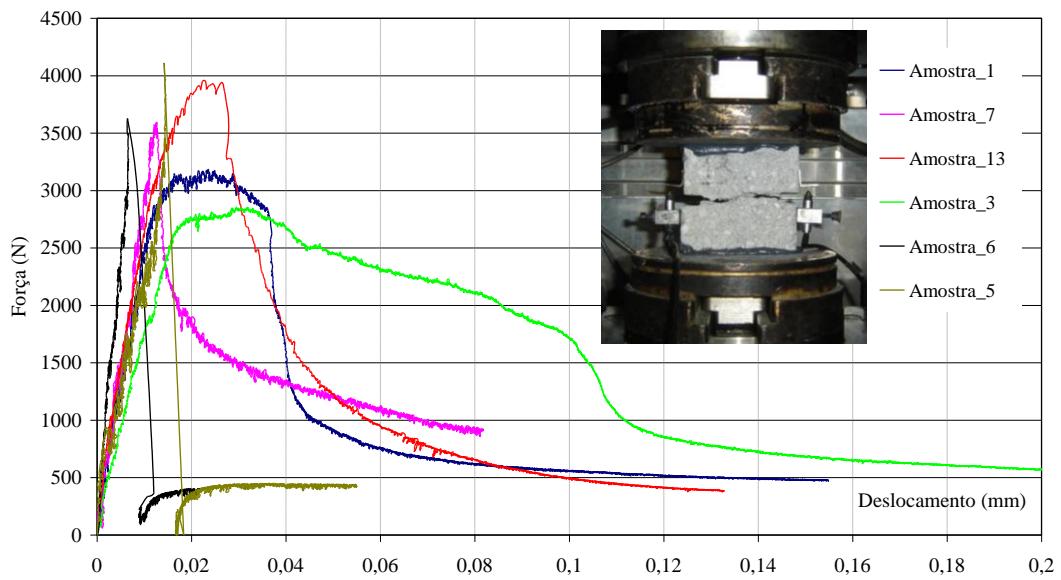


Gráfico 1 - Relação entre força (N) em função do deslocamento médio (mm)

Pelos resultados experimentais nota-se que o comportamento pós-pico à tração foi de difícil obtenção devido ao carácter frágil do material à tração e a rápida propagação da trinca na área enfraquecida pelos entalhes.

2.2 Ensaio de parede

As paredes estruturais tinham as seguintes dimensões: 1 (um) metro de comprimento por 1 (um) metro de altura. O objetivo do estudo era avaliar o modo de ruptura e as deformações axiais e laterais da parede à compressão.

2.2.1 Pontos de medição dos deslocamentos

A parede foi construída sob uma base metálica nivelada e, os blocos da primeira fiada, foram regularizados com uma pasta de cimento de resistência superior ao bloco. A argamassa de assentamento foi do tipo II (1:0,5:4,5), cujo fator água/cimento foi de 1,07. Em todo o estudo foi analisado apenas um único traço de argamassa, pois nesse trabalho não se pretende verificar a influência da argamassa nos resultados de resistência das alvenarias. Os ensaios de compressão uniaxial foram realizados em um pórtico fechado que permite o controle na aplicação da força ou do

deslocamento no tempo. Para aumentar a rigidez axial do prisma foram posicionados dois tirantes verticais em ambos os lados da parede. A fim de cumprir os objetivos de caracterizar a alvenaria à compressão foram posicionados, ao todo, 10 lvdts em diferentes pontos da parede: três destes lvdts foram empregados para medir as deformações verticais de duas (2) juntas de assentamento no centro da parede (*grupo 1*); dois lvdts foram para medir as deformações verticais de 4 juntas de assentamento nos extremos das paredes (*grupo 2*); dois (2) lvdts foram posicionados para a obtenção das deformações horizontais na primeira e última fiadas da alvenaria, próximos do contato com a chapa de aplicação de carga (*grupo 3*); dois (2) lvdts foram posicionados para avaliar a abertura da junta vertical na segunda e quarta fiada (*grupo 4*); um (1) lvdt foi posicionado para a obtenção das deformações horizontais de duas (2) juntas verticais (*grupo 5*). A Figura 3 apresenta uma visão geral do esquema de teste com o posicionamento dos lvdts frontais e da prensa biaxial usada nos ensaios de compressão uniaxial de paredes e a Figura 4 apresenta os pontos de medição dos deslocamentos horizontais e verticais, frente e verso, conforme a distribuição dos grupos citada anteriormente. As chapas de aplicação de carga era rígida com uma altura 19,8 centímetros.



Figura 3 - Esquema geral do ensaio de compressão uniaxial de paredes



Figura 4 - Bases de medida dos 10 lvdts utilizados (frente e verso).

Na mesma amostra, realizou-se o ensaio com distintas velocidades, como: 0,1 KN/s, 0,2 KN/s, 0,5 KN/s, 1,0 KN/s e 1,5 KN/s. Foram verificados os deslocamentos nos procedimentos 12 e 10. A força máxima aplicada na amostra, durante o procedimento do Gráfico 2, corresponde à porcentagem de 0,20 da resistência à compressão, onde se garante que não ocorre nenhum tipo de trinca por concentração, acomodação de tensões ou deformações plásticas na junta de assentamento. Os números mostrados na Gráfico 2 indicam os pontos de aplicação e carga em que foi medido a deformação. A Tabela 3 apresenta os resultados médios das deformações para os grupos de LVDTs especificados anteriormente, para uma velocidade de carga de 0,5 KN/s e diferentes níveis de força.

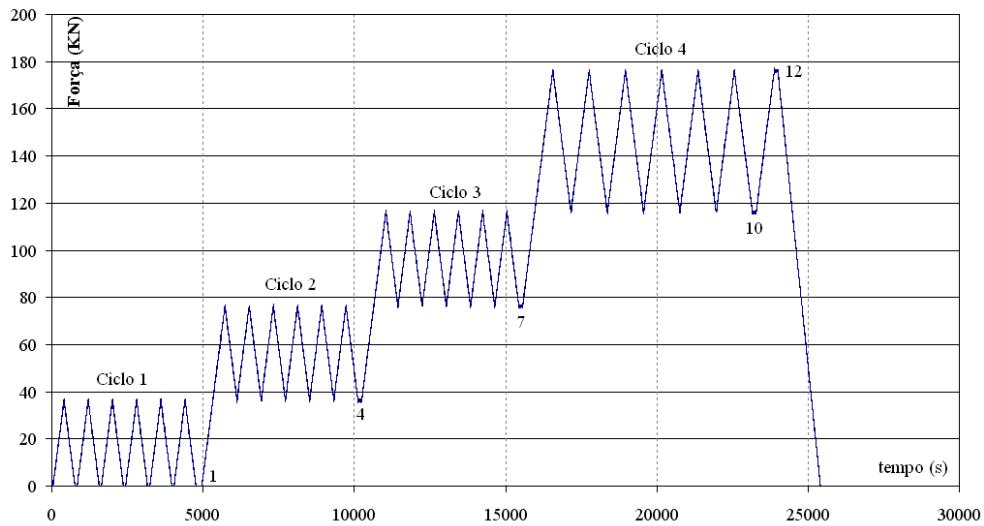


Gráfico 2 - Procedimento de teste adotado para a obtenção dos deslocamentos.

Tabela 3 – Deformações médias nos patamares e nível de tensão.

Velocidade (KN/s)	Procedimento	Grupo 1	Grupo 4	Grupo 3	Grupo 5	Tensão (MPa)
0,5	1	0,000044	0,000080	0,000068	0,000054	0,23
	4	0,000080	0,000103	0,000103	0,000070	0,69
	7	0,000118	0,000128	0,000121	0,000090	1,15
	10	0,000171	0,000158	0,000135	0,000126	1,61
	12	0,000192	0,000160	0,000150	0,000128	2,31

3 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE PAREDES

A parede ensaiada foi levada a ruptura com controle de deslocamento, com uma velocidade de 0,0015 mm/s. A resistência à compressão da argamassa de assentamento foi 8,3 MPa. A Gráfico 3 apresenta o resultado do diagrama tensão-deformação axial e lateral da parede, onde os números 1, 2, 3, 4 e 5 são os grupos de lvdts fixados à parede.

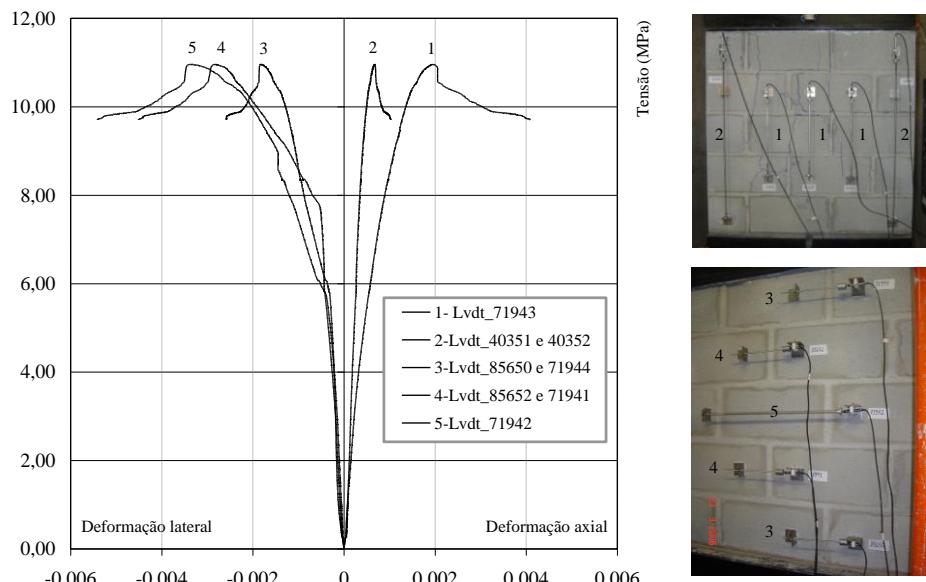


Gráfico 3 – Diagrama tensão-deformação da parede de 1m por 1m

Como esperado face ao confinamento dos pratos metálicos, observou-se que as deformações laterais máximas (*grupos 3, 4 e 5*) vão aumentando, conforme a posição do lvdt. Quando a relação σ/f_c atinge o nível de 0,6 começaram a surgir fissuras na parte intermediária da parede, onde se nota uma mudança significativa do ângulo de inclinação do diagrama tensão-deformação lateral. As fissuras aconteceram, primeiro, na junta vertical entre o bloco e a argamassa, demonstrando que o ponto fraco do conjunto é a interação bloco e junta vertical. Quando a tensão atingiu 8 MPa, as fissuras prolongaram-se, cortando o bloco e a junta horizontal. Verificou-se que o modo de ruptura foi por esmagamento da junta vertical e pelo surgimento de fissuras de tração que cortaram o bloco e a argamassa de assentamento. No Gráfico 3 verificou-se que o diagrama tensão-deformação axial dos lvds do grupo 1 e 2 foram distintos a partir do momento em que a relação σ/f_c atingiu 0,3. Isto aconteceu, provavelmente, pela existência de uma imperceptível fissuração ou abertura de junta vertical. A Tabela 4 apresenta os resultados médios de resistência do bloco à compressão (f_{bloco}), de argamassa à compressão (f_{arg}), de resistência do bloco à tração direta ($f_{tração}$), juntamente com o resultado último da parede na área líquida (f_{parede}). São, também, apresentadas as relações f_{parede}/f_{bloco} e f_{arg}/f_{bloco} .

Tabela 4 – Relação entre as resistências de bloco, argamassa, parede em MPa e as respectivas relações.

Parede	f_{bloco}	f_{arg}	$f_{tração}$	f_{parede}	f_{parede}/f_{bloco}	f_{arg}/f_{bloco}
1m x 1m	23,1	8,3	2,30	10,96	0,47	0,36

Na Figura 5 visualiza-se a distribuição das fissuras (frente e verso) salientadas na parede que, para uma melhor classificação, foram designadas por tipos: 1, 2, 3 e 4. As fissuras do tipo (1) foram fissuras provocadas pela abertura da junta vertical e o consequente esmagamento da argamassa (normalmente este tipo de fissura acontece quando a relação tensão/resistência atinge 0,60); (2) são fissuras de tração que cortam as faces do bloco (essas fissuras, normalmente, são as continuidades da fissura do tipo 1 e acontecem quando a relação tensão/resistência atingir 0,80 à 0,90); (3) são os esmagamentos localizados da argamassa horizontal (acontecem em simultâneo com as fissuras do tipo 2); (4) fissuras de descolamento horizontais entre o bloco e a argamassa (provocado por rotação na parede e o consequente desprendimento do contato entre a junta e o bloco). As fissuras foram simétricas em ambos os lados da parede, ou seja, não se verificou que as fissuras horizontais fossem de flexão. Dos ensaios preliminares pode destacar-se as seguintes observações: a importância das amostras terem as mesmas condições de fronteira, ou seja, o número de juntas verticais serem iguais na primeira e última fiada; no decorrer dos ensaios e na análise dos resultados, verificou-se que a alvenaria (bloco e argamassa) tende a igualar a rigidez dos materiais, ou seja, por mais diferente que seja a resistência do bloco e da argamassa, parece que a junta de argamassa horizontal e o bloco passam a comportarem-se como únicos; o ponto fraco do conjunto é justamente a junta vertical, onde o processo de ruptura começou na fiada intermediária induzindo trincas em toda superfície da parede.

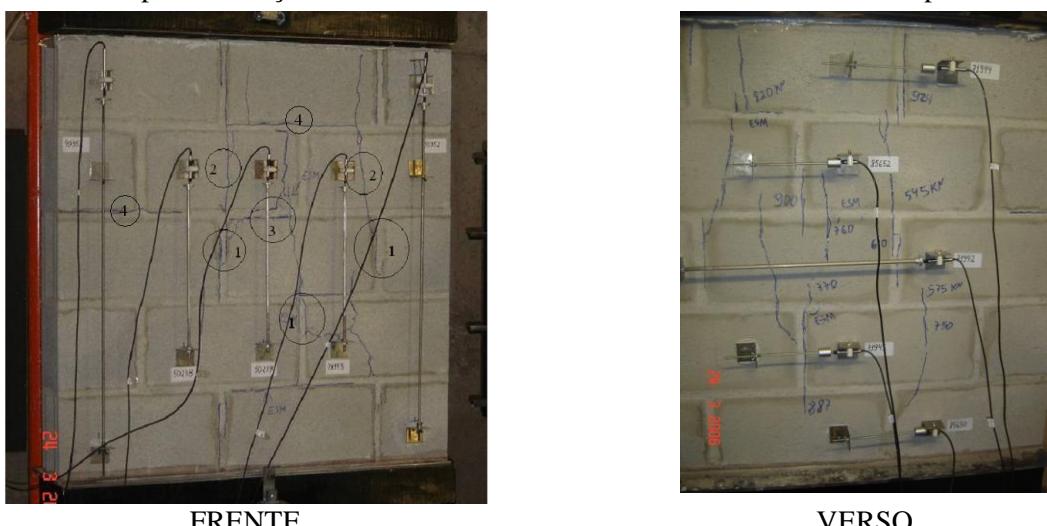


Figura 5 - Parede de 1m por 1m, modo de ruptura

4 CONCLUSÕES

O surgimento das não-linearidades da alvenaria corresponde ao aumento das deformações laterais, devido à extensiva fissuração do material e a um aumento progressivo do coeficiente de Poisson.

A camada de regularização do topo e da base da amostra são importantes devido ao fato das irregularidades gerarem abertura de fissuras na junta vertical de argamassa. Este tipo de ensaio experimental deve possuir simetria entre o topo e a base da parede para se evitarem comportamentos diferenciados, principalmente na junta vertical de contato entre a chapa e a amostra. Pode concluir-se que o atrito existente nas superfícies superior e inferior pode gerar fissuração no contato entre o bloco e a junta de argamassa, elevando as deformações medidas.

Como esperado, os deslocamentos horizontais a meia altura da parede foram maiores do que nos extremos (topo e base). As deformações horizontais medidas no meio da parede, quando comparadas aos lvds da base e topo foram, em média, 3,1 e 4,1 vezes superiores, respectivamente, para o mesmo nível de tensão medido.

O início das trincas verticais deu-se na interface bloco-argamassa. Isto aconteceu quando a tensão atingiu, aproximadamente, 60% da tensão última de ruptura. Verificou-se, também, que o esmagamento da junta de argamassa produziu, em certos pontos, rotações na parede. Conseqüentemente, ocorreu o descolamento da junta de argamassa horizontal num extremo e o esmagamento da unidade no lado oposto. Aconteceram fissuras dispersas entre o bloco e a junta de argamassa horizontal e entre a junta vertical e o bloco de concreto no topo e na base da parede. Notou-se que o efeito do atrito entre a chapa e a amostra foi maior na base da parede devido ao seu maior peso. As paredes, após atingirem a carga última, vão perdendo a respectiva força pela consequente progressão das trincas, podendo obter-se rupturas bruscas, ou seja, sem aviso.

5 REFERÊNCIAS

BRITISH STANDARDS INSTITUTION (BSI). BSI-5628: Structural use of unreinforced masonry. London, Part 1, 1978.

CEN. EUROCODE 6: Design of masonry structures - Part 1 - Common rules for reinforced and unreinforced masonry structures. EN-1996-1-1:2005.

MOHAMAD G, LOURENÇO PB AND ROMAN HR. Ensaio de compressão em prismas de blocos de concreto à compressão – Deformabilidade e modo de ruptura. REVISTA ENGENHARIA – ESTUDO E PESQUISA, 2004; 7(2): 88-95.

MOHAMAD G., LOURENÇO PB AND ROMAN HR. Mechanical behaviour assessment of concrete block masonry prisms under compression. INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE FOR STRUCTURES. INCOS 2005 261-268.

MOHAMAD G. Mecanismo de ruptura de alvenaria de Blocos à Compressão. Tese de doutorado. Universidade do Minho, Portugal, fevereiro de 2007.

NORMA BRASILEIRA. NBR 8522: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. Rio de Janeiro, 2003.