

Theoretical model for predicting the compressive strength of reinforced masonry

Modelo teórico para a previsão da resistência à compressão da alvenaria armada



R. F. SILVA^a
eng_rfs@hotmail.com

J. S. CAMACHO^b
jsc@dec.feis.unesp.br

R. O. RODRIGUES^b
ror@dec.feis.unesp.br

Abstract

This paper compares different models for predicting the compressive strength of concrete block masonry prisms. Four different prism configurations were studied experimentally, each of which was tested without grout (ungrouted prisms) and with grout and reinforcement (reinforced prisms). The axial compressive strength, strain and failure modes of all the prism configurations were recorded. These results were then compared with different theoretical models for predicting compressive strength, based on the individual strength of each material, its break strain and the strapping effect of the blocks on the system. Among the models studied here, the best results were obtained with those that consider the strapping effect of the concrete block, as well as a change in the break strain of grout.

Keywords: structural masonry, concrete blocks, prisms, compressive strength, models.

Resumo

Neste trabalho faz-se a comparação entre diferentes modelos para se prever a resistência à compressão de prismas de alvenaria de blocos de concreto. Foram estudados experimentalmente quatro tipos diferentes de configurações de prismas, sendo cada um deles ensaiados vazios, ou seja, não grauteados, e preenchidos com graute mais armaduras, denominados prismas armados. Para todos os arranjos de prismas foram registradas as suas resistências à compressão axial, deformações e modos de ruptura. Posteriormente, esses resultados foram comparados com diferentes modelos teóricos de previsão de resistência, baseados nas resistências individuais de cada material, nas suas deformações de ruptura e no efeito de cintamento introduzido pelos blocos no sistema. Entre os modelos estudados, verificou-se que os que conduziram à melhores resultados foram aqueles em que foi considerado o efeito do cintamento proporcionado pelo bloco de concreto e, ainda, uma alteração na deformação de ruptura do graute.

Palavras-chave: alvenaria estrutural; blocos de concreto; prismas; resistência à compressão; modelos.

^a Civil Engineer – PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. – PETROBRAS, MSc in Civil Engineering, São Paulo State University (UNESP) – Ilha Solteira School of Engineering, Ilha Solteira/SP, eng_rfs@hotmail.com, Brazil.

^b Professor, PhD, Postgraduate Program in Civil Engineering (PPGEC), São Paulo State University (UNESP) – Ilha Solteira School of Engineering, Department of Civil Engineering, jsc@dec.feis.unesp.br, ror@dec.feis.unesp.br, Ilha Solteira/SP, Brazil.

1. Introdução

A alvenaria estrutural é definida como um componente conformado em obra, constituída por tijolos ou blocos unidos entre si por juntas de argamassa, formando um conjunto rígido e coeso. É um processo construtivo racionalizado e deixou de ser desvalorizado para ser uma alternativa construtiva competitiva em todos os sentidos. No Brasil vem se destacando por ser econômico, em comparação às construções convencionais de concreto a alvenaria estrutural de blocos apresenta grande potencial de crescimento. Entretanto, deve-se considerar que a alvenaria estrutural necessita ainda de grandes melhorias tecnológicas para se aproximar do desenvolvimento que se observa com as estruturas convencionais de concreto armado. A própria normalização nacional, cujos principais documentos da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) estão relacionados na bibliografia, necessita de avanços, exigindo dos centros de pesquisa um grande esforço para que se possa projetar e executar edifícios econômicos e seguros.

Os principais componentes empregados na execução de edifícios de alvenaria estrutural são as unidades (tijolos ou blocos), a argamassa, o graute e as armaduras (construtivas ou de cálculo). Quanto aos materiais que compõem as unidades, a alvenaria pode ser classificada em: alvenaria estrutural de blocos de concreto, cerâmica e sílico calcárea. Segundo Aly [1] o bloco de concreto surgiu em meados do século XIX, na Europa. Por volta de 1890, nos Estados Unidos, foram criados os blocos vazados, que por serem mais leves e possuírem resistências satisfatórias tiveram grande disseminação por todo o EUA e Europa. No Brasil, o bloco foi introduzido em 1950, quando a primeira máquina foi importada dos EUA pela construtora Camargo Corrêa.

A melhor estimativa da resistência à compressão de uma parede de alvenaria, de acordo com Page e Shrive [2], é obtida por ensaios em corpos de prova de paredes, completamente representativos da alvenaria in-situ. Porém, ensaios em paredes exigem instalações especializadas e, embora desejáveis, não podem ser considerados como testes de rotina apropriados para estimar a resistência de uma combinação particular de unidade e argamassa. Duas aproximações são usualmente adotadas para estimar a resistência à compressão de uma parede de alvenaria: (a) ensaios em amostras individuais de unidades e argamassa, ou (b) ensaios em pequenos corpos de prova de alvenaria (prismas ou paredinhas).

Drysdale e Hamid [3], Maurenbrecher [4], Prudêncio Jr. [5], Colville e Wolde-Tinsae [6] e Page et al. [7], afirmam que os resultados obtidos por meio de ensaios com elementos de dois blocos são de difícil correlação com o comportamento da parede de alvenaria. Isso ocorre por que o confinamento do topo e base do prisma faz com que a sua resistência seja aumentada e o modo de ruína seja alterado, prejudicando a forma normal de ruptura dos prismas (tração nas unidades segundo planos paralelos à aplicação de carga) e aumentando a carga necessária para rompê-los, passando a ruína ocorrer por cisalhamento. Assim, os ensaios em prismas devem ter pelo menos três unidades para representar mais eficazmente a parede e minimizar o confinamento imposto pelos pratos da prensa. Nos ensaios realizados com prismas de três blocos, constataram que o modo de ruína permaneceu constante, sendo caracterizado pela fissuração por tração nos blocos centrais, coincidindo, portanto, com o modo de ruína das paredes de alvenaria. Neste trabalho faz-se a comparação entre diferentes modelos para se prever a resistência à compressão de prismas de alvenaria de blocos de concreto. Foram ensaiados quatro tipos diferentes de arranjos de prismas, sendo cada um deles ensaiados vazios e preenchidos com graute mais armaduras, denominados prismas armados. Para todos os arranjos de prismas foram registradas as suas resistências à compressão axial, deformações e modos de ruptura. Os resultados foram comparados com diferentes modelos teóricos de previsão de resistência, baseados nas resistências individuais de cada material, nas suas deformações de ruptura e no efeito de cintamento introduzido pelos blocos no sistema.

2. Materiais e programa experimental

Na confecção dos corpos de prova dos prismas foi utilizado somente um tipo de bloco de concreto, argamassa de assentamento e graute. Foram realizados ensaios de compressão axial nas unidades, prismas de dois blocos (PR2B) e três blocos (PR3B) justapostos, prismas contrafiados PRC1½B (três fiadas de altura e 1½ bloco de comprimento) e PRC2B (três fiadas de altura e dois blocos de comprimento), sendo realizados em prismas vazios, não grauteados, e prismas armados, ou seja, prismas contendo graute mais armaduras no interior dos blocos. O arranjo dos corpos de prova, além dos blocos, pode ser observado na Figura 1. Durante os ensaios foi analisado o comportamento dos corpos de prova no que diz respeito à resistência à compressão axial e ao comportamento tensão-deformação.

Figura 1 – Arranjos dos corpos de prova estudados, em (a) e (b) prisma de dois (PR2B) e três blocos (PR3B), respectivamente e, (c) e (d) prismas contrafiados (PRC1½B) e PRC2B, respectivamente

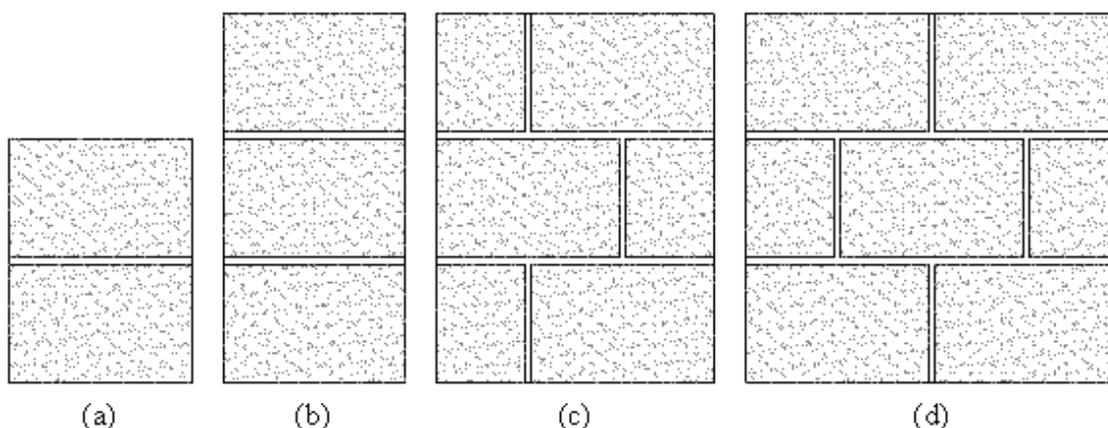
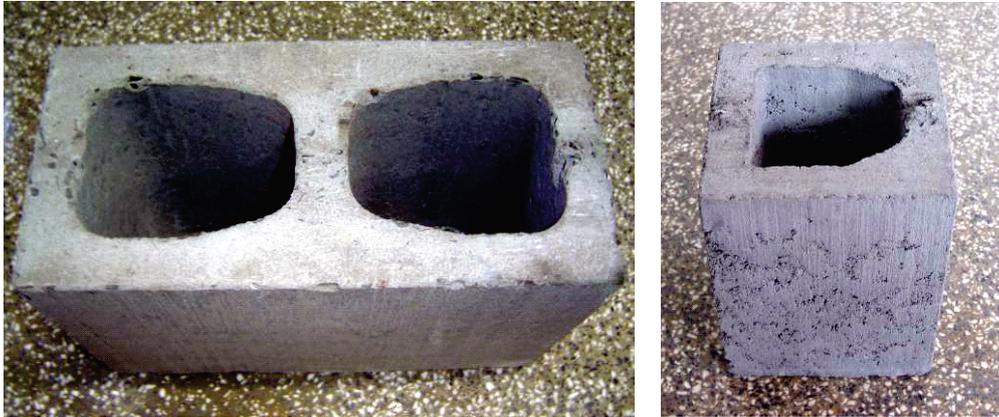


Figura 2 – Blocos de concreto utilizados no trabalho



2.1 Blocos de Concreto

Os blocos de concreto para alvenaria estrutural podem ser definidos, de uma forma geral, como elementos pré-moldados de concreto, a partir da mistura adequada entre agregados graúdos e miúdos, cimento e água. Segundo Franco [8], os blocos representam normalmente de 80% a 95% do total da alvenaria, portanto eles devem atender aos requisitos de desempenho essenciais para as unidades de alvenaria, tais como: resistência mecânica, durabilidade, dimensões padronizadas, tolerância dimensional, massa e facilidade de manuseio, entre outras. Sendo assim, é fundamental que se conheçam as suas propriedades para o entendimento da alvenaria como um todo. Foram utilizados blocos inteiros de concreto com dimensões nominais de (14x19x29)cm e meio blocos com dimensões nominais de (14x19x14)cm (largura x altura x comprimento), conforme Figura 2, sendo caracterizados fisicamente e segundo a sua resistência à compressão axial somente os blocos inteiros. Os blocos foram recebidos em um único lote, com 351 blocos inteiros e 135 meio blocos. Quanto às características visuais, que também podem ocasionar o comprometimento da capacidade resistente dos blocos, as amostras apresentaram aspecto homogêneo, e as arestas vivas estavam livres de trincas e imperfeições. Tais blocos foram adotados por serem comumente utilizados em obras de edifícios de alvenaria estrutural, devido à sua resistência e dimensões modulares, o que facilita a modulação em planta, sendo facilmente encontrado no mercado. Com auxílio da NBR 12118 [9] foi realizada a caracterização física dos blocos através da análise dimensional, absorção de água e área líquida em seis corpos de prova. O ensaio de compressão axial foi realizado segundo a norma anterior em 10 corpos de prova, capeados com gesso para garantir o paralelismo entre suas faces, na prensa universal com uma velocidade de 2kN/s, sendo respeitada a velocidade de carregamento de $(0,05 \pm 0,01)$ MPa/s em relação à área bruta. Tal ensaio permitiu a determinação da resistência à compressão dos blocos de concreto, que é a capacidade do mesmo de resistir a cargas perpendiculares ao plano de seu assentamento.

2.2 Argamassa de assentamento, graute e armaduras

Na alvenaria a argamassa de assentamento tem como principal

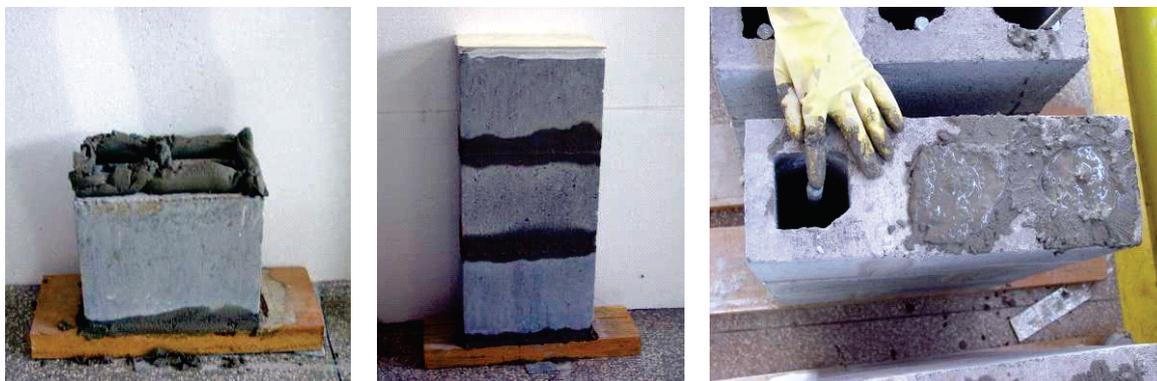
função unir as unidades e distribuir as tensões uniformemente entre elas. A argamassa de assentamento utilizada para todos os ensaios foi confeccionada com cimento CP II-Z-32, cal hidratada e areia silicosa natural, sendo o traço em massa utilizado 1:0,75:4,5 (cimento:cal:areia), mantendo uma junta de aproximadamente 1,0cm de espessura entre os blocos assentados. A mistura dos componentes da argamassa foi realizada a seco, obtendo-se a condição plástica e a trabalhabilidade adequada com uma relação a/c = 1,14 em massa. Adotou-se este traço por ser comumente utilizado em obras de alvenaria estrutural e ainda com o objetivo de se obter uma resistência média compatível com a definida pela NBR 10837 [10], que considera que a argamassa de assentamento deva ter no mínimo uma resistência à compressão de 5MPa.

O graute é um micro concreto constituído por uma mistura de cimento, agregado miúdo, agregado graúdo de $d_{máx} = 9,5$ cm e água, apresentando fluidez adequada para preencher os furos verticais dos blocos vazados. Podem-se citar como funções do graute em elementos de alvenaria: aumentar a resistência das paredes, absorvendo uma parcela dos esforços verticais; proporcionar maior estabilidade ao conjunto, aumentando sua rigidez, e solidarizar a armadura à estrutura, permitindo seu posicionamento. O graute empregado tem resistência aproximadamente igual a do bloco de concreto, na área líquida, utilizado no trabalho, para tanto foi utilizado um traço em massa de 1:1,83:2,17 (cimento:areia:pedrisco) e a relação a/c em massa foi 0,775. A alvenaria estrutural armada é caracterizada por ter os vazados verticais dos blocos preenchidos com graute envolvendo as barras de aço. A taxa de armadura utilizada, nos corpos de prova armados, foi de aproximadamente 1% vezes a área bruta do prisma, sendo utilizadas barras de 16mm do aço CA-50. Essa taxa corresponde ao uso de duas barras de aço por bloco, sendo colocada uma barra em cada furo, em todos os corpos de prova armados.

2.3 Prismas

Os prismas foram executados com os componentes descritos anteriormente, no que se refere às unidades (blocos), argamassa de assentamento e graute. A NBR 8215 [11] define o prisma vazio como sendo o conjunto composto pela justaposição de dois blocos de concreto unidos por junta de argamassa. Apesar das normas

Figura 3 – Montagem dos corpos de prova



brasileiras não citarem os prismas de três blocos, tem sido comum encontrar trabalhos onde eles são utilizados.

Foram preparados e ensaiados à compressão axial 72 corpos de prova: 36 prismas vazios e 36 prismas armados (graute mais armaduras), sendo nove corpos de prova para cada arranjo. Os arranjos ensaiados foram: prismas de dois (PR2B) e três blocos (PR3B) justapostos e prismas contrafiados de um bloco e meio (PRC1½B) e dois blocos (PRC2B) com três fiadas de altura, sendo capeados com gesso para a realização do ensaio de compressão axial.

A execução e o ensaio de compressão axial dos prismas foram realizados segundo os procedimentos preconizados pela NBR 8215 [11]. Durante a execução dos corpos de prova foi feito o controle do prumo e nível, e também o controle das juntas de assentamento na espessura de 1,0cm. Todos os prismas foram executados por um mesmo pedreiro, utilizando um só tipo de argamassa, sendo assentados sobre base de madeira, garantindo após o assentamento que os corpos de prova permanecessem no laboratório, expostos ao ambiente, porém protegidos do sol e intempéries. Na Figura 3 é mostrada a montagem de alguns dos corpos de prova ensaiados.

Para avaliar o comportamento tensão-deformação dos corpos de prova foram utilizados LVDTs (Linear Variable Differential Transformers) como medidores de deslocamentos, para determinar o encurtamento da alvenaria, com acréscimos de carga. Utilizaram-

-se cantoneiras como gabaritos para fixar os LVDTs com comprimento inicial $L = 20\text{cm}$ para os prismas de dois blocos e $L = 40\text{cm}$ para os de três blocos e prismas contrafiados, sendo localizados na posição dos furos verticais e em faces diagonalmente opostas, conforme Figuras 4 e 5. Todos os ensaios foram realizados com auxílio de um sistema de aquisição de dados, no qual eram

Figura 5 – Instrumentação dos PR2B, PR3B, PRC1½B e PRC2B respectivamente



Figura 4 – Figura em planta do posicionamento dos LVDTs

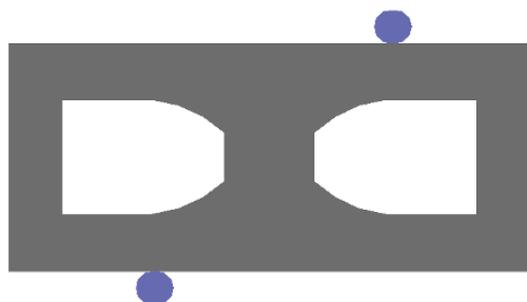


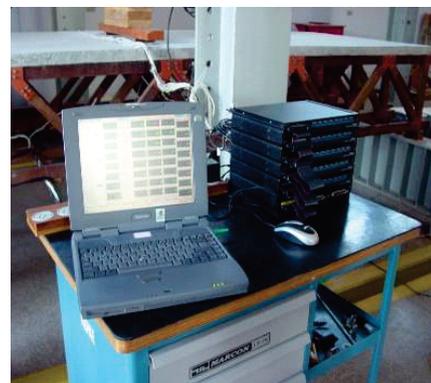
Figura 6 - Instrumentos utilizados no trabalho



Célula de carga



LVDT



Sistema de aquisição

ligados os equipamentos, e os deslocamentos dos corpos de prova, medidos pelos LVDTs, bem como a variação da intensidade da carga, captada pela célula de carga, eram arquivados em um computador a cada segundo, desde o instante do início de aplicação do carregamento, como se observa nas Figuras 6 e 7.

3. Resultados e discussões

Com auxílio da NBR 12118 [9] foi realizada a caracterização física dos blocos através da análise dimensional, absorção de água e área líquida. Os resultados são apresentados na

Tabela 1, estando de acordo com as especificações exigidas pela NBR 6136 [12]. O ensaio de compressão axial para os blocos foi realizado segundo a NBR 12118 [9].

Figura 7 - Prensa utilizada para ensaio dos prismas



Para a obtenção da resistência média à compressão foram ensaiados 10 corpos de prova na prensa universal com uma velocidade de 2kN/s, sendo respeitada a velocidade de carregamento de $(0,05 \pm 0,01)$ MPa/s, em relação à área bruta, adotada pela norma, cujos resultados são apresentados na Tabela 2. Verificou-se com 95% de confiança a não ocorrência de valores espúrios nos resultados. A ruptura dos blocos de concreto ocorreu de forma brusca com pouca percepção de fissuras, e segundo Calçada [13] são formas típicas de ruptura de blocos de concre-

to, conforme Figura 8.

Neste trabalho foi utilizado somente um tipo de argamassa de assentamento, graute e bloco de concreto, em todos os

Tabela 1 - Dimensões médias efetivas, absorção e área líquida dos blocos

Blocos	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Área Bruta (cm ²)	Absorção (%)	Área Líq. (cm ²)
Média	141,72	292,62	189,96	414,69	4,93	283,23
Desvio Padrão	0,35	0,28	1,07	1,32	0,27	5,50
Coef. Var. (%)	0,25	0,10	0,56	0,32	5,50	1,94

Tabela 2 – Ensaio de compressão axial para os blocos de concreto

CP	Carga de Ruptura (kN)	Tensão Área Bruta (MPa)	Tensão Área Líq. (MPa)
Média	577,00	13,91	20,37
Desvio Padrão	105,68	2,55	3,73
Coef. Var. (%)	-	18,32	-

ensaios realizados, ressaltando-se que não foi estudada a argamassa de assentamento, mas sim a influência do formato dos corpos de prova, do grauteamento e adição de armaduras na resistência da alvenaria. Na Tabela 3 é possível observar o valor médio da carga de ruptura e resistência da argamassa de assentamento e graute aos 28 dias, sendo que durante a execução dos prismas foram confeccionadas 12 amostras de corpos de prova de arga-

Figura 8 – Modo de ruptura dos blocos de concreto**Tabela 3 – Resistência à compressão axial para argamassa de assentamento e graute**

CPs	Argamassa Resistência (MPa)	Graute Resistência (MPa)
Média	7,89	17,66
Desvio Padrão	0,98	0,86
Coef. Var. (%)	12,36	4,88

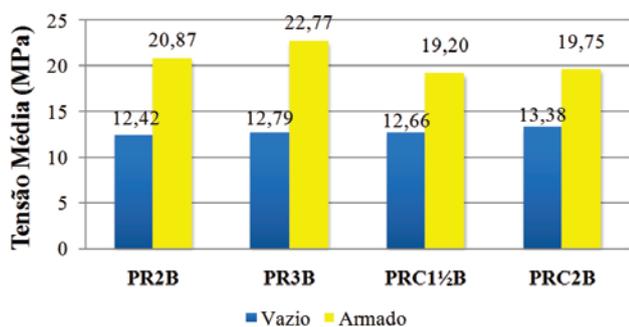
massa e graute. Após os ensaios verificou-se com 95% de confiança (significância $\alpha = 0,05$) a não ocorrência de valores espúrios nos resultados. Foi possível constatar também que em todos os ensaios ocorreu o esfacelamento da argamassa muito próximo da carga de ruptura dos corpos de prova.

Para os prismas, os ensaios de compressão axial foram realizados segundo a NBR 8215 [11] com uma taxa de carregamento de 2kN/s, sendo medido o encurtamento da alvenaria com auxílio de LVDTs nos corpos de prova. A Tabela 4 mostra os valores da carga de ruptura e tensões com relação à área bruta dos prismas, onde se constata que com a inserção de graute mais armadura ocorreu redução significativa no coe-

Tabela 4 – Ensaio de compressão axial para os prismas

CORPOS DE PROVA		Carga de ruptura (kN)		Tensão área bruta (MPa)		
		Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Coef. Var. (%)
PRISMA VAZIO	PR2B	515,11	74,00	12,42	1,78	14,36
	PR3B	530,33	90,95	12,79	2,19	17,15
	PRC1½B	787,78	88,58	12,66	1,42	11,24
	PRC2B	1115,00	138,31	13,38	1,66	12,40
PRISMA ARMADO	PR2B	865,56	72,86	20,87	1,76	8,42
	PR3B	944,10	36,64	22,77	0,88	3,88
	PRC1½B	1194,80	95,98	19,20	1,54	8,03
	PRC2B	1646,28	111,76	19,75	1,34	6,79

Figura 9 - Resistência média em relação à área bruta dos corpos de prova ensaiados



ficiente de variação, já a Figura 9 mostra a resistência dos corpos de prova ensaiados. Verificou-se com 95% de con-

fiança a não ocorrência de valores espúrios nos resultados. As formas de ruptura dos prismas foram semelhantes para todos os corpos de prova, sendo caracterizadas pelo aparecimento de uma fissura vertical principal no centro do prisma, que seguia com o aumento do carregamento até levar o prisma à ruptura. Foram verificadas, também, em alguns casos para os prismas armados, fissuras verticais nos grautes, principalmente na direção em que estavam contidas as armaduras, conforme Figuras 10 e 11. Na Figura 12 é possível observar o comportamento tensão-deformação média para os corpos de prova ensaiados.

4. Modelos de previsão de resistência

Foram propostos diferentes modelos para estimar a carga de ruptura dos prismas armados. Considerou-se no presente trabalho que a deformação medida pelo LVDT no prisma foi a mesma ocorrida no graute e armadura, admitindo que os materiais trabalharam formando um conjunto único. Na equação de equilíbrio (1) os valores das parcelas que a compõem podem ser obtidos a partir

Figura 10 - Forma de ruptura dos prismas vazios



Figura 11 - Forma de ruptura dos prismas armados



dos diagramas tensão-deformação para o concreto e aço, conforme as Figuras 13 e 14.

$$N_S = N_V + N_{GR} + N_{As} \tag{1}$$

sendo:

N_S = Resistência esperada do prisma armado;

N_V = Resistência do prisma vazio (carga obtida nos ensaios de compressão axial com prismas vazios, para a deformação que se quer analisar);

$N_{GR} = A_{GR} \times \sigma_{GR}$ (contribuição de carga do graute);

A_{GR} = área de graute nos prismas (área dos furos do bloco nos prismas);

σ_{GR} = tensão no graute, obtida com o valor da deformação no diagrama da Figura 13;

$N_{As} = A_s \times \sigma_s$ (contribuição de carga da armadura);

A_s = área de armadura inserida nos furos do bloco dos prismas: $\phi = 16\text{mm}$, $A_s = 2,01\text{cm}^2$ para cada furo do bloco; σ_s = tensão no aço, dada pela Figura 14.

Para se obter os resultados através da expressão (1) e compa-

rá-los com os valores experimentais primeiramente foi considerada uma deformação máxima de ruptura de 2,0‰ obtida no diagrama da Figura 13, sendo designado por Modelo I, posteriormente foi considerado que o graute apresentaria uma deformação máxima de 1,5‰, alterando o limite de deformação na expressão da Figura 13, como se pode observar na Figura 16, sendo este o Modelo II, e por fim foi considerado o aumento da resistência do graute devido ao cintamento provocado pelo bloco e ainda considerando os dois limites de deformação já citados anteriormente, sendo este o Modelo III.

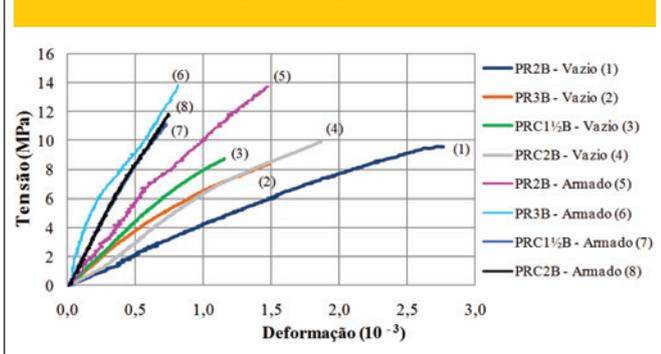
Para os modelos estudados, foram efetuados os procedimentos seguintes:

- Para cada geometria de corpo de prova foram obtidos os valores médios de carga x deformação dos prismas ensaiados, através da utilização dos LVDTs;

- Com os resultados de carga média x deformação média para os prismas vazios e armados foram utilizadas diferentes deformações, conforme a Tabela 5, e respectiva carga para verificação da expressão (1);

- Para uma determinada deformação foi obtido o valor da carga para os prismas vazios (N_V) e armados (Armado Experimental), sendo que com estes dados foi possível obter o valor da carga teórica do prisma armado e compará-lo com o valor experimental.

Figura 12 - Relação Tensão - Deformação média para todos os corpos de prova: vazios e armados



4.1 Modelo I

Neste modelo foi considerada uma deformação máxima de ruptura para o graute de 2,0‰ obtida no diagrama da Figura 13. Foram estudados os pontos correspondentes às deformações de 0,25‰, 0,50‰ e 0,75‰ na alvenaria.

Foi verificada a expressão (1) para diferentes deformações, e ainda para a carga de ruptura dos prismas armados, conforme a Tabela 6. Como os LVDTs foram retirados antes da ruptura dos prismas armados, para que não sofressem algum dano devido à ruptura dos corpos de prova, com intuito de se estimar o valor da deformação na ruptura destes prismas foram utilizadas linhas de tendência no dia-

Figura 13 - Diagrama Tensão - Deformação do graute

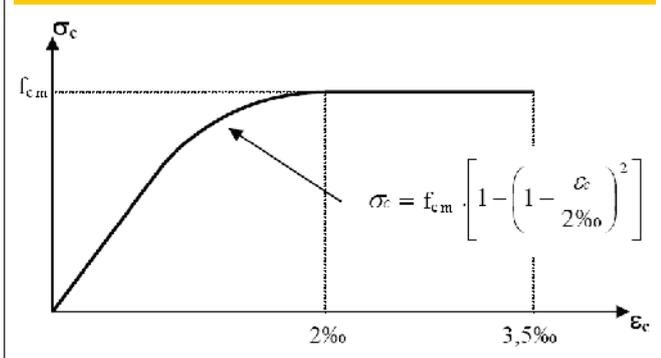


Figura 14 - Diagrama Tensão - Deformação do aço

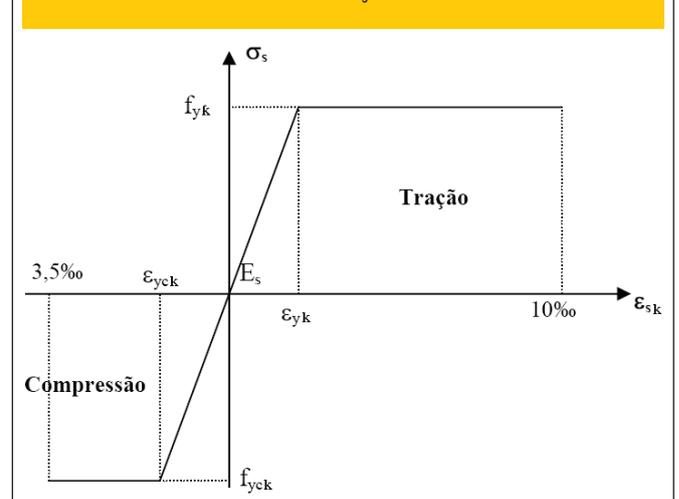


Tabela 5 - Comparação das cargas médias teóricas e experimentais para algumas deformações (Modelo I)

CARGAS DOS PRISMAS (kN)					
Deformações	Corpos de prova	Vazio (N _v)	Armado Teórico (N _s)	Armado Experimental	Relação Experimental/Teórico
ε = 0,25‰	PR2B	37,66	113,18	115,30	1,019
	PR3B	78,31	153,83	261,90	1,703
	PRC1½B	128,21	241,50	279,21	1,156
	PRC2B	97,25	248,30	353,04	1,422
ε = 0,50‰	PR2B	88,18	231,97	240,45	1,037
	PR3B	156,27	300,06	377,42	1,258
	PRC1½B	274,09	489,78	516,33	1,054
	PRC2B	241,41	528,99	689,62	1,304
ε = 0,70‰	PR2B	125,37	318,55	312,68	0,982
	PR3B	207,59	400,77	498,16	1,243
	PRC1½B	372,39	662,17	667,59	1,008
	PRC2B	369,44	755,81	930,19	1,231

Tabela 6 - Comparação das cargas médias teóricas e experimentais para deformações na ruptura (Modelo I)

CARGAS DE RUPTURA DOS PRISMAS (kN)				
Corpos de Prova	Vazio (N _v)	Armado Teórico (N _s)	Armado Experimental	Relação Experimental/Teórico
PR2B ε = 2,75‰	397,34	830,56	865,66	1,042
PR3B ε = 1,8‰	320,60	702,44	944,10	1,344
PRC1½B ε = 1,8‰	746,57	1319,33	1194,80	0,906
PRC2B ε = 1,5‰	710,58	1399,21	1646,28	1,177

Figura 15 - Diagrama Tensão - Deformação com linha de tendência para estimativa da deformação na ruptura dos prismas armados

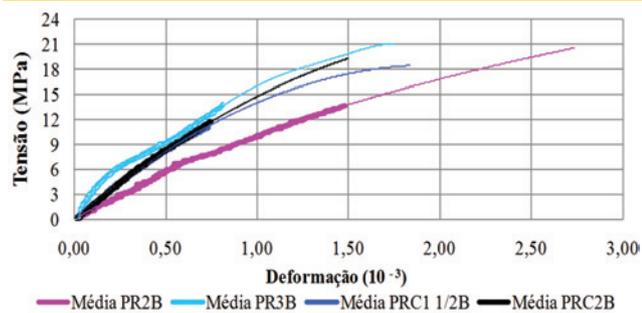


Figura 16 - Diagrama Tensão - Deformação do graute para ε ≤ 1,5‰

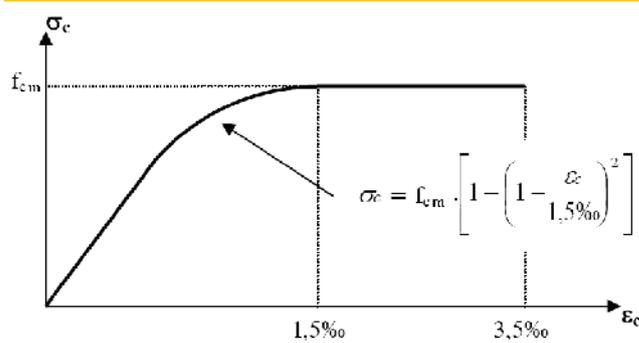


Tabela 7 - Comparação das cargas médias teóricas e experimentais para algumas deformações (Modelo II)

CARGAS DOS PRISMAS (kN)					
Deformações	Corpos de prova	Vazio (N_v)	Armado Teórico (N_s)	Armado Experimental	Relação Experimental/Teórico
$\varepsilon = 0,25\%$	PR2B	37,66	129,71	115,30	0,889
	PR3B	78,31	170,36	261,90	1,537
	PRC1½B	128,21	266,28	279,21	1,049
	PRC2B	97,25	281,35	353,04	1,255
$\varepsilon = 0,50\%$	PR2B	88,18	259,38	240,45	0,927
	PR3B	156,27	327,47	377,42	1,153
	PRC1½B	274,09	530,89	516,33	0,973
	PRC2B	241,41	583,81	689,62	1,181
$\varepsilon = 0,70\%$	PR2B	125,37	350,60	312,68	0,892
	PR3B	207,59	432,82	498,16	1,151
	PRC1½B	372,39	710,24	667,59	0,940
	PRC2B	369,44	819,91	930,19	1,135

Tabela 8 - Comparação das cargas médias teóricas e experimentais para deformações na ruptura (Modelo II)

CARGAS DE RUPTURA DOS PRISMAS (kN)				
Corpos de Prova	Vazio (N_v)	Armado Teórico (N_s)	Armado Experimental	Relação Experimental/Teórico
PR2B $\varepsilon = 2,75\%$	397,34	830,56	865,66	1,042
PR3B $\varepsilon = 1,8\%$	320,60	704,76	944,10	1,340
PRC1½B $\varepsilon = 1,8\%$	746,57	1322,81	1194,80	0,903
PRC2B $\varepsilon = 1,5\%$	710,58	1428,23	1646,28	1,153

grama tensão-deformação. Na Figura 15 é possível observar em linhas mais grossas o diagrama obtido nos ensaios e em linhas mais suaves as linhas de tendência inseridas, sendo utilizado polinômio de 3ª ordem para os PR2B, polinômio de 5ª ordem para os PR3B e para os prismas contrafiados polinômio de 2ª ordem.

Obtida a deformação estimada na ruptura e conhecendo-se a carga real de ruptura dos prismas armados, retorna-se na expressão proposta, encontra-se o valor da carga teórica média de ruptura para estes prismas, comparado-as com o valor médio obtido nos ensaios. Pode-se observar que as deformações estimadas na ruptura para os prismas armados foram aproximadamente: 2,75‰ para os PR2B; 1,8‰ para os PR3B; 1,8‰ para os PRC1½B e 1,5‰ para os PRC2B.

4.2 Modelo II

As Tabelas 7 e 8 foram feitas considerando o comportamento do graute como se obedecesse ao diagrama tensão-deformação do concreto

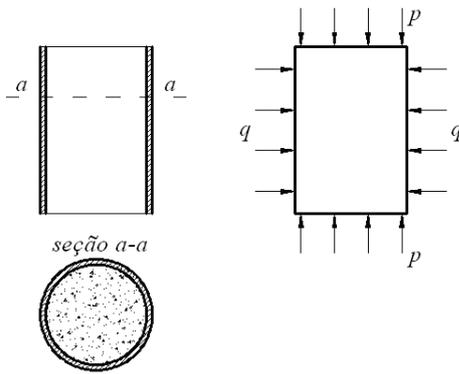
para uma deformação entre 0 e 2‰, porém resultados obtidos por Logullo [14] indicaram que a deformação máxima para blocos de concreto, com resistência de 15,76MPa e com as mesmas dimensões dos blocos aqui estudados, foi de aproximadamente 1,5‰, sendo assim foi realizada uma alteração na expressão da Figura 13, considerando agora uma deformação máxima de 1,5‰. Assim, para o cálculo da tensão no graute a expressão seria como na Figura 16.

Utilizando esta expressão modificada foram montadas as Tabelas 7 e 8 para deformações abaixo da deformação de ruptura e deformações estimadas na ruptura dos prismas armados, respectivamente.

4.3 Modelo III

Também foi analisada a expressão considerando que o graute sofra um acréscimo de resistência em função do bloco criar um efeito de confinamento, ou seja, considerando que a resistência do graute aumente devido ao confinamento provocado pelo bloco. O conceito de concreto

Figura 17 - Cilindro de concreto envolvido por tubo de parede fina de aço



cintado, bem como a equação (2) que retrata o acréscimo de carga devido ao efeito do cintamento, foram retirados de Santos [15].

4.3.1 Conceito de concreto cintado

Dado um cilindro de concreto envolvido por um tubo de parede fina de aço e carregado longitudinalmente por uma força P, o mesmo sofrerá um encurtamento longitudinal, e devido ao efeito de Poisson, um alongamento transversal que será parcialmente impedido pelo tubo de aço, conforme Figura 17. Devido à reação do tubo, criar-se-á no cilindro de concreto um estado triplo de tensões e a resistência do concreto aumentará em relação à resistência inicial fcc do concreto não cintado.

4.3.2 Aumento da resistência

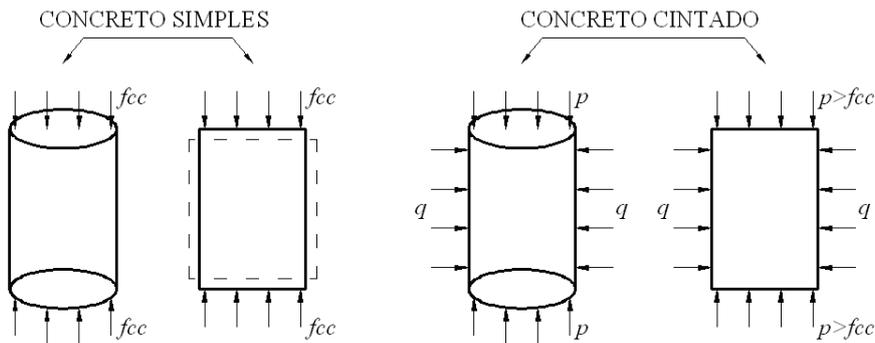
Se fcc for a resistência individual de um corpo de prova de concreto simples, a resistência do mesmo concreto, desde que cintado, será p > fcc, como se observa na Figura 18.

A nova resistência do concreto pode ser expressa pela equação (2):

$$p = f_{cm} + (5 \times q) \tag{2}$$

onde:
 p = valor médio da resistência do concreto cintado;
 fcm = valor médio da resistência do graute.

Figura 18 - Aumento de resistência provocado pelo confinamento (cintamento) do concreto



Para determinar o valor de q foram utilizados os parâmetros obtidos a partir das Figuras 19-21, que são as características geométricas e resistências dos blocos de concreto.

A partir das Figuras 19-21 é possível obter os valores das pressões que o graute exerce no interior do bloco, em cada direção.

$$\text{Direção 1: } q_1 = 2 \times \sigma_{T1} \times (b_1/a) \tag{3}$$

$$\text{Direção 2: } q_2 = 1.5 \times \sigma_{T2} \times (b_2/b) \tag{4}$$

onde:

$\sigma_{T1} = \sigma_{T2}$ = resistência à tração do bloco de concreto.

Foi considerado que a resistência à tração do bloco seja a mesma nas duas direções e sendo a espessura das paredes do bloco iguais ($b_1 = b_2$) e ainda com $b > a$, o menor valor de q pode ser obtido a partir da expressão (4). Resultados obtidos por Albertini [16] para os mesmos blocos mostraram que $\sigma_T \approx 2,75\text{MPa}$, sendo $b_2 = 3\text{cm}$ e $b \approx 9,5\text{cm}$. De posse destes dados e substituindo-se na expressão (4), tem-se: $q_2 = q = 1,5 \times 0,275 \times (3/9,5) = 0,130\text{kN/cm}^2$

Figura 19 - Dimensões do bloco em planta, sendo a região hachurada responsável pelo cintamento do graute no vazado esquerdo do bloco

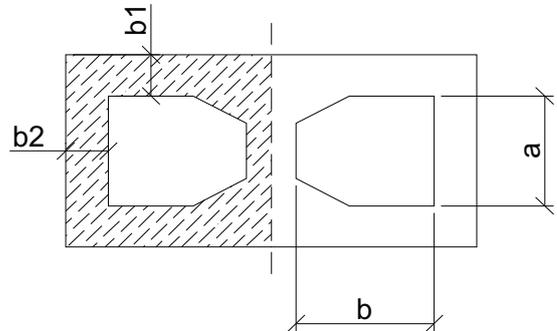


Figura 20 – Possíveis pontos de ruptura nas paredes do bloco, devido a esforços de tração

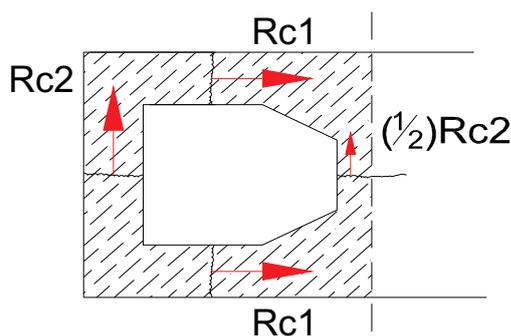
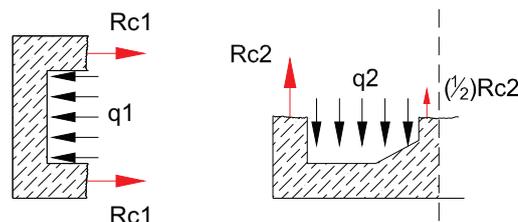


Figura 21 – Resultantes nas paredes dos blocos nas direções 1 e 2



Com o valor de q na expressão (2) encontra-se o novo valor da resistência à compressão do graute, considerando o efeito do cintamento. Assim, como se observa nos cálculos seguintes, a resistência média do graute é aumentada de 17,66MPa para 24,16MPa, ou seja, um aumento de 37% devido ao efeito do cintamento provocado pelo bloco de concreto, onde:

$f_{cm} = 17,66\text{MPa}$ (Tabela 3) resistência média do graute;

$p = f_{cm} + (5 \times q) = 1,766 + (5 \times 0,130) = 2,416\text{kN/cm}^2 = 24,16\text{MPa}$

Nas Tabelas 9 e 10 têm-se os resultados obtidos considerando o aumento de resistência provocado pelo cintamento, e ainda deformação máxima de ruptura para o graute de 2,0‰, sendo este o Modelo III - 2,0‰. A Tabela 9 mostra os resultados obtidos considerando-se deformações abaixo da deformação de ruptura, já na Tabela 10 tem-se os resultados para as deformações estimadas de ruptura dos corpos de prova ensaiados.

Da mesma forma que as Tabelas 9 e 10 anteriores, nas Tabelas 11 e 12 têm-se os resultados obtidos considerando o aumento de resistência provocado pelo cintamento, mas agora a deformação

máxima de ruptura para o graute é de 1,5‰, sendo este o Modelo III - 1,5‰. A Tabela 11 mostra os resultados obtidos considerando-se deformações abaixo da deformação de ruptura e a Tabela 12 apresenta os resultados para as deformações estimadas de ruptura dos corpos de prova ensaiados.

Já a Tabela 13 apresenta um resumo para as relações entre os valores experimentais obtidos nos ensaios e os valores teóricos obtidos com todos os modelos analisados, para o caso de valores de deformação estimada na ruptura.

5. Conclusões

Foi possível observar que os valores mais próximos do experimental para deformações abaixo da deformação de ruptura foram obtidos considerando os seguintes modelos: para os prismas de dois blocos justapostos (PR2B) o modelo I; prismas de três blocos justapostos (PR3B) o modelo III (1,5‰); prismas contrafiados (PRC1½B) o modelo II e prismas contrafiados (PRC2B) o modelo III (1,5‰). Assim, é possível observar que com o aumento do número de fiadas e, ainda, com corpos de prova contrafiados, existe influência do cintamento provocado pelo bloco no graute e sua deformação de ruptura se reduz para 1,5‰, como se observa quando se passa do PR2B para o PR3B e do PRC1½B para o PRC2B.

Tabela 9 – Comparação das cargas médias teóricas e experimentais para algumas deformações (Modelo III - 2,0‰)

Deformações	CARGAS DOS PRISMAS (kN)				
	Corpos de prova	Vazio (N_v)	Armado Teórico (N_s)	Armado Experimental	Relação Experimental/Teórico
$\varepsilon = 0,25\%$	PR2B	37,66	133,21	115,30	0,866
	PR3B	78,31	173,86	261,90	1,506
	PRC1½B	128,21	271,54	279,21	1,028
	PRC2B	97,25	288,35	353,04	1,224
$\varepsilon = 0,50\%$	PR2B	88,18	269,36	240,45	0,893
	PR3B	156,27	337,45	377,42	1,118
	PRC1½B	274,09	545,85	516,33	0,946
	PRC2B	241,41	603,76	689,62	1,142
$\varepsilon = 0,70\%$	PR2B	125,37	367,90	312,68	0,850
	PR3B	207,59	450,12	498,16	1,107
	PRC1½B	372,39	736,19	667,59	0,907
	PRC2B	369,44	854,50	930,19	1,089

Tabela 10 - Comparação das cargas médias teóricas e experimentais para deformações na ruptura (Modelo III - 2,0‰)

CARGAS DE RUPTURA DOS PRISMAS (kN)				
Corpos de Prova	Vazio (N_v)	Armado Teórico (N_s)	Armado Experimental	Relação Experimental/Teórico
PR2B $\varepsilon = 2,75\text{‰}$	397,34	916,01	865,66	0,945
PR3B $\varepsilon = 1,8\text{‰}$	320,60	787,03	944,10	1,200
PRC1½B $\varepsilon = 1,8\text{‰}$	746,57	1446,22	1194,80	0,826
PRC2B $\varepsilon = 1,5\text{‰}$	710,58	1559,43	1646,28	1,056

Tabela 11 - Comparação das cargas médias teóricas e experimentais para algumas deformações (Modelo III - 1,5‰)

CARGAS DOS PRISMAS (kN)					
Deformações	Corpos de prova	Vazio (N_v)	Armado Teórico (N_s)	Armado Experimental	Relação Experimental/Teórico
$\varepsilon = 0,25\text{‰}$	PR2B	37,66	155,82	115,30	0,740
	PR3B	78,31	196,47	261,90	1,333
	PRC1½B	128,21	305,45	279,21	0,914
	PRC2B	97,25	333,57	353,04	1,058
$\varepsilon = 0,50\text{‰}$	PR2B	88,18	306,85	240,45	0,784
	PR3B	156,27	374,94	377,42	1,007
	PRC1½B	274,09	602,10	516,33	0,858
	PRC2B	241,41	678,75	689,62	1,016
$\varepsilon = 0,70\text{‰}$	PR2B	125,37	411,75	312,68	0,759
	PR3B	207,59	493,97	498,16	1,008
	PRC1½B	372,39	801,96	667,59	0,832
	PRC2B	369,44	942,20	930,19	0,987

Tabela 12 - Comparação das cargas médias teóricas e experimentais para deformações na ruptura (Modelo III - 1,5‰)

CARGAS DE RUPTURA DOS PRISMAS (kN)				
Corpos de Prova	Vazio (N_v)	Armado Teórico (N_s)	Armado Experimental	Relação Experimental/Teórico
PR2B $\varepsilon = 2,75\text{‰}$	397,34	916,01	865,66	0,945
PR3B $\varepsilon = 1,8\text{‰}$	320,60	790,21	944,10	1,195
PRC1½B $\varepsilon = 1,8\text{‰}$	746,57	1450,99	1194,80	0,823
PRC2B $\varepsilon = 1,5\text{‰}$	710,58	1599,13	1646,28	1,029

Tabela 13 – Relação Experimental/Teórico para deformação na ruptura para todos os modelos

Corpos de prova	Modelos			
	I	II	III (2%)	III (1.5%)
PR2B	1,042	1,042	0,945	0,945
PR3B	1,344	1,340	1,200	1,195
PRC1½B	0,906	0,903	0,826	0,823
PRC2B	1,177	1,153	1,056	1,029

Para a deformação na ruptura os valores teóricos mais próximos do experimental foram encontrados considerando a utilização do Modelo III, tanto para deformação máxima no graute de 1,5% quanto 2%, mas de uma forma geral, pode-se dizer que os resultados com menores erros em relação ao experimental foram obtidos considerando uma deformação máxima no graute de 1,5%. Assim, novamente, vê-se a influência do confinamento provocado pelo bloco no graute e da redução de sua deformação máxima de ruptura para 1,5%, como observado para deformações inferiores as de ruptura.

Dos modelos estudados foi possível observar que o arranjo dos prismas (contrafiado ou não) influenciou nos resultados obtidos, sendo que os prismas contrafiados foram os que apresentaram, de modo geral, resultados teóricos mais próximos do experimental. Assim, conclui-se que tanto para valores de deformações na ruptura, quanto para valores menores que as mesmas, a expressão para o cálculo das tensões no concreto é válida para o cálculo das tensões no graute inserido nos prismas ensaiados, devendo a expressão ser corrigida pelo efeito do cintamento provocado pelo bloco de concreto. Ainda a adição de graute mais armaduras reduz significativamente a variabilidade das tensões de ruptura para os corpos de prova.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo e à empresa Copel (Araçatuba, SP) pelo fornecimento dos blocos de concreto.

7. Referências bibliográficas

- [01] 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. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica de São Paulo, Universidade de São Paulo, 103p.
- [02] PAGE, A. W.; SHRIVE, N. G. A critical assessment of compression tests for hollow block masonry. *Masonry International*, v.2, n.2-2, 1989, p.64-70.
- [03] DRYSDALE, R. G.; HAMID, A. A. Behavior of concrete block masonry under axial compression. *ACI Journal*, v.76, n.6, jun. 1979, p.707-721.
- [04] MAURENBRECHER, A. H. P. Effect of test procedures on compressive strength of masonry prisms. *In: Canadian Masonry Symposium, 2º, Ottawa, 1980, Proceedings... Ottawa: Carleton University, 1980, p.119-32.*
- [05] PRUDÊNCIO Jr, L. R. Resistência à compressão da alvenaria e correlação entre a resistência de unidades, prismas e paredes. Florianópolis, 1986. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, 123p.
- [06] COLVILLE J.; WOLDE-TINSAE, A. M. Compressive strength of grouted concrete masonry. *In: International Brick and Block Masonry Conference, 9º, Berlim, 1991, Proceedings... Berlim, 1991, v.2, p.149-156.*
- [07] PAGE, A. W.; SIMUNDIC, G.; HAN XIE. A study of the relationship between unit, prism, and wall strength for hollow masonry loaded in compression. *In: International Brick and Block Masonry Conference, 9º, Berlim, 1991, Proceedings... Berlim, 1991, v.1, p. 236-243.*
- [08] FRANCO, L. S. Desempenho estrutural do elemento parede de alvenaria empregado na alvenaria estrutural não armada, quando submetido a esforços de compressão. São Paulo, 1987. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 136p.
- [09] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Métodos de ensaio. NBR 12118, Rio de Janeiro, 2006.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cálculo de alvenaria estrutural de blocos vazados de concreto. NBR 10837, Rio de Janeiro, 1989.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Prismas de blocos vazados de concreto simples para alvenaria estrutural - Preparo e ensaio à compressão. NBR 8215, Rio de Janeiro, 1983.
- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Blocos vazados de concreto simples para alvenaria estrutural - Requisitos. NBR 6136, Rio de Janeiro, 2006.
- [13] CALÇADA, L. M. L. Avaliação do comportamento de prismas grauteados e não grauteados de bloco de concreto. Florianópolis, 1998. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, 188p.
- [14] LOGULLO, B. G. Influência do graute e da taxa de armadura no comportamento da alvenaria de blocos de concreto. Ilha Solteira, 2006. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - FEIS, Universidade Estadual Paulista, 192p.
- [15] SANTOS, L. M. Cálculo de concreto armado. São Paulo: Edgar Blucher, 1981, v.2, 458p.
- [16] ALBERTINI, M. M. Análise do comportamento experimental e numérico de prismas de alvenaria estrutural utilizando o elemento finito prismático regular parabólico. Ilha Solteira, 2009. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - FEIS, Universidade Estadual Paulista, 208p.