ESTUDO DAS CORRELAÇÕES ENTRE ESCALAS DE BLOCOS ESTRUTURAIS DE CONCRETO

Rodrigo Piernas Andolfato[1]; Jefferson Sidney Camacho[2]

(1) Eng. MSc, Núcleo de Estudo e Pesquisa da Alvenaria Estrutural (NEPAE) - Unesp.
Doutorando pela Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.
email: rpa@dec.feis.unesp.br

(2) Professor Doutor, Coordenador do Núcleo de Estudo e Pesquisa da Alvenaria Estrutural - NEPAE.
Departamento de Engenharia de Civi, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista - Unesp.
email: jefcam@dec.feis.unesp.br

NEPAE - DEC - FEIS - UNESP
Av. Brasil, 56 - Centro – Cx. P.31
15385-000 Ilha Solteira – SP BRASIL

RESUMO

O presente trabalho tem como objectivo principal o estudo e o desenvolvimento das técnicas de produção de blocos de concreto para alvenaria estrutural na escala reduzida de (1:4). Os blocos em escala reduzida foram produzidos para apresentarem o mesmo comportamento em termos de resistência à compressão e deformabilidade que os seus pares em escala real. Para as duas escalas em estudo, (1:1) e (1:4), foram produzidos blocos com quatro traços diferentes entre si. Além dos blocos, também foram construídos e ensaiados à compressão prismas de três fiadas, nas duas escalas, de modo a determinar as correlações entre as resistências e deformações nas duas escalas. Para a consecução do objectivo acima, foram desenvolvidos ensaios de compressão axial em unidades e prismas de três blocos, nas escalas (1:1) e (1:4). Os parâmetros observados, medidos e comparados foram as resistências à compressão, os módulos de deformação, as curvas tensão-deformação e as formas de ruptura apresentadas pelos corpos-de-prova. Como resultado final, chegou-se a uma série de procedimentos que, quando observados, permitem a reprodução de blocos de concreto para alvenaria estrutural na escala (1:4), mantendo praticamente as mesmas características de resistência à compressão e deformabilidade, tanto para as unidades quanto para os prismas estudados.

1 INTRODUÇÃO

A alvenaria de um modo geral seja ela com funções estruturais ou não, é um componente conformado em obra, constituído por tijolos ou blocos unidos entre si por juntas de argamassa, formando um conjunto rígido e coeso (SABBATINI, 1984).

"O presente estágio do conhecimento da alvenaria estrutural está fundamentado, quase que integralmente, em resultados de ensaios em unidades, prismas e paredes. Os ensaios em unidades e argamassas já não podem mais acrescentar conhecimentos significativos em relação à alvenaria, sendo ainda admitidos por várias normas com o objectivo de se estimar a resistência à compressão e ao cisalhamento. Os ensaios em prismas são mais adequados do que os executados em unidades, contudo, esses elementos nem sempre conseguem representar satisfatoriamente as paredes estruturais, dependendo do fenómeno que se deseja reproduzir. Apesar disso, ainda são empregados no desenvolvimento de muitos estudos. Ensaios em paredes reais, normalmente painéis de $1{,}20x2{,}60m$, apresentam como principais inconvenientes um custo maior, a demanda de maior tempo e utilização de equipamentos especiais, nem sempre disponíveis nos laboratórios de pesquisas. Mesmo esses painéis apresentam

restrições quando se deseja estudar o comportamento de um elemento estrutural mais complexo ou de um grupo de paredes resistentes." (CAMACHO, 1995).

Considerando as limitações dos ensaios citados anteriormente e a necessidade de conhecer o comportamento de elementos estruturais mais complexos, alguns estudos foram realizados em estruturas reais, em escala natural. Exemplo clássico foi um pequeno edifício de cinco pavimentos construído por HENDRY (1998), na década de setenta, ao lado de uma encosta rochosa na Inglaterra, onde foram realizados vários estudos, dos quais a distribuição das acções verticais entre grupos de paredes, a distribuição de acções horizontais entre as paredes de contraventamento e a simulação do efeito de explosão interna, conforme mostra a figura 1.

Outros exemplos podem ser encontrados nas pesquisas desenvolvidas pelo Building Research Institute, Ministry of Construction, no Japão, onde se vê na figura 2 um edifício de cinco pavimentos.

Desnecessário seria comentar os aspectos relacionados a custo, tempo e complexidade dos equipamentos envolvidos na realização de programas de ensaios dessa natureza e, consequentemente, da impossibilidade de sua execução em grandes quantidades, para

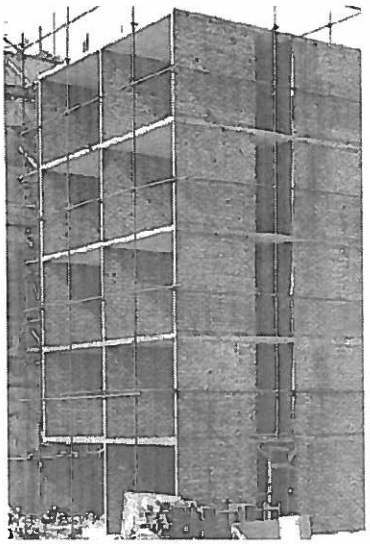


Fig 1 - Foto do ensaio em um edifício em escala real (HENDRY).



Fig 2 - Foto de um ensaio de um edifício real (Japão).

que tais ensaios pudessem receber tratamentos estatísticos adequados.

Levando em consideração os custos para a realização de tal trabalho, muitos pesquisadores desta área ao redor do mundo foram levados a acreditar que um estudo bem fundamentado da alvenaria estrutural em modelos físicos reduzidos seria um caminho interessante para desenvolver conhecimentos mais aprofundados das características físico-mecânicas de sistemas de paredes de alvenaria estrutural. "Um melhor entendimento do comportamento complexo das estruturas de alvenaria é necessário para se conseguir um conceito mais apropriado do estado limite de projecto" (ABBOUD et al., 1990).

2 OBJECTIVO

Desenvolver as técnicas de produção dos blocos de concreto na escala (1:4), através da adaptação de uma vibro-prensa utilizada para fabricação de blocos de concreto na escala real para produzir os modelos em um quarto de escala, permitindo imprimir nos modelos o mesmo grau de compactação existente nos protótipos. Para isso foi utilizada uma vibro-prensa pneumática com cilindros que fornecem uma força adequada de prensagem e de desforma.

Realizar um programa experimental para relacionar as características físicas da

unidade e do prisma de alvenaria entre modelo (escala reduzida) e protótipo (escala real), tal como resistência e módulo de deformação. Para isso, foram realizados ensaios de compressão axial em unidades e prismas.

Supõe-se que depois de conhecidas as relações de resistência à compressão, deformações específicas e modos de ruptura entre modelos e protótipos, para esse corpo de ensaios, tenham-se dados que permitam a execução de programas de ensaios mais complexos, os quais permitam investigações mais profundas sobre o comportamento de sistemas estruturais de alvenaria, e que, consequentemente, surjam maiores conhecimentos de forma a aperfeiçoar os critérios de projectos hoje existentes.

3. MODELOS FÍSICOS REDUZIDOS (MFR)

Para os estudos na área de engenharia de estruturas a principal aplicação da análise dimensional é o estabelecimento das semelhanças físicas, que relacionarão os protótipos e os modelos, ou seja, para que modelos forneçam dados como resistência, deformação, coeficiente de Poisson do protótipo. Seguem algumas definições (ACI, 1979) sobre os tipos de modelos:

- ✓ *Modelo (abreviação para modelo físico)* – Um modelo é qualquer representação física de uma estrutura ou porção dela. O modelo é usualmente construído em escala reduzida, e frequentemente representa um protótipo de uma estrutura específica;
- ✓ *Modelo Indirecto* – Um modelo para o qual o carregamento e os materiais não têm relação direta aos usados no protótipo. Cargas e deformações são aplicadas para se obter linhas ou superfícies de influência utilizando o princípio de Müller-Breslau. Tensões nos protótipos são então deduzidas a partir de diagramas de influência obtidos nos ensaios em modelos. Consequentemente, somente o comportamento elástico pode ser determinado;
- ✓ *Modelo Directo* – Um modelo carregado na mesma maneira do protótipo, tal que tensões e deformações sejam similares às aquelas do protótipo;
- ✓ *Modelo Elástico* – Um modelo directo que geometricamente representa o protótipo, mas que utiliza materiais elásticos e homogéneos. Tal modelo irá simular apenas a parte elástica do comportamento dos protótipos de concreto;
- ✓ *Modelo de Resistência Última* – Um modelo directo que geometricamente representa o protótipo tanto nas dimensões externas quanto nas internas. Além disso, os materiais do modelo reproduzem fielmente as características dos materiais do protótipo. Tal modelo pode prever o modo de comportamento do protótipo a qualquer nível de carga até a última.

3.1 Resistência mecânica do material do corpo

A resistência do material de um corpúsculo é definida pelos critérios da Resistência dos Materiais, e os parâmetros que figuram nessas funções devem ser incluídos na matriz dimensional.

Para o caso da unidade de alvenaria estrutural, que é um material considerado pétreo, ou seja, não dúctil, estes parâmetros podem ser: a resistência à compressão simples, a resistência à tracção e o ângulo de atrito interno. Porém, este último configura em um "número Π" e, portanto não precisa estar presente na matriz dimensional.

Outro factor importante é que se for idealizada uma relação entre resistência à compressão e tracção, esta se transforma em um "número Π" e também deve apresentar as mesmas proporcionalidades nos protótipos e nos modelos, bastando assim que apenas a resistência à compressão configure na matriz dimensional.

3.2 Base dupla *LF* em problemas estáticos

Nos problemas estáticos de mecânica dos corpos deformáveis a grandeza fundamental "tempo", não configura nenhum papel, e desta forma a base *LMT* se torna superabundante.

Para estes casos é mais adequado a utilização da base *LF* (também conhecida como base dos engenheiros), salvò o fato que no lugar da constante física massa específica ρ, se adopte o peso específico $\gamma = \rho g$ e desta forma a intensidade da gravidade g não configurará na matriz dimensional.

No entanto para problemas dinâmicos é indispensável a adopção da base *LMT*, e a inclusão de ρ e g separadamente na matriz dimensional, pois a massa específica é necessária para o cálculo das forças de inércia que independem de g.

3.3 Adopção de parâmetros

Após esta breve revisão da Teoria dos Modelos Físicos Reduzidos, decidiu-se que os parâmetros que devem figurar com valores iguais nas duas escalas são:

- ✓ A Resistência à compressão σ, e portanto;
- ✓ O módulo de elasticidade E;
- ✓ O peso específico do bloco γ.

Apesar do $Ngal = \frac{\gamma \times l}{\sigma_k}$ não figurar nas formulações deste trabalho, uma das variáveis mais importantes para o ganho de resistência das unidades de alvenaria de blocos de concreto é o grau de compactação (ANDOLFATO et. al, 2002), que nada mais é que o peso específico dos blocos.

Num futuro, ao se estudar edifícios de alvenaria com blocos reduzidos, onde a carga do peso próprio tem suma importância, dois procedimentos podem ser testados. O primeiro é distribuir um acréscimo de carga a cada pavimento da estrutura, simulando assim um aumento das forças gravitacionais.

O segundo é diminuir a resistência do bloco de tal forma que o *Ngal* seja unitário nas duas escalas, e que mesmo assim o comportamento do gráfico *tensão-deformação* seja próximo nas duas escalas. É óbvio que o segundo processo é muito mais complicado que o primeiro.

Existe ainda a possibilidade de se construir uma grande centrífuga para aumentar a aceleração da gravidade atuante no modelo. Esta seria a solução que provavelmente apresentaria os melhores resultados.

3.4 Histórico do MFR na alvenaria estrutural

O início dos estudos de modelos físicos reduzidos na alvenaria estrutural data da década de cinquenta, mas foi a partir de 1975, que teve início um amplo programa de pesquisas na Universidade de Drexel, com modelos físicos de alvenaria estrutural de blocos de concreto, objectivando desenvolver tanto as técnicas de fabricação dos materiais, tais como, blocos, argamassas, grautes e armaduras, bem como as técnicas de montagem da alvenaria e a busca do conhecimento das correlações entre modelos e protótipos.

São apresentados, de forma sucinta, os resultados e conclusões de algumas pesquisas realizadas, com objectivos semelhantes ao do presente trabalho. Os resultados de um trabalho realizado por DRYSDALE, HAMID e HEIDEBRECHT (1979), onde se estudou o comportamento à compressão axial de prismas de três blocos, sem graute e com graute de diferentes resistências, são apresentados por ABBOUD (1990). Em linhas gerais, segundo o autor, os resultados dos ensaios mostraram que:

- ✓ Modelos e protótipos dos prismas, com e sem graute, apresentaram os mesmos modos de ruptura;

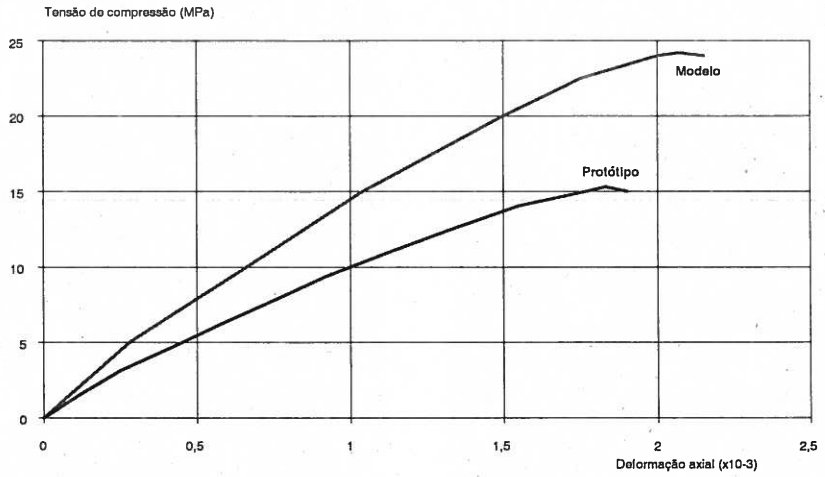


Fig 3 - Relação tensão-deformação para prismas. *(Fonte: CAMACHO, 1995).*

- ✓ O comportamento tensão-deformação foi semelhante, devendo-se observar que a resistência dos blocos na escala reduzida foi superior a dos blocos em escala natural, em média 32%;
- ✓ A utilização de grautes de maior resistência à compressão, teve como conseqüência um aumento moderado na resistência à compressão dos prismas;
- ✓ Os resultados obtidos nos modelos apresentaram menor variabilidade do que o observado no protótipo;
- ✓ E, finalmente, as semelhanças entre o comportamento e os modos de ruptura observados indicaram que a técnica de modelagem física, nesse caso, pode ser perfeitamente capaz de permitir um melhor entendimento do complexo comportamento do sistema alvenaria.

4 PROCESSO DE PRODUÇÃO DOS BLOCOS NA ESCALA REDUZIDA

Diferentemente dos blocos na escala real, os blocos na escala reduzida têm sua massa inicial húmida definida já na produção dos blocos. Isto se deve ao fato de que a fôrma foi especialmente projectada para permitir esta pré-determinação de um valor inicial que definirá o grau de compactação do modelo. Na sequência são apresentadas as etapas de produção dos blocos na escala reduzida:

- ✓ Pesagem dos materiais constituintes do traço (areia, pedrisco e cimento);
- ✓ Mistura dos materiais secos em uma bandeja e adição de água;
- ✓ Pesagem individual da massa inicial húmida de cada pote que será introduzido nas fôrmas individuais;
- ✓ Lançamento da mistura nas fôrmas (procedimento realizado com a vibro-prensa em funcionamento "vibrando");
- ✓ Compactação dos materiais nas fôrmas;
- ✓ Interrupção da vibração;
- ✓ Suspensão da fôrma e retirada dos blocos.

5 ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os ensaios preliminares foram realizados no intuito de estabelecer algumas características físico-mecânicas dos componentes usados na pesquisa. Foram determinadas as curvas granulométricas da areia e do pedrisco na escala natural, bem como foi produzido uma areia e um pedrisco na escala reduzida.

Foi produzida uma areia com três faixas granulométricas diferentes para a argamassa da escala real no intuito de facilitar sua modelagem na escala reduzida e ainda de melhor controlar as variáveis envolvidas.

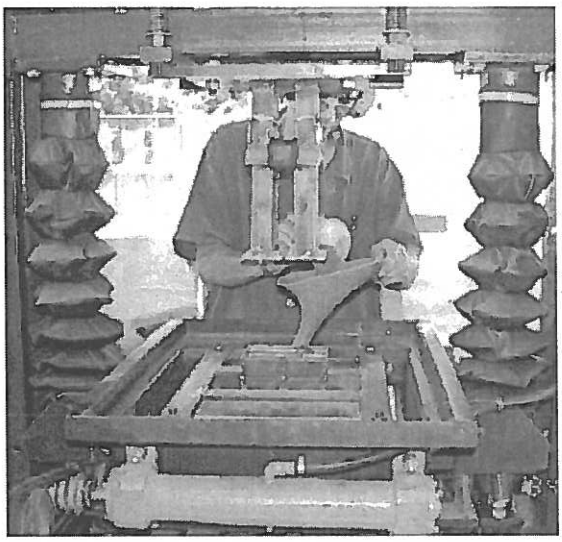


Fig 4 - Lançamento do material na forma

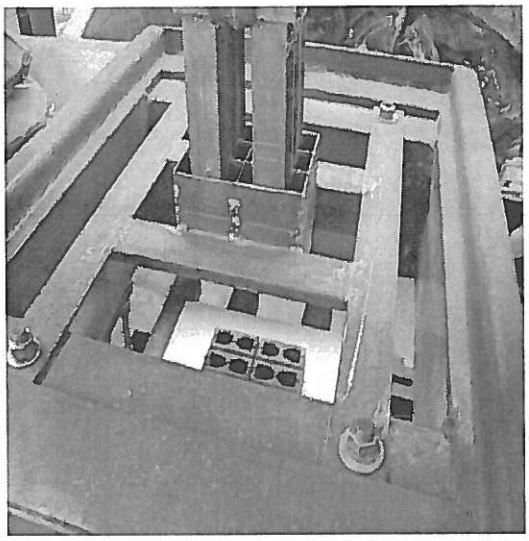


Fig 5 - Retirada dos blocos.

Tabela 1 - Percentagem de grânulos de areia retidos nas peneiras

Agregado	Percentagem retida nas peneiras										
	Peneira 9,50 (mm)	Peneira 4,80 (mm)	Peneira 2,38 (mm)	Peneira 1,19 (mm)	Peneira 0,59 (mm)	*Peneira 0,42 (mm)	Peneira 0,297 (mm)	Peneira 0,149 (mm)	*Peneira 0,105 (mm)	*Peneira 0,074 (mm)	Fundo
Areia da Fábrica	-	-	1,72	5,08	21,22	30,70	17,82	21,55	1,17	0,51	0,23
Areia de referência	-	-	-	-	28,00	30,00	18,00	24,00	-	-	-
Areia na escala (1:4)	-	-	-	-	-	-	-	28,00	30,00	18,00	24,00

* Peneiras intermediárias. Estas não fazem parte da série normal.
OBS: As areias apresentaram mesmo peso específico para as duas escalas com valor de $1{,}48\ ^{gf}/_{cm^3}$.

Tabela 2 - Percentagem de grânulos de pedrisco retidos nas peneiras

Agregado	Percentagem retida nas peneiras										
	Peneira 9,50 (mm)	*Peneira 6,30 (mm)	Peneira 4,80 (mm)	Peneira 2,38 (mm)	*Peneira 2,00 (mm)	Peneira 1,19 (mm)	Peneira 0,59 (mm)	Peneira 0,297 (mm)	Peneira 0,149 (mm)	*Peneira 0,074 (mm)	Fundo[+]
Pedrisco da Fábrica	-	1,65	39,37	55,12	2,20	0,89	0,77	-	-	-	(3%)
Pedrisco de referência	-	-	41,00	59,00	-	-	-	-	-	-	(3%)
Pedrisco na escala (1:4)	-	-	-	-	-	41,00	59,00	-	-	-	(3%)

* Peneiras intermediárias. Estas não fazem parte da série normal.
[+] Esta peneira representa o Filler que teve sua quantidade representada segundo o peso total em relação às outras peneiras.
OBS: Os pedriscos apresentaram mesmo peso específico para as duas escalas com valor de $1{,}37\ ^{gf}/_{cm^3}$.

Para determinação dos agregados constituintes dos blocos foi utilizada a NBR-7217 de Agosto de 1987, que preconiza a utilização da série normal de peneiras para agregado miúdo. Na caracterização da areia foram obtidos os dados apresentados na Tabela 1. Foi ainda esquematizada uma areia de referência, cujo intuito foi facilitar sua reprodução na escala reduzida. Esta é uma aproximação da areia proveniente da fábrica, porém, utilizando valores inteiros para as quatro peneiras que mais retiveram os grânulos.

Foi um passo inicial tentar produzir os blocos na escala reduzida sem a correta redução da curva granulométrica da areia, somente estipulando uma dimensão máxima destes grânulos. Isto foi feito devido a pequena quantidade dos grânulos mais finos, necessários para a reprodução, que se obtém no processo de peneiramento. Porém os blocos realizados com este agregado "incorrectamente" reduzido em escala não apresentaram bons resultados, no que diz respeito principalmente ao processo de fabricação dos blocos.

Na caracterização do pedrisco foram obtidos os dados apresentados na Tabela 2. Neste caso também foi esquematizado um pedrisco de referência. E ainda foram seguidos todos os procedimentos preconizados pela NBR-7217 de Agosto de 1987, já que o pedrisco também é considerado como agregado miúdo.

5.1 Argamassa de assentamento

No intuito de facilitar a reprodução da granulometria da areia na escala reduzida, a areia utilizada na mistura da argamassa para assentamento dos blocos na escala real foi composta por três faixas granulométricas seguintes:

- ✓ Passante na peneira 0,59*mm* e retida na 0,42*mm*;
- ✓ Passante na peneira 0,42*mm* e retida na 0,297*mm*;
- ✓ Passante na peneira 0,297*mm* e retida na 0,149*mm*;

A proporção utilizada foi de 1:2:1 em peso com relação a sequência apresentada acima. Uma vez com a areia produzida artificialmente, realizou-se a mistura da argamassa na proporção 1:1:6 (cimento : cal : areia) em volume. A razão pela escolha desta argamassa comummente utilizada na alvenaria estrutural e em pesquisas se deu mais por um aspecto de utilização e preferência do que por qualquer outro motivo, uma vez que existem quatro ou cinco tipos de traços de argamassa usualmente utilizados nas pesquisas. A quantidade de água na mistura da argamassa foi tal que permitisse uma característica plástica à mesma, e que condissesse com a plasticidade necessária para o assentamento.

A areia utilizada na mistura da argamassa para assentamento dos blocos na escala reduzida foi uma reprodução da areia utilizada para este fim na escala real. Esta foi composta por três faixas granulométricas seguintes:

- ✓ Passante na peneira 0,149*mm* e retida na 0,105*mm*;
- ✓ Passante na peneira 0,105*mm* e retida na 0,074*mm*;
- ✓ Passante na peneira 0,074*mm* e retida no fundo.

Uma vez com a areia produzida artificialmente, foi realizada a mistura da argamassa na proporção 1:1:6 (cimento:cal:areia), como na escala real.

6 Procedimento Prático para as Unidades de Alvenaria

6.1 Produção dos blocos

Os blocos na escala real foram produzidos em uma fábrica comercial com cinco traços diferentes, onde se variou quantidade de cimento e grau de compactação[1]. Isto foi proposto para que a técnica de modelagem física reduzida fosse posta a prova em casos

[1]O termo grau de compacidade é utilizado para expressar a densidade final seca dos blocos, ou seja, maior ou menor índice de vazios.

diferentes e assim pudesse ser validada de forma mais geral.

Os blocos na escala reduzida foram produzidos no Laboratório do Núcleo de Estudo e Pesquisa da Alvenaria Estrutural (NEPAE) da FEIS – Unesp em uma vibro-prensa produzida comercialmente e adaptada para este fim.

Os blocos na escala real foram produzidos com as características geométricas apresentadas na Tabela 3 e na Figura 6.

Abaixo são apresentadas a Tabela 4 e a Tabela 5 que resumem os parâmetros dos traços produzidos na escala real.

Os blocos na escala reduzida foram produzidos com as características geométricas apresentadas na Tabela 6. Cada traço na escala reduzida representa um equivalente na escala real, por exemplo, traço 1M (escala reduzida) é equivalente ao traço 1P (escala real). A Tabela 7 apresenta a equivalência entre escalas quanto ao grau de compactação.

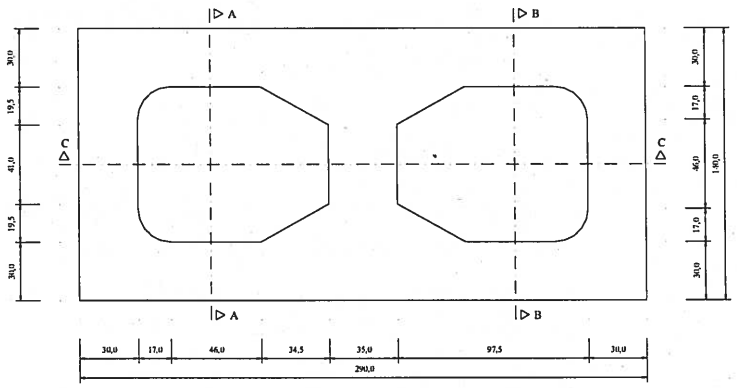
6.2 Resultados obtidos nos blocos

Os valores das resistências e dos módulos de deformação secantes à 40% da carga de ruptura, obtidos nos ensaios de compressão axial dos corpos-de-prova, nas duas escalas, são mostrados na Tabela 8. É de suma importância lembrar neste ponto que o Traço 4P e 5P considerados iguais anteriormente aqui comprovam esta teoria confirmando a não necessidade de reproduzir os dois na escala reduzida, bastando reproduzir apenas um.

O valor do módulo de deformação secante à 40% da carga de ruptura foi escolhido por analogia ao concreto comum.

6.3 Análise dos resultados obtidos nos blocos

As formas de ruptura dos modelos e protótipos seguiram sempre padrões de ruptura verificados nas duas escalas. A Fig 7 mostra estes padrões.



Planta de Fundo

Fig 6 - Planta de fundo do bloco na escala real.

Tabela 3 - Características Geométricas dos blocos na escala real.

Dimensões (cm, cm^2, cm^3)	
Compr.	29
Largura	14
Altura	19
Área	406
Volume	7714

Tabela 4 - Graus de compactação obtidos na escala real (Protótipos *P*).

Traços estudados	Traço 1P	Traço 2P	Traço 3P	Traço 4P	Traço 5P
Peso	10,145 *kg*	9,967 *kg*	10,096 *kg*	10,493 *kg*	10,549 *kg*
G.C.	1,315 *g/cm³*	1,292 *g/cm³*	1,309 *g/cm³*	1,360 *g/cm³*	1,367 *g/cm³*
C.V.	1,97%	1,75%	1,72%	1,60%	1,56%

C.V.: Coeficiente de Variação

Tabela 5 - Traços estudados na escala real (Protótipos *P*).

Materiais	Traço 1P	Traço 2P	Traço 3P	Traço 4P	Traço 5P
Cimento (*kg*)	40	33	47	40	40
Areia (*kg*)	213	213	213	213	213
Pedrisco (*kg*)	132	132	132	132	132
Água (*lts*)	7	7	7	14	21
Areia / pedrisco	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62
Cim. / agregado (%)	11,61	9,64	13,57	11,61	11,61
Água / Mat. Secos^{++} (%)	7,41	7,54	7,28	9,23	10,79
Água / cimento^{++} (%)	71,24	85,77	60,91	88,74	103,74

$^{++}$ Computada a água presente na umidade da areia e pedrisco.

Tabela 6 - Características Geométricas dos blocos na escala reduzida.

Dimensões (cm , cm^2 , cm^3)	
Compr.	7,25
Largura	3,50
Altura	4,75
Área	25,375
Volume	120,5

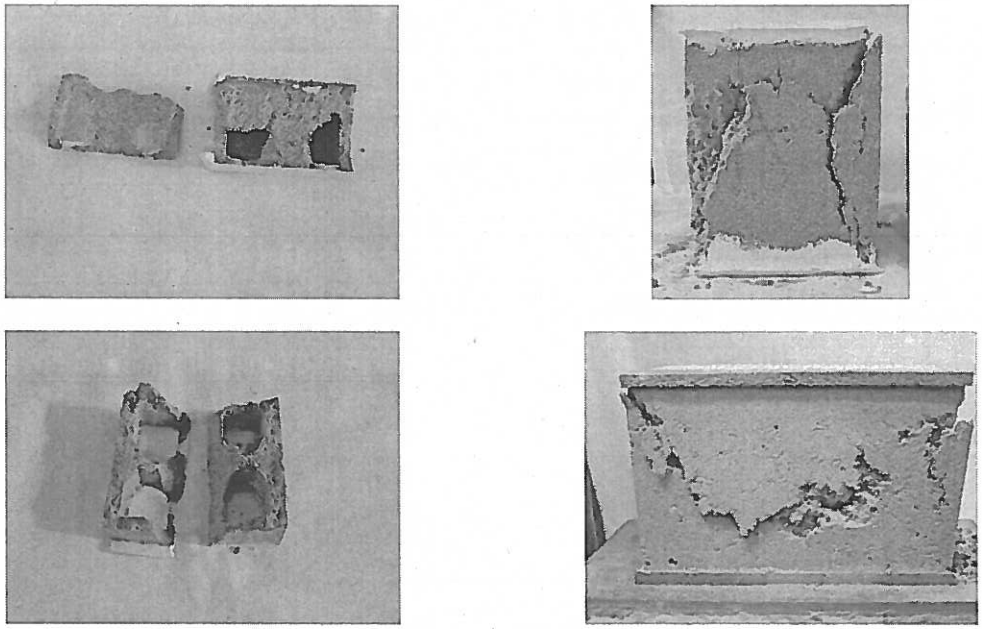
Tabela 7 - Graus de compactação obtidos na escala real e reduzida e comparação das médias.

Traços estudados	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4	Traço 5
G.C. na escala reduzida	1,308 *g/cm³*	1,302 *g/cm³*	1,328 *g/cm³*	1,361 *g/cm³*	1,367 *g/cm³*
G.C. na escala real	1,315 *g/cm³*	1,292 *g/cm³*	1,309 *g/cm³*	1,360 *g/cm³*	
Teste de hipótese	As médias são iguais	As médias são iguais	As médias são iguais *	As médias são iguais **	

* Mesmo o teste de hipótese validando as igualdades, para este traço 3, percebe-se uma sensível diferença entre os graus de compactação, que mais adiante explicará a diferença entre as resistência do modelo e do protótipo.
** O traço 4 e 5 na escala real apresentam mesmo traço e mesmo grau de compactação por isso são o mesmo tipo de bloco, o que levou a produção de apenas quatro tipos de blocos na escala reduzida, e este representa os dois traços da escala real.

Tabela 8 - Resultados do ensaio com as unidades.

Escala	Traço	**Resistência**		**Módulo Secante**	
		Ruptura (*MPa*)	C. V. (%) Coef. de Variação	Valor médio (*MPa*)	C. V. (%)
Escala Real	Traço 1P	9,17	12,85	14387	31,71
	Traço 2P	7,94	13,39	8295	29,37
	Traço 3P	8,90	13,17	15858	31,87
	Traço 4P	13,38	17,87	10387	27,38
	Traço 5P	13,48	13,72	10572	23,30
Escala Reduzida	Traço 1M	9,47	16,77	10761	19,68
	Traço 2M	6,31	14,85	9006	27,13
	Traço 3M	11,39	17,50	10936	10,77
	Traço 4M	12,88	11,20	11409	18,24



Modelo Reduzido **Modelo Real**

Fig 7 - Padrões de ruptura das unidades.

Os blocos do Traço 1P e 1M apresentaram o mesmo valor de resistência média comprovado através do teste de hipótese de "*t de student*", conforme mostra a Tabela 9. Para os blocos do Traço 2P – 2M a igualdade não foi verificada, conforme mostra a Tabela 9, porém o valor para validação do teste é de $7MPa$ para o modelo, segundo o teste de hipótese com nível de significância de 0,05, e desta forma o erro apresentado pelo traço 2M em relação ao 2P é mostrado através da equação abaixo:

$$erro = \frac{7,00 - 6,31}{6,31} = 10,93\% \qquad (1)$$

Segundo o ACI (ver abaixo), este modelo representa seu protótipo com excelente confiabilidade.

"(...) A respeito dos modelos, o Comité tem adoptado de maneira arbitrária as seguintes terminologias:

- ✓ Os termos "Excelente confiabilidade" e "Excelente concordância" implicam em resultados dentro de uma faixa de $\pm 10\%$ em relação ao comportamento do protótipo;
- ✓ "Boa confiabilidade" significa $\pm 20\%$ de diferença entre modelo e protótipo;

Para os blocos do Traço 3P - 3M a igualdade das médias de resistência não foi verificada, conforme a Tabela 9. O aumento excessivo de resistência do modelo do Traço 3 em relação ao protótipo deveu-se ao grau de compactação. Apesar do grau de compactação ter sido considerado igual no modelo e no protótipo através do teste de *student*, percebeu-se uma diferença sensível de *1,309* para o protótipo e *1,328* para o modelo o que justifica o aumento da resistência. Analisando a Fig 8 pode-se estimar a resistência para o bloco do traço 3 com grau de compactação de *1,328*, que seria $10,94MPa$, e a partir deste valor comparar com o modelo que apresentou resistência média de $11,39MPa$, isto comprovaria pelo teste de hipótese a igualdade de resistências entre modelo e protótipo.

Para os blocos Traço 4P e 4M a resistência do modelo foi igual à resistência do protótipo confirmado pelo teste de hipótese, conforme Tabela 9.

Com relação aos módulos de deformação, estes foram determinados e correlacionados entre seus traços equivalentes. Abaixo está apresentada a Tabela 10 contendo o teste de

hipótese para correlação dos módulos dos traços estudados.

Apesar do valor do módulo secante do traço 1 ter se apresentado maior para a escala real o teste de hipótese valida suas igualdades. As curvas tensão deformação dos ensaios em escala real são apresentados na Fig 9, onde as linhas pretas representam o protótipo e as linhas vermelhas representam o modelo. As linhas mais grossas com círculos representam as médias das curvas tensão-deformação.

A Tabela 10 apresenta o teste de hipótese para o traço 2 comprovando a igualdade dos módulos de deformação. A Fig 10 apresenta o gráfico com as curvas tensão-deformação obtidas nos ensaios.

Tabela 9 - Teste de hipótese para a resistência dos Traços estudados.

	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
Graus de liberdade	30	27	30	30
Variância Ponderada	1,957	1,018	2,672	3,898
Valor de t calculado	0,705	4,353	5,189	0,902
t tabelado	2,042	2,771	2,042	2,042
Resist. Protótipo (MPa)	9,17	7,94	8,90	13,38
Resist. Modelo (MPa)	9,47	6,31	11,39	12,88
Igualdade	sim	não	não*	sim
Erro (%)	-	10,93	-	-

* Diferença devida ao grau de compactação.

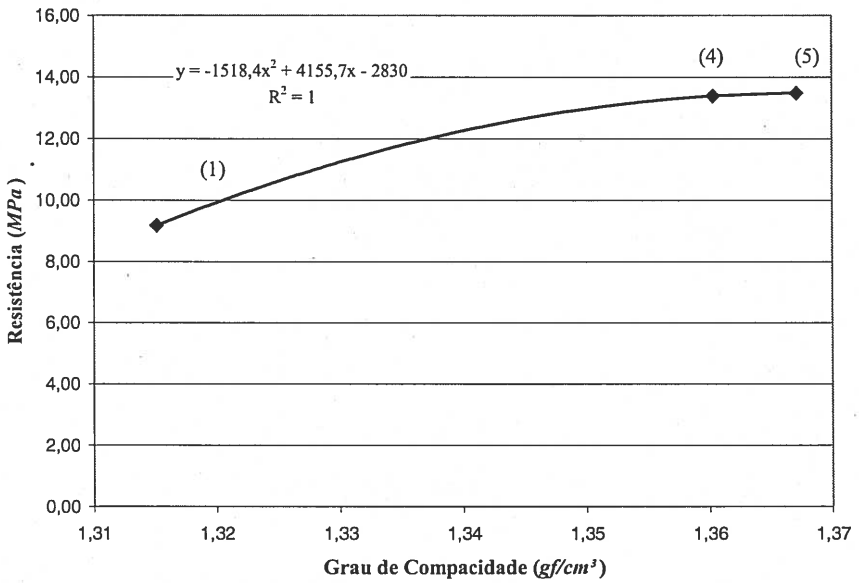


Fig 8 - Relação entre grau de compactação e resistência.

Tabela 10 - Teste de hipótese para o módulo de deformação dos Traços estudados.

	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
Graus de liberdade	5	5	4	7
Variância Ponderada	10272092	5950179	13465261	5940648
Valor de t calculado	2,263	0,504	2,323	0,937
t tabelado	2,571	2,571	2,776	2,365
Resist. Protótipo (MPa)	14387	8295	15858	10387
Resist. Modelo (MPa)	10761	9006	10936	11409
Igualdade	sim	sim	sim	sim

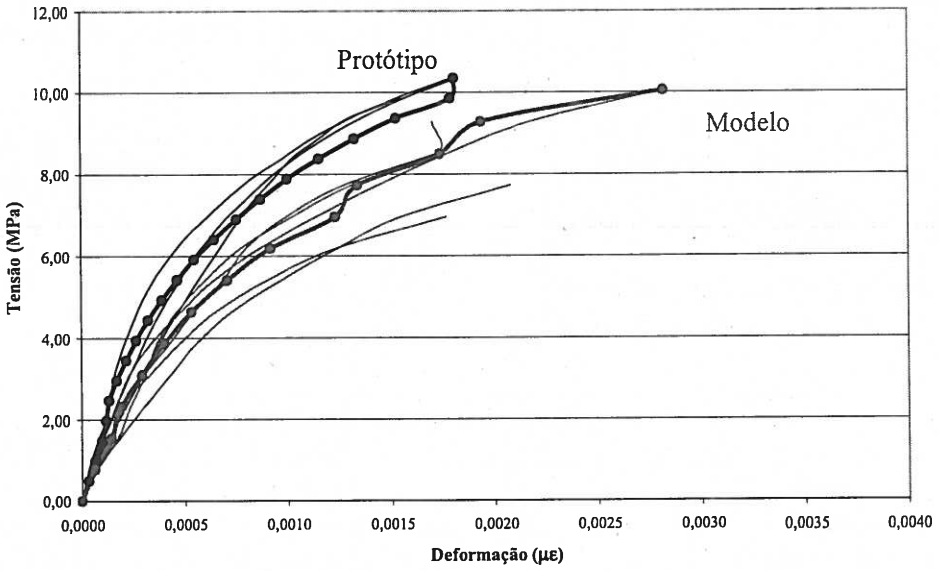


Fig 9 - Gráfico Tensão-Deformação do Traço 1.

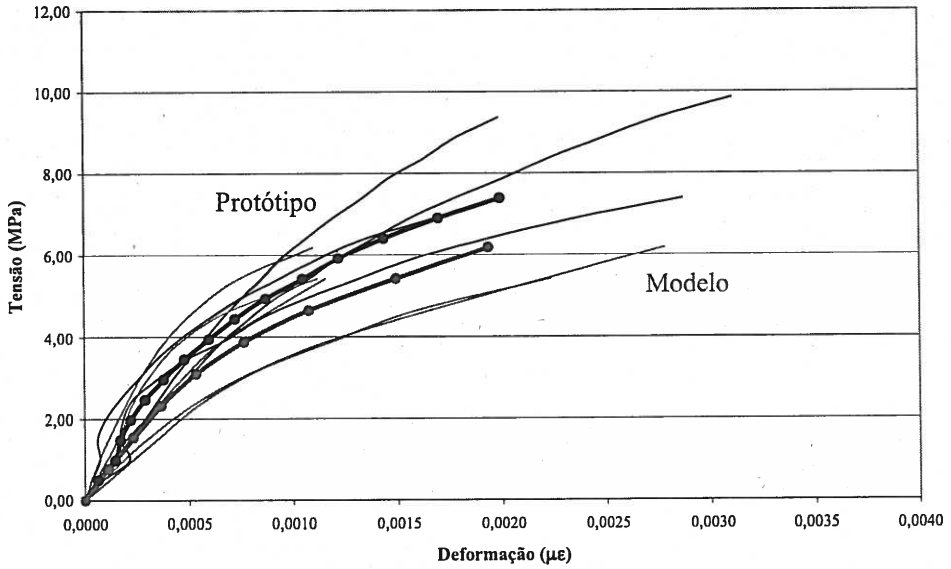


Fig 10 - Gráfico Tensão-Deformação do Traço 2.

O mesmo comportamento é então verificado para o Traço 3 conforme comprovado pelo teste de hipótese através da Tabela 10 e pela Fig 11. Percebe-se neste ponto do trabalho fazendo um comparativo entre os gráficos do Traço 1, 2 e 3 que conforme variou-se a quantidade de cimento, variou-se também as rigidezes dos corpos-de-prova tanto na escala real quanto na reduzida. Sendo assim verifica-se que as técnicas de produção do modelo se ajustam inclusive para este tipo de propriedade.

Também é verificada a igualdade para o traço 4 onde tanto as resistências à compressão foram iguais quanto os módulos secante, conforme mostrado na Tabela 10 e na Fig 12.

7 Prismas

7.1 Moldagem dos corpos-de-prova

Foram utilizados gabaritos para evitar variáveis no ensaio relacionadas a mão-de-obra. As Fig 13 e Fig 14 mostram estes aparatos auxiliando a fabricação dos prismas nas duas escalas.

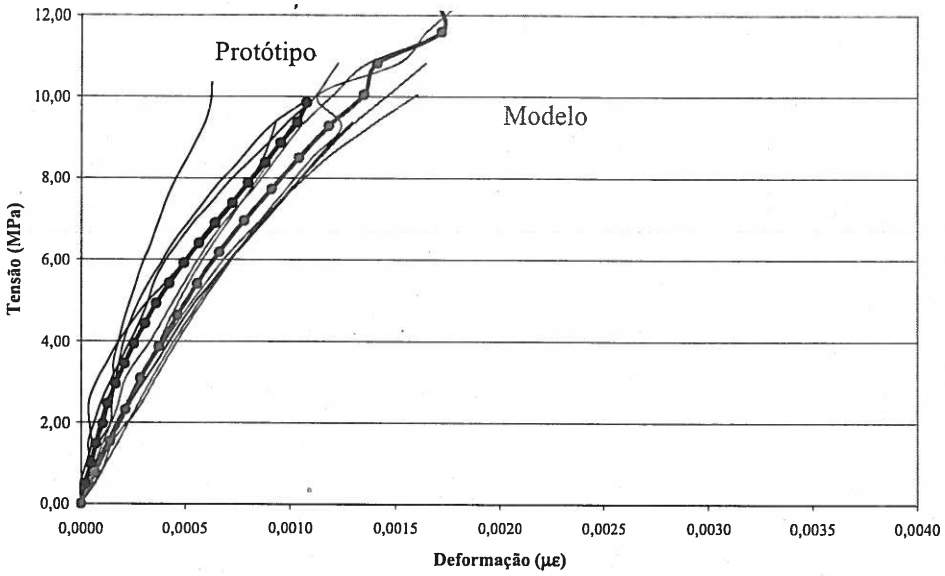


Fig 11 - Gráfico Tensão-Deformação do Traço 3.

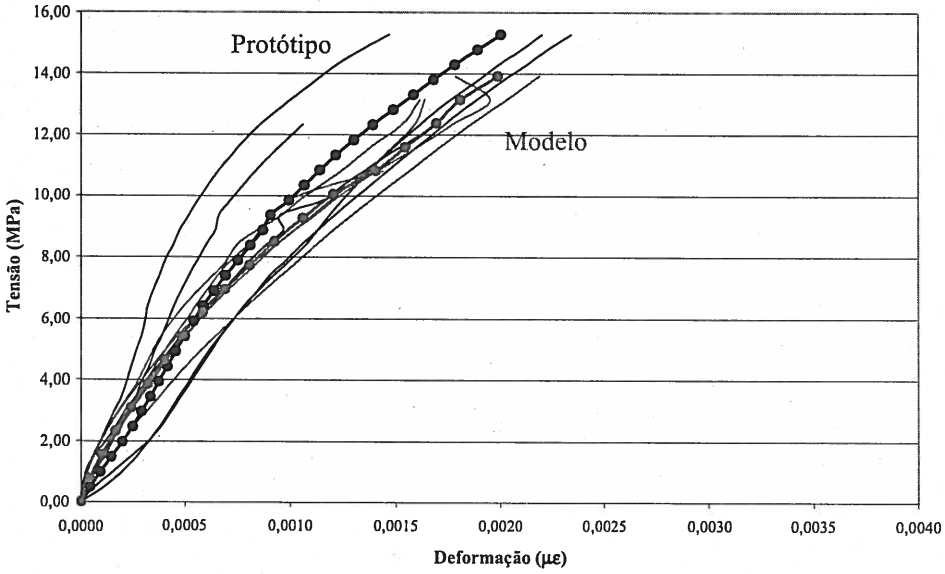


Fig 12 - Gráfico Tensão-Deformação do Traço 4.

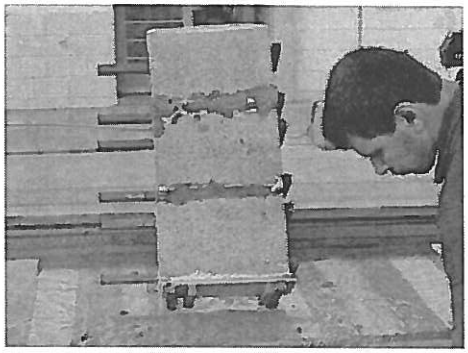


Fig 13 - Aparato guia para consecução dos prismas na escala real.

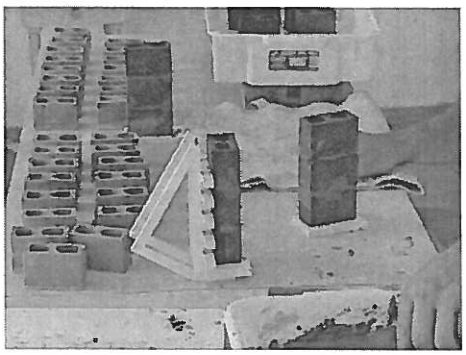


Fig 14 - Aparato guia para consecução dos prismas na escala (1:4).

7.2 Descrição dos ensaios em prismas

Para a determinação da resistência à compressão dos prismas de blocos de concreto, neste trabalho, foram utilizados alguns procedimentos preconizados pela norma brasileira NBR-8215 de outubro de 1983. Alguns fatores foram modificados, tal como a altura dos prismas, que esta norma preconiza como sendo duas fiadas de altura, porém neste trabalho foi decidido trabalhar com prismas de três fiadas de altura, para evitar os efeitos dos pratos da prensa. MAURENBRECHER (1980) sugere que se trabalhe com prismas de três fiadas de altura, com relação $h/t \cong 5$ ao invés de com dois prismas de altura conforme preconiza a norma utilizada neste trabalho.

7.3 Resultados obtidos

Os valores das resistências à compressão e dos módulos de deformação secantes obtidos nos ensaios de compressão axial dos corpos-de-prova, nas duas escalas, são mostrados na Tabela 11. O valor escolhido para a determinação do módulo de deformação secante foi de aproximadamente 40% das cargas de ruptura dos prismas.

7.4 Análise dos resultados obtidos nos prismas

As formas de ruptura encontradas para os prismas na escala real foram as mesmas encontradas na escala reduzida, onde, apesar de ocorrer vários tipos e formas de ruptura estas foram verificadas nas duas escalas.

Tabela 11 - Resultados do ensaio com os prismas.

Escala	Traço	Resistência		Módulo Secante	
		Ruptura (MPa)	C. V. (%)	Valor Médio (MPa)	C. V. (%)
Escala Real	Traço 1P	7,92	7,20	10001	12,79
	Traço 2P	6,58	6,91	7704	25,16
	Traço 3P	6,97	9,37	9053	11,90
	Traço 4P	10,15	12,38	8372	17,77
	Traço 5P	8,03	8,49	6709	13,86
Escala Reduzida	Traço 1M	9,16	5,69	9053	9,77
	Traço 2M	7,27	6,95	7865	17,84
	Traço 3M	9,52	14,78	10206	10,02
	Traço 4M	10,99	8,06	8621	12,06

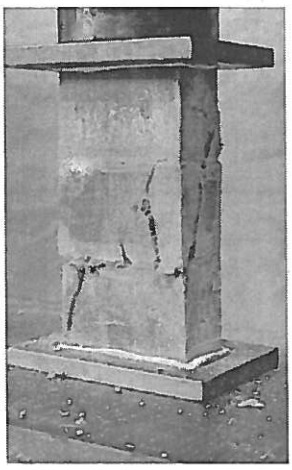


Fig 15 - Ruptura no prisma da escala reduzida



Fig 16 - Ruptura no prisma da escala real.

Assim como aconteceu para as unidades, os prismas que apresentaram resistências e deformações diferentes entre escalas, apresentaram erros em torno de 10%. Assim sempre apresentando uma confiabilidade excelente

Os prismas Traço 1P e 1M apresentaram valores diferentes de resistência média comprovado através do teste de hipótese de "*t de student*", conforme Tabela 12. Este fato pode ter ocorrido devido à maior precisão na fabricação dos modelos, pela facilidade de se trabalhar com os mesmos, evitando problemas com assentamento dos blocos e acréscimo de água na argamassa, mesmo assim a proximidade do valor de *t* calculado e tabelado é muito grande, o que indica uma proximidade nas médias de resistências do modelo e protótipo. De fato, o valor para validação da igualdade seria de $9{,}00MPa$ para o modelo, o que significa que modelo e protótipo apresentam resistências diferentes de apenas 1,77%, que segundo o ACI (1979) tem excelente representatividade. Para os prismas do Traço 2P e 2M foi verificada a igualdade conforme mostra a Tabela 12.

Para os prismas do Traço 3P e 3M a resistência do modelo foi superior à resistência do protótipo, como ocorrido para o Traço 1, conforme mostrada na Tabela 12. Mais uma vez é determinado o erro para comparação do modelo com o protótipo. O valor para validação era de $8{,}40MPa$ para que o modelo apresentasse resistência igual ao protótipo, isto imprime ao traço 3 um erro de 11,76%. Para os prismas do Traço 4P e 4M a resistência do modelo foi igual à resistência do protótipo confirmado pelo teste de hipótese, conforme Tabela 12.

Com relação aos módulos de deformação, estes foram determinados e correlacionados entre seus traços equivalentes. A seguir é mostrada a Tabela 13 que verifica a igualdade do módulo de deformação secante entre os prismas do Traço 1.

Pela Fig 17 e pelo coeficiente de variação das amostras pode-se afirmar que as curvas tensão-deformação são iguais, aproximando ainda mais as relações entre modelo e protótipo. A unidade para o número Π é então encontrada.

Tabela 12 - Teste de hipótese para a resistência dos Traços estudados.

	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
Graus de liberdade	8	7	8	7
Variância Ponderada	0,298	0,235	1,203	1,124
Valor de t calculado	2,426	1,268	3,847	1,224
t tabelado	2,306	2,365	2,306	2,042
Resist. Protótipo (MPa)	7,92	6,58	6,97	10,15
Resist. Modelo (MPa)	9,16	7,27	9,52	10,99
Igualdade	não	sim	não*	sim
Erro (%)	1,77	-	11,76	-

* Não levando em consideração o aumento de resistência do modelo devido ao seu aumento no grau de compactação.

Tabela 13 - Teste de hipótese para o módulo de deformação dos Traços estudados.

	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
Graus de liberdade	7	7	7	7
Variância Ponderada	1270377	2990105	1110779	1729054
Valor de t calculado	1,683	0,187	2,188	0,378
t tabelado	2,365	2,365	2,365	2,365
Resist. Protótipo (MPa)	10001	7704	9053	8372
Resist. Modelo (MPa)	9053	7865	10206	8621
Igualdade	sim	sim	sim	sim

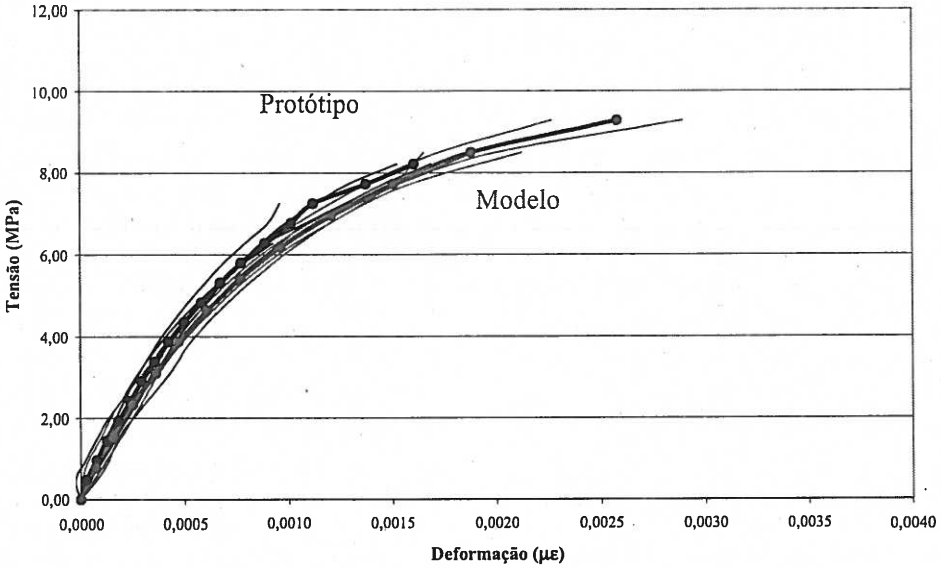


Fig 17 - Gráfico tensão-deformação para os prismas do Traço 1.

Para os prismas do Traço 2 também foi verificada a relação unitária do número Π entre as escalas, ou seja, o comportamento das unidades com menos cimento em relação aos prismas com mesmo traço de argamassa desempenhou da mesma forma nas duas escalas, conforme pode ser observado pela Fig 18 e através do teste de hipótese conforme mostra a Tabela 13.

Para os prismas do Traço 3, percebe-se diferença nas rigidezes próximo as cargas de ruptura, conforme mostra a Fig 19, com o modelo apresentando maiores valores.

Este fato pode ter ocorrido na produção dos prismas, quando em se mantendo a plasticidade da argamassa de assentamento na escala real, o que pode ter conferido, as argamassas, características diferentes. Contudo o teste de hipótese mostrado na Tabela 13 apresenta valores de módulo de deformação secante iguais entre protótipo e modelo.

O Traço 4 apresenta o mesmo comportamento verificado para o Traço 3 conforme apresentado na Fig 20 e na Tabela 13.

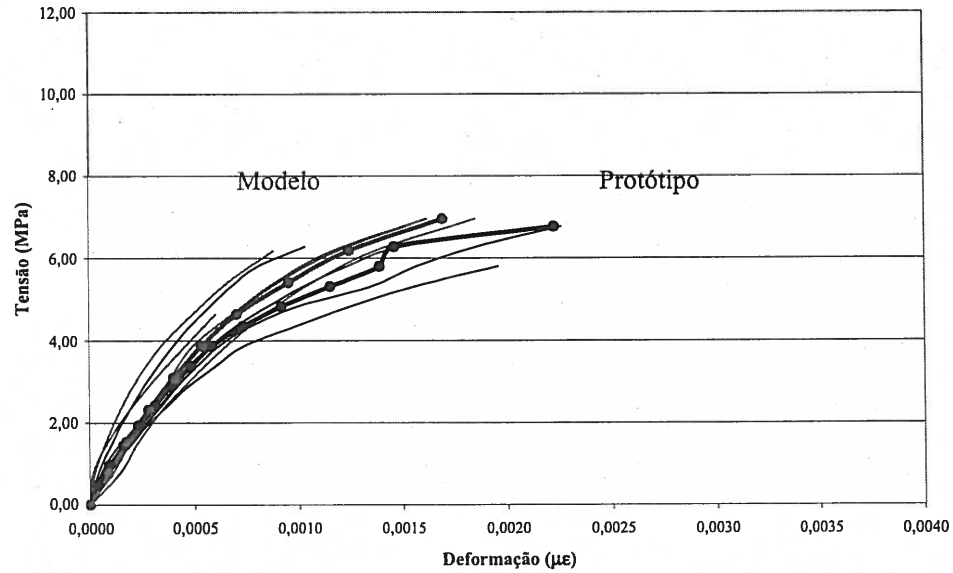


Fig 18 - Gráfico tensão-deformação para os prismas do Traço 2.

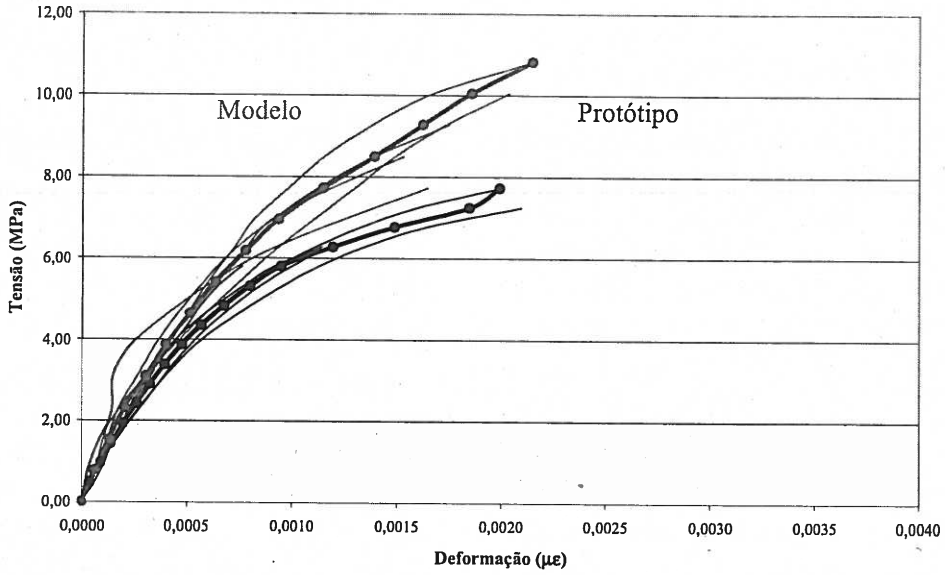


Fig 19 - Gráfico tensão-deformação para os prismas do Traço 3.

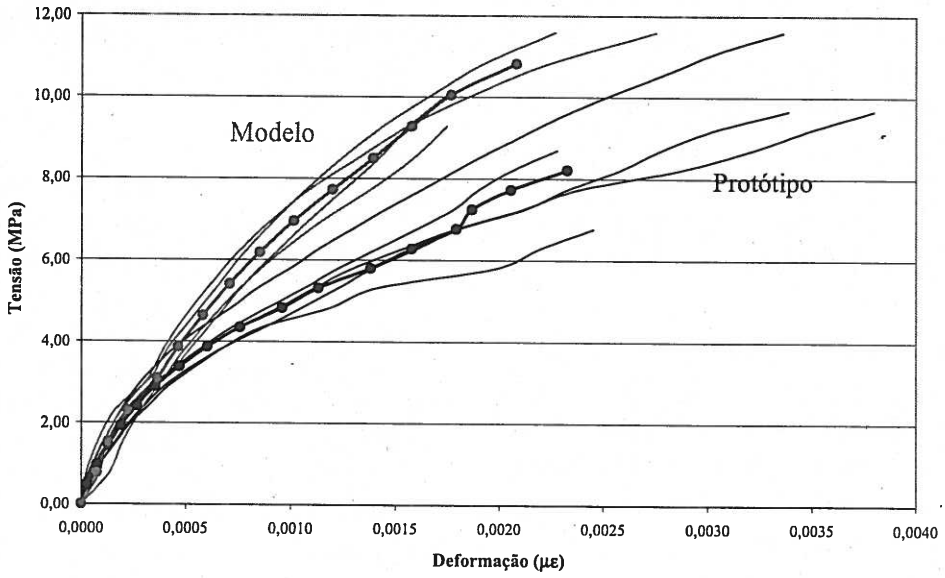


Fig 20 - Gráfico tensão-deformação para os prismas do Traço 4.

8 COMENTÁRIOS FINAIS E CONCLUSÃO

Para a fabricação dos blocos em escala reduzida, inicialmente decidiu-se por definir as granulometrias máximas dos agregados, fazendo somente um limitante superior para as mesmas. Contudo, esse procedimento não apresentou bons resultados, sendo que as grandezas medidas no modelo e no protótipo apresentavam diferenças significativas, bem como prejudicava o processo de fabricação. Assim, como segunda tentativa, optou-se por adoptar os seguintes procedimentos:

- ✓ Manutenção das curvas granulométricas entre modelo e protótipo;
- ✓ Determinação das faixas significativas das curvas granulométricas dos agregados;
- ✓ Manutenção dos graus de compactação entre modelo e protótipo;

- ✓ Manutenção dos teores de cimento entre modelo e protótipo.

É muito importante que o grau de compactação seja o mais próximo possível entre modelo e protótipo para que ambos apresentem resistências à compressão iguais. Deste modo verificou-se neste trabalho que o nível de significância adotado para comparação das médias dos graus de compactação não foi o melhor. Deve-se aumentar o nível de significância para 0,01 quando comparando este parâmetro, já que o mesmo influencia de modo significante a variável resistência.

Com relação a escolha da escala, realmente ficou constatado que a relação (1/4) adotada foi capaz de manter correlações com a escala real e, ao mesmo tempo, mostrou-se adequada quando na montagem dos prismas, facilitando o processo de execução quanto a manutenção de prumo, nível e espessura das juntas. Para as unidades, a redução em escala dos agregados não apresentou dificuldades. Dessa forma, essa escala permitirá futuras investigações em elementos estruturais de maior porte.

Com relação aos blocos e suas correlações entre escalas foi verificado que o modelo apresentou comportamento similar ao protótipo, tanto com relação à resistência, quanto com relação ao módulo secante. Contudo, mais importante que relacionar estes dois parâmetros foi o comportamento das curvas tensão-deformação dos mesmos, que se apresentaram muito próximas, permitindo assim entender que o modelo representa muito bem o comportamento estrutural do protótipo, fato comprovado pelos testes de hipóteses realizados ao longo do trabalho.

Foi verificado nos prismas o mesmo comportamento observado nos blocos isolados, ou seja, valores de resistências e módulos de deformação. Esse fato é muito importante para a reprodução de estruturas na escala reduzida. Algumas variações perceptíveis nos ensaios foram influenciadas pela argamassa de assentamento, o que indica a necessidade de que em trabalhos futuros haja um controle rigoroso da mesma, nas escalas estudadas.

Concluindo, entende-se pela análise dos resultados obtidos nos ensaios dos blocos e dos prismas, que a alvenaria de blocos de concreto pode ser estudada através de modelos reduzidos com resultados confiáveis, uma vez que se observem todos os procedimentos aqui descritos.

Como trabalhos futuros, no sentido de continuidade do estudo aqui realizado, propõe-se um estudo detalhado da deformabilidade de prismas e paredes, nas duas escalas, medindo-se comportamento global dos elementos, das unidades e das juntas. Uma vez vencida essa etapa, abre-se um enorme caminho para investigações do comportamento de estruturas mais complexas através da técnica de modelagem física reduzida.

9 REFERÊNCIAS

ABBOUD, B. E.; HAMID, A. A.; HARRIS, H. G. Small-scale of concrete block masonry structures. **ACI Structural Journal**, Detroit, v.87, n.2, 1990. p.145-155.

ANDOLFATO, R. P.; CAMACHO, J. S.; MAURÍCIO, R. M. Blocos de concreto: A busca de um traço otimizado. **Revista IBRACON,** São Paulo, Ano X, v.29, 2002. p.32-39.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI Committee 444 on models of concrete structures. **Models of concrete structures:** state of the art. Detroit: American Concrete Institute, 1979. 19p. (ACI 444R-79).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **Agregados – Determinação da composição granulométrica:** NBR-7217. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1987. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRADE NORMAS TÉCNICAS. **Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Determinação da resistência à compressão:** NBR-7184. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992. 2p.

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: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1983. 2p.

CAMACHO, J. S. **Contribuição ao estudo de modelos físicos reduzidos de alvenaria estrutural cerâmica**. São Paulo, 1995. 157p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

HENDRY, A. W. **Structural masonry**. Hong Kong: Macmillan Press, 1998. 294p.

MAURENBRECHER, A. H. P. The effects of test procedures on compressive strength of masonry prisms. **Proceedings of the Second Canadian Masonry Symposium,** Ottawa, 1980. p.119-132.

SABBATINI, F. H. **O processo construtivo de edifícios de alvenaria estrutural sílico-calcária**. São Paulo, 1984. 298p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.