

## **Análise não-linear com elementos de interface de alvenaria de blocos de concreto à compressão**



**Gihad Mohamad<sup>1</sup>**



**Paulo Brandão  
Lourenço<sup>2</sup>**



**Humberto Ramos  
Roman<sup>3</sup>**

### **RESUMO**

Este trabalho tem por objetivo avaliar um modelo numérico para simular o ensaio de compressão em prismas de blocos de concreto, por meio de um modelo constitutivo usando a teoria de plasticidade e comparar com os resultados experimentais. Para os resultados numéricos de tensão e deformação axial e lateral dos prismas foram consideradas as não-linearidades do material e das interfaces entre os mesmos. A simulação numérica foi realizada comparando dois traços de argamassas, com controle de deslocamento, conforme resultados experimentais. Para o concreto que compõe o bloco e a argamassa da junta empregou-se o modelo material não-linear apresentado pelo programa Diana, onde as condições limite de plasticidade são estabelecidas pelo critério combinado de Rankine e Drucker-Prager. Esse critério é comumente empregado para materiais isotrópicos quasi-frágeis, pois possibilita a representação adequada da fissuração por tração e o esmagamento por compressão. O comportamento pós-pico do material à tração seguiu uma lei exponencial e, na compressão, foi especificado um critério parabólico para o trecho ascendente e descendente da curva tensão e parâmetro de endurecimento. A argamassa foi conectada ao bloco pela interface, cujo modelo empregado foi o discreto, onde a fissuração ocorreu quando a tração normal excedeu a resistência à tração do material.

### **PALAVRAS-CHAVE**

Blocos de Concreto, Alvenaria estrutural, Interface, Simulação numérica.

<sup>1</sup> Universidade do Extremo Sul Catarinense, Departamento de Engenharia Civil, 88806-000, Criciúma, SC, Brasil. gihad@unesc.net

<sup>2</sup> Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 4800-058 Guimarães, Portugal. pbl@civil.uminho.pt

<sup>3</sup> Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil. 88040-900, Florianópolis, SC, Brasil humberto@ecv.ufsc.br

## 1. INTRODUÇÃO

Os principais modos de deformação da interface estão relacionados com fenômenos cinemáticos, tais como: deformação localizada, deslizamento, abertura e dilatância. Por isso, existe a necessidade de uma maior compreensão ao longo do carregamento dos mecanismos de ruptura das alvenarias, considerando uma interface coesiva (anterior ao pico de resistência) e um modelo único de atrito (pós-pico), onde as tensões de cisalhamento produzem variações geométricas na dilatância. Todos esses efeitos são pouco conhecidos na alvenaria dificultando, de uma forma geral, as simulações numéricas.

MARTINS [1] realizou ensaios de cisalhamento em prismas de blocos de concreto vazados com dois níveis de resistência para o bloco e três resistências para a argamassa de assentamento. Os prismas de blocos de concreto possuíam um espaço entre os meios-blocos de forma que, durante os testes, os mesmos pudessem deslizar e provocar o cisalhamento no contato entre a argamassa e o bloco. A Figura 1 mostra os prismas e o esquema para a realização dos ensaios.

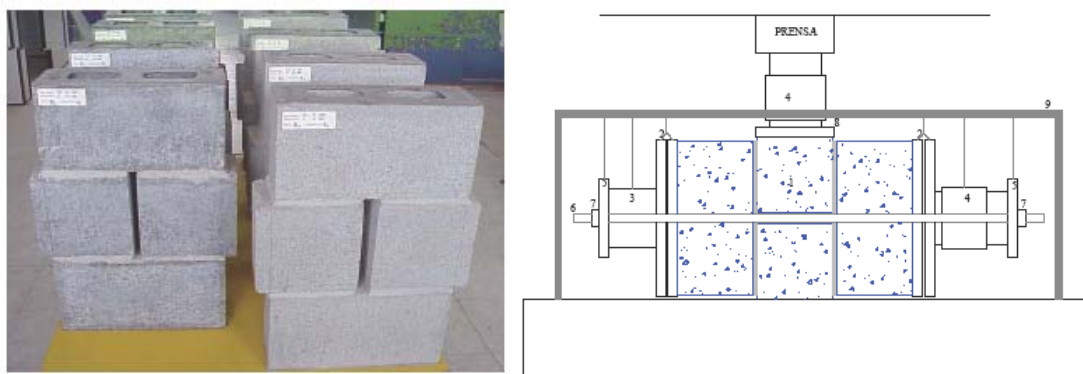


Figura 1. Prismas de blocos para os ensaios de cisalhamento com e sem tensão lateral e o esquema de teste realizado por Martins (2001).

ABDOU et. al. [2] realizaram estudos em que o principal objetivo foi o de investigar o comportamento da junta de assentamento ao cisalhamento, por meio de testes em prismas de dois blocos. Foi produzido um modelo de interface capaz de reproduzir as não-linearidades observadas em testes experimentais. Nos ensaios foram empregados dois tipos de unidades (sólidas e vazadas) para a mesma argamassa. Um equipamento existente foi modificado e enrijecido para permitir os ensaios em amostras de alvenaria (Fig. 2).

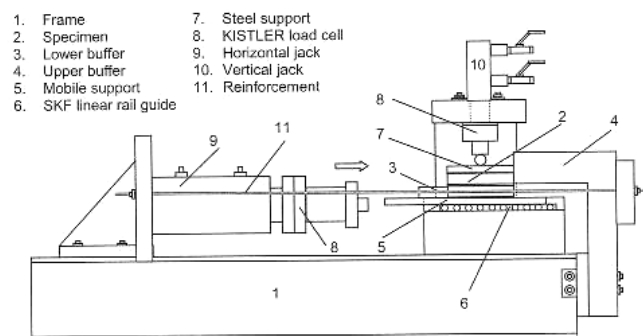


Figura 2. Equipamento modificado para o ensaio de cisalhamento em amostras de alvenaria.

Os primeiros testes consistiam em ciclos de carga e descarga para caracterizar os deslocamentos da interface entre o tijolo e a argamassa (elástico, elasto-plástico), onde a fase de descarga permitiu determinar se ocorre degradação da rigidez entre os materiais. Os testes permitiram verificar a relação do aumento da tensão vertical na tensão de cisalhamento bem como, se o comportamento da interface muda com o tipo de unidade. Os autores citam que o modo de ruptura da alvenaria pode ocorrer no

tijolo (fissuras distribuídas), na argamassa (esmagamento) ou na interface entre ambos os materiais. Na interface tijolo-argamassa, dois modos de ruptura são possíveis: ruptura por tração (induz uma abertura de junta) e cisalhamento (deslizamento entre as superfícies com o atrito). Os valores obtidos nos ensaios experimentais estão resumidos no Quadro 1.

Quadro 1. Proporção em volume de cimento, cal e areia dos traços de argamassas.

Tijolo	Características	Última (Valores de Pico)
Sólido	Coesão (MPa)	c=1,58
	Ângulo de Atrito	tan (φ)=1,01
Vazado	Coesão (MPa)	c=1,27
	Ângulo de Atrito	tan (φ)=1,01

GIAMBANCO E GATI [3] trabalharam com um modelo para a interface coesiva de alvenarias de blocos. Essa superfície é bilinear, sendo constituída pela lei de Coulomb e por uma tração limite. As funções limite, obtidas no espaço das tensões, são apresentadas nas Eq. (1) e (2).

$$\phi_1(\sigma, \beta) = |\tau_n| + \sigma_n \cdot \tan \varphi - c(\beta) = 0 \quad (1)$$

$$\phi_2(\sigma, \beta) = \sigma_n - s(\beta) = 0 \quad (2)$$

onde  $\varphi$  é o ângulo de atrito interno do material,  $s(\beta)$  e  $c(\beta)$  são os valores da resistência à tração e coesão, e  $\beta$  é uma variável interna que quantifica o comportamento inelástico.

## 2. SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO NÃO-LINEAR DOS PRISMAS.

A adoção de um modelo numérico parte habitualmente da consideração de que os seus resultados são determinísticos e não-probabilísticos, ou seja, as propriedades mecânicas são tomadas como médias, sem considerar a variabilidade. A intenção deste estudo é a obtenção de um modelo capaz de simular numericamente o ensaio de compressão em prismas, por meio de um modelo constitutivo usando a teoria de plasticidade. A Figura 3 mostra o esquema da malha quadrangular de elementos de oito nós, submetidos à estado plano de tensão, restrições de deslocamentos e carregamentos utilizados no modelo numérico.

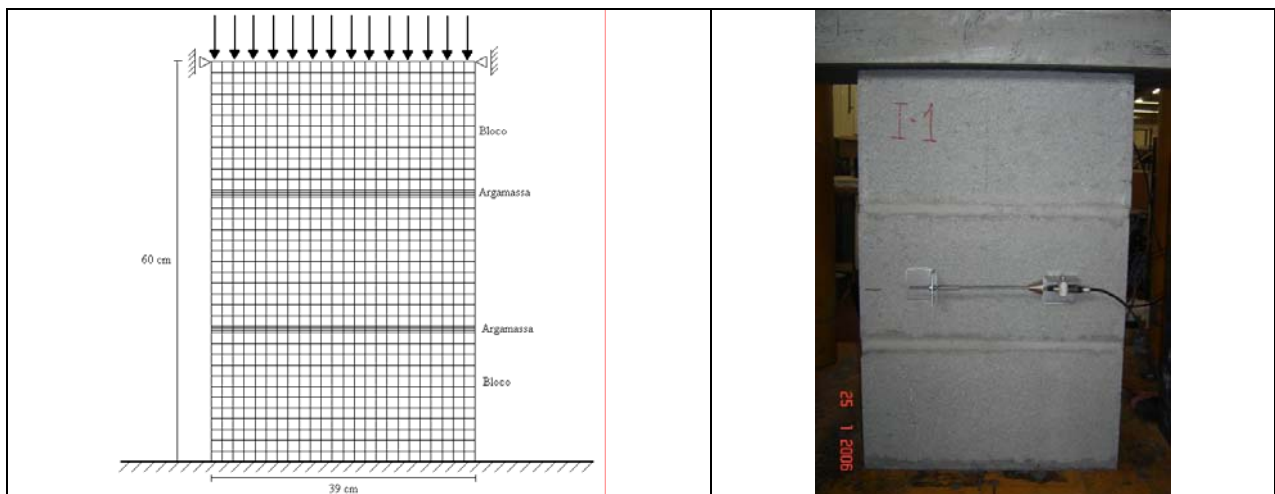


Figura 3. Características geométricas do conjunto bloco-argamassa.

As características mecânicas lineares e não-lineares dos materiais empregados na simulação são apresentadas nos Quadros 2 e 3 (MOHAMAD [4]). Foram simulados apenas dois traços de argamassa, pois não se verificou, nos resultados experimentais, diferenças nas resistências e no modo de ruptura dos prismas construídos com as argamassas de traço II e III. Para tal, foram utilizados os resultados experimentais de dois prismas, designados por I-1, I-2, II-1 e II-2. As propriedades dos materiais foram ajustadas em cada simulação. As propriedades mecânicas das argamassas de traço I e II foram estabelecidas considerando o estado de tensão em que se encontram, ou seja, utilizaram-se como referência, as envoltórias de resistência à compressão triaxial (tabela 3.16), o aumento do módulo de elasticidade da argamassa confinada e a diminuição do coeficiente de Poisson devido ao confinamento lateral.

Quadro 2. Características mecânicas lineares dos materiais.

<i>Componente</i>	$E_c$ (MPa)	$\nu$	$k_n$ (MPa/mm)	$k_s$ (MPa/mm)
Bloco	16000	0,19	-	-
Argamassa - I	18000	0,10	-	-
Argamassa - II	14250	0,10	-	-
Interface	-	-	81	33

Quadro 3. Características mecânicas não-lineares dos materiais.

<i>Componente</i>	$c$ (MPa)	$f_i$ (MPa)	$Sen \varphi$	$Sen \psi$	$Gf_i$ (N/mm)	$Gf_c$ (N/mm)
Bloco	6,5	2,13	0,15	0,0871	0,094	12
Argamassa -I	7,2	2,4	0,15	0,0871	0,094	13
Argamassa- II	5,2	2,0	0,15	0,0871	0,080	11
Interface	-	2,1	-	-	-	-

### 3. RESULTADOS NUMÉRICOS

#### 3.1 Resultados experimentais dos prismas tipo A

O principal objetivo desta simulação é o de avaliar as deformabilidades axiais e laterais dos prismas de blocos, ocasionado pela mudança no traço de argamassa (traço I e II). Os valores do módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson da argamassa especificados no Quadro 2 foram obtidos de forma a considerar o aumento de rigidez axial e lateral proporcionado pelo confinamento.

Verificou-se através do diagrama tensão-deformação, para os prismas I-1 e I-2, que a rigidez axial do modelo numérico foi menor, ou seja, para o mesmo nível de tensão vertical as deformações medidas nos ensaios experimentais foram menores do que os numéricos. Enquanto que as deformações laterais no modelo numérico, até a abertura da primeira trinca, conseguiram representar os ensaios experimentais. As Figuras 4, 5, 6 e 7 mostram o comparativo entre o diagrama tensão-deformação axial e lateral dos prismas obtidos experimentalmente para uma junta de argamassa de traço I e II, comparado com os resultados numéricos obtidos em posições semelhantes ao experimental.

O surgimento de tensões localizadas a meia altura do prisma de traço I induziu trincas no bloco, ocasionando o aumento instantâneo das deformações laterais do prisma, como pode ser visto nas Fig. 4 e 5. Assim, o prisma confeccionado com traço de argamassa I não conseguiu representar as deformações laterais, para níveis de tensões acima de  $0,6.f_c$ , mas obteve um bom acordo quando comparado a tensão última de ruptura.

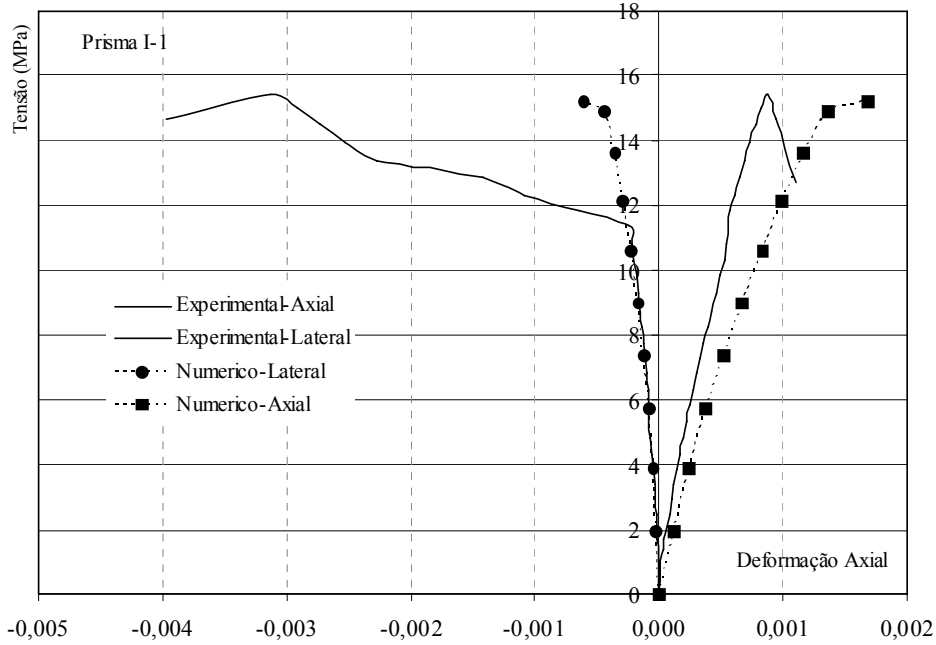


Figura 4. Diagrama tensão-deformação axial e lateral dos prismas de traço I-1.

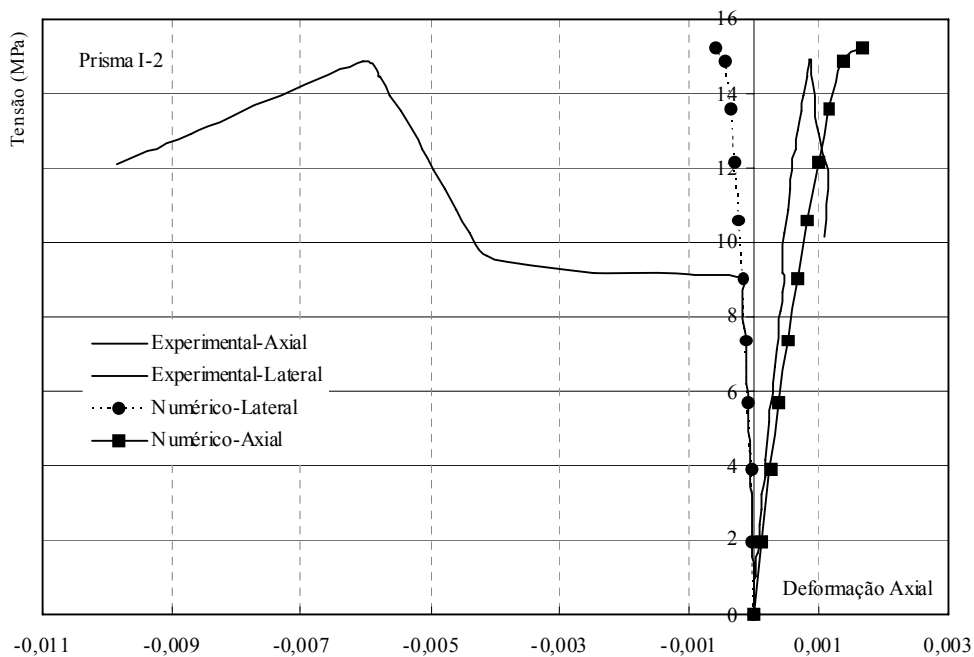


Figura 5. Diagrama tensão-deformação axial e lateral dos prismas de traço I-2.

Nos prismas confeccionados com o traço de argamassa II houve uma melhor aproximação entre os resultados numéricos e experimentais para as deformações axiais, laterais e a tensão última de ruptura. Como o modo de ruptura observado experimentalmente deste tipo de prisma começou com esmagamento da argamassa, não se verificou uma abertura repentina de trinca a meia altura do prisma, como ocorreu nos prismas de traço I. Deste modo, houve um melhor acordo entre as tensões e deformações laterais e axiais até a ruptura. O Quadro 4 apresenta os resultados comparativos entre as deformações axiais últimas obtidas nos ensaios experimentais e nas simulações numéricas. Entende-se por deformação última a perda da capacidade de carga total do componente, e não o surgimento da primeira trinca. Nota-se uma diferença significativa das deformações axiais últimas quando comparados os resultados numéricos e experimentais dos prismas I-1, I-2 e II-1.

Quadro 4. Características mecânicas não-lineares dos materiais.

Prisma	$\varepsilon_{axial\ última}$ (Experimental)	$\varepsilon_{axial\ última}$ (Numérico)
I-1	0,00088	0,00168
I-2	0,00086	0,00168
II-1	0,00124	0,00321
II-2	0,00332	0,00321

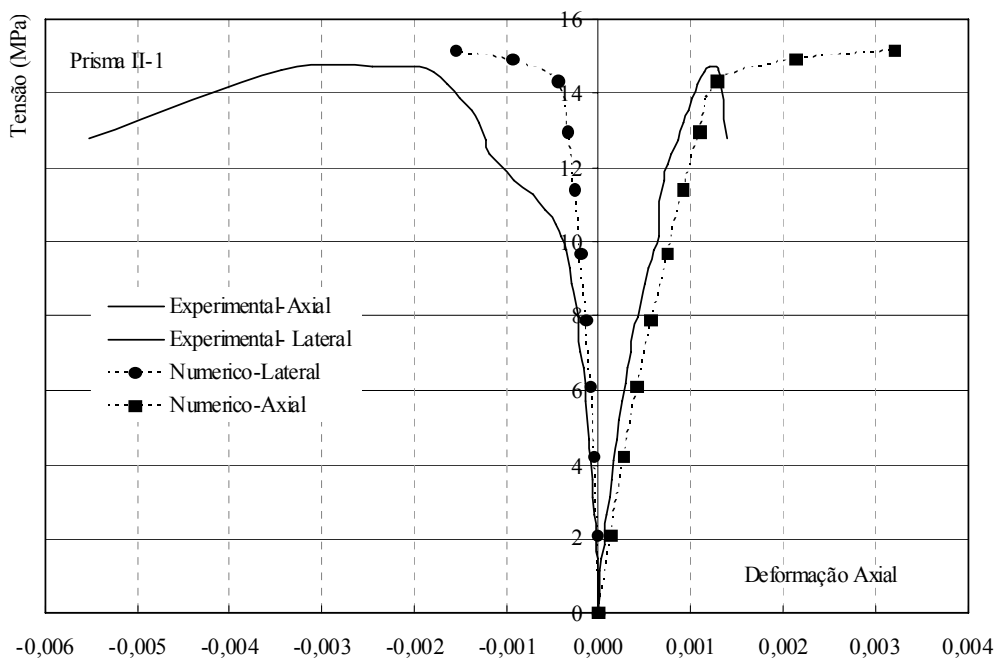


Figura 6. Diagrama tensão-deformação axial e lateral dos prismas de traço II-1.

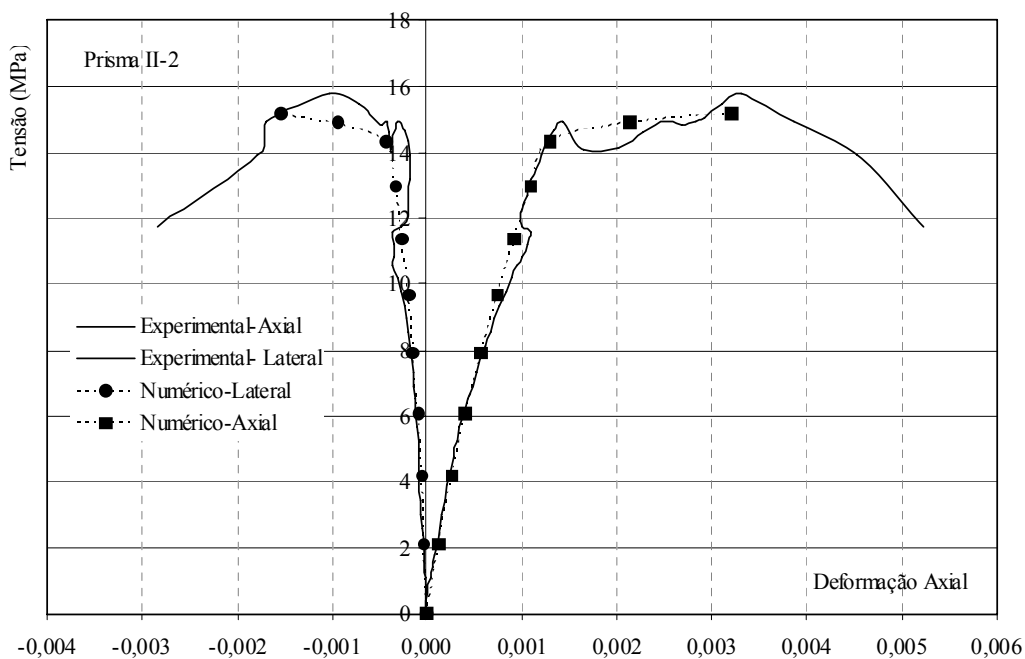


Figura 7. Diagrama tensão-deformação axial e lateral dos prismas de traço II-2.

Foi simulado, para o traço de argamassa II, o efeito que a interface entre os materiais (bloco e a argamassa) produz nos valores de tensão e deformação axial e lateral. Os resultados obtidos nos prismas, desconsiderando a interface, foram semelhantes aos obtidos com interface. Uma explicação para isso seria de que a interface está sendo comprimida, ou seja, eventuais efeitos não-lineares seriam minimizados pela força atuante de compressão. O Quadro 5 apresenta o resultado entre a proporção tensão/resistência pelo coeficiente de Poisson obtido no modelo numérico para a argamassa de traço I e II. Nota-se que nos resultados, houve um aumento do Poisson de 0,19 para 0,36, para a argamassa de assentamento de traço I. Já para a argamassa de traço II a variação do Poisson foi de 0,19 para 0,48.

Quadro 5. Resultados médios experimentais de deformabilidade dos prismas.

$\sigma/f_c$	Traço de argamassa I	Traço de argamassa II
	Coeficiente de Poisson	
0	0	0
0,13	0,19	0,19
0,26	0,19	0,19
0,38	0,21	0,22
0,49	0,24	0,24
0,59	0,26	0,27
0,70	0,27	0,28
0,80	0,29	0,30
0,90	0,30	0,33
0,98	0,32	0,43
1,00	0,36	0,48

Através da análise numérica, obteve-se a relação entre as tensões verticais e horizontais para a argamassa e para o bloco. As tensões na argamassa foram de compressão e no bloco de tração. Para a ruptura dos prismas construído com o traço de argamassa I, os valores das tensões de confinamento na argamassa foram 2,19 MPa e as tensões de tração no bloco atingiram o máximo de 0,12 MPa. O prisma de traço I apresentou um comportamento linear no aumento da tensão de confinamento até a relação  $\sigma/f_c$  ser próximo de 0,9. As Figuras 8 e 9 mostram os resultados numéricos das tensões para um elemento específico na argamassa e bloco.

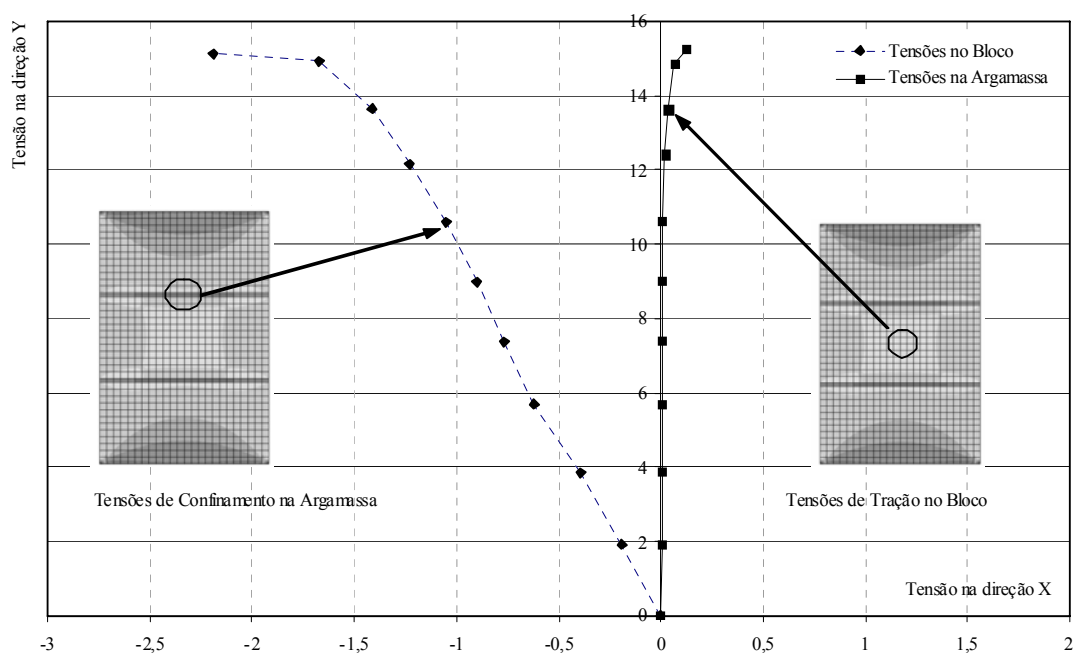


Figura 8. Relação entre tensões do modelo numérico para a argamassa e bloco.

Para a ruptura dos prismas de traço II, os valores das tensões de confinamento na argamassa foram de 5,9 MPa e a tensão máxima de tração no bloco foi de 0,37 MPa. Os prismas de traço II apresentaram uma variação linear no aumento das tensões de confinamento na argamassa até a relação  $\sigma/f_c$  atingir 0,6. Após isso, houve um aumento desproporcional das tensões laterais, demonstrando o forte caráter não-linear da argamassa do conjunto.

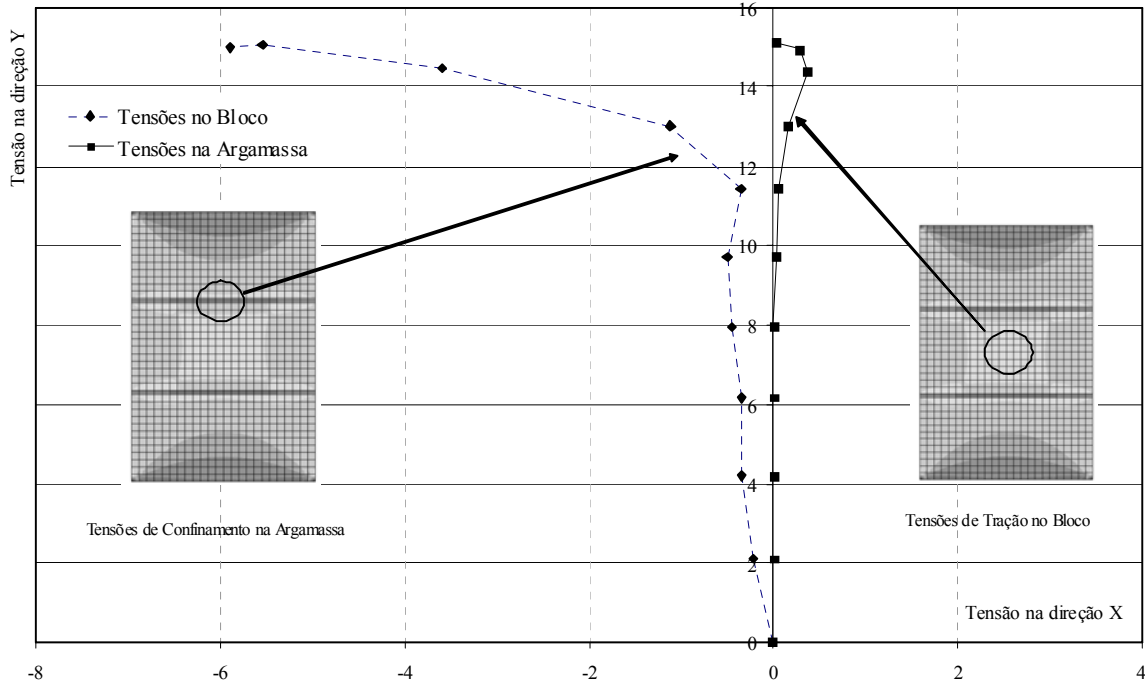


Figura 9. Relação entre tensões do modelo numérico para a argamassa e bloco.

Pelos resultados numéricos, concluiu-se que o nível de tensão de tração atuante no bloco não foi suficiente para gerar tensões de tração que levem o bloco de concreto a ruptura por tração, o que confirma que a representação do colapso é essencialmente fenomenológica, sendo necessários modelos mais avançados para representar adequadamente a forma de ruptura.

Com os resultados numéricos obteve-se, para um elemento escolhido na argamassa de assentamento e no bloco, a relação entre as tensões e as deformações axiais e laterais. Com estes valores calculou-se o módulo de elasticidade secante, até próximo à ruptura do prisma. Determinou-se a relação entre a proporção dos módulos de elasticidades da argamassa em função do bloco ( $E_a/E_b$ ), pela relação entre a tensão atuante e resistência à compressão ( $\sigma/f_c$ ), como mostra a figura 6.17. Os limites inferior e superior da Fig. 10 demarcam uma área de comportamento da proporção de rigidez dos materiais. De acordo com os resultados numéricos dos prismas de traço I verificou-se o desenvolvimento de tensões de tração na argamassa, devido ao módulo de elasticidade da mesma ser superior ao do bloco e, por consequência, gerou tensões de compressão no bloco. Já para o prisma de traço II, o bloco esteve submetido a tensões de tração ao longo de todo o carregamento e a argamassa ficou sob compressão triaxial, devido ao módulo de elasticidade da argamassa não conseguir se igualar ao bloco. Isso pode conduzir a conclusão que os modos de ruptura dos prismas foram diferenciados, ou seja, para o prisma de traço I, houve um aumento progressivo das deformações na direção x, produzindo tensões que levem o material a romper por tração. Já para o prisma construído com o traço II, houve uma maior deformação da junta de assentamento, gerando esmagamentos localizados e levando a ruptura a ser primeiramente por colapso da junta, e o posterior desenvolvimento de tensões de tração no bloco.



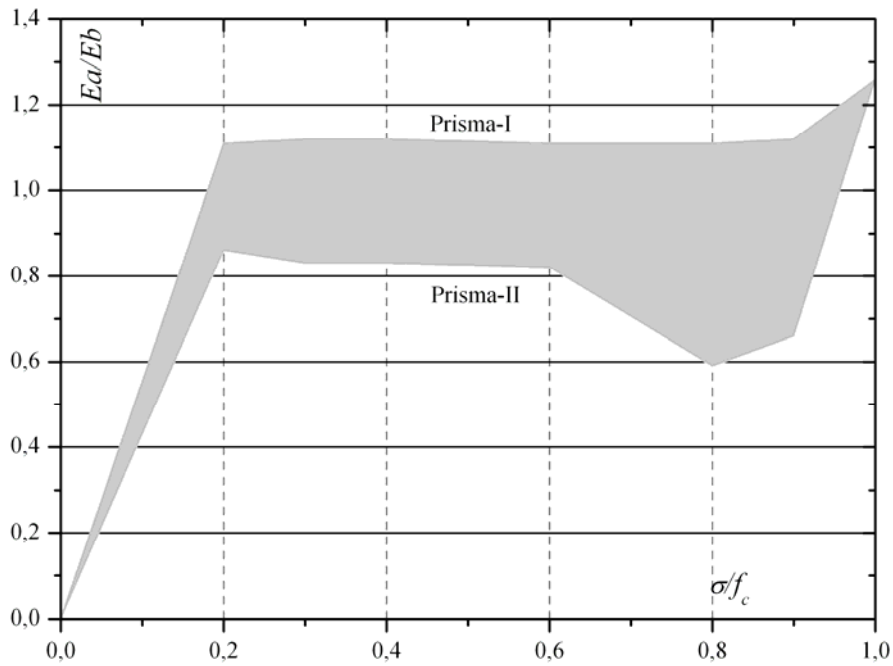


Figura 10. Relação entre  $E_a/E_b$  em função da proporção  $\sigma/f_c$ .

A Figura 11 mostra as deformações na ruptura para a direção x, considerando a existência ou não da interface entre o bloco e a argamassa. Pelos resultados, verificou-se que as deformações máximas ( $\epsilon_x$ ) na direção x dos prismas com interface foram menores do que as deformações dos prismas sem interface. As deformações máximas na direção x aconteciam no bloco intermediário em todos os casos analisados, devido ao efeito de confinamento dos pratos.

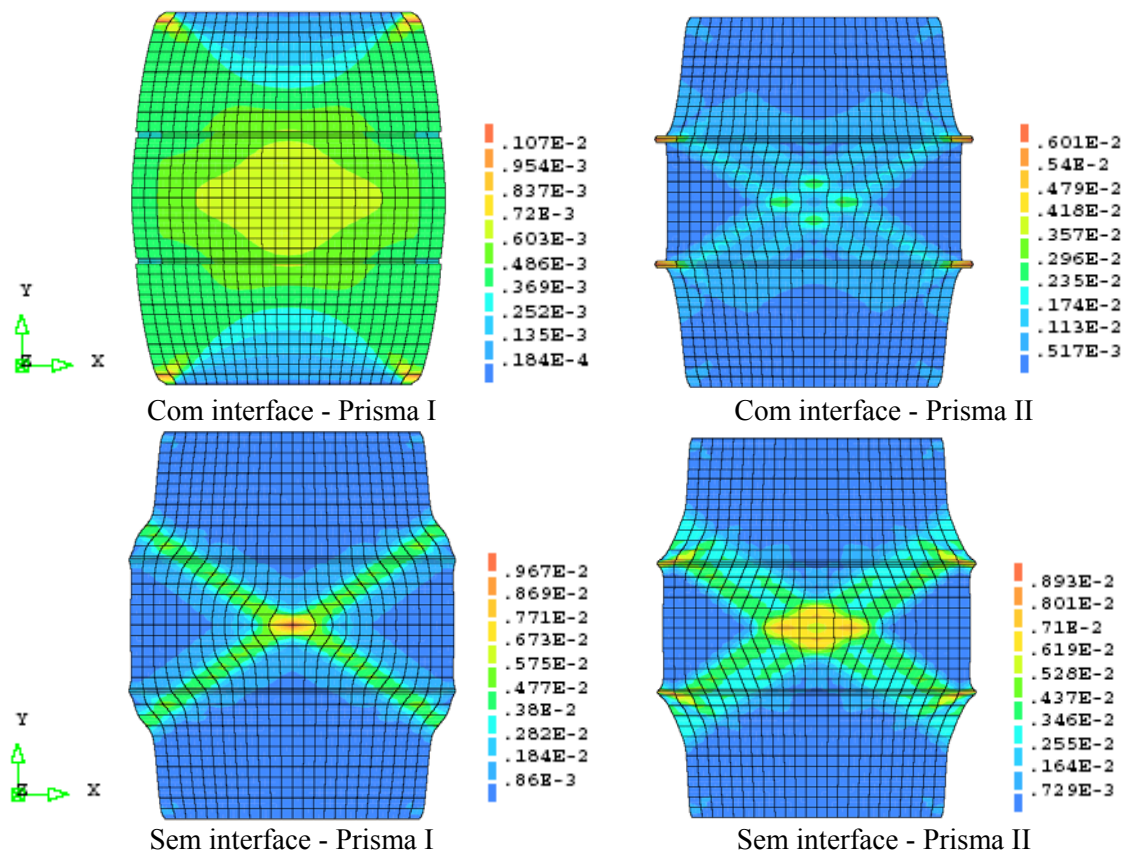


Figura 11. Deformações nos prismas na ruptura ( $\epsilon_x$ ), com e sem interface entre os materiais.

#### **4. CONCLUSÕES**

As principais conclusões obtidas foram:

- O prisma confeccionado com traço de argamassa I não conseguiu representar as deformações laterais, para níveis de tensões acima de  $0,60f_c$ , mas obteve um bom acordo, quando comparado com a tensão última de ruptura;
- O prisma confeccionado com o traço de argamassa II, houve uma melhor aproximação entre os resultados numéricos e experimentais;
- Não foi verificado, nos resultados experimentais, uma abertura repentina de trinca a meia altura do prisma, como ocorreu nos prismas de traço I;
- Para os prismas de três blocos, os efeitos da consideração da interface bloco-argamassa foram insignificantes nos resultados de deformação;
- Nos resultados numéricos, os prismas construídos com argamassas de traço I, apresentaram desenvolvimentos de tensões de tração na argamassa, devido ao aumento da rigidez da mesma e, por conseqüência, geraram tensões de compressão no bloco. Já para o prisma de traço II, o bloco esteve submetido a tensões de tração ao longo do carregamento e a argamassa ficou sob compressão triaxial. Isso pode conduzir a conclusão de que os modos de ruptura dos prismas foram diferenciados, ou seja, para o prisma de traço I houve um aumento progressivo das deformações na direção x, produzindo tensões que induzem tração no material. Já para o prisma construído com o traço II, houve deformações na junta de assentamento e esmagamentos localizados onde ocorreu, primeiramente, o colapso da junta e o posterior desenvolvimento de tensões de tração no bloco.

#### **REFERÊNCIAS**

- [1] MARTINS, H. F.- Resistência ao Cisalhamento de Alvenaria estrutural de Blocos de Concreto. Dissertação de mestrado. Dep. de Eng. Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, 2001.
- [2] ABDOU, L.; SAADA, R. A., MEFTAH, F. AND MEBARKI, A.- On the sliding behavior of the brick-mortar interface: An experimental study. Masonry International, Journal of the British Masonry Society, 17(nº 3):129-134, Winter, 2004.
- [3] GIAMBANCO, G. AND DI GATI L.- A cohesive interface model for the structural mechanics of block masonry. Mechanics Research. Vol. 24(nº 5), 503-512, 1997.
- [4] MOHAMAD, G. – Mecanismo de ruptura de alvenarias de blocos a compressão. UMinho: Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 2007. 312 p. Tese de Doutorado.