

# Compressive strength of masonry constructed with high strength concrete blocks

## Resistência a compressão da alvenaria estrutural com blocos de concreto de alta resistência

E. S. FORTES<sup>a</sup>  
ernestofortes@hotmail.com

G. A. PARSEKIAN<sup>a</sup>  
parsekian.ufscar@gmail.com

J. S. CAMACHO<sup>b</sup>  
jsc@dec.feis.unesp.br

F. S. FONSECA<sup>c</sup>  
fonseca@byu.edu

### Abstract

Although the use of high strength concrete blocks for the construction of tall buildings is becoming common in Brazil, their mechanical properties and behavior are not fully understood. The literature shows a gap in experimental studies with the use of high strength concrete blocks, i.e., those with compressive strength greater than 16 MPa.

The work presented herein was conducted in order to study the behavior of high strength structural masonry. Therefore, the compressive strength and modulus of elasticity of concrete block walls tested under axial load were assessed. The specimens included grouted and ungrouted walls and walls with a mid-height bond beam; ungrouted walls were constructed with face-shell and full mortar bedding. The walls were built and tested in the laboratory of CESP and in the Structures Laboratory of the UNESP Civil Engineering Department in Ilha Solteira (NEPAE). Concrete blocks with nominal compressive strength of 16 (B1), 24 (B2) and 30 (B3) MPa were used. Ungrouted masonry walls had a height of 220 cm and a width of 120 cm while grouted masonry walls had a height of 220 cm and a width of 80 cm. Traditional Portland cement, sand and lime mortar was used. The testing program included 36 blocks, 18 prisms, 9 ungrouted walls (6 with face-shell mortar bedding and 3 with full mortar bedding), 9 grouted masonry walls, and 12 ungrouted walls with a bond beam at mid-height.

The experimental results were used to determine the compressive strength ratio between masonry units, prisms and masonry walls. The analyses included assessing the cracking pattern, the mode of failure and the stress-strain curve of the masonry walls.

Tests results indicate that the prism-to-unit strength ratio varies according to the block strength; that face-shell mortar bedding is suitable for high strength concrete masonry; and that 20% resistance decrease for face-shell mortar bedding when compared with full mortar bedding is a conservative consideration. The results also show that using a bond beam at the mid-height of the wall does not lead to a compressive strength decrease but it changes the failure mode and the shape of the stress-strain curve. In addition, the results show that estimating  $E = 800$  fp is conservative for ungrouted masonry walls but reasonably accurate for grouted masonry walls and that there is no reason to limit the value of  $E$  to a maximum value of 16 GPa. Furthermore, the results show that, for design purposes, a wall-to-prism strength ratio value of 0.7 may be used for high strength concrete masonry.

**Keywords:** structural masonry, concrete block, high strength, compressive strength, high-rise buildings.

### Resumo

Ainda que o uso de blocos de concreto de alta resistência para a construção de edifícios altos esteja se tornando comum no Brasil, as características e alguns aspectos do comportamento não são totalmente conhecidos. A literatura mostra uma lacuna em estudos experimentais com a utilização de blocos de concreto de alta resistências, acima de 16 MPa.

O trabalho aqui apresentado foi realizado com o objetivo de estudar o comportamento da alvenaria estrutural de alta resistência. Para tanto foram estudadas a resistência a compressão e o módulo de elasticidade em paredes de blocos de concreto ensaiadas sob carregamento axial, divididas em paredes ocas, paredes grauteadas, paredes com cinta grauteada a meia altura e paredes com assentamento parcial e total. As paredes foram construídas e ensaiadas no laboratório da CESP e no laboratório de Estruturas do Dep. de Engenharia Civil da UNESP de Ilha Solteira (NEPAE). Foram utilizados blocos de concreto com valores nominais de resistência à compressão de 16 (B1), 24 (B2) e 30 (B3) MPa. As paredes ocas foram construídas com altura de 220 cm e largura de 120 cm, enquanto as paredes grauteadas foram construídas com altura de 220 cm e largura de 80 cm, utilizando argamassa tradicional de cimento, areia e cal. Foram ensaiados 36 blocos, 18 prismas, 9 paredes ocas (6 com argamassa apenas na lateral dos blocos e 3 com argamassa sobre toda a face desses), 12 paredes grauteadas, e 12 paredes ocas onde foi introduzida uma canaleta grauteada a meia altura.

A análise dos resultados experimentais possibilitou verificar a relação entre a resistência a compressão das unidades de alvenaria, dos prismas e das paredes de alvenaria. Foi também analisada a fissuração, modo de ruptura e curva tensão – deformação das alvenarias ensaiadas.

Através dos resultados dos ensaios verificou-se que o valor da relação de resistência prisma/bloco varia conforme a resistência do bloco; que o procedimento executivo com argamassa apenas na lateral é adequado para blocos de concreto de alta resistência, sendo conservadora a consideração de diminuição de resistência de 20% quando comparada com casos com argamassa disposta sobre toda a face dos blocos; que o uso de cinta grauteada à meia altura das paredes não levou a diminuição da resistência a compressão, mas alterou a forma de ruptura e a forma da curva tensão-deformação; que os módulos de elasticidade medidos nas paredes ensaiadas foram sempre maiores que 800 fp para paredes ocas e entre 688 e 848 fp para paredes grauteadas, não sendo verificado a necessidade de limitar  $E$  ao valor máximo de 16 GPa. Por último, foi verificado que o valor da relação de resistência parede/prisma igual a 0,7 pode ser adotado para blocos de concreto de alta resistência.

**Palavras-chave:** alvenaria estrutural, bloco de concreto, alta resistência, resistência a compressão, edifícios altos.

<sup>a</sup> Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Civil, São Carlos, SP, Brasil;

<sup>b</sup> Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita e Filho, Departamento de Engenharia Civil, São Paulo, SP, Brasil;

<sup>c</sup> Brigham Young University, Departamento de Engenharia Civil, Provo, UT, Estados Unidos da América.

## 1. Introdução

O projeto estrutural em alvenaria requer uma compreensão clara do comportamento do conjunto unidade-argamassa em condições de carga diferentes. A combinação de blocos e argamassa de características diferentes, altera significativamente o comportamento dos elementos estruturais de alvenaria. Em estruturas com esses elementos, a resistência à compressão é o fator predominante no projeto.

A resistência à compressão da alvenaria depende de um número de fatores tais como: resistência da argamassa; resistência das unidades; valores relativos entre a resistência da argamassa e das unidades; relação entre a altura da unidade e a menor dimensão horizontal da unidade; orientação da unidade em relação a direção de aplicação da carga; e espessura da junta da argamassa. A dependência nesses fatores indica, portanto, a complexidade de fazer uma avaliação precisa da resistência da alvenaria estrutural. De acordo com Parsekian et al. [1] a resistência à compressão da alvenaria depende em grande escala do tipo de bloco e em menor escala da mão-de-obra, e em menor escala ainda do tipo de argamassa.

Mais detalhadamente Hendry et al. [2] discutem os fatores mais importantes que afetam a resistência à compressão da alvenaria. Esses fatores são apresentados na Tabela 1.

Curtin et al. [3], de forma mais simplificada, afirmam que a resistência característica da alvenaria a compressão depende da resistência característica da unidade; da argamassa especificada se a alvenaria é argamassada; da forma das unidades; da espessura das juntas de argamassa; e do padrão de acabamento.

Segundo a ABNT NBR 15961-1 [4], a resistência característica à compressão simples da alvenaria  $f_k$  deve ser determinada com base no ensaio de paredes (ABNT NBR 8949 [5]) ou ser estimada como 70% da resistência característica à compressão do prisma  $f_{pk}$  ou 85% da resistência característica de pequena parede  $f_{ppk}$ . Esses valores se referem todos na área bruta.

O EUROCODE 6 [10] propõe duas equações para determinar a resistência característica à compressão da alvenaria simples: uma para alvenaria de junta tradicional de 10 mm e outra para junta fina de 3 mm ou menos. Essas formulações levam em conta a resistência à compressão do bloco, a resistência média à compressão da argamassa convencional, a espessura da junta de argamassa e o fator  $k$ , que depende do tipo de bloco e da argamassa:

$f_k = kf_b^{0,7} f_m^{0,3}$  - Equação 1 - alvenaria com argamassa tradicional – junta de 10mm;

$f_k = kf_b^{0,85}$  - Equação 2 - alvenaria com argamassa fina – junta de 3 mm ou menos.

Sendo:  $k = 0,5$  para bloco vazado de concreto.

A alvenaria tem um comportamento frágil, é não homogênea e anisotrópica, e composta de dois materiais de propriedades muito diferentes: os blocos mais rígidos e a argamassa relativamente deformável, além de eventualmente graute e armadura. A alvenaria tem resistência à tração muito baixa porque é composta por materiais diferentes distribuídos em intervalos regulares, e a ligação entre eles é fraca. Portanto, para a alvenaria não armada, a qual é extensivamente construída, espera-se resistência principalmente aos esforços de compressão.

Existem três formas típicas de ruptura da alvenaria em compressão, em função da relação entre a resistência à compressão da argamassa e do bloco:

- Quando a argamassa é muito fraca em relação ao bloco, a resistência da alvenaria é limitada pela resistência da argamassa, que geralmente rompe por esmagamento;
- Quando a argamassa tem uma resistência moderada, a resistência da alvenaria é determinada pela combinação das resistências à compressão e tração do bloco, que usualmente rompe por tração lateral;
- Quando a argamassa é mais forte que o bloco, a resistência da alvenaria é limitada pela resistência à compressão do bloco.

Quanto mais o modo de ruptura se aproxima do modo de ruptura “c”, mais frágil e explosiva é a ruptura. Usualmente pretende-se que a ruptura ocorra do modo “b”, sendo esse um meio termo entre a resistência da alvenaria à compressão adequada e o comportamento menos explosivo, além de redução do potencial de fissuração na junta da argamassa. Para alvenarias usuais, Parsekian et al. [1] recomendam que a resistência da argamassa seja especificada entre 70 a 150% da resistência do bloco.

Durante a compressão de paredes de alvenaria construídas com blocos de alta resistência e argamassa com resistência moderada, aproximadamente entre 70 e 150% da resistência do bloco, a junta de argamassa tem uma maior tendência a expandir-se lateralmente em relação aos blocos, pois esses têm maior rigidez. No entanto, a argamassa é confinada lateralmente na interface bloco-argamassa pelos blocos; portanto, tensões de cisalhamento na interface bloco-argamassa resultam em um estado interno de tensão, que consiste na compressão triaxial na argamassa e tração bilateral e compressão axial nos blocos. Este estado de tensão inicia fissuras verticais nos blocos que levam a ruptura das paredes (McNary e Abrams [11]; Atkinson e Noland [12]; Drysdale et al. [13]).

**Tabela 1**

Fatores que afetam a resistência da alvenaria

Características dos blocos	Características das argamassas	Alvenaria
Resistência	Resistência	Ligação
Tipo e geometria:	Mistura	Direção das tensões
Relação altura/espessura	Relação água/cimento	Tensões concentradas localmente
Características de absorção	Retentividade de água	-
-	Características de deformação relativa do bloco	-

Na Tabela 2 são resumidos alguns resultados de ensaios experimentais a partir da resistência à compressão de alvenaria. Exceto

quando indicado, os dados dessa tabela referem-se a tensões na área bruta, resistência da argamassa em corpo-de-prova cilíndrico

**Tabela 2**

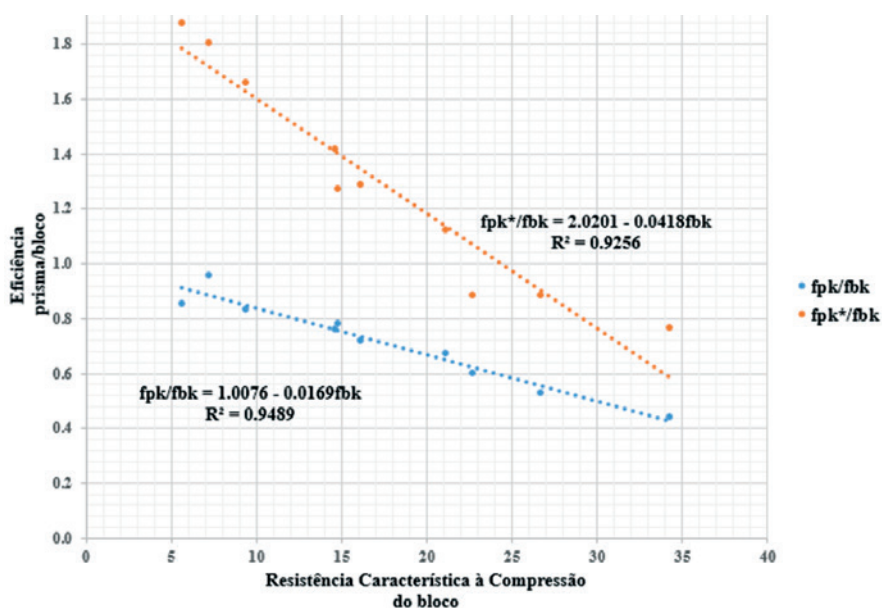
Resumo de resultados de ensaios experimentais de algumas pesquisas nacionais sobre a resistência à compressão da alvenaria (valores em MPa)

		$f_b$	$f_a$	$f_p$	$f_{gk}$	$f_{par}$	Observações
Aly [15]	Blocos vazados de concreto	7,90	-	6,40	-	5,10	-
		10,60	-	9,30	-	6,40	-
		13,30	-	9,80	-	8,30	-
		7,90	-	6,40	-	8,10	Todos os furos grauteados
		10,60	-	9,30	-	9,90	
		13,30	-	9,80	-	11,10	
		7,90	-	6,40	-	10,00	todos os furos grauteados, 0,2% de aço
		10,60	-	9,30	-	10,80	
		7,90	-	6,40	-	9,20	todos os furos grauteados, 0,3% de aço
		10,60	-	9,30	-	12,30	
Medeiros [16]	Blocos vazados de concreto	8,40	4,55	-	-	4,28	-
		8,40	5,89	-	-	4,64	-
		10,80	4,55	-	-	4,83	-
		10,80	5,89	-	-	5,26	-
		14,90	4,55	-	-	4,97	-
		14,90	5,89	-	-	6,52	-
Mendes [17]	Bloco cerâmico vazado	22,89	6,47	-	-	-	Prisma de 3 blocos; argamassa em toda área de assentamento; quando indicada resistência do graute, os prismas são grauteados
		22,89	6,68	12,28	49,87	-	
		22,89	7,00	14,66	28,32	-	
		22,89	6,52	17,94	13,94	-	
		22,89	19,86	12,56	-	-	
		22,89	19,09	20,81	49,57	-	
		22,89	19,78	19,53	25,08	-	
		22,89	21,15	21,33	12,37	-	
Mohamad [18]	Blocos vazados de concreto	10,70	19,90	10,56	-	-	Prisma de 3 blocos, argamassa em toda área de assentamento
		10,70	8,63	8,60	-	-	
		10,70	4,20	8,17	-	-	
		10,70	2,28	7,54	-	-	
		15,70	19,90	11,70	-	-	
		15,70	8,63	10,80	-	-	
		15,70	4,20	8,84	-	-	
Silva [25]	Blocos vazados de concreto	11,8	5	10,1	-	8,56	Prisma de 3 blocos, argamassa em toda área de assentamento
		22	5	14,4	-	8,16	

**Tabela 3**Resultados médios de elementos com blocos de concreto ( $f_{bk}$  até 10 MPa)

66 paredes	Relações admensionais			
	$f_{pa}/f_a$	$f_{pa}/f_{ppa}$	$f_{pa}/f_p$	$f_p/f_b$
Média aritmética	0,51	1,00	0,69	0,80
Desvio padrão	0,08	0,12	0,13	0,07
Coeficiente de variação	0,16	0,12	0,19	0,09

Fonte: Cavalheiro & Gomes [14]

**Figura 1**

Eficiência prismas/bloco versus resistência característica a compressão do bloco

**Figura 2**

Ilustração das paredes ensaiadas

de 100x50mm, prisma de dois blocos, e prismas e paredes não grauteadas.

Cavalheiro e Gomes [14] resumem e analisam vários ensaios de Cavalheiro e Gomes [14] resumem e analisam vários ensaios de blocos, prismas e paredes de blocos de concreto (maior  $f_{bk} = 10$  MPa), com resultado das relações de resistência indicados na Tabela 3.

Outras pesquisas, (ROMAGNA [19]; MAURÍCIO [20]) trazem resultados de ensaio à compressão, porém limitadas a poucas e moderadas resistências de blocos.

Fortes [21] apresenta estudo com blocos de concreto de baixa a alta resistência, entre 4 e 35 MPa, limitando o comportamento à resistência do bloco e do prisma. A Figura 1 mostra os resultados através da indicação de relações prisma/bloco para várias resistências. Como pode-se perceber, na medida em que se aumenta a resistência do bloco, a relação prisma/bloco diminui.

A revisão bibliográfica possibilitou concluir a existência de vários resultados de ensaios disponíveis onde verificou-se uma relação prisma/bloco de 0,80 para blocos de 4 MPa, diminuindo até 0,5 ou menos para blocos de 30 MPa, considerando a área bruta. No caso de ensaios de paredes, a relação parede/prisma, aferido com blocos

**Tabela 4**

Ensaio de paredes grauteadas com cinta grauteada a meia altura da parede

Nome	Cinta	Arg. lateral ou total	Oca ou grauteada	$f_{bk}$	$f_a$	$f_{gk}$	Número de Cps
B1-O-AT-CT	Sim	Total	Oca	B1	A1	G1	3
B1-O-AP	Não	Lateral	Oca	B1	A1	-	3
B1-G-AT-CT	Sim	Total	Grauteada	B1	A1	G1	3
B2-O-AT-CT	Sim	Total	Oca	B2	A2	G2	3
B2-O-AP	Não	Lateral	Oca	B2	A2	-	3
B2-G-AT-CT	Sim	Total	Grauteada	B2	A2	G2	3
B3-O-AT-CT	Sim	Total	Oca	B3	A3	-	3
B3-O-AT	Não	Total	Oca	B3	A3	-	3
B3-G-AP	Não	Lateral	Oca	B3	A3	-	3
B3-G-AT-CT	Sim	Total	Grauteada	B3	A3	G3	3

de até 14 MPa, mostrou valores superiores a 0,7, mas não existem relatos de ensaios de parede com blocos acima de 14 MPa, exceto por um caso com ensaios de paredes com blocos de 22 MPa e com argamassa fraca, abaixo da resistência recomendada. Portanto, considerando a enorme quantidade de edifícios altos atualmente em execução no Brasil e sendo que a revisão bibliográfica mostrou uma falta de pesquisa com blocos de concreto de alta resistência, acima de 14 MPa, a pesquisa aqui desenvolvida é plenamente justificada.

### 1.1 Justificativa

O objetivo do estudo aqui apresentado é avaliar parâmetros e características de alvenarias de blocos de concreto de alta resistência (de 18 MPa a 34 MPa quando se considera a área bruta). O uso desses blocos não é comum em nenhuma outra parte do mundo, devendo hoje o Brasil ser um dos poucos países onde existem aplicações correntes com esse material, aqui chamado de blocos de concreto de alta resistência. Ainda que o uso seja comum no Brasil, as características e alguns aspectos do comportamento não são totalmente conhecidos. Vários edifícios hoje utilizam blocos de concreto de alta resistência, confiando em parâmetros para obtenção de propriedades de paredes estruturais baseadas em relações de resistência obtidas com blocos de resistência muito inferior. Resultados de ensaios que permitem correlacionar a resistência de bloco de concreto, prisma e parede para os valores elevados de resistência aqui relatados são, até onde se pode verificar, inéditos. Pode-se afirmar que a pesquisa aqui relatada trabalhou no limite da área de conhecimento e contribuindo para expansão deste.

**Tabela 5**

Caracterização das argamassas

Denominação	Traço em volume	Traço em massa	a/c	Resistência esperada (MPa)
A <sub>1</sub>	1:1,0:5,0	1:0,42:4,25	1,05	12
A <sub>2</sub>	1:0,5:4,0	1:0,21:3,40	0,86	18
A <sub>3</sub>	1:0,5:3,5	1:0,21:2,98	0,77	24

## 2. Materiais e programa experimental

Trinta paredes de alvenaria, Figura 2, incluindo alvenaria oca, grauteada, com cinta grauteada na quinta fiada e ainda com assentamento parcial e total foram ensaiadas sob carga de compressão.

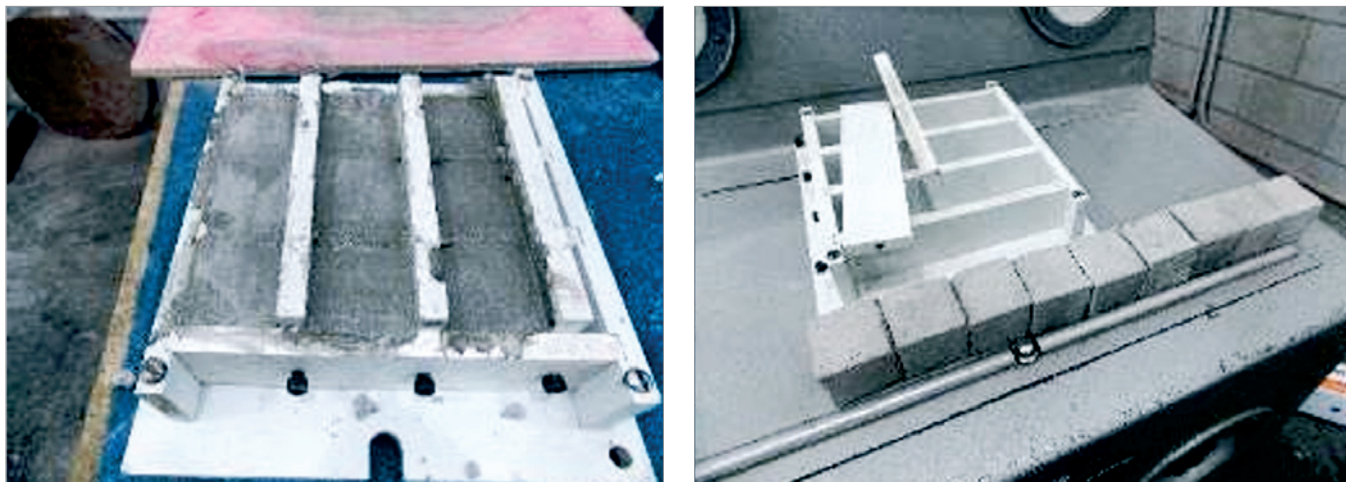
Os seguintes elementos foram ensaiados:

- Ensaio a compressão simples de paredes de alvenaria com blocos de resistência nominal de 16, 24 e 30 MPa:
  - Não-grauteadas com cinta a meia altura (canaletas de resistência menor e igual a 6MPa);
  - Não-grauteadas, com argamassamento parcial (apenas nas laterais dos blocos);
  - Não-grauteadas, com argamassamento total (em toda a face horizontal dos blocos);
  - Grauteadas, com cinta a meia altura.
- Ensaio a compressão simples de prismas e blocos de alvenaria de concreto com blocos de 18, 24 e 34 MPa,
- Ensaio a compressão simples de corpos-de-prova de argamassa e graute.

A Tabela 4 indica as características e quantidade de ensaios de parede realizados.

### 2.1 Argamassa

Foram empregados três dosagens de argamassa de assentamento com resistência à compressão de acordo com a resistência dos blocos. Os traços de argamassa utilizados aqui são os mesmos



**Figura 3**  
Moldagem dos corpos-de-prova cúbicos de argamassa

**Tabela 6**  
Denominações dos grautes, traços e resistências esperadas

Designação	Traço em volume	Traço em massa	w/c	Resistência esperada (MPa)
G <sub>1</sub>	1:0,1 :0,009 :1,6:1,8	1:0,06:0,01:1,60:1,80	0,68	25
G <sub>2</sub>	1:0,1:0,009:1,4:1,6	1:0,06:0,01:1,98:2,02	0,58	30
G <sub>3</sub>	1:0,1:0,009:1,0:1,3	1:0,06:0,01:1,42:1,64	0,45	40

já testados em Fortes [21], e, em massa, iguais a 1:0,42:4,25; 1:0,21:3,40 e 1:0,21:2,98, conforme Tabela 5. A

Figura 3 mostra a moldagem e os corpos-de-prova da argamassa. Utilizou-se o cimento Portland CP II-Z-32, cal hidratada e areia média, cujas massas unitárias foram determinadas durante o estudo. Para cada traço de argamassa foram retirados seis corpos-de-prova para controle de resistência e do processo de produção.

## 2.2 Graute

Para o grauteamento das paredes e enchimento das cintas grauteadas foi utilizado o aditivo “dry d1 c compact”, já testada por Fortes [21], no traço do graute para diminuir a retração do graute e consequentemente a separação do graute das paredes dos blocos. O respectivo aditivo é um produto em pó inorgânico, isento



**Figura 4**  
Moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos de graute e grauteamento das paredes



**Figura 5**

Ilustração dos blocos de concreto inteiros e cortados, e as canaletas utilizadas

de cloretos e de outros componentes prejudiciais para o graute. É um aditivo a base de óxido de cálcio submetidos a tratamento térmico com uma granulometria específica e selecionada e com propriedade expansiva para ser utilizada em argamassa e concreto. A característica expansiva induz a diminuição de porosidade e a redução de permeabilidade, um incremento de resistência à compressão, e uma maior aderência entre os elementos.

Três traços de grautes de resistências distintas, conforme o bloco utilizado, foram adotados de Fortes[21] para o grauteamento das paredes e enchimento das cintas. Os traços dos grautes em massa foram 1:0,06:0,01:1,60:1,80; 1:0,06:0,01:1,98:2,02; e 1:0,06:0,01:1,42:1,64 (cimento: cal: aditivo: areia: brita); cujas resistências nominais à compressão são respectivamente 25 (G1), 30 (G2) e 40 (G3) MPa. A Tabela 6 traz as denominações, os traços em massa e em volume e as resistências esperadas, e a Figura 4 mostra os corpos-de-prova e o grauteamento das paredes.

### 2.3 Bloco

Foram utilizados blocos de concreto de alta resistência de lotes fornecidos pela mesma empresa, como especifica a norma NBR 6136 [22], de geometria uniforme, e resistências nominais de 16,

24 e 30 MPa, denominadas respectivamente de  $B_1$ ,  $B_2$  e  $B_3$ . Para todos os ensaios foram utilizadas amostras de doze blocos para as três resistências. As amostras não apresentaram quebras, trincas, deformações ou irregularidades nas arestas. Blocos canaletas, fornecidos pela mesma empresa, de única resistência nominal, 6 MPa, foram utilizados na construção da cinta para todas as paredes independente do tipo de blocos usados nas paredes. Blocos inteiros foram cortados para serem utilizados como meio blocos. A

Figura 5 mostra o bloco inteiro, o bloco cortado ao meio e a canaleta.

### 2.4 Construção dos prismas e paredes

Prismas ocós e grauteados foram construídos como especificado pela norma brasileira ABNT NBR 15961-2 [23]. Os blocos, argamassa e os grautes foram combinados para montar os prismas. Cada prisma foi montado com dois blocos e assentos com argamassa total. A

Figura 6 mostra os prismas construídos e um prisma grauteado. A execução seguiu rigorosamente as prescrições da ABNT NBR 15961-2 [23], sendo todos os elementos construídos com a mesma equipe de mão de obra.

O grauteamento dos prismas foi realizado aproximadamente



**Figura 6**

Ilustração dos prismas ocós e grauteados



**Figura 7**  
Escantilhões para auxiliar na construção das paredes



**Figura 8**  
Sequência de montagem das paredes



**Figura 9**  
Ilustração das paredes ocas (sem grauteamento)

**Figura 10**  
Ilustração das paredes grauteadas com cinta a meia altura



24 horas depois da construção dos prismas. Antes do grauteamento, rebarbas e resto de argamassas foram removidos do interior dos prismas, e os prismas foram molhados antes do grauteamento. O grauteamento foi realizado em duas camadas e compactados com 12 golpes por camada, conforme recomendações da ABNT NBR 15961-2 [23]. Depois de completado o grauteamento, a superfície do graute foi nivelado e alisado com uso de uma espátula e coberta imediatamente com filme plástico impermeável. A construção das paredes seguiu o mesmo rigor e prescrições, com sequência executiva mostrada a partir da Figura 7 à Figura 13.

### 2.5 Blocos, argamassa e graute

Para cada grupo de paredes, foram ensaiados à compressão 12 blocos de concretos, conforme ABNT NBR 12118 [6]. Os ensaios dos blocos foram feitos no mesmo dia dos ensaios das paredes. Seguindo as recomendações da ABNT NBR 15961-2 [23], as resistências à compressão média das argamassas foram fixadas em 70% da resistência à compressão dos blocos utilizados. Foram utilizados os traços já ensaiados por Fortes [21]. Foram moldados

e ensaiados seis corpos-de-prova de argamassa à compressão para cada grupo de paredes. Seguiram-se as recomendações da NBR 5739 [24] para o ensaio de resistência à compressão dos grautes. Os corpos-de-prova foram retificados antes dos ensaios e apresentavam idade de 28 dias no momento dos ensaios.

### 2.6 Prisma

Seguindo as especificações da ABNT NBR 15961-2 [23], 18 prismas ocós e 18 prismas grauteados foram construídos e ensaiados. Antes do ensaio, os prismas foram capeados com pasta de cimento de acordo com a ABNT NBR 15961-2 [23]. Os ensaios foram realizados utilizando uma máquina de ensaio com capacidade de 2000 kN e os prismas foram carregados com uma velocidade de  $0,05 \pm 0,01$  MPa por segundo.

### 2.7 Configuração das paredes

As paredes ensaiadas foram divididas em três grupos de acordo



**Figura 11**  
Ilustração das paredes com cinta a meia altura



**Figura 12**  
Ilustração das paredes com assentamento total (argamassa em todas as paredes dos blocos)



**Figura 13**  
Ilustração das paredes com assentamento parcial (argamassa somente nas as paredes longitudinais dos blocos)



**Figura 14**  
Ilustração das paredes construídas para os ensaios de compressão

com a resistência dos blocos. No primeiro grupo foram ensaiadas doze paredes com blocos de concreto com resistência nominal de 30 MPa ( $B_3$ ), sendo três paredes ocas com assentamento total, três paredes ocas com assentamento parcial, três paredes ocas com assentamento total e com cinta a meia altura e três paredes grauteadas com cinta grauteada na quinta fiada. Esse grupo contempla a comparação de resultados de resistência a compressão das paredes com blocos assentados com argamassa apenas na lateral com à das paredes com blocos assentados com argamassa sobre toda a face do bloco. No segundo grupo foram ensaiadas



**Figura 15**  
Ilustração do capeamento das paredes com argamassa

nove paredes com blocos de concreto com resistência nominal de 24MPa ( $B_2$ ), sendo três paredes ocas com assentamento total e com uma cinta grauteada na quinta fiada, três paredes ocas com assentamento parcial e três paredes grauteadas com cinta grauteada na quinta fiada. No terceiro grupo foram ensaiadas mais nove paredes com blocos de concreto com resistência nominal de 16MPa ( $B_1$ ), sendo três paredes ocas com assentamento total e com uma cinta grauteada na quinta fiada, três paredes ocas com assentamento parcial e três paredes grauteadas com cinta grauteada na quinta fiada. Não foi utilizado qualquer tipo de reforço nas paredes grauteadas, somente uma barra de aço horizontal de 10 mm nas cintas colocadas na quinta fiada.

As paredes ocas foram construídas com altura de 220 cm e largura de 120cm, enquanto que as paredes grauteadas foram construídas com altura de 220 cm e largura de 80 cm, devido a capacidade de carga máxima da prensa.

Argamassa tradicional, cimento, areia e cal, foram utilizadas para a construção das paredes e dos prismas. A argamassa foi concebida para ter uma resistência a compressão aos 28 dias igual a 70 % da resistência das unidades, considerando a área bruta.

O graute utilizado nas paredes e para enchimento das cintas foi concebido para ter uma resistência à compressão aos 28 dias de 40 ( $G_3$ ), 30 ( $G_2$ ) e 25 ( $G_1$ ) MPa, respetivamente para as paredes construídas com unidades de 30 ( $B_3$ ), 24 ( $B_2$ ) e 16 ( $B_1$ ) MPa. Para reduzir a retração do graute e possível descolamento das paredes das unidades foi utilizado um aditivo compensador de retração na mistura do graute.

Para cada grupo de paredes, doze blocos de concreto e seis prismas ocas e seis grauteados foram ensaiados na altura dos ensaios das paredes.

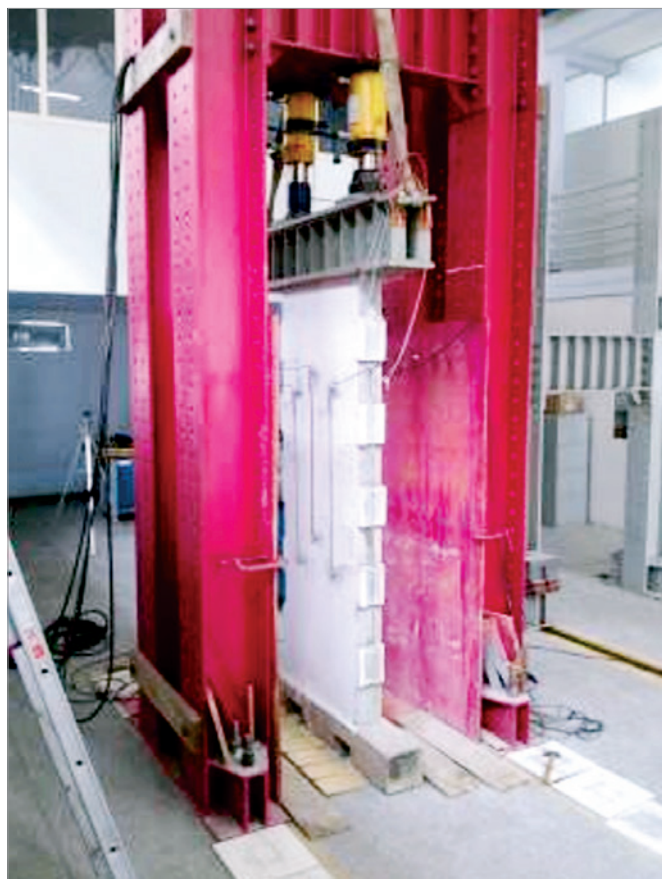


**Figura 16**  
Configuração do ensaio das paredes, grupo 1 e 2

Para diferenciar as paredes, foi utilizado um sistema de designação, como Par-B-O-G-AT-AP-CT. As letras iniciais Par refere-se a própria parede. A letra B refere-se ao tipo de bloco utilizado. As letras O e G referem-se a parede oca ou grauteada, respectivamente. As letras AT e AP referem-se ao Assentamento Total ou Assentamento Parcial, respetivamente. Por último, as letras CT referem-se à colocação de uma cinta grauteada a meia altura da parede. Para ajudar a observar melhor as fissuras, todas às paredes foram pintadas com tinta branca. A Figura 14 mostra algumas paredes prontas.

## 2.8 Capeamento

Para os ensaios de compressão das paredes, foi feito um capeamento com argamassa, como mostra a Figura 15, conforme prescrições da NBR 8949 [5]. Foi utilizado um traço de argamassa 1:2:0,5 (cimento, areia e cal) de forma a obter uma resistência igual ou superior à resistência dos blocos. Os blocos foram capeados com uma chapa dura, conforme Fortes [21], e os prismas foram capeados com pasta de cimento.



**Figura 17**  
Configuração do ensaio das paredes, grupo 3



**A** Grupo 3



**B** Grupo 1 e 2

**Figura 18**  
Instrumentação das paredes

**Tabela 7**

Procedimentos utilizados na caracterização da argamassa, graute, bloco, prisma e parede

Designação	Procedimentos	Ensaios
Blocos	ABNT NBR 6136/2014	Especificação
Blocos	ABNT NBR 12118/2013	Absorção total
Blocos	ABNT NBR 12118/2013	Resistência à compressão
Paredes	ABNT NBR 8949/1985	Ensaio a compressão simples
Paredes Argamassa Prismas	ABNT NBR 15961-2/2011	Ensaio, execução e controle
Graute	ABNT NBR 5738	Procedimentos para moldagem e cura de corpos-de-prova
Graute	ABNT NBR 5739	Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos
Graute	ABNT NBR 7211	Especificações
Argamassa	ABNT NBR 13279	Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão

## 2.9 Configuração do ensaio e da instrumentação

Uma prensa hidráulica analógica com capacidade de 500 toneladas (5000 kN), como mostra a Figura 16, foi usada para o ensaio das paredes referentes ao grupo 1 e 2. Para os ensaios das paredes do grupo 3, foi montado um sistema de pórtico autoportante, como mostra a Figura 17. Durante os ensaios das paredes, foram medidos os deslocamentos verticais em ambas as faces (Face 1 e Face 2) das paredes usando transdutores de deslocamento (LVDTs), como mostra a Figura 18, com comprimentos de 25 milímetros e uma precisão de 0,00001 milímetros. Os deslocamentos verticais na lateral da parede foram monitorizados continuamente por meio de relógio comparador sem fio montado sobre as paredes, mostrado também na Figura 16.

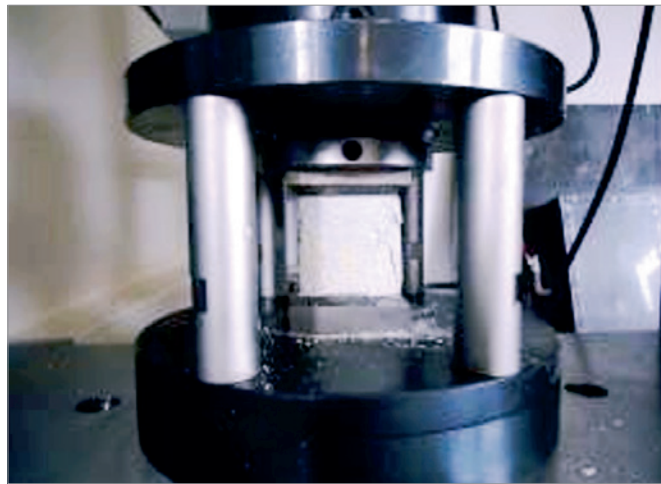
Para verificar qualquer eventual excentricidade de carregamento durante o ensaio, as medidas foram tomadas tanto na parte da frente como na parte de trás das paredes, conforme mostra a Figura 18, e o valor médio das duas medidas foi utilizada para a análise. Antes de cada ensaio, a parede a ser ensaiada foi centrada na posição de ensaio e alinhada verticalmente e transversalmente com a ajuda de um nível a laser e com o fio de prumo. A parede foi então carregada-descarregada duas vezes usando uma carga nominal de 5% da carga máxima prevista para garantir que as paredes e a instrumentação foram colocadas antes de se iniciar um ensaio. Durante cada ensaio, o carregamento vertical foi aplicado gradualmente com uma taxa de cerca 10 kN/s até a ruptura ocorrer.

**Figura 19**

Ilustração dos ensaios dos corpos-de-prova cilíndricos de grautes

**Tabela 8**Resistências à compressão dos grautes,  $G_1$ ;  $G_2$  e  $G_3$ 

Designação	Resistência à compressão média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
$G_1$	31,3	2,35	7,5
$G_2$	34,9	3,92	11,2
$G_3$	42,4	2,68	6,3



**Figura 20**  
Ilustração dos ensaios das argamassas utilizadas

**Tabela 9**  
Resistências à compressão média das argamassas

Designação	Resistência à compressão média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
A <sub>1</sub>	13,4	0,69	5,3
A <sub>2</sub>	21,8	0,65	3,0
A <sub>3</sub>	26,9	0,80	3,0

**2.10 Procedimento experimental**

No início dos ensaios, duas cargas seguidas de descargas inferiores a 50% da carga de ruptura prevista foram efetuadas. As cargas foram aplicadas seguindo incrementos de 10% da carga de ruptura provável até 50% da carga de ruptura prevista, com o tempo de permanência de cada carregamento de 5 minutos, para que fosse possível o traçado dos gráficos carga-encurtamentos e dos gráficos tensão-deformação. Após o carregamento inicial, a carga axial foi gradualmente aumentada monotonicamente até a ruptura. O histórico dos carregamentos foi tomado através do relógio analógico da prensa de ensaio para as paredes dos grupos 1 e 2 e por unidade de aquisição de dados para as paredes do grupo

3. Leituras dos LVDTs foram tomadas e gravado por uma unidade de aquisição de dados controlado por computador. A aquisição de dados e taxas de gravação foram definidas para ocorrer a cada segundo, com a instrumentação permanecendo durante todo o ensaio. Em todos os casos, a ruptura última foi considerada quando se deu o aparecimento de fissuras verticais e a parede não sustentava aumento da carga vertical, ou quando a parede exibiu grande deflexão lateral com diminuição da carga vertical. Os procedimentos adotados em cada ensaio são descritos na Tabela 7.

**3. Resultados e discussões**

Uma descrição detalhada dos resultados obtidos nos ensaios



**Figura 21**  
Ensaio dos blocos de concreto



**Figura 22**  
Ilustração dos ensaios prismas ocós e grauteados

**Tabela 10**  
Resistências à compressão média dos blocos,  $B_1$ ;  $B_2$  e  $B_3$

Designação	Resistência à compressão média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
$B_1$	18,7	1,1	5,9
$B_2$	27,3	3,0	11,0
$B_3$	34,5	0,4	1,0

**Tabela 11**  
Resumo das tensões de compressão máxima calculada para os prismas ocós ensaiados

Designação	Ensaio dos prismas ocós - duas fiadas		
	$B_1 - A_1$	$B_2 - A_2$	$B_3 - A_3$
Média (MPa)	10,0	13,3	16,9
Desvio padrão (MPa)	0,90	1,26	1,45
Coef. variação (%)	8,96	9,46	8,6

**Tabela 12**  
Resumo das tensões de compressão máxima calculada para os prismas grauteados ensaiados

Designação	Ensaio dos prismas grauteados - duas fiadas		
	$B_1 - A_1 - G_1$	$B_2 - A_2 - G_2$	$B_3 - A_3 - G_3$
Média (MPa)	22,3	29,0	32,2
Desvio padrão (MPa)	1,1	2,8	1,2
Coef. variação (%)	4,75	9,6	3,7

dos componentes e dos elementos prismas e paredes é apresentada abaixo.

### 3.1 Graute

A Figura 19 mostra alguns corpos-de-prova do graute retificados e o modo de ruptura de um deles. As respectivas resistências alcançadas pelos corpos-de-prova referentes ao grauteamento das paredes e do enchimento das cintas, para os diferentes grupos de parede, Grupo 1, 2 e 3, estão indicados na Tabela 8.

### 3.2 Argamassa

A Figura 20 mostra alguns corpos-de-prova da argamassa e um dos ensaios. Na Tabela 9 são apresentados os valores de resistência à compressão média obtidos nos ensaios.

### 3.3 Blocos

A Figura 21 mostra um bloco sendo ensaiado e o modo de ruptura típico dos blocos. Na Tabela 10 são apresentados os valores de resistência média à compressão e os coeficientes de variação obtidos para os ensaios dos blocos de concreto, capeados com pasta de cimento.

### 3.4 Prismas

A Figura 22 mostra alguns prismas ocós e grauteados, respectivamente, após os ensaios. Provavelmente, devido a alta resistência dos blocos utilizados nos prismas, os prismas ocós não tiveram uma ruptura típica, conforme a norma e resultados apresentados na literatura. Os prismas ocós romperam devido ao desenvolvimento de fissuras verticais ao longo da altura seguida de separação das paredes laterais dos blocos ou pelo esmagamento da junta de argamassa seguido de separação lateral das paredes laterais dos blocos.

A resistência a compressão medida para os prismas ocós e grauteados são apresentadas na Tabela 11 e Tabela 12, respectivamente, e também são apresentados os desvios padrões e os coeficientes de variação em percentagem.

Os valores apresentados nas Tabela 13, Tabela 14 e Tabela 15 são  $f_{pa}$ ,  $\Delta_u$ ,  $\Delta_{u50\%}$ ,  $\epsilon_u$ , e  $\epsilon_{50\%}$ , representando a resistência a compressão média, o encurtamento média última, o encurtamento a 50% da tensão máxima, a deformação média última, e a deformação a 50% da tensão máxima, respectivamente. Os resultados das resistências verificadas, a relação tensão-deformação para alvenaria em compressão, a relação tensão-deformação para a carga última, o efeito da cinta a meia altura da parede, o tipo de assentamento da argamassa, o efeito do grauteamento das paredes e o modo de ruptura são discutidos nas seções seguintes.

**Tabela 13**

Descrição e resultados dos ensaios das paredes para o Bloco B3

Designação das paredes	$f_{pa}$ (MPa)	$\Delta_{u50\%}$ (mm)	$\epsilon_{u50\%}$ (mm/mm)
<b>Par-B3-O-AT</b>			
Média	11,4	0,49	0,0006
Coeficiente variação	4,45	28,90	27,98
<b>Par-B3-O-AP</b>			
Média	11,8	0,48	0,0006
Coeficiente variação	4,89	17,69	19,16
<b>Par-B3-O-AT-CT</b>			
Média	11,1	0,46	0,0005
Coeficiente variação	3,88	7,93	5,09
<b>Par-B3-G-AT-CT</b>			
Average	19,0	0,49	0,0006
Coefficient of variation	14,03	24,44	19,58

**Tabela 14**

Descrição e resultados dos ensaios das paredes para Bloco B<sub>2</sub>

Designação das paredes	$f_{pa}$ (MPa)	$\Delta_u$ (mm/mm)	$\epsilon_u$ (mm/mm)
<b>Par-B2-O-AP</b>			
Média	10,7	0,78	0,0008
Coeficiente variação	0,9	15,68	19,60
<b>Par-B2-O-AT-CT</b>			
Média	11,8	0,97	0,0012
Coeficiente variação	3,3	22,22	19,64
<b>Par-B2-G-AT-CT</b>			
Média	19,8	1,20	0,0013
Coeficiente variação	10,7	18,65	16,31

**Tabela 15**Descrição e resultados dos ensaios das paredes para o Bloco B<sub>1</sub>

Designação das paredes	$f_{pa}$ (MPa)	$\Delta_u$ (mm/mm)	$\varepsilon_u$ (mm/mm)
<b>Par-B1-O-AT-CT</b>			
Média	7,8	0,72	0,0008
Coefficiente variação	6,19	23,45	19,60
<b>Par-B1-O-AP</b>			
Média	7,8	0,98	0,0011
Coefficiente variação	8,35	21,75	23,47
<b>Par-B1-G-AT-CT</b>			
Média	11,5	1,06	0,0012
Coefficiente variação	20,22	24,88	27,39

### 3.5 Grupo 1 – Paredes com blocos de concreto de alta resistência de 30MPa (B<sub>3</sub>)

Os resultados dos ensaios do grupo 1 são apresentados na Tabela 13. Para as paredes ocas e com assentamento total de argamassa, a tensão de ruptura média foi de 11,43 MPa. Já para as paredes ocas com assentamento parcial, a tensão de ruptura média foi de 11,82 MPa. Esse resultado era inesperado, pois esperava-se maior resistência para as paredes com assentamento total. A diferença em relação a resistência média das paredes é apenas 3,3%. Aplicando um teste-t nos resultados, chega-se a um p-value igual a 22,5%, indicando que, estatisticamente, as médias são iguais para um nível de significância de 95%. Os encurtamentos médios,  $\Delta_{u50\%}$ , de todas as paredes do grupo 1, varia em média de 0,46 a 0,49 mm. É evidente que o encurtamento das paredes é indiferente das variáveis consideradas. As deformações médias,  $\varepsilon_{u50\%}$ , são semelhantes, sendo os valores de 0,0006, 0,0006, 0,0005 e 0,0006, respetivamente para as paredes ocas com assentamento total, paredes ocas com assentamento parcial, paredes ocas com assentamento total e cinta a meia altura e para as paredes grauteadas com assentamento total e cinta a meia altura.

A norma brasileira de alvenaria estrutural com blocos de concreto, NBR 15961-2 [23], prescreve que a capacidade máxima de compressão das paredes com assentamento parcial deve ser considerada 20% inferior à das paredes com assentamento total. Os resultados apresentados aqui não corroboram a redução indicada pela norma. A hipótese aqui levantada para explicar essa semelhança refere-se à geometria dos blocos. A configuração da posição e espessura dos septos dos blocos leva à não sobreposição desses quando assentado com defasagem de 20 cm. Portanto, o assentamento total nesse caso pode ter sido ineficiente pela não coincidência dos septos. A tensão de compressão de ruptura média foi de 19,0 e 11,1 MPa para as paredes grauteadas e não grauteadas (com cinta e assentamento total de argamassa), respetivamente, representando um aumento em resistência de aproximadamente 66%.

### 3.6 Grupo 2 – Paredes com blocos de concreto de alta resistência de 24MPa (B<sub>2</sub>)

Os resultados dos ensaios do grupo 2 são apresentados na Tabela 14. Para as paredes ocas com assentamento total e com cinta grauteada a meia altura da parede, a tensão de compressão de ruptura média foi de 11,77 MPa enquanto que para as paredes ocas com assentamento parcial e sem cinta grauteada, a carga de ruptura média foi de 10,69 MPa. Percebe-se um aumento de 10 % na carga de ruptura para as paredes ocas com assentamento total e cinta a meia altura em relação

as paredes ocas com assentamento parcial e sem cinta grauteada a meia altura. O teste-t indica um p-value de 2,7%, mostrando que há diferença entre as médias. A existência de canaleta a meia altura pode ter contribuído para melhor distribuição das cargas na região crítica e contribuído para o aumento de resistência quando o assentamento foi total. Entretanto, esse mesmo resultado não foi encontrado nos ensaios do grupo 3, o que invalida essa hipótese. Os encurtamentos últimos médios,  $\Delta_u$ , foram respetivamente 0,78, 0,97 e 1,20 mm para as paredes ocas com assentamento total e cinta grauteada a meia altura, para as paredes ocas com assentamento parcial e para as paredes grauteadas com cinta grauteada a meia altura. Percebe-se, portanto, uma variabilidade no encurtamento médio das paredes. As deformações médias,  $\varepsilon_u$ , são 0,0008, 0,0012, e 0,0013 mm/mm, respetivamente para as paredes ocas com assentamento total e cinta a meia altura, para as paredes ocas com assentamento parcial e para as paredes grauteadas com assentamento total e cinta a meia altura.

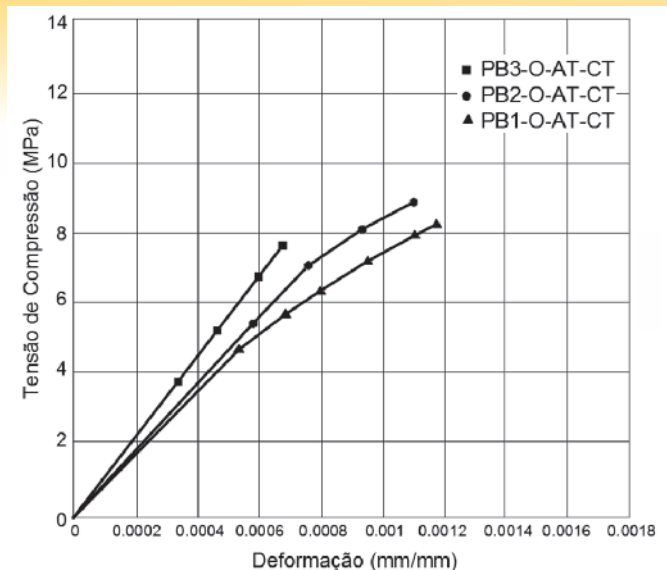
Quando se compara as paredes ocas com assentamento total e cinta a meia altura, com tensão de compressão máxima de ruptura de 11,77 MPa com as paredes grauteadas com assentamento total e cinta grauteada a meia altura com tensão de compressão máxima de ruptura de 19,79, observa-se que a capacidade de ruptura média das paredes grauteadas é aproximadamente 68% maior do que à das paredes ocas.

### 3.7 Grupo 3– Paredes com blocos de concreto de alta resistência de 16MPa (B<sub>1</sub>)

Os resultados dos ensaios do grupo 3 são apresentados na Tabela 15. A tensão de compressão de ruptura média foi 7,8 MPa para as paredes ocas tanto para o caso de assentamento lateral sem cinta, quanto para o caso de assentamento total com cinta. Portanto, não houve diferença significativa entre o tipo de assentamento e presença de cinta a meia altura. Os encurtamentos últimos médios,  $\Delta_u$ , foram respetivamente 0,72, 0,98 e 1,06 para as paredes ocas com assentamento total e cinta grauteada a meia altura, para as paredes ocas com assentamento parcial e para as paredes grauteadas com cinta grauteada a meia altura. Como aconteceu com as paredes do grupo 2, percebe-se uma pequena variabilidade no encurtamento médio das paredes. As deformações médias,  $\varepsilon_u$ , foram 0,0008, 0,0011, e 0,0012, respetivamente para as paredes ocas com assentamento total e cinta a meia altura, para as paredes ocas com assentamento parcial e para as paredes grauteadas com assentamento total e cinta a meia altura.

Quando se compara as paredes ocas com assentamento total e cinta a meia altura, com tensão de compressão máxima de ruptura





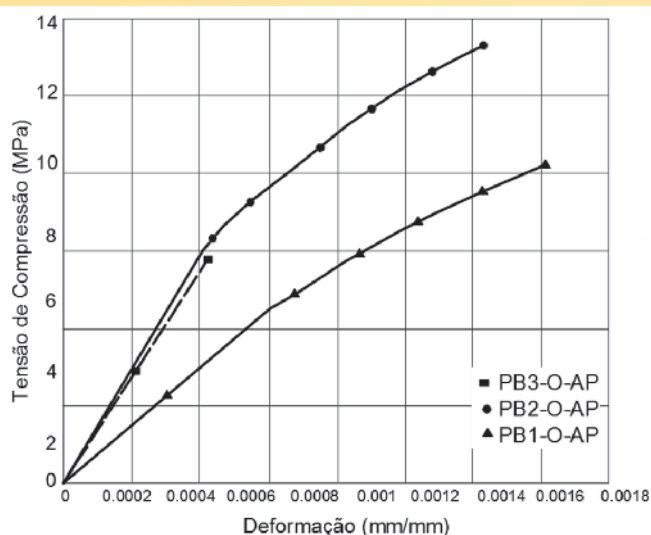
**Figura 23**  
Curvas de tensão x deformação para as paredes PB-O-AT-CT, considerando as três resistências de blocos

de 7,78 MPa, com as paredes grauteadas com assentamento total e cinta grauteada a meia altura, com tensão de compressão máxima de ruptura de 11,53 observa-se que as paredes grauteadas são aproximadamente 48% superior as paredes ocas.

### 3.8 Relação tensão-deformação

Para avaliar o efeito da cinta a meia altura, do grauteamento e do assentamento parcial ou total na relação tensão-deformação da alvenaria de alta resistência em compressão, foram plotadas as curvas tensão-deformação das amostras para os grupos 1, 2 e 3. As deformações médias últimas para as paredes dos Grupos 2 e 3 foram calculadas utilizando os deslocamentos verticais até a ruptura dentro de uma medição do comprimento calibrado sobre a face das paredes. As deformações ultimas médias para as paredes dos Grupos 2 e 3 e as deformações médias para as paredes do grupo 1 (considerando 50% da carga de ruptura) são apresentadas nas Tabela 13, Tabela 14 e Tabela 15. As deformações médias últimas para as paredes dos Grupos 2 e 3 variou de 0,001 a 0,0015. Para as paredes do Grupo 1, os deslocamentos medios foram medidos até 50% da carga de ruptura prevista e variou de 0,0005 a 0,0006. Relações tensão-deformação para as paredes com as mesmas características de cada grupo estão apresentadas nas Figura 23, Figura 24 e Figura 25. A tensão de compressão para as paredes foi determinada diretamente através da divisão da carga aplicada pela área bruta das paredes. Para as paredes PB3-O-AT-CT, PB3-O-AP e PB3-G-AT-CT foi possível obter a curva tensão-deformação durante o ensaio somente até 50% da carga de ruptura, enquanto para as restantes paredes as curvas foram obtidas até a ruptura das mesmas. Os resultados apresentados na Figura 23, Figura 24 e Figura 25 mostram uma ruptura frágil para todas as paredes ensaiadas.

Paras as paredes ocas assentas com argamassa total e com cinta grauteada a meia altura da parede, a curva tensão-deformação, Figura 23, manteve-se linear aproximadamente até 75% da carga de ruptura. Enquanto que as paredes ocas assentas com argamassa parcial e sem cinta a meia altura, a curva tensão-deformação, Figura 24, manteve-se linear aproximadamente até 70% da carga de ruptura. Já no caso das paredes grauteadas assentas



**Figura 24**  
Curvas de tensão x deformação para as paredes PB-O-AP, considerando as três resistências de blocos

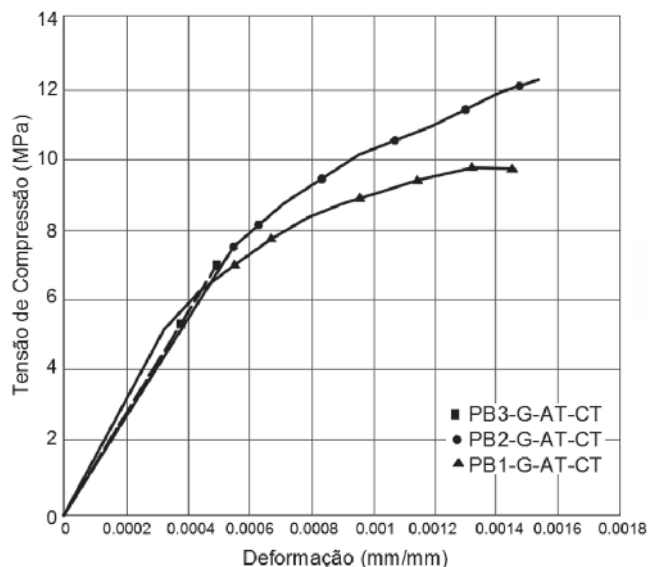
com argamassa total e com cinta grauteada a meia altura da parede, a curva tensão-deformação,

Figura 25, manteve-se linear aproximadamente até 60% da carga de ruptura, indicando que a colocação da cinta a meia altura da parede, a forma de assentamento, argamassamento parcial ou total, e o grauteamento das paredes tem um pequeno efeito na forma da curva tensão-deformação para paredes.

A comparação da curva tensão-deformação entre as paredes ocas e grauteadas indica que, no geral, a forma das curva tensão-deformação são similares, enquanto que as paredes grauteadas mostram um comportamento não linear mais pronunciado.

### 3.9 Modulo de elasticidade da alvenaria

O modulo de elasticidade foi considerando pela reta secante da



**Figura 25**  
Curvas de tensão x deformação para as paredes PB-G-AT-CT, considerando as três resistências de blocos

curva entre 5 e 30% da tensão de ruptura. O módulo de elasticidade ainda pode ser calculado como uma função da resistência à compressão da alvenaria, e essas estimativas são encontrados em normas de construção para dimensionamento. A NBR 15961-1 [4] prescreve que o módulo de elasticidade da alvenaria com blocos de concreto pode ser estimado como sendo  $800 f_{pk}$ .

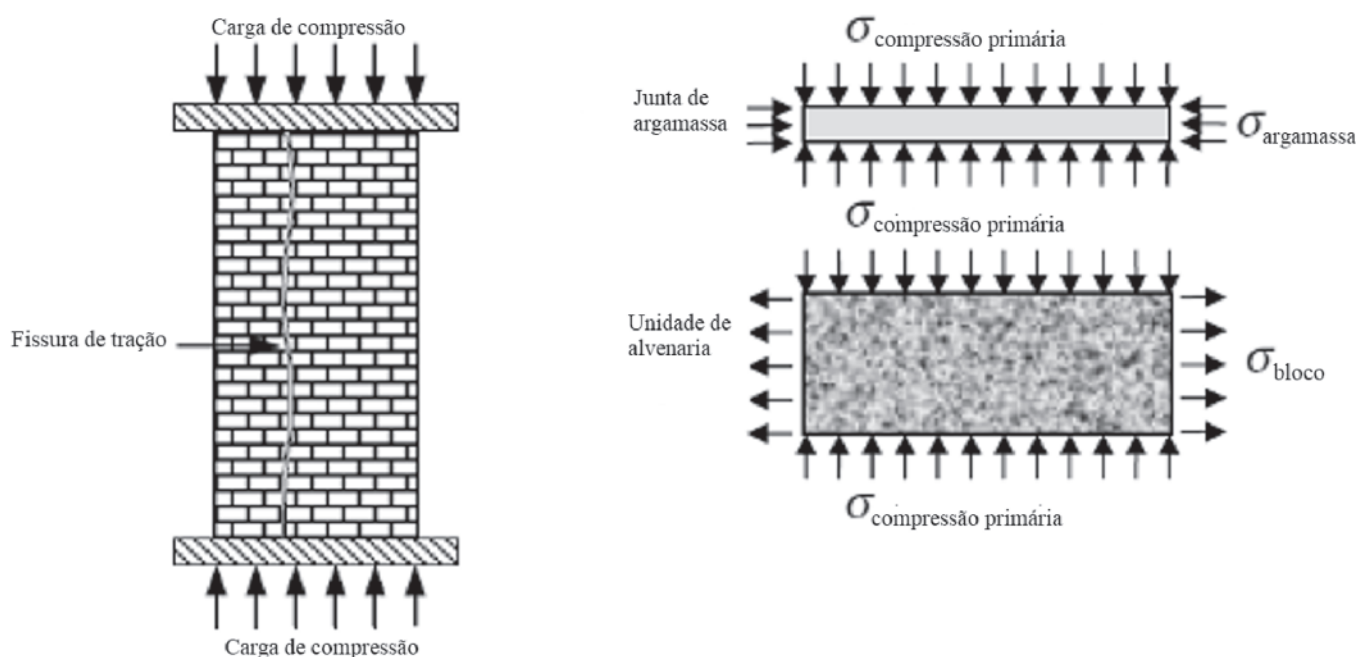
A Tabela 16 mostrar os resultados médios do módulo de elasticidade obtida através dos ensaios de compressão das paredes pela análise da região linear dos gráficos de tensão-deformação.

Em média, os resultados do módulo de elasticidade secante dos ensaios de compressão do grupo 1 variou de 20,2 GPa para as paredes ocas a 24,2 GPa para as paredes grauteadas.

**Tabela 16**

Resumo dos resultados médios máximos do módulo de elasticidade dos ensaios das paredes

Designação	Grupo 1 Par - B <sub>3</sub>	Group 2 Par - B <sub>2</sub>	Group 3 Par - B <sub>1</sub>
<b>Par-O-AT</b>			
E (média) (MPa)	20631	-	-
EA (800 f <sub>p</sub> ) (MPa)	13520	-	-
Coefficiente de variação	26,05%	-	-
<b>Par-O-AP</b>			
E (média) (MPa)	20283	19658	14327
EA (800 f <sub>p</sub> ) (MPa)	13520	10640	8000
Coefficiente de variação	8,31%	8,07%	4,76%
<b>Par-O-AT-CT</b>			
E (média) (MPa)	23438	20473	15781
EA (800 f <sub>p</sub> ) (MPa)	13520	10640	8000
Coefficiente de variação	13,96%	6,71%	4,68%
<b>Par-G-AT-CT</b>			
E (média) (MPa)	24219	23927	15394
EA (800 f <sub>p</sub> ) (MPa)	25760	23200	17840
Coefficiente de variação	17,14%	34,17%	-12,97%



**Figura 26**

Modo de ruptura da alvenaria (Hendry et al 2004)

Observou-se também que os resultados do módulo de elasticity secante dos ensaios de compressão do grupo 2 variou em média de 19,6 GPa para paredes ocas a 23,9 GPa para as paredes grauteadas. Já para as paredes do grupo 3, em média, os resultados do módulo de elasticity secante dos ensaios de compressão variou de 14,3 GPa para as paredes ocas a 15,4 GPa para as paredes grauteadas.

Utilizando a prescrição da norma ABNT NBR 15961-2 [23], que especifica que o módulo de elasticidade da alvenaria igual a  $800 f_{pk}$ , limitado a 16 GPa, percebe-se que os valores calculados são muito superiores para todas as paredes ocas, com valores consideravelmente maiores que 16 GPa e com diferenças entre 50% até quase 100%. No caso das paredes grauteadas, os valores calculados são próximos aos estimados com  $E = 800 f_p$ , com diferenças entre -14% a +6%; ou seja, entre  $688 f_p$  a  $848 f_p$ .

### 3.10 Modo de ruptura

O modo de ruptura de alvenaria em compressão é geralmente causado por uma fissura de tração que se propaga através dos blocos e da argamassa na direção da força aplicada, como mostrado na Figura 26. Esta fissura é causada por tensões de tração secundárias resultantes da deformação de confinamento da argamassa nas juntas da alvenaria (Hendry et al.[2]). As tensões de tração que induzem a fissura são desenvolvidas nas interfaces argamassa-blocos e são devido à deformação restrita da argamassa. Na maioria dos casos, a resistência da alvenaria é consideravelmente menor do que a resistência dos blocos, essa, contudo, é consideravelmente mais elevada do que a da argamassa. A melhoria aparente na resistência da argamassa é devido ao

estado biaxial ou triaxial de tensões impostas sobre a argamassa quando atua em conjunto com os blocos.

O modo de ruptura observado nos ensaios foi de compressão típica iniciada por fissuras verticais através das faces longitudinais e transversais das paredes como mostrado nas Figura 27 à Figura 31. As fissuras verticais iniciaram-se por fissuração de tração, com alguma evidência de esmagamento da alvenaria, como mostra a Figura 29. Observou-se, conforme mostra a Figura 30, que em alguns casos o desenvolvimento das fissuras acontece bem no centro das paredes e em as vezes um pouco afastado do centro. Para as paredes grauteadas com cinta grauteada, o modo de ruptura caracterizou-se por fissuras de separação verticais nas paredes transversais dos blocos, conforme mostra a Figura 31. Para as paredes do grupo 1 e 2, a primeira fissura surgiu aproximadamente quando a carga era 60 % da carga de ruptura, enquanto que para as paredes do grupo 3, o aparecimento das primeiras fissuras aconteceu quando a carga era aproximadamente 75% da carga de ruptura. As paredes grauteadas, com cinta à meia altura, apresentaram uma forma de ruptura atípica daquele observada para paredes de alvenaria sem cinta, conforme mostra a Figura 31. A carga de ruptura, entretanto, foi semelhante à de paredes sem cinta.

### 3.11 Relação de resistência de parede/prismas/bloco

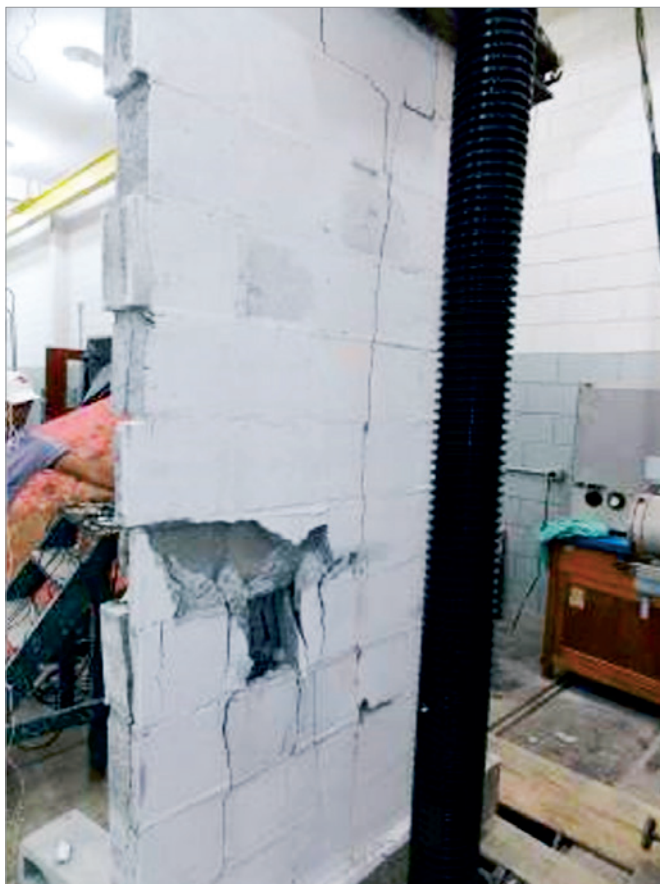
A normalização brasileira admite que a resistência da parede,  $f_k$ , seja igual a 70% da resistência do prisma,  $f_{pk}$ . Paredes em escala real normalmente tem resistência inferior à do prisma e a do prisma inferior à do bloco devido à esbelteza e possibilidade de



**Figura 27**  
Modo de ruptura das paredes ocas com cinta grauteada



**Figura 28**  
Ilustração da ruptura das paredes ocas



**Figura 29**  
Ilustração da ruptura com fissuração vertical e esmagamento da alvenaria



**Figura 30**  
Ilustração da fissuração vertical das paredes Grupo 1 e 2



**Figura 31**  
Modo de ruptura das paredes grauteadas

**Tabela 17**

Resumo das resistências e eficiências dos materiais e elementos ensaiados

$f_b$ (MPa)	$f_p$ (MPa)		Parede	Parede oca		Parede grauteada		Oco/ grauteada
	Oco	Grauteado		$f$ (MPa)	$f/f_p$	$f$ (MPa)	$f/f_p$	
18,7	10	22,3	B1-O/G-AT-CT	7,8	0,8	11,53	0,5	1,5
			B1-O-AP	7,8	0,8	-	-	-
27,3	13,3	29	B2-O/G-AT-CT	10,7	0,8	19,79	0,7	1,9
			B2-O-AP	11,8	0,9	-	-	-
34,5	16,9	32,2	B3-O/G-AT-CT	11,4	0,7	18,98	0,6	1,7
			B3-O-AT	11,8	0,7	-	-	-
			B3-G-AP	11,1	0,7	-	-	-

distribuição não uniforme do carregamento. Fortes [21] observou, em seus ensaios com diversas resistências de blocos, uma diminuição da resistência do prisma a medida que a resistência do bloco aumenta e calculou valores de eficiência de 0,8 a 0,5 para blocos de 6,0 MPa a 34,0 MPa. A Tabela 17 apresenta um resumo da resistência a compressão dos blocos, argamassa, dos prismas ocios e grauteados e das paredes. Também são apresentadas as eficiências, aqui definida como a razão entre a resistência a compressão das paredes e a resistência à compressão dos prismas. Para as paredes do grupo 1, a razão entre a resistência à compressão das paredes ocios com assentamento total e a resistência à compressão dos prismas ocios (com assentamento total) é de 0,7. Quando se inclui uma cinta grauteada a meia altura da parede ou quando se realiza um assentamento parcial, a razão entre a resistência à compressão das paredes ocios e a resistência à compressão dos prismas ocios permanece igual a 0,7. A razão entre a resistência à compressão média das paredes grauteadas com cinta grauteada a meia altura da parede e a resistência à compressão dos prismas grauteados é de 0,6.

Para as paredes do grupo 2, a razão entre a resistência à compressão das paredes ocios com assentamento total e cinta a meia altura e os prismas ocios é de 0,9, enquanto que para as paredes ocios com assentamento parcial e sem cinta essa razão é de 0,8. Para as paredes grauteadas com cinta grauteada a meia altura e os prismas grauteados, calculou-se uma relação de resistência à compressão de 0,7.

Para as paredes do grupo 3, a razão entre a resistência à compressão das paredes ocios com assentamento parcial e a resistência à compressão dos prismas ocios é de 0,8. Calculou-se a mesma razão para as paredes ocios com assentamento total e cinta grauteada a meia altura da parede. A razão entre a resistência à compressão das paredes grauteadas com cinta grauteada a meia altura da parede e a resistência à compressão dos prismas grauteados é apenas 0,5.

Desta forma, os resultados indicam que é seguro utilizar a convencional relação parede/prisma igual a 0,7 para paredes não grauteadas, mesmo para os blocos de alta resistência. Para o caso de paredes grauteadas, registra-se a recomendação de considerar o aumento máximo de 50% em relação à parede não grauteada. Foi aplicado o teste Anova – Análise de Variância entre os resultados para as paredes construídas com o mesmo bloco – B<sub>3</sub>. O

teste teve como objetivo verificar se existe diferença significativa na resistência a compressão para:

- Paredes ocios construídas com blocos de concreto, assentos com argamassamento total, e cinta grauteada a meia altura da parede: PB3-O-AT-CT;
- Paredes ocios construídas com blocos de concreto, assentos com argamassamento total, e sem cinta grauteada a meia altura da parede: PB3-O-AT;
- Paredes ocios construídas com blocos de concreto, assentos com argamassamento parcial, e sem cinta grauteada a meia altura da parede: PB3-O-AP.

Três amostras foram utilizadas no teste de resistência à compressão axial para cada tipo de ensaio das paredes. Com base nos resultados do teste ANOVA, variando o tipo de assentamento e a colocação ou não da cinta grauteada a meia altura da parede verificou-se que  $F_0 = 2.34 < F_{\alpha, u1, u2} = 5.14$ . Portanto não existe diferença significativa entre as paredes PB3-O-AT-CT; PB3-O-AT e PB3-O-AP.

Para as paredes construídas com blocos B<sub>2</sub> e B<sub>1</sub>, foi aplicado o teste t para determinar se há um nível de significância de 5%, se a colocação de uma cinta grauteada a meia altura da parede ou o tipo de assentamento altera ou não a resistência média à compressão das paredes. A comparação foi realizada entre as:

- Paredes ocios construídas com blocos de concreto B1, assentos com argamassamento total, e sem cinta grauteada a meia altura da parede: PB1-O-AT-CT; e as;
- Paredes ocios construídas com blocos de concreto B1, assentos com argamassamento parcial, e sem cinta grauteada a meia altura da parede: PB1-O-AP.

Três exemplares foram utilizados no teste de resistência à compressão axial para cada tipo de paredes. Com base nos resultados do teste t, variando o tipo de assentamento e a colocação da cinta grauteada a meia altura da parede verificou-se que  $t_{4;5\%} = 2,132 > t = 0,049$ . Portanto não existe diferença significativa entre as resistências a compressão média entre as paredes PB1-O-AT-CT e PB1-O-AP.

A mesma análise, teste t, foi realizada para as paredes construídas com blocos B2. Com base nos resultados do teste t, variando o tipo de assentamento e a colocação da cinta grauteada a meia altura da parede verificou-se que  $t_{4;5\%} = 2,132 < t = 6,67$ . Portanto existe diferença significativa na resistência a compressão média entre as paredes PB2-O-AT-CT e PB2-O-AP.

## 4. Conclusões

Foi apresentado um programa experimental abrangente com o objetivo de avaliar o comportamento à compressão de alvenaria com bloco de concreto de alta resistência, em paredes não-grauteadas e grauteadas. Blocos de resistência nominais de 16, 24 e 30 MPa foram utilizados. O graute foi produzido com aditivo compensador de retração. A resistência a compressão das paredes foi avaliada considerando a resistência à compressão dos blocos, o tipo de assentamento da argamassa, e o uso ou não de uma cinta grauteada a meia altura da parede.

As principais conclusões da pesquisa apresentada aqui são:

- Não houve diferença estatisticamente significativa entre a resistência à compressão média para as paredes ocas com assentamento de argamassa parcial ou total;
- Não houve diferença estatisticamente significativa entre a resistência à compressão média para as paredes ocas, com argamassa total e com argamassa parcial, com e sem cinta grauteada;
- Todas as paredes ocas apresentaram relação parede/prisma superior a 0,7;
- Todas as paredes grauteadas apresentaram aumento de resistência à compressão de pelo menos 50% em relação às paredes ocas;
- Os gráficos tensão-deformação mostram ruptura frágil de todas as paredes com deformação de ruptura entre 0,10 e 0,15% (compressão simples);
- Os resultados dos módulos de elasticidade foram sempre maiores que  $800 f_p$  para paredes ocas e entre 688 e  $848 f_p$  para paredes grauteadas. Vários resultados foram superiores ao limite de 16 GPa indicado na ABNT NBR 15961-1.

A partir dessas observações, pode-se sugerir, para alvenaria com blocos de resistência maior que 16 MPa o seguinte:

- O valor da relação parede-prisma igual a 0,7 pode ser adotado para blocos de concreto de alta resistência para paredes não grauteadas;
- Para paredes totalmente grauteadas, pode se usar um aumento máximo de 50% no valor da relação parede-prisma em relação ao valor para paredes não grauteada;
- Considerando a geometria do bloco utilizado, o uso de assentamento de argamassa em toda face do bloco não é eficiente, desta forma a recomendação é de considerar argamassa apenas na lateral, tanto no cálculo quanto na execução. Ressalva-se que outras eventuais geometrias de blocos, com perfeita sobreposição dos septos, podem trazer resultados diferentes do aqui relatado;
- O uso de cinta à meia altura para paredes não leva a diminuição da resistência a compressão;
- O valor do módulo de elasticidade indicado na normalização brasileira igual a  $800 f_{pk}$  pode ser aferido para paredes não grauteadas, porém um valor menor foi verificado nos ensaios de paredes grauteadas. Entende-se que esse ponto deve ser melhor estudado em trabalhos futuros. Por precaução, recomenda-se adotar o valor de  $E = 600$  a  $650 f_{pk}$  para alvenaria com blocos de concreto de alta resistência (maior que 16 MPa);
- Em contrapartida, o valor limite para  $E = 16$  GPa, não foi verificado nos ensaios aqui apresentados, sendo assim sugerido eliminar esse limite da normalização brasileira.

## 5. Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da Fundação de Apoio a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), através dos processos 2012/22454-0 e 2015/02362-2, da CESP – Companhia Energética do Estado de São Paulo e do Grupo Chimica Edile.

## 6. Referências bibliográficas

- [1] Parsekian. G. A. Hamid. A. A. and Drysdale. R. G. Comportamento e Dimensionamento de Alvenaria Estrutural. EdUFSCar. São Carlos. S.P. Brazil. 2012.
- [2] Hendry. A. W.; Sinha B. P.; Davies S. R. Design of Masonry Structures. Department of Civil Engineering. University of Edinburgh. UK. E & FN SPON. 3ª ed. London. 2004.
- [3] Curtin. W. G. Shaw. G. and Beck. J. K. Design of Reinforced and Prestressed Masonry. Thomas Telford. London. Ed. 1988.
- [4] ABNT-NBR 15961-1: Alvenaria estrutural — Blocos de concreto — Parte 1: Projeto. Rio de Janeiro. 2011.
- [5] ABNT-NBR 8949: Paredes de alvenaria estrutural – Ensaio à compressão simples. Rio de Janeiro. 1985.
- [6] ABNT-NBR 12118: Blocos Vasados de Concreto Simples para Alvenaria – Métodos de ensaio – NBR 12118. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. R.J. Brazil. 2011.
- [7] ABNT-NBR 5738: Concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos – método de ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. R.J. Brasil. 2003.
- [8] ABNT-NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. R.J. Brasil. 2009.
- [9] ABNT-NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência a tração na flexão e a compressão. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. R.J. Brasil. 2005.
- [10] Eurocode 6. 1996-1-1: Rules for reinforced and unreinforced masonry. 1996.
- [11] McNary. W. S. and Abrams. D. P. (1985). Mechanics of masonry in compression. Journal of Structural Engineering. 111(4). 857-870. DOI:10.1061/(ASCE)0733-445(1985)111:4(857)
- [12] Atkinson. R. H.; Noland. J. L.; Abrams. D.P. and McNary S. A deformation failure theory for stack-bond brick masonry prisms in compression. Proc. 3rd NAMC. Arlington. Texas 1985.
- [13] Drysdale. R.G. Hamid. A.A. and Baker. L.R. Masonry structures: behavior and design. Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs. N.J. 1994
- [14] Cavalheiro. O. P.; Gomes. N. S. Alvenaria estrutural de blocos vazados: resultados de ensaios de elementos e redutores de Strength à compressão. In: XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural. 2002. Brasília. DF. Anais da XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural. 2002.
- [15] Aly. V. L. C. Determinação da capacidade resistente do elemento parede de alvenaria armada de blocos de concreto submetido a esforços de compressão. São Paulo. 1991.103p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica. Universidade de São Paulo.

- [16] Medeiros. J. S. Alvenaria estrutural não armada de blocos de concreto: produção de componentes e parâmetros de projeto. São Paulo. 1993. 2v. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica. Universidade de São Paulo.
- [17] Mendes. J. R. K. Resistência a compressão de alvenaria de blocos cerâmicos estruturais. Florianópolis. 1998. 185p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina.
- [18] Mohamad. G. Comportamento mecânico na ruptura de prismas de blocos de concreto. Florianópolis. 1998. 117p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina.
- [19] Romagna. R. H. Resistência a compressão de prismas de blocos de concreto grauteados e não grauteados. MS thesis. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. S.C. Brazil. 2000.
- [20] Maurício. R. M., Estudo teórico e experimental das ligações diretas contra-fiadas entre paredes de blocos de concreto em escala real e reduzida 1:4. Dissertação (mestrado). Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. UNESP. 2005.
- [21] Fortes. E. S., Influência do Capeamento e Caracterização da Resistência a Compressão de Alvenaria Estrutural de Blocos de concreto. Dissertation (MS) - Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2012.
- [22] ABNT–NBR 6136: Blocos Ocos de Concreto Simples para Alvenaria – Requisitos. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. R.J. Brasil. 2007.
- [23] ABNT NBR 15961-2: Alvenaria estrutural — Blocos de concreto — Parte 2: Execução e controle de obras. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. R.J. Brasil. 2011.
- [24] ABNT–NBR 5739: Ensaio à compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. R.J. Brasil. 2007.
- [25] Silva. A. F. Avaliação da Strength à compressão da alvenaria estrutural. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira. 2007.

## 7. Notação

- $f_b, f_{bk}$  = resistência média e característica à compressão do bloco (MPa);
- $f_p, f_{pk}$  = resistência média e característica à compressão do prisma (MPa);
- $f_{bm}$  = resistência característica à compressão do bloco (MPa);
- $f_k$  = resistência característica à compressão da alvenaria (MPa);
- $f_{ppk}$  = resistência característica à compressão da pequena parede (MPa);
- $f_m$  = resistência média à compressão da argamassa (MPa).