



ENSAIO DE COMPRESSÃO EM PRISMAS DE BLOCO DE CONCRETO-DEFORMABILIDADE E MODO DE RUPTURA

G. Mohamad⁽¹⁾, P. B. Lourenço⁽²⁾, H. R. Roman⁽³⁾

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

⁽²⁾ UMINHO - Departamento de Engenharia Civil, Azurém, Cx. Postal 4800-058, Guimarães-Portugal- pbl@civil.uminho.pt

⁽³⁾ UFSC - Departamento de Engenharia Civil, Cx. Postal 88049-900, Florianópolis - Brasil- humbertol@ecv.ufsc.br

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho é analisar os ensaios de compressão em prismas confeccionados com diferentes blocos de concreto e argamassas, propondo um modelo que estabeleça a relação entre o modo de ruptura e as características mecânicas dos materiais isolados. A dificuldade em empreender testes experimentais faz com que generalizações sejam adotadas a partir de parâmetros não aplicáveis aos diversos tipos de composições. Com isso, propõem-se um modelo, em função da rigidez dos componentes, com intuito de iniciar uma discussão sobre as características de deformabilidade linear, não-linear e de ruptura do conjunto. As conclusões obtidas são: as não-linearidades da curva tensão-deformação do conjunto dependem da argamassa utilizada; o ensaio de tração indireta por compressão forneceu resultados com boa precisão e baixa variabilidade; houve um aumento significativo no Poisson dos prismas, medido no bloco, após a proporção entre a tensão atuante e a resistência última atingir o nível de 0,6; salienta-se a existência de dois modos de ruptura, o primeiro é caracterizado pela indução de tração no bloco até atingir o limite de resistência à tração e o segundo é caracterizado pelo esmagamento da junta de assentamento, quando a argamassa atingir o limite da resistência à compressão confinada.

Palavras-chave: Alvenaria, Bloco, Compressão, Prisma e Ruptura.

1 INTRODUÇÃO

A alvenaria estrutural é um dos sistemas construtivos comumente empregado em países como o Brasil. A principal característica da alvenaria é ter a parede como elemento resistente as cargas verticais e laterais, onde a associação intercalada entre a unidade e a junta de assentamento é denominada por prisma. A norma brasileira NBR-10837 [1] designa o prisma como o principal parâmetro de especificação e controle dos materiais empregados.

O mecanismo indutor de ruptura na alvenaria e a influência da resistência do bloco e argamassa no conjunto são parâmetros fundamentais para estimar a capacidade resistente da parede. Todavia, estabelecer equações, a partir de resultados mecânicos dos materiais sob estados de tensão não equivalente ao presente no conjunto, de certa forma, já induzem erro ao serem aplicados como modelos genéricos, devido à distintas situações, tais como: características da mão-de-obra, tipo de unidade e argamassa. Portanto, o conhecimento das características mecânicas dos materiais isolados e da interação entre os mesmos pode permitir uma compreensão dos fatores envolvidos na deformabilidade e ruptura do conjunto.

Este trabalho pretende analisar os resultados mecânicos dos prismas, associando o modo de ruptura e a proporção de rigidez entre materiais (bloco e argamassa). Também, iniciar uma discussão nas características de deformabilidade linear e não-linear do conjunto.

2 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS ARGAMASSAS

O valor do módulo de elasticidade tangente inicial e resistência à compressão das argamassas foram obtidos a partir de ensaios em cilindros com 5 centímetros de diâmetro por 10 centímetros de altura. Um total de seis amostras foram ensaiadas para cada traço de argamassa. Os resultados da figura 1 são os valores médios dos deslocamentos obtidos em dois pontos afastados um do outro de 180 graus. O módulo de elasticidade foi obtido para um nível de tensão de 30% da resistência do material.

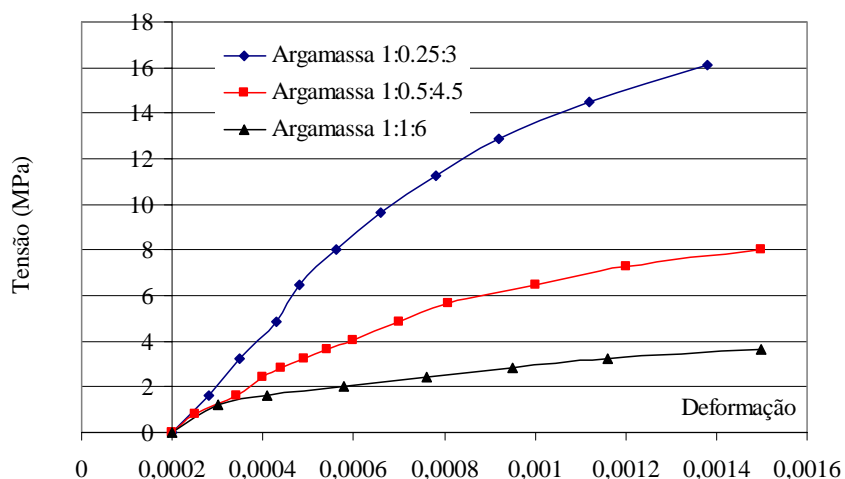


Figura 1 – Curva tensão-deformação de argamassas comprimidas uniaxialmente.

A equação (1) foi a que melhor representou a variação do módulo de elasticidade, em função da resistência à compressão da argamassa.

$$E_{arg} = -18,9f_{arg}^2 + 939,4f_{arg} \quad (1)$$

3 ENSAIO DE COMPRESSÃO EM PRISMA DE BLOCO DE CONCRETO

3.1 Diagrama tensão-deformação de prismas

A figura 2 mostra os resultados do diagrama tensão-deformação dos prismas construídos com blocos de duas células designado por M1, cujas dimensões reais, em centímetros, são: largura = 14, altura = 19 e comprimento = 39.

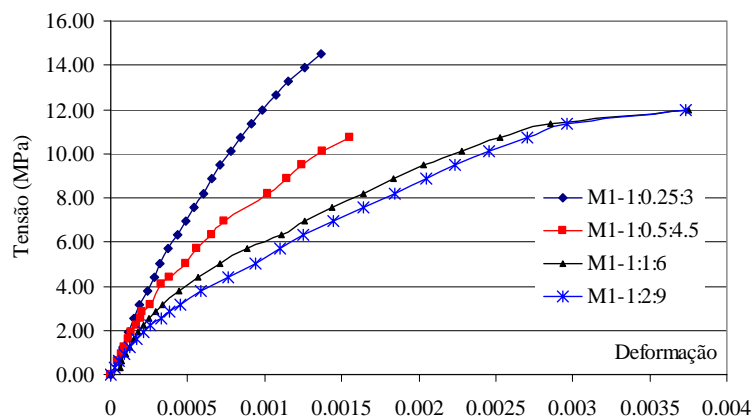


Figura 2 – Diagrama tensão-deformação de prismas de blocos de concreto (M1).

A tabela 1 apresenta os resultados mecânicos individuais dos materiais. Como hipótese inicial, para se prever o módulo de elasticidade confinado da argamassa (E_{aa}) presente nos prismas, se supõe que a deformação dos prismas até 30% da tensão última é governada, basicamente, pela deformação da argamassa entre blocos. Observa-se que, o diagrama tensão-deformação é dependente da resistência à compressão da junta de assentamento. Quanto menor a resistência à compressão da argamassa, maior é as não-linearidades do conjunto. O diagrama tensão-deformação para o traço de argamassa 1:1:6 e 1:2:9 apresentaram resultados similares nos valores de deformação.

TABELA 1 – Características mecânicas dos materiais isolados e do conjunto.

Designação	f_b (MPa)	f_a (MPa)	f_{prisma}^* (MPa)	E_{prisma} (MPa)	E_a (MPa) Eq. (1)	E_{aa}/E_a
M1-1:0,25:3	18,5	19,9	18,2	17491	11230	1,56
M1-1:0,5:4,5	18,5	8,63	14,2	15150	6409	2,36
M1-1:1:6	18,5	4,20	14,1	10684	4033	2,65
M1-1:2:9	18,5	2,29	13,0	9015	2042	4,41

*o valor de f_{prisma} fora obtido com a área líquida do bloco. A relação entre área líquida e bruta fora de 0,58.

A relação entre E_{aa}/E_a , para diferentes traços de argamassa, permitem concluir que existe um aumento na rigidez da argamassa presente nos prismas em relação aos obtidos uniaxialmente. Para o bloco designado como M1, os dados apresentados permitem concluir que, existe uma diferença na trajetória do diagrama tensão-deformação dos prismas, em função do tipo de argamassa. As deformações medidas nos prismas confeccionados com argamassas de traço 1:0,25:3 e 1:0,5:4,5 foram distintas. Os prismas confeccionados com o traço 1:1:6 e 1:2:9 apresentaram comportamentos semelhantes. A figura 3 apresenta o diagrama tensão-deformação dos prismas confeccionados com o bloco M2. A tabela 2 apresenta os resultados individuais.

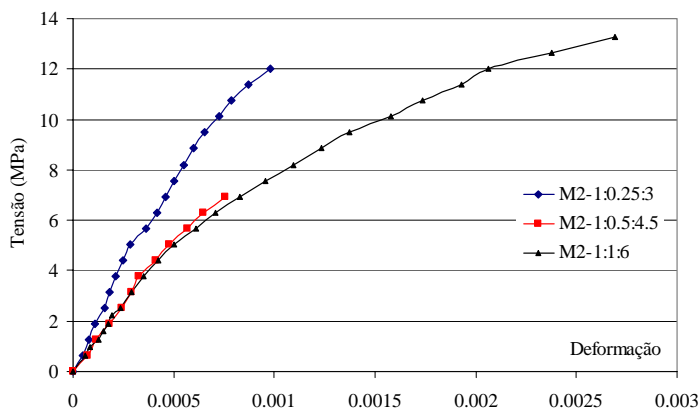


Figura 3 – Diagrama tensão-deformação de prismas de blocos de concreto (M2).

TABELA 2 – Características mecânicas dos materiais isolados e do conjunto.

Designação	f_b (MPa)	f_a (MPa)	f_{prisma} (MPa)	E_{prisma} (MPa)	E_a (MPa) Eq. (1)	E_{aa}/E_a
M2-1:0,25:3	27	19,20	20,20	17808	11069	1,61
M2-1:0,5:4,5	27	7,60	18,60	11600	6048	1,92
M2-1:1:6	27	5,41	15,20	10868	4529	2,40

A figura 4 apresenta a curva que melhor descreve a proporção entre o módulo de elasticidade confinado e o módulo de elasticidade uniaxial em função da resistência à compressão da argamassa.

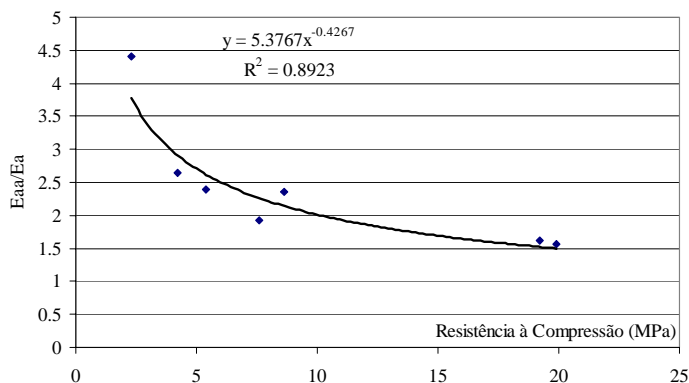
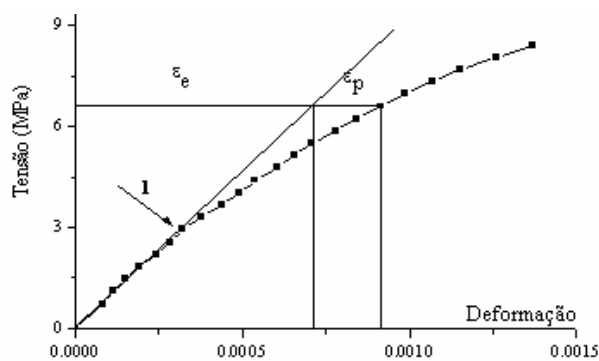


Figura 4 – Relação entre E_{aa}/E_a versus resistência à compressão da argamassa.

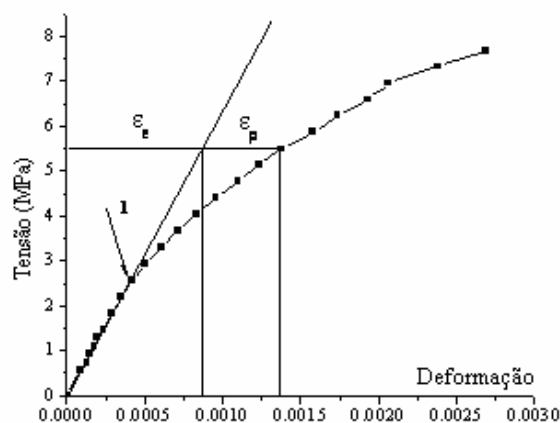
A expressão potencial da figura 4 é apresentada na equação (2).

$$\frac{E_{aa}}{E_a} = 5,38 \cdot f_{\text{arg}}^{-0,43} \quad (2)$$

A simulação numérica da alvenaria, com o intuito de verificar a perda da capacidade resistente, fica limitada devido a falta de conhecimento de propriedade, tal como: os fenômenos responsáveis pelas deformações não-lineares do conjunto gerados pelas mudanças nas características mecânicas do material. No exemplo da figura 5 (a) e (b) são mostrados os resultados experimentais da curva tensão-deformação dos prismas, onde se verifica o surgimento das deformações plásticas, a partir do ponto 1 através da reta de proporcionalidade entre tensões e deformações. Nota-se na figura 5 (a) e (b) que, as deformações plásticas são maiores quanto mais fraca for a argamassa. Para o gráfico da figura 5 (a) a proporção entre a deformação última plástica e a deformação elástica (ϵ_p/ϵ_e) é igual a 0,51. Na figura 5 (b) a proporção entre a deformação última plástica e a deformação elástica (ϵ_p/ϵ_e) é igual a 1,22. Portanto, ocorre um aumento significativo na proporção entre as deformações plásticas pelas elásticas. Como conclusão dos resultados experimentais, poderia se sugerir que as mudanças nas propriedades internas, tais como diminuição da coesão do material e fechamento dos poros internos influencia no comportamento plástico do material. Por consequência disso, surge um rearranjo nas partículas do material. Esta sugestão de perda de coesão das ligações ou mudanças na configuração estável dos grãos de agregados da argamassa deve ser estudada a partir de uma análise microestrutural do material antes e pós-ruptura.



a



b

Figura 5- (a) Diagrama tensão-deformação de prismas construídos com bloco de resistência $f_b=18,2$ MPa e argamassas de $f_{arg.} = 19,9$ MPa; (b) Diagrama tensão-deformação de prismas construídos com bloco de resistência $f_b= 27$ MPa e argamassa $f_{arg.} = 5,41$ MPa.

Os estudos experimentais permitiram determinar uma forma para a curva tensão/resistência (σ/f_c) e deformação/deformação última ($\varepsilon/\varepsilon_u$) dos prismas. O diagrama que melhor corresponde aos pontos é uma função polinomial de segundo grau com correlação (R^2) da ordem de 0,99. A figura 6 (a) apresenta a curva tensão/resistência versus deformação/deformação última dos prismas construídos com bloco de resistência à compressão (f_b) igual a 18,2 MPa e resistência da argamassa ($f_{arg.}$) igual a 19MPa. A figura 6 (b) apresenta a curva tensão/resistência versus deformação/deformação última dos prismas construídos com bloco de resistência à compressão (f_b) igual a 27 MPa e resistência da argamassa ($f_{arg.}$) igual a 5,41MPa. A equação generalizada da curva tensão-deformação transformada tem a forma apresentada na figura 6, cuja aproximação é uma função parabólica conforme mostra a equação (3).

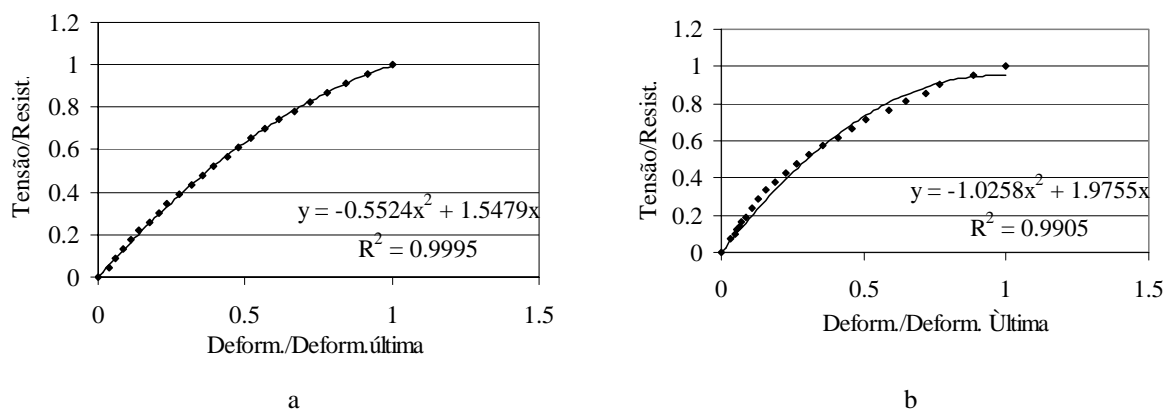


Figura 6 – Curva tensão-deformação transformada de prismas de blocos de concreto.

$$\frac{\sigma}{f_c} = a \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_u} - b \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_u} \right)^2 \quad (3)$$

As constantes a e b são obtidas através de diferentes composições entre a resistência do bloco e argamassa.

Através dos resultados experimentais se determinou a relação entre a tensão/resistência à compressão versus o Poisson do conjunto. Nos prismas construídos com o traço de argamassa 1:0,25:3, até a proporção tensão/resistência igual a 0,2, houve uma variação, no valor do Poisson, causada pela acomodação do material, a partir deste valor, nota-se que o Poisson se estabelece no patamar de 0,15, até atingir a proporção entre tensão/resistência igual 0,6. Após isto, acontece um aumento gradativo do Poisson até atingir à ruptura. O valor do Poisson na ruptura foi de 0,45. Nos prismas construídos com traços de argamassa 1:1:6, se nota um aumento gradativo do Poisson, desde níveis

de tensões iniciais até próximo às tensões finais (ruptura). O valor do Poisson na ruptura foi de 0,25. Para a proporção entre tensão/ resistência de 0,4 à 0,6 o coeficiente de Poisson médio obtido foi de 0,10. A figura 7 mostra os resultados experimentais.

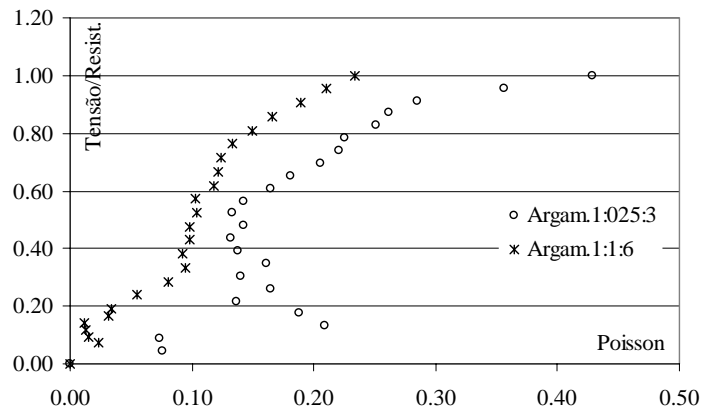


Figura 7 – Tensão/resistência versus o Poisson do prisma.

A superfície que descreve a relação entre a f_{bloco} , $f_{arg.}$, f_{prisma} é apresentada na figura 8 e na equação (4).

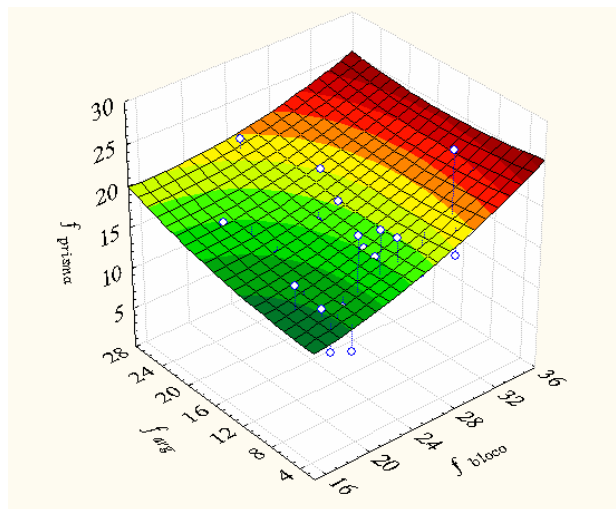


Figura 8 – Relação entre f_{prisma} , f_{arg} e f_{bloco} .

$$f_{prisma} = 14,48 - 0,148 \cdot f_b + 0,129 \cdot f_{arg} + 0,0129 f_b^2 - 0,0092 f_b f_a + 0,0064 f_a^2 \quad (4)$$

4 MODELO PARA A PREVISÃO DO MODO DE RUPTURA

Pretende-se, neste trabalho, apresentar um modelo teórico que descreva o comportamento mecânico na ruptura dos prismas de bloco de concreto, através do esmagamento da junta de assentamento ou da tensão de tração induzida no bloco. Como premissa inicial, o modelo estabelece uma relação entre a resistência à compressão do conjunto em função dos limites de resistência à compressão da argamassa e à tração do bloco. Para tanto, pela dificuldade em realizar os ensaios de tração direta, usou-se os

dados dos estudos de MOHAMAD [2] e ROMAGNA [3], onde os autores utilizaram ensaios de tração indireta por compressão diâmetral. A figura 9 mostra os resultados de tração indireta em função da resistência à compressão do bloco.

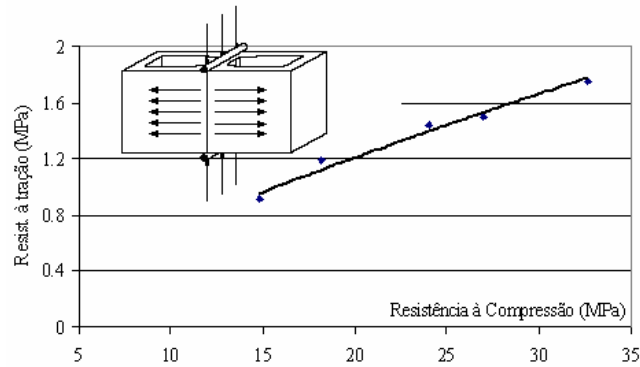


Figura 9 – Resistência à tração por compressão versus resistência à compressão do bloco.

A equação (5) descreve uma função potencial entre a resistência à tração e a compressão de blocos de concreto. A tabela 3 apresenta os resultados experimentais de de diferentes autores para a construção do modelo da figura 10.

$$f_t = 0,1137 \cdot f_c^{0,789} \quad (5)$$

TABELA 3 – Resultados de MOHAMAD [2], ROMAGNA [3], HAMID [4], KHALAF [5], CHEEMA [6] e CALÇADA [7].

	f_{bloco} (MPa)	f_{arg} (MPa)	f_{prisma} (MPa)	f_t (MPa)	f_{prisma}/f_{arg}	f_{prisma}/f_t
MOHAMAD [2]	18,5	19,9	18,2	1,14	0,91	16,01
	18,5	8,6	14,9	1,14	1,64	13,03
	18,5	4,2	14,1	1,14	3,35	12,37
	18,5	2,3	13,0	1,14	5,68	11,40
	27,0	19,2	20,2	1,53	1,05	13,20
	27,0	7,6	18,7	1,53	2,45	12,20
	27,0	5,4	15,3	1,53	2,81	9,98
ROMAGNA [3]	17,7	3,9	12,5	1,10	3,20	11,36
	27,4	5,6	15,7	1,55	2,80	10,13
	29,0	3,8	17,1	1,62	4,50	10,56
	24,1	7,4	17,9	1,40	2,42	12,78
	33,5	7,8	22,0	1,81	2,82	12,15
HAMID [4]	20,0	5,7	15,4	1,21	2,70	12,73
	20,0	14,7	16,4	1,21	1,11	13,55
	20,0	18,2	16,3	1,21	0,89	13,47
CHEEMA [6]	25,8	14,9	19,2	1,29	1,29	13,01
KHALAF [5]	24,3	9,2	17,8	1,93	1,93	12,62
	24,3	15,4	17,4	1,13	1,13	12,34
	24,3	26,5	21,4	0,81	0,81	15,18
CALÇADA [7]	17,8	5,2	16,8	3,23	3,23	15,27
	24,6	5,2	21,0	4,04	4,04	14,79
	29,7	5,2	28,4	5,46	5,46	17,21
	12,6	5,2	16,3	3,13	3,13	19,40
	21,0	5,2	23,4	4,50	4,50	18,57
	23,0	5,2	22,9	4,40	4,40	16,96

O valor de f_{prisma} e f_{bloco} foram obtidos considerando a área líquida; f_t é a resistência à tração do bloco estimado, através da equação (5); f_{arg} é a resistência da argamassa obtida através de cilindros de 5 cm por 10 cm de altura.

Os resultados experimentais, apresentados na figura 10, possibilitaram traçar o gráfico entre f_{prisma}/f_{arg} e f_{prisma}/f_t em função da proporção de rigidez entre argamassa e bloco. A intersecção entre as duas curvas é o ponto que estabelece uma mudança no modo de ruptura do conjunto. O modo de ruptura 1 é caracterizado por uma ruptura gerada pela indução de tração no bloco, o modo de ruptura 2 é caracterizado pelo esmagamento da junta de assentamento e a posterior indução de tração no bloco.

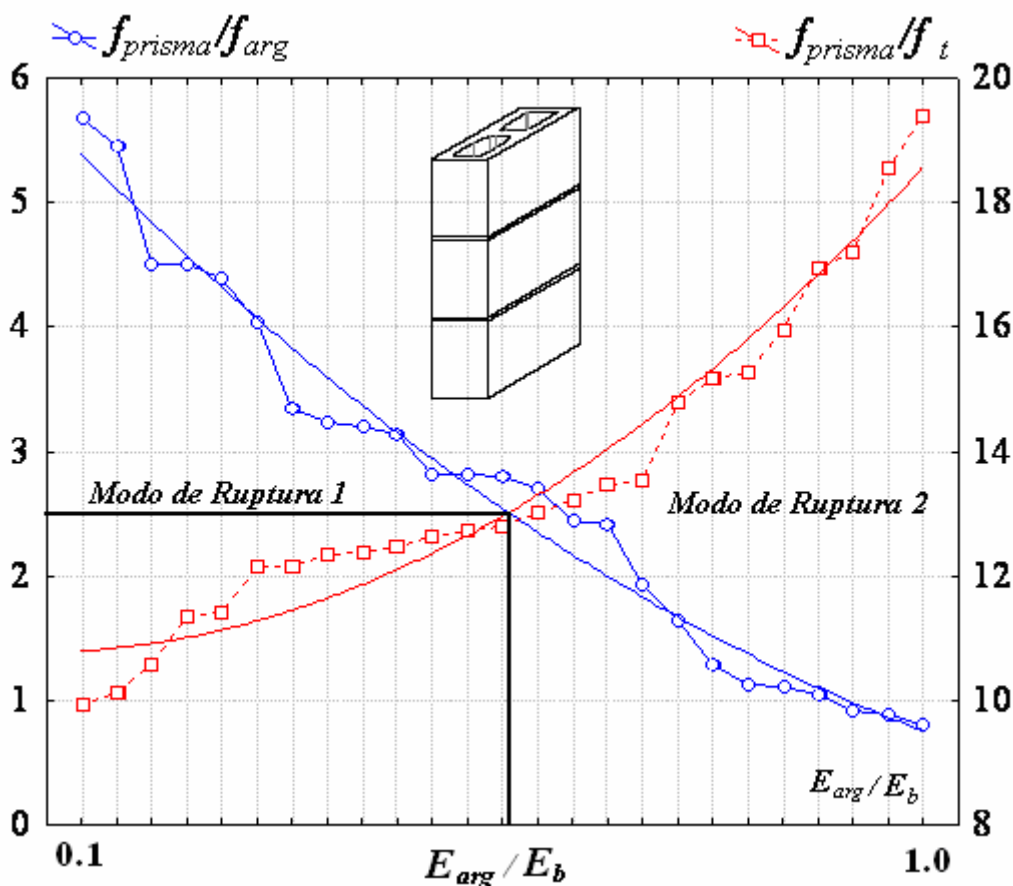


Figura 10 – Relação entre f_{prisma}/f_{arg} , f_{prisma}/f_t e E_{arg}/E_b .

5 CONCLUSÃO

- Foi verificado, nos ensaios de prismas, um aumento na rigidez da argamassa de assentamento, permitindo concluir que existe uma tendência de equilíbrio entre as proporções de forças absorvidas pelo bloco e pela junta. Portanto, quanto mais fraca for a argamassa maior será a relação entre E_{ad}/E_a . Isto, poderia justificar a pouca diferença no aumento de resistência do prisma em função do incremento de resistência da argamassa.

- O ensaio de tração indireta por compressão forneceu resultados com boa precisão e baixa variabilidade. Este tipo de ensaio é de fácil obtenção, sem a necessidade de equipamentos especiais.

- As deformações não-lineares são significativamente maiores e dependentes do traço de argamassa.

- Nota-se que o Poisson dos prismas medido no bloco aumentou após a proporção entre a tensão atuante e a resistência última atingir o nível de 0,6.

- Se pode salientar a existência de dois modos de ruptura do conjunto, o primeiro é caracterizado pela ruptura à tração do bloco quando a tensão de tração do bloco atingir o limite de resistência à tração do material, e o segundo pelo esmagamento

da junta de assentamento quando a resistência à compressão confinada da argamassa for atingida.

- Estudos devem ser dirigidos para o entendimento de quais fenômenos são responsáveis pelo surgimento das deformações plásticas enfatizando a natureza física da base porosa e da quantidade de material aglomerante.

6 AGRADECIMENTOS

O autor agradece a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “Cálculo de alvenaria estrutural de blocos vazados de concreto”. NBR10837, Rio de Janeiro, 1989.
- [2] MOHAMAD, G. “Comportamento mecânico na ruptura de prismas de blocos de Concreto”-Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-UFSC, Florianópolis. 1998-178p.
- [3] ROMAGNA, R. H. - “Resistência à compressão de prismas de blocos de concreto grauteados e não grauteados”-Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-UFSC, Florianópolis. 2000-218p.
- [4] HAMID, A. A. et al. Suggested failure criteria for grouted concrete masonry under axial compression. *American Concrete Institute- Journal Proceedings*. Out, 1979. Vol. 76, nº 10. pp 1047-1062.
- [5] KHALAF, F. M. et al. Study of the compressive strength of blockwork masonry. *American Concrete Institute- Structural Journal*. July, August. 1994. Vol.91, nº 4. pp 367-375.
- [6] CHEEMA, T. S. et al. Compressive Strength of Concrete Masonry Prism. *American Concrete Institute- ACI Structural Journal* . Jan, 1986. Vol. 83, nº 1. pp 88-97.
- [7] CALÇADA, L. M. L. “Avaliação do comportamento de prismas grauteados e não grauteados de blocos de concreto”-Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-UFSC, Florianópolis. 1998-188p.