

# ESTUDO DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS ARGAMASSAS DE ASSENTAMENTO PARA ALVENARIA ESTRUTURAL

G. Mohamad (1); P. B. Lourenço (2); A. Camões (3); H. R. Roman (4)

(1) Uminho- Departamento de Engenharia Civil- CAPES-MEC, Azurém, Cx. Postal 4800-058, Guimarães, Portugal- [gihad@civil.uminho.pt](mailto:gihad@civil.uminho.pt)

(2) e (3) Uminho - Departamento de Engenharia Civil, Azurém, Cx. Postal 4800-058, Guimarães, Portugal- [pbl@civil.uminho.pt](mailto:pbl@civil.uminho.pt) e [aires@civil.uminho.pt](mailto:aires@civil.uminho.pt)

(4) UFSC – Departamento de Engenharia Civil, Cx. Postal 88049-900, Florianópolis, Brasil. [humberto@ecv.ufsc.br](mailto:humberto@ecv.ufsc.br)

## RESUMO

As normas BSI-5628 (BSI,1992) e ASTM C-270 (ASTM,1997) especificam a resistência a compressão como a principal característica mecânica das argamassas de assentamento para alvenaria estrutural. No entanto, este tipo de parâmetro não é suficiente para propiciar um melhor entendimento das complexidades da alvenaria em função da argamassa e, por consequência, não é usado como único fator nas simulações computacionais, onde é senso comum que a principal responsável pelas não-linearidades é a junta de assentamento. Este trabalho pretende avaliar o comportamento mecânico das argamassas no estado endurecido, através das propriedades de resistência à compressão, tração na flexão e módulo de elasticidade. Portanto, estabelecer correlações entre os resultados mecânicos de diferentes traços de argamassas, relações água/cimento e geometria da amostra. Para tanto, foram especificados três traços de argamassas, cujas proporções foram designadas em volume. Corpos-de-prova cúbicos, prismáticos e cilíndricos foram moldados e ensaiados. Com base nos resultados experimentais, as principais conclusões obtidas são: existe uma relação potencial entre a resistência a compressão do cubo, cilindro e a resistência à flexão em função da relação água/cimento; a equação que descreve o comportamento entre as resistências dos cubos e cilindros em relação à flexão é exponencial; a função linear é a que melhor ajusta os valores médios do módulo de elasticidade em função da resistência à compressão.

Palavras-chave: argamassas de assentamento, alvenaria estrutural, propriedades físicas e mecânicas.

## 1. INTRODUÇÃO

A alvenaria é composta pela justaposição entre o bloco e a argamassa, cujas combinações entre as diferentes características mecânicas dos materiais foram estudadas por diversos pesquisadores. Como exemplo, pode-se citar: Hamid e Drysdale (1979), Cheema e Klingner (1986) e Khalaf et al. (1994). As pesquisas, de uma forma geral, indicam que na alvenaria deve haver uma compatibilidade nas características mecânicas entre os tipos de bloco e a capacidade resistente da argamassa. No entanto, quando se aumentou a capacidade resistente da argamassa, não se evidenciou um aumento significativo na resistência da alvenaria. Consequentemente, alguns pesquisadores relegaram a junta de assentamento para um segundo plano frente ao bloco. Talvez por isso, as normalizações internacionais, tais como BSI-5628 (BSI,1992) e ASTM C-270 (ASTM,1997), apresentam apenas traços indicativos das composições entre o cimento, a cal e a areia, sem estabelecer os parâmetros físicos e mecânicos necessários para o uso das argamassas para fins estruturais. Critérios como o tipo de assentamento (se com colher, binaça ou mecânico), do peso da unidade (bloco ou tijolo) e da necessidade do assentador não são usualmente considerados nas normalizações. Portanto, não existe qualquer informação sobre a relação água/cimento ( $a/c$ ), da geometria da amostra (cubos ou cilindros), dos índices de vazios e do módulo de elasticidade.

Os parâmetros mecânicos obtidos nos ensaios experimentais deste trabalho, como a resistência à compressão, o módulo de elasticidade e o comportamento pós-pico da argamassa, irão servir de base para uma futura simulação numérica das alvenarias estruturais.

Neste contexto, o objetivo principal deste trabalho é caracterizar física e mecanicamente as argamassas de assentamento a base de cal, determinando as respectivas correspondências entre os valores mecânicos. Para tanto, foram utilizados diferentes proporções entre o cimento, a cal e a areia, formas geométricas e modos de determinação do módulo de elasticidade. Os traços designados neste trabalho seguiram as recomendações da BSI-5628 (BSI,1992) e ASTM C-270 (ASTM,1997).

## 2. PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DAS ARGAMASSAS

Os itens a seguir descrevem os requisitos físicos e mecânicos especificados pelas normas NBR 7211 (ABNT,1983), NBR 7211 (ABNT,2005), EN 459-1 (CEN,2002), EN 197-1 (CEN,2001), BSI-1200 (BSI,1976), ASTM C-144 (ASTM,1999), NBR 7251 (ABNT,1982), NBR 9778 (ABNT,1987), ASTM C-270 (ASTM,1997) e BSI-5628 (BSI,1992) para as argamassas de assentamento.

### 2.1 Especificação granulométrica da areia

Os ensaios de caracterização física servem de base para o cálculo das percentagens de material, em massa, que farão parte das composições das argamassas e permitem definir as faixas de variação dos tamanhos dos grãos de agregados, a partir dos limites granulométricos fixados pelas normalizações. Neste contexto, se pretende utilizar as designações especificadas pelas normas NBR 7211 (ABNT,1983), NBR 7211 (ABNT,2005), BSI-1200 (BSI,1976) e ASTM C-144 (ASTM,1999) para caracterizar a composição granulométrica da areia para uso em assentamento nas alvenarias. As normas BSI-1200 (BSI,1976) e ASTM C-144 (ASTM,1999) especificam as percentagens passantes das areias em função das peneiras, estabelecendo os limites granulométricos inferiores (LI) e superiores (LS) adequados para o uso em argamassas de assentamento. A tabela 1 apresenta as respectivas percentagens passantes nas peneiras.

**Tabela 1 – Percentagens passantes de areias nas peneiras**

Peneira (abertura em mm)	Percentagem passante		Percentagem passante	
	BSI-1200 (BSI,1976)		ASTM C-144 (ASTM,1999)	
	LI	LS	LI	LS
0,15	0	10	2	15
0,30	5	40	10	35
0,60	40	80	40	75
1,20	70	100	70	100
2,40	90	100	95	100
4,80	100	100	100	100

A NBR 7211 (ABNT,1983) fixa os limites granulométricos do agregado miúdo por meio das zonas em que as mesmas se enquadram. As denominações são apresentadas na tabela 2. Essa caracterização é função das percentagens retidas de material nas respectivas peneiras.

**Tabela 2 – Limites granulométricos do agregado miúdo pela NBR 7211 (ABNT,1983)**

Peneira (abertura em mm)	Percentagem, em massa, retido nas peneiras.			
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
	Muito fina	Fina	Média	Grossa
9,5	0	0	0	0
6,3	0 - 3	0 - 7	0 - 7	0 - 7
4,8	0 - 5*	0 - 10	0 - 11	0 - 12
2,4	0 - 5*	0 - 15*	0 - 25*	5* - 40
1,2	0 - 10*	0 - 25*	10* - 45*	30* - 70
0,6	0 - 20	21 - 40	41 - 65	66 - 85
0,3	50 - 85*	60* - 85*	70* - 92	80* - 95
0,15	85* - 100	90** - 100	90** - 100	90** - 100

\* Tolerância de até 5%;\*\* Para agregado miúdo resultante de britagem este limite poderá ser de 80;

O resultado da análise granulométrica da areia utilizada na confecção das argamassas é apresentado na tabela 3. As percentagens retidas e passantes acumuladas foram obtidas pela média de duas porções de areia.

**Tabela 3 – Caracterização granulométrica da areia para os ensaios de argamassas**

<b>Peneira (abertura em mm)</b>	<b>Porcentagem retida acumulada (%)</b>	<b>Porcentagem passante acumulada (%)</b>
4,8	0	100
2,4	7	93
1,2	20	80
0,6	36	64
0,3	74	26
0,15	90	10
0,075	98	2
Fundo	100	0

A areia empregada no ensaio experimental esta dentro dos limites das percentagens passantes nas respectivas peneiras da série, quando utilizada as normas internacionais BSI-1200 (BSI,1976) e ASTM C-144 (ASTM,1999). Já ao usar como referência a norma NBR 7211 (ABNT,1983) a areia se encontra entre as zonas 2 e 3, ou seja, pode ser caracterizada como possuindo tamanhos de grãos finos e médios. A diferença principal entre as duas versões das normas NBR 7211 (ABNT,1983) e NBR 7211 (ABNT,2005) é a mudança nas denominações existentes. A segunda edição somente utiliza as denominações ótimas e utilizáveis, o que de certa forma se aplica apenas ao concreto. A primeira edição permitia a adequação da areia para outros fins como assentamento de alvenarias e revestimentos de paredes, pois existia uma faixa de variação por zonas, permitindo a classificação da areia conforme o tamanho do grão (muito fina, fina, média e grossa). O módulo de finura da areia é definido como o somatório das percentagens retidas acumuladas nas peneiras da série normal até a abertura de peneira igual a 0,15 milímetros divididos por cem (100). O valor obtido para o módulo de finura da areia utilizada nos experimentos foi de 2,27. A dimensão máxima característica da areia é uma grandeza associada à distribuição granulométrica do agregado correspondente a abertura de malha na qual as percentagens retidas acumuladas são iguais ou imediatamente inferiores a 5% em massa. A dimensão máxima característica da areia utilizada nos experimentos foi igual a 2,4 milímetros.

## **2.2 Características da areia, da cal e do cimento**

Em geral, nas argamassas de assentamento para as alvenarias estruturais, podem ser usados cimento portland comum, composto, pozolânico ou alto-forno. Para os ensaios experimentais realizados foram utilizados cimentos portland de calcário do tipo CEM II/B-L, de resistência a compressão não inferior a 32,5 MPa, conforme classificação da EN 197-1(CEN,2001) e contendo entre 21% e 35% em massa de calcário. Também, nos ensaios experimentais foram utilizados cal hidráulica da classe HL5, conforme a classificação da norma EN 459-1(CEN,2002). Como requisitos químicos dessa cal estão o teor de SO<sub>3</sub> menor ou igual a 3% e a cal livre superior a 3%.

Para a transformação dos traços de argamassas de volume para peso é necessário a determinação da massa unitária do agregado no estado solto. As amostras após serem secas devem ser lançadas, com o uso de uma concha, de uma altura de 10 a 12 centímetros até encher o recipiente, conforme NBR 7251(ABNT,1982). A massa unitária do agregado solto é a média dos resultados individuais obtidos em três determinações. Os resultados da massa unitária para o cimento, cal e areia são apresentados na tabela 4.

**Tabela 4 – Massa unitária do cimento, da cal e da areia**

<b>CIMENTO</b>	<b>CAL</b>	<b>AREIA</b>
1,08 kg/dm <sup>3</sup>	0,5 kg/dm <sup>3</sup>	1,48 kg/dm <sup>3</sup>

## **2.3 Índices de vazios e massa específica das argamassas**

A norma NBR 9778 (ABNT,1987) descreve os procedimentos de execução do ensaio para a determinação do índice de vazios e massa específica da argamassa no estado endurecido. As amostras utilizadas nos ensaios têm formato cúbico com a dimensão dos lados igual a 5 centímetros. O índice de vazios (*I<sub>v</sub>*) é a relação entre os volumes de poros permeáveis e o volume total, sendo calculado pela equação (1).

$$I_v = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} \times 100 \quad (1)$$

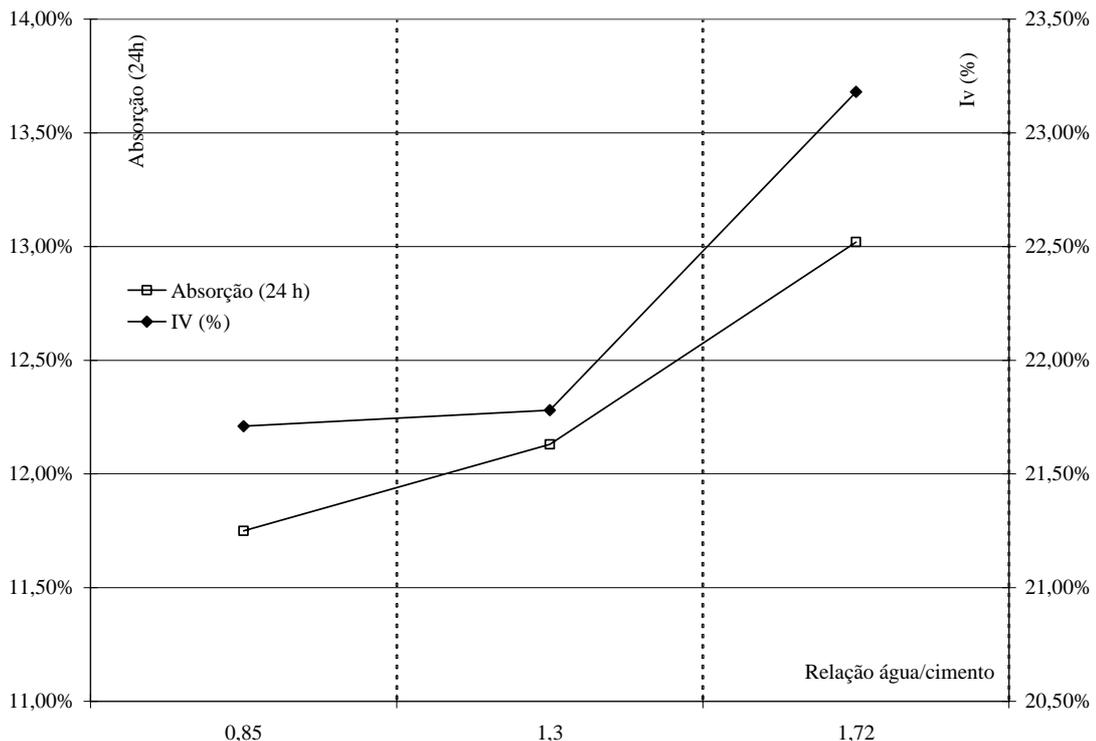
Onde  $M_{sat}$  é a massa do corpo-de-prova saturado,  $M_s$  é a massa do corpo-de-prova seco em estufa e  $M_i$  é a massa do corpo-de-prova saturado e imerso em água. A equação (1) define, no numerador, a diferença entre a massa saturada e seca, isto é a massa de água absorvida pelo material que preenche os vazios internos comunicáveis. O denominador é descrito pela diferença entre a massa saturada e a massa submersa, ou seja, é a massa em água que o material ocupa. A massa específica da amostra seca ( $\mu_s$ ) é definida pela equação (2). A tabela 5 apresenta os resultados individuais dos índices de vazios e das massas específicas das argamassas.

$$\mu_s = \frac{M_s}{M_{sat} - M_i} \quad (2)$$

**Tabela 5 – Resultados dos cálculos do índice de vazios e massa específica de argamassas**

TRAÇO	Relação água/cimento	$M_{SAT}$	$M_s$	$M_i$	$I_v$	$\mu_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção de água 24 horas
1:0,25:3	0,85	1580,9	1414,7	815,3	21,71%	1,85	11,75%
1:0,5:4,5	1,30	1552,8	1384,8	781,6	21,78%	1,80	12,13%
1:1:6	1,72	1546,0	1367,9	777,6	23,18%	1,78	13,02%

As massas das argamassas saturadas, secas e submersas em água foram obtidas pela média de seis amostras cúbicas. Nos resultados, se nota que o índice de vazios calculado foi da ordem de 20%. Assim, pode-se concluir que os vazios permeáveis internos são significativos e dependentes da relação água/cimento. Os resultados demonstraram que a massa específica da amostra seca diminuiu de valor em função do aumento da relação água/cimento. Também, a absorção de água em 24 horas aumentou com o incremento da relação água/cimento. De acordo com os resultados experimentais, se verificou que não existe uma correspondência entre a absorção de água e o índice de vazios. A figura 1 apresenta o gráfico com dois eixos verticais de correspondência entre a absorção de água 24 horas e o índice de vazios em função da relação água/cimento. Nota-se que, a medida que se aumenta a relação água/cimento ocorre um aumento nos valores de absorção de água e índice de vazios internos da argamassa. Os ensaios de absorção de água e índice de vazios foram realizados com idade de 28 dias.



**Figura 1 – Relação entre a absorção de água (24h), o índice de vazios e a relação água/cimento**

## 2.4 Critérios para a especificação dos traços de argamassas

As especificações dos traços de argamassas são definidas pelas recomendações normativas ASTM C-270 (ASTM,1997) e BSI-5628 (BSI,1992). As exigências estabelecidas por estas normalizações são consistência e retenção de água, para as argamassas no estado fresco. Estas características não consideram o tipo de unidade (cerâmico ou concreto) e a forma de assentamento. A tabela 6 apresenta os valores das propriedades da argamassa no estado fresco. Cabe salientar que o valor estabelecido de consistência de  $230 \pm 10$  milímetros é impraticável para assentamentos de alvenaria de blocos de concreto, ou seja, não se consegue um completo espalhamento e ajuste vertical da junta de assentamento com esta consistência.

**Tabela 6 – Exigências estabelecidas para as argamassas de assentamento**

PROPRIEDADE	ARGAMASSA
Consistência (abatimento)	$230 \pm 10$ mm
Retenção de água (%)	>75 %

A norma ASTM C-270 (ASTM,1997) especifica os traços de argamassas a partir da proporção em volume de materiais como mostra a tabela 7. As exigências estabelecidas para as propriedades mecânicas das argamassas de assentamento devem satisfazer os requisitos apresentados na tabela 8.

**Tabela 7 – Especificação dos traços de argamassas, conforme a ASTM C-270 (ASTM,1997)**

Tipo	Cim. Portland ou cimento com adição	Cal hidráulica ou leite de cal	Proporção de agregado
M	1	0,25	Maior que 2,25 e menor que 3 vezes a soma dos volumes de aglomerantes
S	1	0,25 a 0,50	
N	1	0,50 a 1,25	
O	1	1,25 a 2,25	

**Tabela 8 – Propriedade mecânica da argamassa (ASTM C-270 (ASTM,1997))**

Tipo	Resistência média à compressão aos 28 dias (MPa)	Retenção de água (%)	Ar na mistura (%)
M	17,2	>75	12
S	12,4	>75	12
N	5,2	>75	14*
O	2,4	>75	14*

\* Quando houver armadura incorporada à junta de argamassa, a quantidade de ar incorporado não poderá ser maior que 12%.

As recomendações para os traços de argamassas da BSI-5628 (BSI,1992) são apresentadas na tabela 9, seguidos pelos limites de resistência à compressão (tabela 10).

**Tabela 9 – Especificação dos traços de argamassas em volume (BSI-5628 (BSI,1992))**

Designação da Argamassa	TIPO DE ARGAMASSA		
	Cim:Cal:Areia	Cim.Alv.:Areia	Cim:Areia Plastificante
(I)	1:0 a 0,25:3	-	-
(II)	1: 0,5:4 a 4,5	1:2,5 a 3,5	1:3 a 4
(III)	1:1:5 a 6	1:4 a 5	1:5 a 6
(IV)	1:2:8 a 9	1:5,5 a 6,5	1:7 a 8

**Tabela 10 – Propriedades mecânicas das argamassas segundo a BSI-5628 (BSI,1992)**

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO MÉDIA AOS 28 DIAS (MPa)		
Designação da argamassa	Testes laboratoriais	Testes em situ
(I)	16,0	11,0
(II)	6,5	4,5
(III)	3,6	2,5
(IV)	1,5	1,0

Comparando os resultados de resistência à compressão apresentados pela ASTM C-270 (ASTM,1997) e

BSI-5628 (BSI,1992), nota-se uma significativa diferença de valor para os traços “S”, “N” e “O” em relação aos traços “II”, “III” e “IV”. No trabalho experimental os traços de argamassas foram mantidos constantes e definidos a partir dos requisitos e exigências das normas ASTM C-270 (ASTM,1997) e BSI-5628 (BSI,1992). A proporção entre aglomerante e agregado foi de 1:3. As relações água/cimento das misturas foram escolhidas em função da trabalhabilidade da mistura, de modo a proporcionar suficiente manuseio e espalhamento sob a superfície do bloco. Os traços estudados são apresentados na tabela 11.

**Tabela 11 – Especificação dos traços de argamassas e proporção entre materiais**

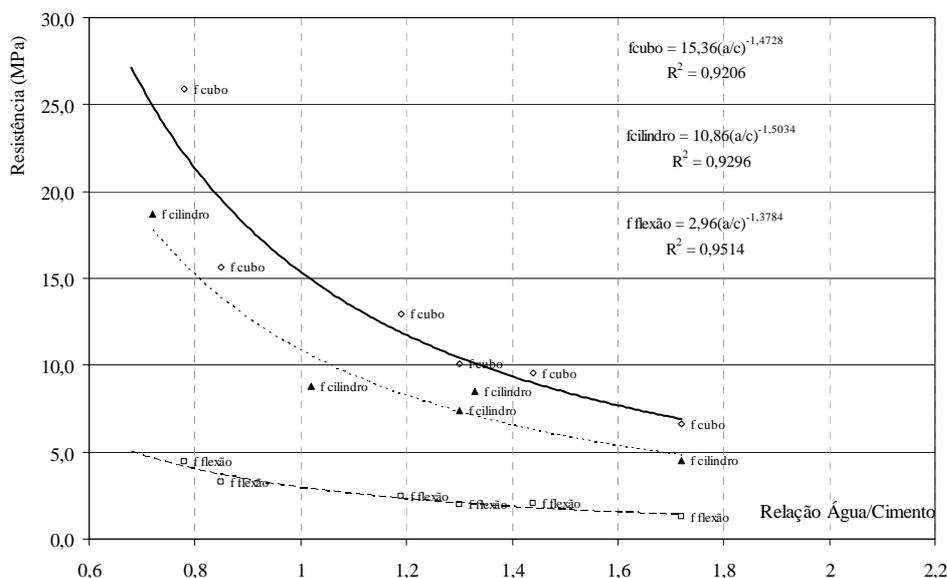
TRAÇO	PROPORÇÃO EM VOLUME CIM:CAL:AREIA	RELAÇÃO AGLOMERANTE: AGREGADO
I	1: 0,25:3	1 : 2,4
II	1: 0,5:4,5	1 : 3
III	1:1:6	1 : 3

### 3. ANÁLISES DOS RESULTADOS MECÂNICOS DAS ARGAMASSAS

Por intermédio da análise dos resultados mecânicos dos diferentes traços de argamassas é possível avaliar o comportamento do material quando solicitado por forças.

#### 3.1 Efeitos da variação da relação água/cimento nas resistências mecânicas das argamassas

A resistência à compressão das argamassas é um dos principais parâmetros comparativos de qualificação das composições estabelecidas pela ASTM C-270 (ASTM,1997) e BSI-5628 (BSI,1992). O ensaio de compressão foi realizado com velocidade constante de 0,002 mm/s. Os ensaios de flexão em três pontos foram realizados em amostras prismáticas, cujas as dimensões: largura, altura e comprimento são 4, 4 e 16 centímetros. A velocidade de carregamento foi de 0,001 mm/s. Para os ensaios, foram estabelecidos procedimentos de testes compatíveis com o material a ser ensaiado. As determinações das resistências foram feitas em uma prensa com controle de deslocamento, com o objetivo de se obter o comportamento pós-pico do material. As relações água/cimento foram fixadas de acordo com a trabalhabilidade da mistura em função do tipo assentamento da alvenaria, da necessidade do operário e para que a junta de argamassa ficasse sempre com uma altura constante. Inicialmente, se distribuía a argamassa sob o bloco ficando a mesma com uma altura de 15 milímetros para que os blocos superiores das fiadas fossem posicionados com um martelo de borracha e nível. A altura final da junta de assentamento era de 10 a 12 milímetros. Portanto, os parâmetros de referências para a trabalhabilidade foram determinados pelo assentador. A figura 2 apresenta os resultados médios dos ensaios de compressão (amostras cúbicas e cilíndricas) e flexão. As equações das curvas correspondentes a figura 2 são apresentadas na tabela 12.

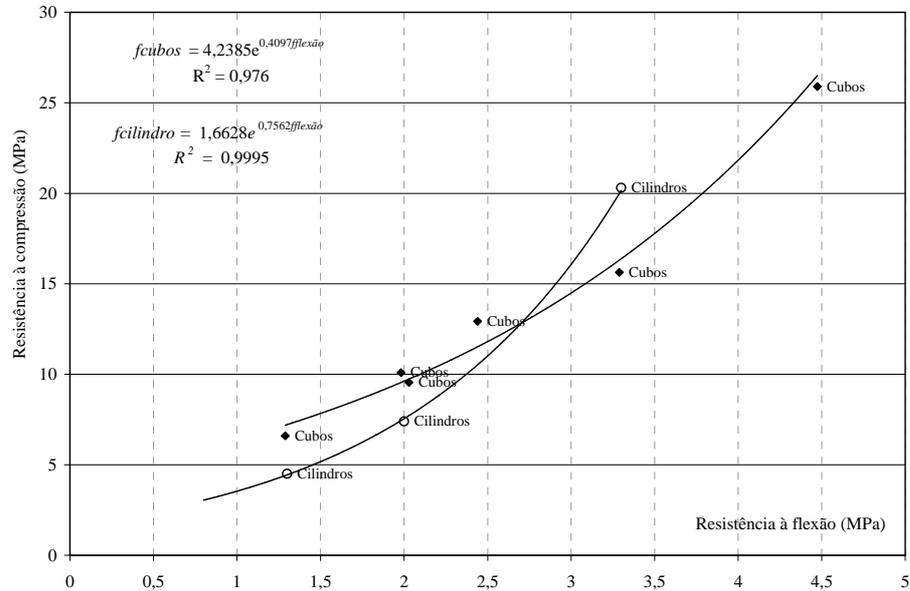


**Figura 2 – Resistência em função da relação água/cimento**

**Tabela 12 – Variação da resistência em função da relação água/cimento**

Equação	FORMA		
	Cúbico	Cilíndrico	Flexão
	$f_{cubo} = 15,36(a/c)^{-1,4728}$	$f_{cilindro} = 10,86(a/c)^{-1,5034}$	$f_{flexão} = 2,96(a/c)^{-1,3787}$

A figura 3 apresenta o resultado médio entre as resistências dos cubos e cilindros em relação à resistência a flexão, juntamente com as respectivas correlações. A função exponencial foi a que melhor representou os pontos.



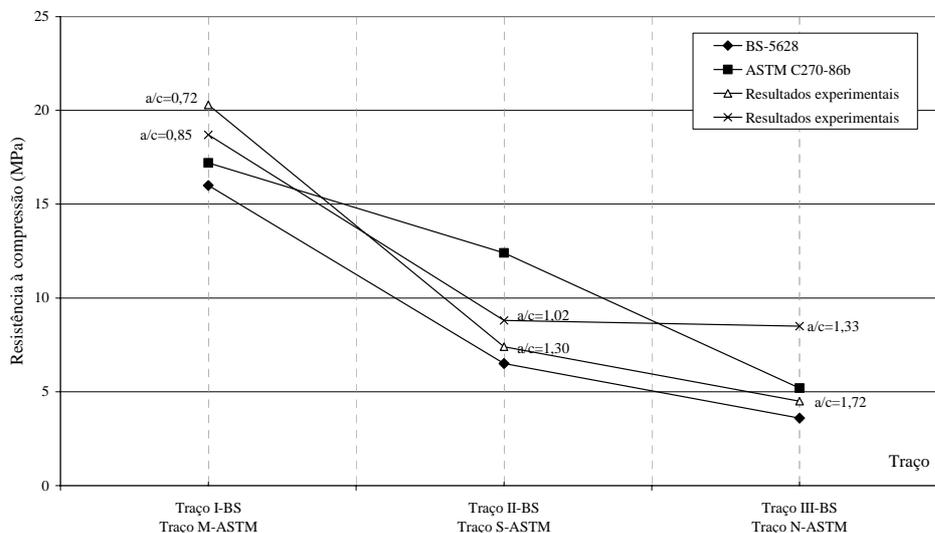
**Figura 3 – Resistência à compressão de amostras cúbicas e cilíndricas em função da flexão**

A tabela 13 apresenta as equações entre a resistência do cubo e cilindro em função da resistência a flexão.

**Tabela 13 – Variação entre as resistências à compressão de cubos e cilindros em função da flexão**

Equação- Flexão	FORMA	
	Cúbico	Cilindro
	$f_{cubo} = 4,24.e^{0,4097 f_{flexão}}$	$f_{cubo} = 1,66.e^{0,7562 f_{flexão}}$

A figura 4 apresenta o comparativo entre as resistências das argamassas obtidas experimentalmente em comparação com a proposta pelas normas BSI-5628 (BSI,1992) e ASTM C-270 (ASTM,1997).

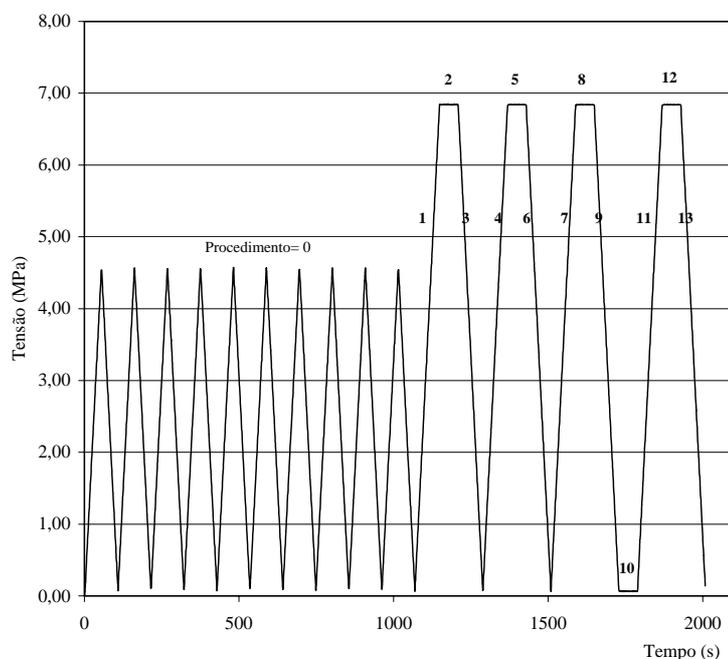


**Figura 4 – Relação entre a resistência da argamassa em comparação ao especificado pela BSI e ASTM**

### 3.2 Resultados de módulo de elasticidade das argamassas

Outro parâmetro de caracterização das argamassas é o módulo de elasticidade. Esta variável serve de base para alimentar o comportamento mecânico do material, quando se usa programas de elementos finitos. Partindo-se da premissa que diferentes métodos de teste podem influenciar nos resultados do módulo de elasticidade se adotou os procedimentos estabelecidos pela norma NBR 8522 (ABNT,2003).

A seguir se descreve o método utilizado para a execução do ensaio. Antes de realizar o ensaio de módulo de elasticidade deve-se, primeiramente, verificar a resistência à compressão das argamassas ( $f_c$ ) com o uso de duas amostras similares, cujo intuito é fixar o patamar  $0,3. f_c$ . O corpo-de-prova deve ser posicionado e ajustado na prensa de ensaio. A NBR 8522 (ABNT,2003) no ensaio de módulo de elasticidade cita a velocidade de  $(0,25 \pm 0,05)$  MPa/s. Durante os testes preliminares notou-se que esta velocidade não condiz com o tipo de material utilizado, ou seja, em poucos segundos a tensão na amostra atingia  $0,3. f_c$ . Testes realizados anteriormente permitiram concluir que a velocidade pode interferir no tempo de resposta do material (deslocamento) quando solicitado. Portanto, levando em consideração as necessidades anteriores, se concluiu que a velocidade de  $0,15$  KN/s era suficiente para as condições de teste. Na figura 5 são mostrados os procedimentos para a verificação das deformações lidas nas bases de medidas, ou seja, dez ciclos de carga e descarga (procedimento 0), quatro patamares lineares crescentes (procedimentos 1, 4, 7 e 11), quatro patamares lineares decrescentes (procedimentos 3, 6, 9 e 13) e cinco patamares constantes (2, 5, 8, 10 e 12). O módulo de elasticidade do material é obtido pelas tensões e deformações médias entre os procedimentos 12 e 10.



**Figura 5 – Procedimentos utilizados para a determinação do módulo de elasticidade das argamassas**

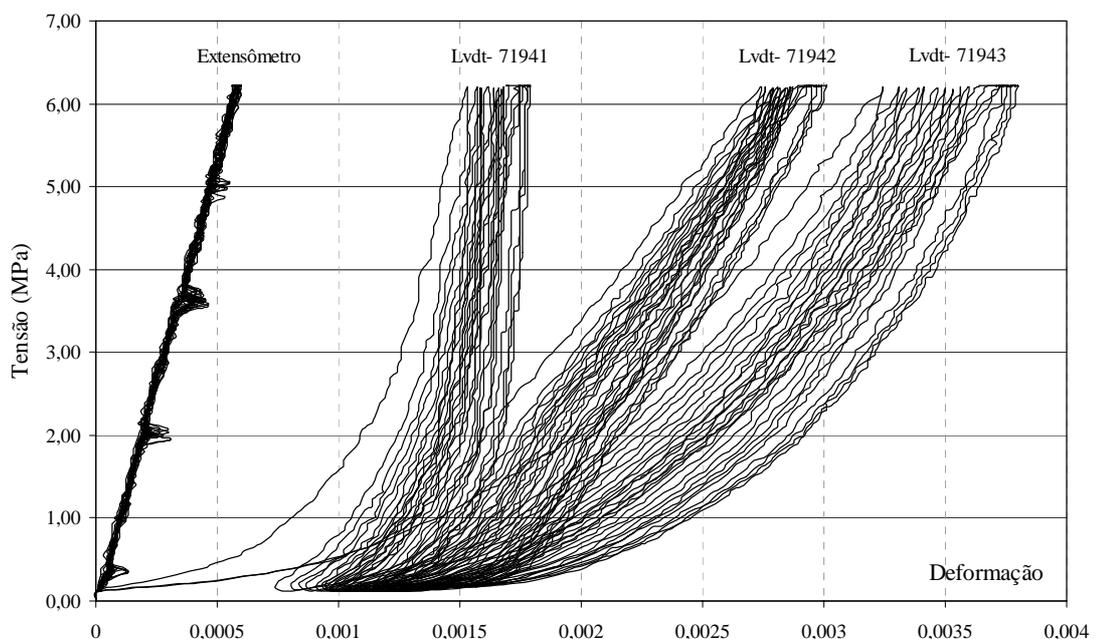
Anteriormente a execução do ensaio, se buscou realizar o ajuste na posição da amostra, por meio dos seguintes passos: colocou-se o corpo-de-prova em posição centrada entre os pratos da prensa; aplicou-se uma força aproximada de 10% do valor previsto na ruptura; verificaram-se as deformações registradas pelos medidores, caso a diferença entre as deformações lidas nesses medidores fosse maior que 20% da maior das deformações, fazia-se a descarga do corpo-de-prova e procedia-se ao ajuste do centro da amostra. Nos estudos iniciais foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos com cinco centímetros de diâmetro por dez centímetros de altura. Um extensômetro foi colado nas amostras, a fim de se comparar as deformações verticais com os três transdutores de deslocamentos (lvdts) distanciados de  $120^\circ$ . Os lvdts são externos a argamassa e foram fixados na célula de carga, ou seja, para o cálculo das deformações a base de medida é a altura total do cilindro. Na figura 6 se visualiza a amostra e o equipamento de teste.



**Figura 6 – Determinação do módulo de elasticidade usando extensômetros e lvdts**

No início do ensaio é aplicada uma pré-carga de 0,1 MPa, onde os registros de deslocamentos nos lvdts são zerados e o teste é iniciado, respeitando os procedimentos da figura 5. Os resultados dos ensaios permitiram as seguintes verificações:

- A superfície superior da amostra deve estar perfeitamente retificada, a fim de garantir que não exista concentração de tensão em pontos localizados da amostra que, por consequência, gera rotações e influencia nos valores das deformações lidas;
- Ocorreram deformações residuais significativas nos topos das amostras, quando os lvdts são posicionados em toda altura do corpo-de-prova (figura 6). A figura 7 apresenta a curva tensão-deformação da argamassa usando extensômetros e lvdts (71941, 71942 e 71943);
- A resina regularizadora aplicada na amostra de argamassa pode afetar os resultados de deformação, se a mesma tiver rigidez superior ao material;
- Os extensômetros apresentaram resultados de deformações residuais praticamente insignificantes, pois foram posicionados no terço médio eliminando o efeito das interfaces (topos);
- Os módulos de elasticidade da argamassa calculados pelo lvdt-71941 e lvdts- 71942 e 71943 foram significativamente diferentes.



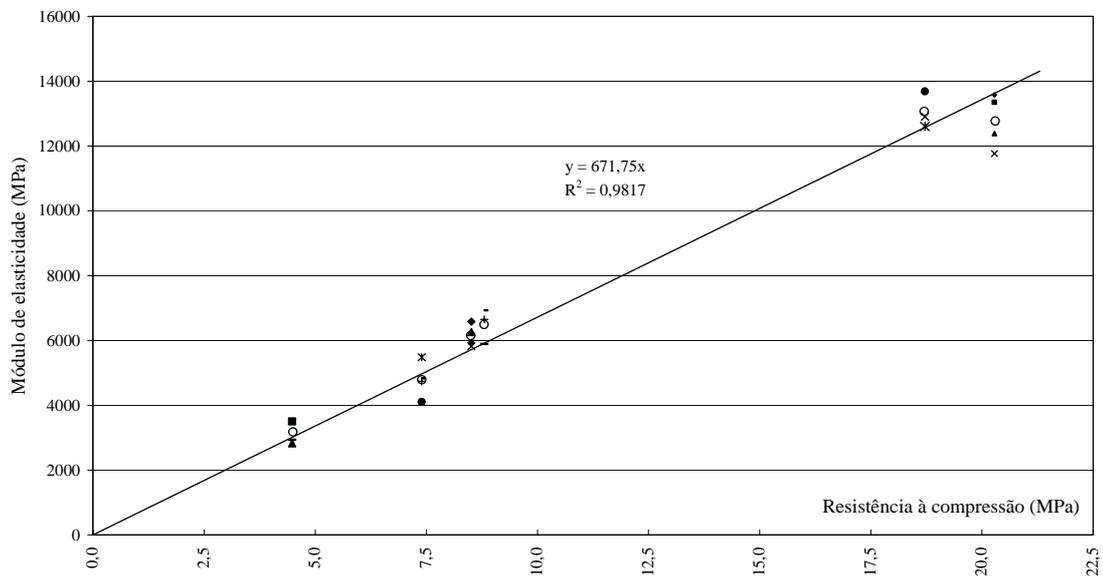
**Figura 7 – Relação entre a tensão e a deformação usando lvdts e extensômetro**

Os resultados nos ensaios possibilitaram concluir que, para eliminar os efeitos das interfaces, anéis metálicos devem ser posicionados no terço médio da amostra, conforme figura 8.



**Figura 8 – Esquema do ensaio para determinação do módulo de elasticidade da argamassa**

O ensaio da figura 8 possibilitou eliminar as deformações do topo e da base evitando as rotações da amostra. A figura 9 apresenta os resultados individuais entre o módulo de elasticidade secante para um nível de tensão de  $0,3.f_c$  em função da resistência à compressão. A base de medida das deformações foi de 27 milímetros.



**Figura 9 – Módulo de elasticidade secante e a resistência à compressão**

A tabela 14 apresenta os resultados médios dos diferentes traços de argamassas com os respectivos desvios-padrões (s.d), coeficiente de variação (c.v) e o número de amostras ensaiadas (n). Os traços foram denominados conforme BSI-5628 (BSI,1992). Para cada traço foi utilizado duas relações água/cimento.

**Tabela 14 – Resultados médios das resistências e módulos de elasticidade da argamassa**

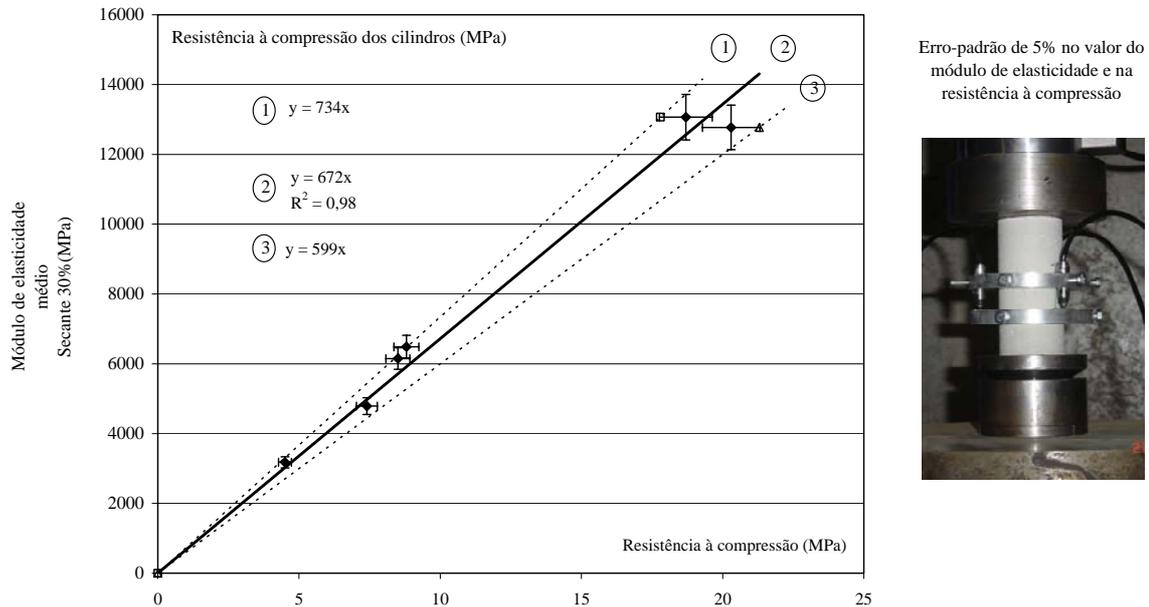
Traço	Resistência à compressão (MPa)				E <sub>30%</sub> (MPa)			
	Média	s.d (MPa)	c.v (%)	n	Média	s.d (MPa)	c.v (%)	n
I	20,3	0,32	1,6	3	12769	846	6,6	4
I*	18,7	0,86	4,6	4	13065	558	4,3	3
II	7,4	0,77	10,4	3	4788	565	11,8	4
II*	8,8	0,13	1,5	4	6491	537	8,3	3
III	4,5	0,63	14,0	3	3177	343	10,8	4
III*	8,5	0,27	3,1	4	6152	339	5,5	4

\* Traços com a mesma proporção de cimento, cal e areia e diferente relação água/cimento.

O coeficiente de variação do módulo de elasticidade das argamassas, apresentada na tabela 13, variou de 4 a 11,8%. Esses valores podem ser considerados pequenos.

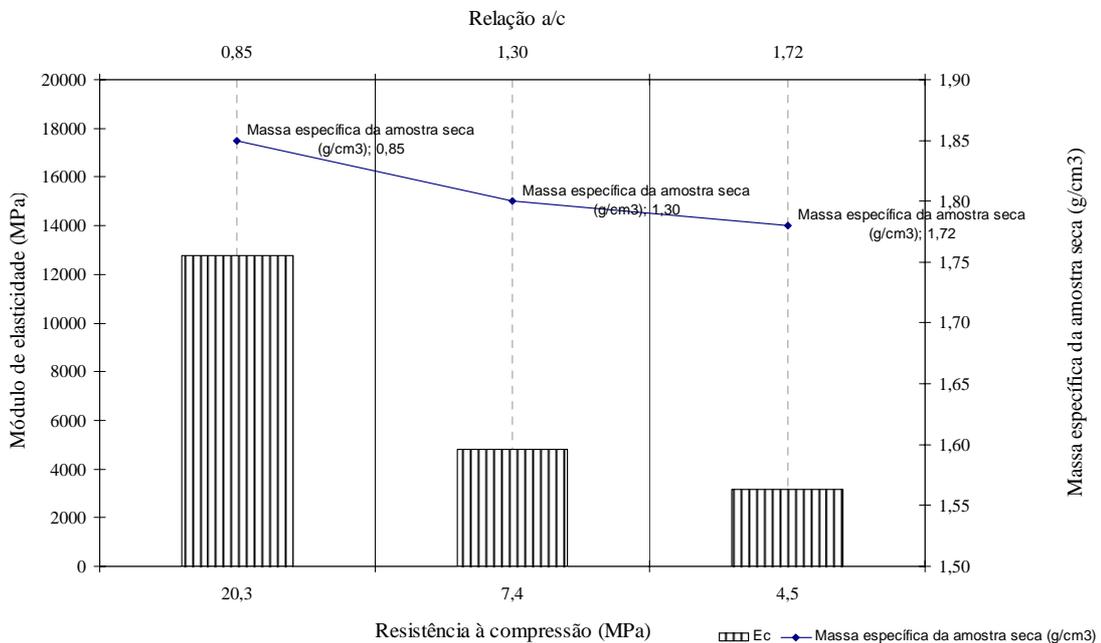
Através dos resultados médios, considerando um erro-padrão de 5% no valor do módulo de

elasticidade e da resistência à compressão, se obteve a faixa de variação da função linear passando pela origem, conforme mostra a figura 10. Os números 1, 2 e 3 da figura 10 representam as retas de aproximação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão quando considerado o erro-padrão de  $\pm 5\%$ .



**Figura 10 – Faixa de variação da função linear entre o módulo de elasticidade secante e a resistência à compressão**

A figura 11 relaciona as variáveis mecânicas (resistência à compressão e módulo de elasticidade) com as variáveis físicas (relação água/cimento e a massa específica da amostra seca) de argamassa.



**Figura 11 – Resultados entre as variáveis mecânicas e físicas da argamassa**

Os ensaios de compressão foram realizados com controle de deslocamento com uma velocidade constante de 0,002 mm/s. Com os resultados se pode verificar que a argamassa de resistência 19,1 MPa teve um comportamento linear até próximo  $0,83.f_c$ . Após isso, começam a ocorrer as deformações não-lineares. Para a argamassa de resistência à compressão de 3,7 MPa e 7,1 MPa as deformações não-lineares acontecem quando as tensões atingem  $0,37.f_c$  e  $0,43.f_c$ , respectivamente. A argamassa de resistência à compressão de 19,1 MPa possui um comportamento pós-pico parabólico.

As argamassas de resistência à compressão de 3,7 e 7,1 MPa tiveram um comportamento dúctil. Após atingir a ruptura teve-se um aumento progressivo das deformações mantendo-se praticamente constante o nível de tensão aplicado. A figura 12 mostra o diagrama tensão e deformação salientando, com um círculo, o ponto onde começam as deformações não-lineares da argamassa. Também, são mostrados a resistência última da argamassa ( $f_c$ ), a deformação máxima na ruptura e o comportamento pós-pico do material.

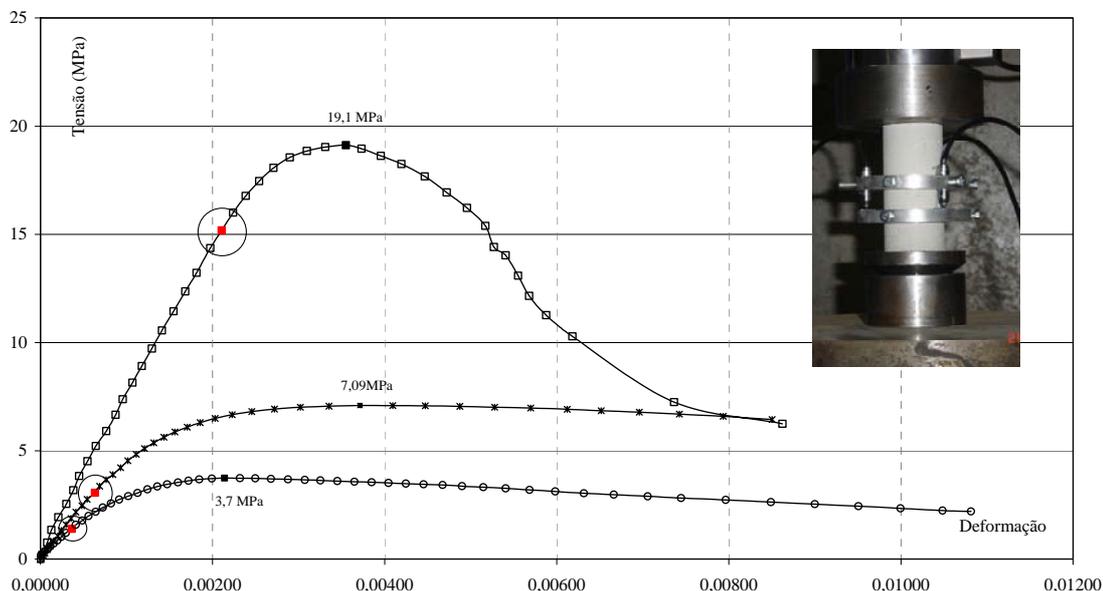


Figura 12 – Comportamento do diagrama tensão e deformação das argamassas

#### 4. CONCLUSÕES

As principais conclusões deste trabalho são:

- Os traços de argamassas especificados pela BS 5628 (1992) e ASTM C-270 (1997) e os resultados experimentais são dependentes da relação água/cimento. As normas não sugerem parâmetros de trabalhabilidade em função do tipo de assentamento. Isso interfere nos resultados mecânicos, causando inconsistências entre os resultados mecânicos obtidos experimentalmente e os fornecidos pelas normalizações;
- Não existe uma relação entre o teor de ar na mistura (%) de acordo com a ASTM C-270 (1997) e o índice de vazios (NBR 9778 (1987)). Notou-se que o índice de vazios foi maior que o esperado. Isso pode justificar o modo de ruptura das argamassas de traço II e III ser dúctil e, principalmente, a ocorrência do prolongamento da deformação pós-ruptura;
- Existe uma relação potencial entre as resistências do cubo, cilindro e flexão em função da relação água/cimento das argamassas. Também, se verificou um paralelismo entre a resistência à compressão do cubo e cilindro em função da relação água/cimento. A proporção média entre a resistência do cilindro em função do cubo é de 0,70;
- A relação entre as resistências dos cubos e cilindros em função da resistência à flexão foi uma equação exponencial. Para as amostras cúbicas ou cilíndricas, a proporção entre a resistência à compressão e flexão foi de 0,19;
- Para o ensaio do módulo de elasticidade das argamassas, os lvdts devem ser posicionados no terço médio da amostra. Caso contrário às imperfeições no topo e base pode afetar os resultados de deslocamento. Também, quanto à adoção de extensômetros se deve ter o cuidado com o tipo de resina regularizadora, pois poderá ter rigidez superior ao material testado;
- Existe uma tendência do valor do coeficiente de Poisson diminuir em função da resistência da argamassa. Os traços do tipo II e III apresentaram valores de 0,10 e 0,06, respectivamente. O coeficiente de Poisson do traço designado por I foi de 0,16;

- A função linear é a que melhor ajusta os valores médios do módulo de elasticidade secante em relação à resistência a compressão. O coeficiente angular da reta de aproximação pode variar de 600 a 740 vezes a resistência à compressão da argamassa;
- As argamassas com resistência à compressão de 20 MPa tiveram um comportamento linear até, aproximadamente, 0,83 da tensão última. Para as argamassas de resistência à compressão de 7,1 MPa e 3,7 MPa, as deformações não-lineares aconteceram quando o nível de tensão atingiu 0,47 e 0,37 da resistência à compressão. Isso pode estar vinculado com a distribuição e tamanho dos vazios internos da argamassa e, por conseqüência, pode afetar o modo de ruptura das amostras. Estudos posteriores devem ser realizados a fim de verificar o tamanho dos vazios e a distribuição, pois poderá auxiliar na interpretação das deformações não-lineares da argamassa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C 270**: Standard specification for mortar for unit masonry. Pennsylvania, 1997.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C 144**: Standard specification for aggregate for masonry mortar. Pennsylvania, 1999.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION (BSI). **BSI-5628**: Structural use of unreinforced masonry. London, Part 1, 1992.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION (BSI). **BSI-1200**: Specifications for building sands from natural sources. London, 1976.
- COMITÊ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO. EN 197-1: Cimento. Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes. Instituto Português de Qualidade, 2001.
- \_\_\_\_\_.EN **459-1**: Cal de construção: Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade. Instituto Português de Qualidade, 2002.
- DRYSDALE, R.G.; HAMID A.A Behavior of concrete block masonry under axial compression. **American concrete institute journal**, v.76, n. 6, p.707-721, 1979.
- KHALAF, A .; W. HENDRY; D.R. FAIRBAIN Mechanical properties of material used in concrete blockwork construction. **Magazine of Concrete Research**, v. 44, March, 1994.
- CHEEMA, T. S.; KLINGNER, R. E. Compressive strength of concrete masonry prism. **American concrete institute journal**, v.83, n. 1, p. 88-97, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7211**: Agregado para concreto. Rio de Janeiro, 1983.
- \_\_\_\_\_.**NBR 7211**: Agregado para concreto. Rio de Janeiro, 2005.
- \_\_\_\_\_.**NBR 7251**: Agregado em estado solto: Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.
- \_\_\_\_\_.**NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 1987.
- \_\_\_\_\_.**NBR 8522**: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. Rio de Janeiro, 2003.

## AGRADECIMENTOS

O autor agradece o financiamento da agência CAPES-MEC para a realização deste trabalho.