

MODELO NUMÉRICO PARA SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE PRISMAS DE ALVENARIA ESTRUTURAL SUBMETIDOS A AÇÕES VERTICAIS

Maicon M. Albertini ^a, Rogério de O. Rodrigues ^b, Jefferson S. Camacho ^b

^a *Universidade Camilo Castelo Branco, Estrada Projetada F1, s/n, Fazenda Santa Rita, Fernandópolis, Brasil, maicon.albertin@unicastelo.br, <http://www.unicastelo.br>*

^b *Núcleo de Ensino e Pesquisa de Alvenaria Estrutural, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Avenida Brasil Centro, 56, Ilha Solteira, nepae@dec.feis.unesp.br, <http://www.feis.unesp.br>*

Palavras Chave: alvenaria estrutural, modelagem numérica, comportamento não-linear, prismas.

Resumo. Atualmente o Engenheiro de Estruturas necessita incorporar a modelagem numérica como uma ferramenta de trabalho usual. Embora a elaboração de projetos de alvenaria estrutural ainda tenha uma abordagem relativamente simples, ferramentas computacionais que buscam traduzir o comportamento real deste método construtivo devem ser incorporadas como auxílio no desenvolvimento de projetos futuros.

Fundamentado neste fato, este trabalho tem por objetivo principal a validação de um modelo numérico capaz de simular o comportamento de prismas de alvenaria estrutural, através da análise comparativa entre o comportamento experimental e numérico de prismas submetidos a ações verticais. Para isto, a discretização estrutural é feita por meio do Método dos Elementos Finitos, utilizando o elemento finito prismático regular parabólico, sendo que a aplicação de força é feita incrementalmente. Para a consideração da não-linearidade dos materiais é utilizado o Critério de Mohr-Coulomb, com associação a um redutor de rigidez.

1 INTRODUÇÃO

Conforme citado por [LOGULLO\(2006\)](#), a alvenaria estrutural apresenta grande potencial de crescimento na sua utilização por propiciar maior racionalidade na execução da obra, redução de consumo e desperdício de materiais, aumentando a eficiência da mão-de-obra, além de apresentar nítidas vantagens quanto à diminuição de espessuras de revestimento a serem utilizadas.

A compatibilização de todos os elementos envolvidos na alvenaria, tais como bloco, argamassa, graute e armadura, é primordial e indispensável para se maximizar e aperfeiçoar o seu desempenho, com o aproveitamento de todo o potencial do sistema, MENDES(1998).

Por outro lado, o engenheiro sempre tem por meta representar os fenômenos físicos através da modelagem numérica. Porém, muitas vezes, estes fenômenos estão além do alcance de abstrações matemáticas. É nesse momento que se recorre à natureza para subsidiar as informações necessárias para se entender o comportamento de um sistema, através da modelagem física, [ANDOLFATO\(2002\)](#).

Aliando a representação de um fenômeno físico com a modelagem numérica, o presente trabalho vem a contribuir com uma análise experimental e numérica de prismas de alvenaria estrutural, validando um modelo numérico capaz de simular o comportamento força versus deslocamento e força de ruptura, com a variação de algumas propriedades físicas dos materiais que o constituem.

2 MODELO FÍSICO NÃO-LINEAR

A Mecânica dos Sólidos apresenta algumas relações válidas apenas quando considerado que os materiais estruturais apresentam um comportamento elástico linear.

Contudo, tanto o concreto quanto a argamassa apresentam, para determinados níveis de solitação, um comportamento não-linear, caracterizado pela relação não-linear entre tensão e deformação. Esse tipo de comportamento é manifestado por meio da capacidade de acomodar grandes deformações em relação ao acréscimo de uma pequena parcela de carregamento, e também do surgimento de deformações irreversíveis ou plásticas.

Dessa forma para a análise da deformação e da ruptura de prismas de alvenaria estrutural é conveniente a utilização de modelos que permitam representar a diminuição da rigidez, bem como a consideração de deformações irreversíveis.

O comportamento do concreto pode ser modelado por meio da simulação matemática das relações entre tensão e deformação, a partir de uma série de experimentos simples, em que se procura definir a forma da superfície de ruptura do concreto, desconsiderando-se os mecanismos microscópicos intrínsecos do material.

Para este trabalho foi utilizado o critério de Mohr-Coulomb, que é uma generalização da equação de ruptura de Coulomb definida por:

$$\tau = c - \sigma \tan \phi \quad (1)$$

onde:

τ : tensão de cisalhamento;

σ : tensão normal;

C : coesão;

ϕ : ângulo de atrito interno do material.

Esta equação indica que ocorrerá ruptura do material quando a tensão de cisalhamento, num determinado plano, vence a resistência ao deslizamento originada de duas parcelas: uma

proveniente da referida coesão do material e outra de uma fração da tensão normal atuante nesse mesmo plano.

Graficamente, a equação (1) representa uma reta tangente ao maior círculo de tensões principais, como mostrado na [Figura 1](#). Quando o par de tensões $(\tau, |\sigma|)$ atuantes em um ponto qualquer do material situarem-se sobre tal reta, ocorrerá a ruptura do material.

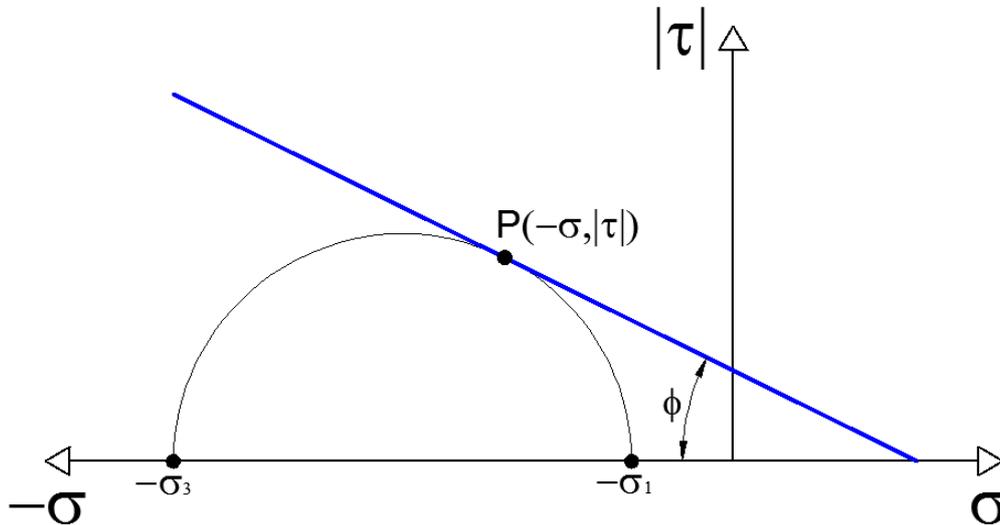


Figura 1 - Critério de Mohr-Coulomb

Por meio da [Figura 1](#) e para $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, a equação (1) pode ser reescrita em função das tensões principais, conforme apresentado na equação (2), utilizando as relações de σ_1 e σ_3 onde as tensões principais ficam definidas em função apenas dos invariantes (I_1, J_2, θ) , obtém-se o critério em função de (I_1, J_2, θ) , como segue.

$$\frac{\sigma_1 (1 + \operatorname{sen} \phi)}{2c \cdot \cos \phi} - \frac{\sigma_3 \cdot (1 - \operatorname{sen} \phi)}{2c \cdot \cos \phi} = 1$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{Bmatrix} = \frac{I_1}{3} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} + \frac{2\sqrt{3}}{3} \sqrt{J_2} \begin{Bmatrix} \cos \theta \\ \cos(\theta - 120^\circ) \\ \cos(\theta + 120^\circ) \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$\frac{I_1}{3} \operatorname{sen} \phi + \sqrt{J_2} \operatorname{sen}(\theta + 60^\circ) + \frac{\sqrt{3}}{3} \sqrt{J_2} \operatorname{sen} \phi \cdot \cos(\theta + 60^\circ) - c \cdot \cos \phi = 0$$

$$f(I_1, J_2, \theta) = 0$$

No espaço das tensões principais, o critério de Mohr-Coulomb é representado por uma pirâmide hexagonal irregular, conforme ilustra a [Figura 2](#), cujo contorno define a superfície de ruptura do material.

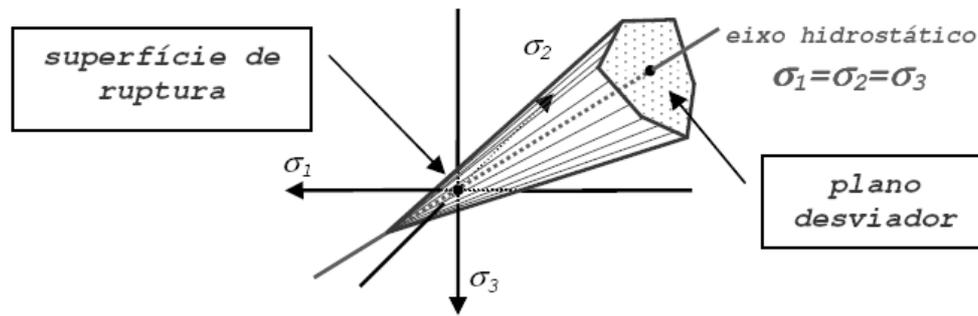


Figura 2 - Representação geométrica da superfície de ruptura do critério de Mohr-Coulomb no espaço das tensões principais

Na aplicação do critério de Mohr-Coulomb para o concreto, os parâmetros c e ϕ podem ser definidos em função da resistência à tração f_t e da resistência à compressão f_c do material, obtidas por meio de um ensaio de tração simples e de compressão simples, respectivamente.

Dessa forma, para ensaio de compressão simples os valores das tensões principais são dados por $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$ e $\sigma_3 = f_c$ e para ensaio de tração simples por $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ e $\sigma_1 = f_t$.

Substituindo-se tais valores na equação (2) e resolvendo-se esse sistema de equações, chega-se às equações apresentadas em (3) que definem, respectivamente, o ângulo de atrito interno e a coesão em função das resistências f_t e f_c .

$$\phi = \text{sen}^{-1} \left(\frac{f_c + f_t}{f_c - f_t} \right) \quad (3)$$

$$c = -\frac{f_c (1 - \text{sen}\phi)}{2 \cos \phi} = +\frac{f_t (1 + \text{sen}\phi)}{2 \cos \phi}$$

Como a fissuração é a causa mais freqüente da ruptura no comportamento da alvenaria, segundo [PELETEIRO\(2001\)](#), ela é produzida por deformações excessivas induzidas por esforços à tração muito elevados. A deformação pode ser causada por forças aplicadas ou por restrição à variação volumétrica do material. Dessa forma, aplica-se o Método dos Elementos Finitos para detecção da fissuração da alvenaria, como um modelo numérico apropriado para discretização dos materiais.

3 ANÁLISE EXPERIMENTAL

Nessa etapa realizaram-se ensaios para determinação das características físicas e resistência à compressão, com leitura das deformações, resultando curvas tensão versus deformação para cada material que constitui o prisma de alvenaria.

As atividades experimentais foram desenvolvidas no laboratório do Núcleo de Ensino e Pesquisa da Alvenaria Estrutural – NEPAE, da Unesp - Faculdade de Engenharia Civil, Campus de Ilha Solteira.

Como se sabe, esses materiais tem característica isotrópicas, mas, para determinados níveis de tensão apresentam um comportamento não-linear, por isso deve ser levado em consideração a alteração do módulo de elasticidade em função da variação das tensões.

Para a determinação da resistência à compressão foram realizados ensaios de compressão axial em blocos, corpos-de-prova de argamassa e graute, conforme ilustra a [Figura 3](#).

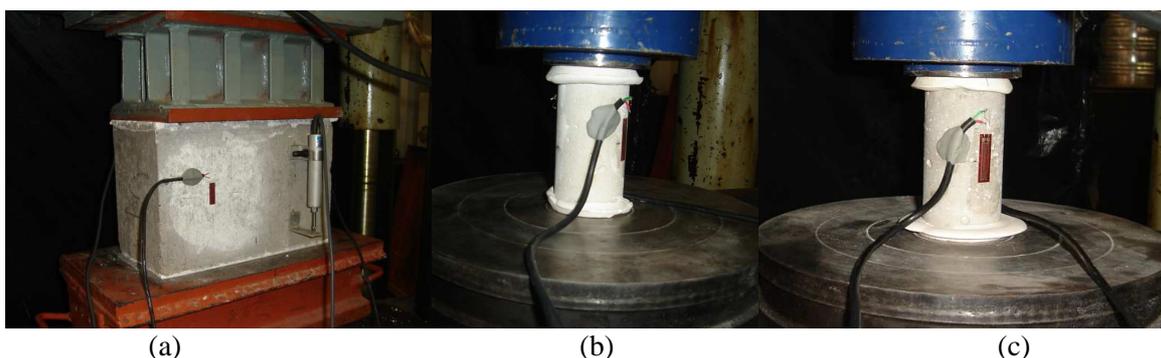


Figura 3 – (a) ensaio de compressão em bloco de concreto (b) ensaio de compressão em corpo-de-prova de argamassa (c) ensaio de compressão em corpo-de-prova de graute

Para a determinação da resistência à tração foram realizados ensaios de tração direta em elementos extraídos da parede dos blocos, [Figura 4](#) (a), e ensaios de compressão diametral, Método Brasileiro, conforme pode ser visto na [Figura 4](#) (b) e [Figura 4](#) (c).

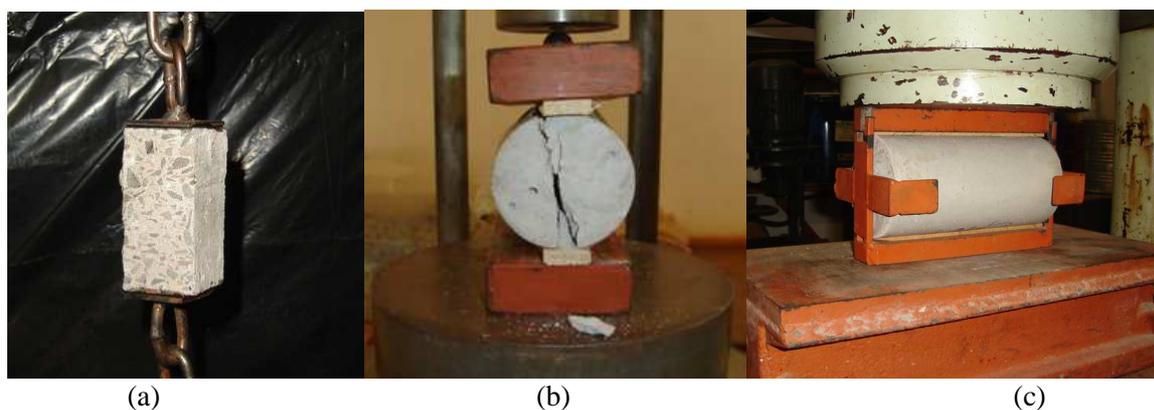


Figura 4 – (a) ensaio de tração em bloco de concreto (b) ensaio de tração em corpo-de-prova de argamassa (c) ensaio de tração em corpo-de-prova de graute

Foram realizados ensaios com prismas de alvenaria de dois blocos, [Figura 5](#), de onde se obteve o comportamento de cada material atuando em conjunto, sendo assim possível se obter a relação tensão versus deformação que melhor se adapta ao trabalho conjunto dos materiais constituintes.



Figura 5 – Prisma de alvenaria instrumentado em ensaio de compressão axial

Dos ensaios realizados determinou-se o comportamento não-linear entre tensão e deformação, sendo assim possível avaliar o módulo de elasticidade do material para qualquer nível de tensão, tendo como parâmetro variacional a resistência à compressão do mesmo. O módulo de elasticidade instantâneo de cada material constituinte, E_{INST} , é apresentado na [Tabela 1](#), bem como as parcelas referentes ao módulo de elasticidade inicial (E_0) e o redutor de rigidez (R).

Material	Módulo de Elasticidade		Redutor
	Instantâneo	Inicial	
<i>Bloco</i>	$E_{INST} = 473,6 \cdot f_c - 3,00 \cdot 10^5 \cdot f_c \cdot \varepsilon$	$E_0 = 473,6 \cdot f_c$	$R = -3,00 \cdot 10^5 \cdot f_c \cdot \varepsilon$
<i>Argamassa</i>	$E_{INST} = 1022 \cdot f_c - 4,31 \cdot 10^5 \cdot f_c \cdot \varepsilon$	$E_0 = 1022 \cdot f_c$	$R = -4,31 \cdot 10^5 \cdot f_c \cdot \varepsilon$
<i>Graute</i>	$E_{INST} = 510,6 \cdot f_c - 1,30 \cdot 10^5 \cdot f_c \cdot \varepsilon$	$E_0 = 510,6 \cdot f_c$	$R = -1,30 \cdot 10^5 \cdot f_c \cdot \varepsilon$

Tabela 1 – Módulo de elasticidade instantâneo dos materiais constituintes

4 ANÁLISE NUMÉRICA

Na formulação do Método dos Elementos Finitos, MEF, a equação básica de equilíbrio estático ($K \cdot D = F$) tem por hipótese o fato de o sistema ser considerado linear. Assim, para o equacionamento da matriz de rigidez do elemento finito prismático regular parabólico com 20 nós, [Figura 6](#), tomou-se por premissa esse fato ser verdadeiro, considerando-se o comportamento linear do material.

Para contornar esse problema, na simulação numérica será utilizado o processo incremental de forças, sendo que, após cada incremento, o módulo de elasticidade será corrigido em função da menor deformação principal de cada elemento, função esta que depende dos respectivos deslocamentos nodais.

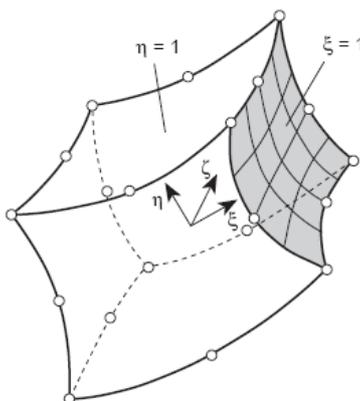


Figura 6 - Elemento finito prismático regular parabólico com 20 nós
(Fonte: [ZIENKIEWICZ, 2000](#))

4.1 Discretização do prisma

Para interpretação do programa computacional desenvolvido neste trabalho, que realizará a análise não-linear física de prismas de alvenaria baseado no MEF, procurou-se discretizar o prisma de modo que algumas condições fossem atendidas.

Apresenta-se na [Figura 7](#) a interface do sistema que permite a entrada paramétrica de dados referentes ao prisma, onde é possível uma variação de suas dimensões e das propriedades materiais constituintes.

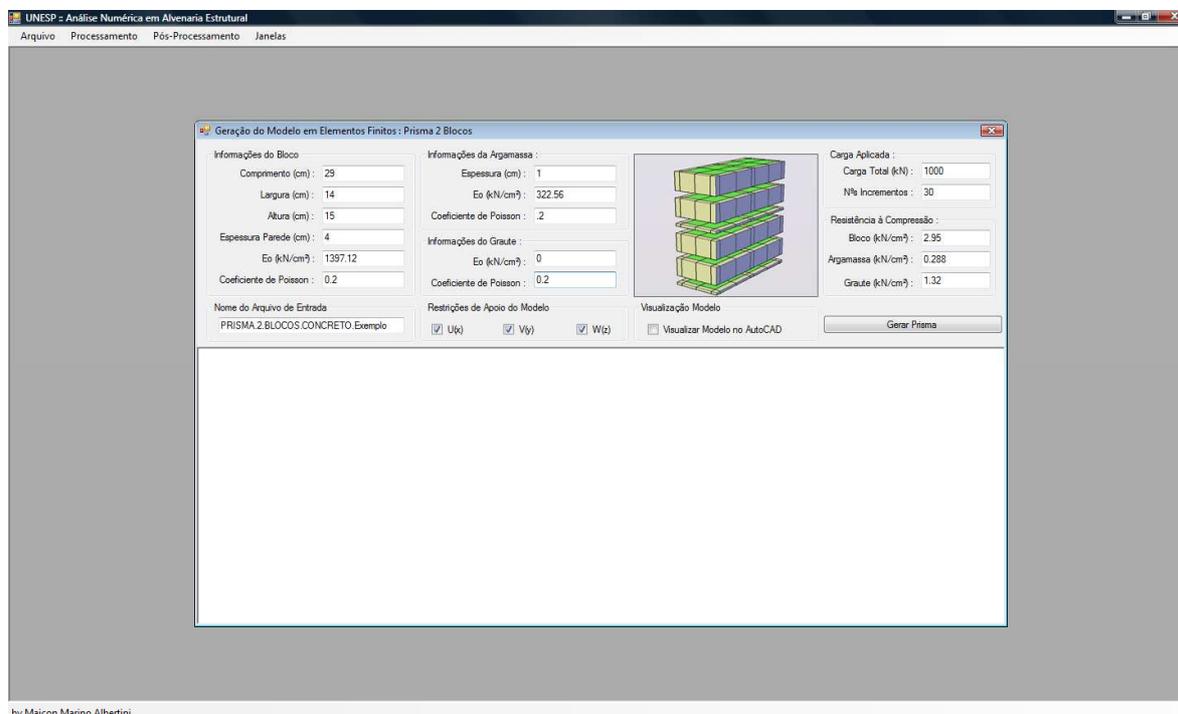


Figura 7 – Interface para entrada dos dados

O sistema após a entrada inicial de dados passa a ser responsável pela elaboração do arquivo com a discretização do modelo embasada nos dados fornecidos.

A condição inicial a ser atendida se refere aos parâmetros geométricos, sendo que o modelo deve seguir os mesmos padrões de medidas de prismas reais e, especificamente, dos prismas que foram ensaiados. Com relação à discretização estrutural, procurou-se subdividir o prisma em elementos cuja posição de alguns nós ficassem em lugares idênticos aos que foram instalados os equipamentos de leitura dos ensaios experimentais, para posterior avaliação da relação força x deslocamento.

A [Figura 8](#) apresenta o prisma em uma visão tridimensional, tal como a sua subdivisão em elementos.

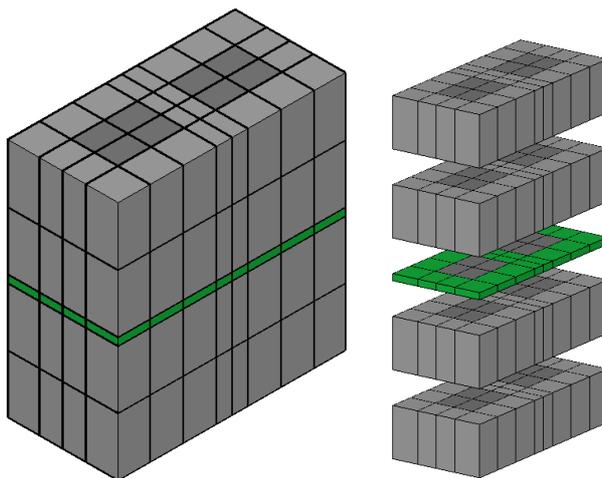


Figura 8 – Prisma subdividido em elementos

O modelo analisado seguiu o esquema apresentado na [Figura 9](#), com aplicação de força nos nós superiores e restrição a translação nos nós inferiores.

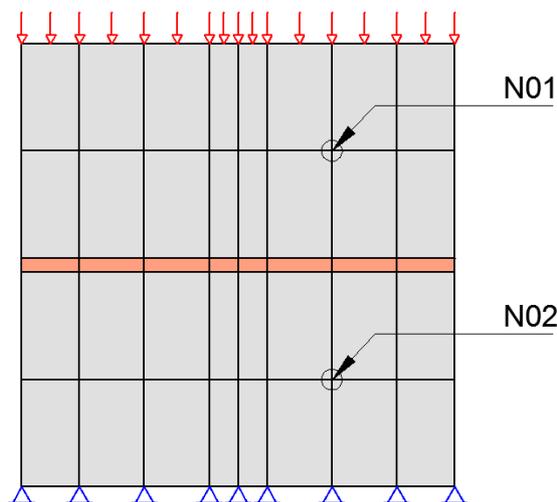


Figura 9 – Modelo discreto com apresentação das condições de contorno, forças aplicadas e nós analisados

4.2 Fluxograma geral de cálculo

O processo incremental de carregamento aqui adotado consiste na subdivisão do carregamento em um número conhecido de incrementos, aplicados de forma acumulativa. À medida que a força vai sendo incrementada, efetua-se o cálculo e o armazenamento dos deslocamentos, com conseqüente cálculo das deformações e das tensões em cada elemento,

para posterior aplicação do critério de ruptura e correção do módulo de elasticidade instantâneo do material.

Caso a ruptura do elemento venha a ser verificada, é feita uma redução total do módulo de elasticidade, de forma individual no elemento verificado, para posterior armazenamento dos deslocamentos nodais.

O esquema geral de cálculo está apresentado na [Figura 10](#).

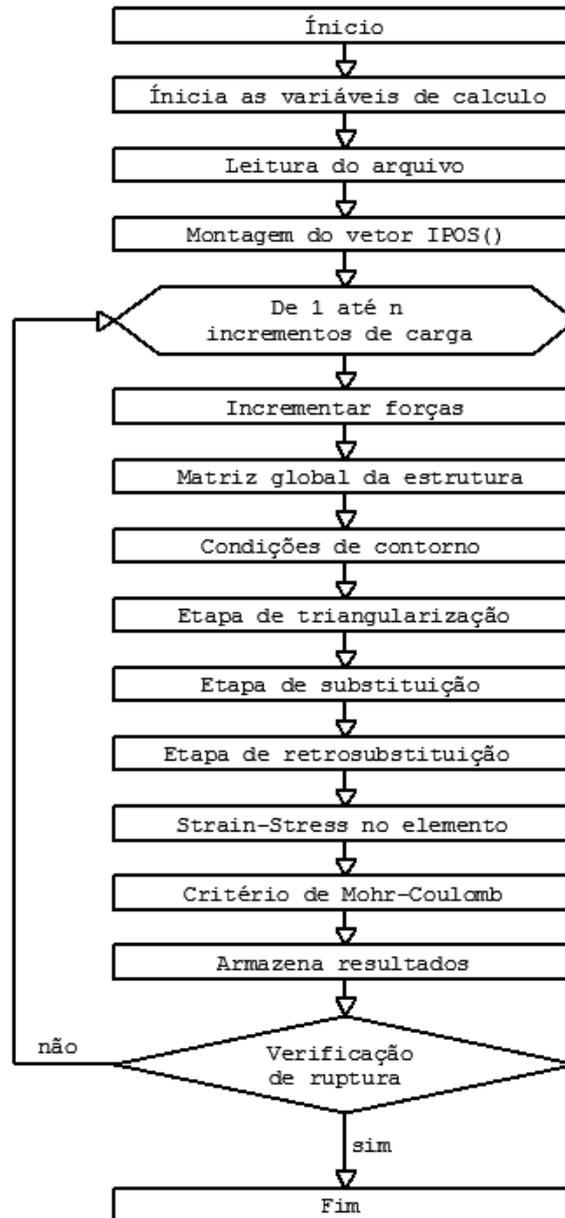


Figura 10 – Fluxograma geral de cálculo

O sistema apresenta em interface de fácil manuseio a curva força versus deslocamento para qualquer diferencial entre pontos e em qualquer direção, [Figura 11](#), o que permite uma vasta gama de informações sobre o comportamento numérico do prisma de alvenaria estrutural.

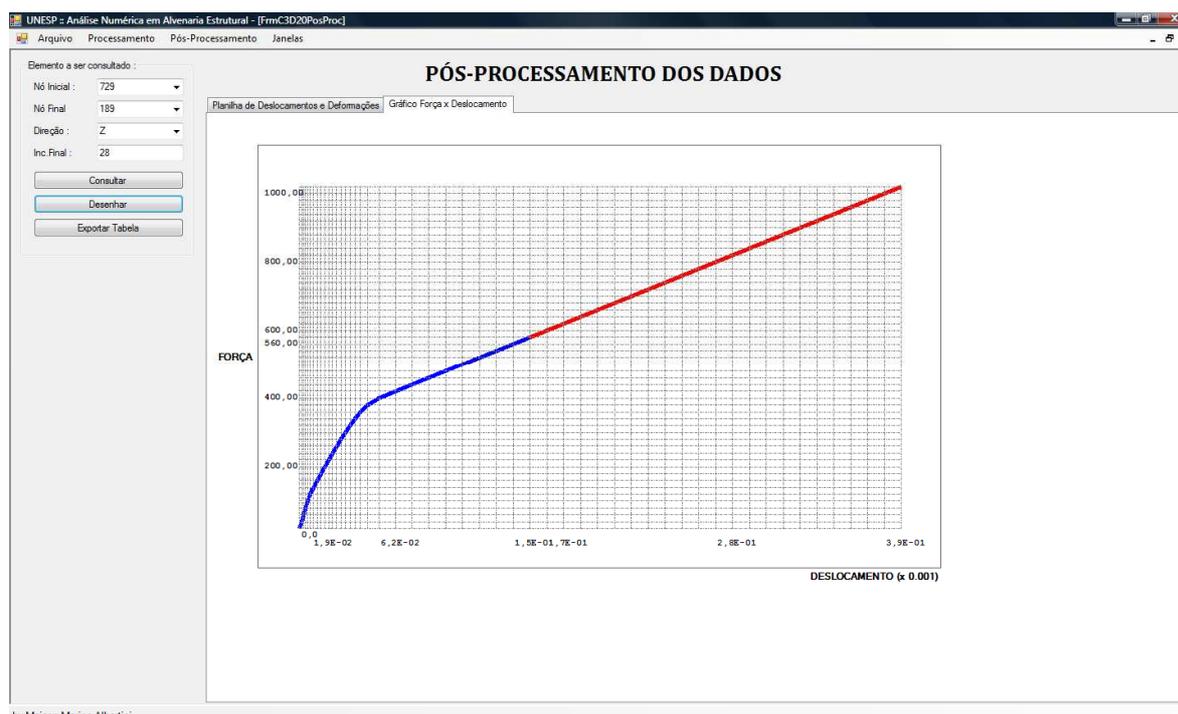


Figura 11 – Fluxograma geral de cálculo

Apresenta ainda um diferencial de cores onde a cor azul indica que nenhum elemento até o presente incremento de força sofreu ruptura, e a região vermelha mostra a continuidade do processo até que seja alcançado o final da aplicação do carregamento estabelecido no início, na etapa de geração do modelo discreto.

5 RESULTADOS

Neste item são apresentadas comparações entre os resultados experimentais e os resultados das simulações numéricas, obtidas computacionalmente, na tentativa de validar o modelo capaz de fornecer um comportamento semelhante aos obtidos experimentalmente, utilizando o critério de resistência de Mohr-Coulomb na verificação da ruptura e os redutores dos módulos de elasticidade dos materiais.

Para solução numérica foi utilizado um programa desenvolvido em Visual Basic®, onde foram utilizadas as resistências obtidas experimentalmente nos ensaios, seguida da discretização já apresentada.

5.1 Exemplo I: prisma vazio assentado com argamassa menos resistente

Neste exemplo será feita a comparação entre os resultados dos ensaios dos prismas vazios, que foram feitos com a utilização da argamassa menos resistente, com os resultados numéricos.

Os elementos que constituem os septos na discretização para análise computacional receberam como atribuição o módulo de elasticidade inicial nulo, simulando assim a condição de não existência dos elementos finitos.

Para efeito de aplicação das forças, receberam carregamento somente os elementos que apresentassem rigidez diferente de zero, assim como as condições de apoio também foram atribuídas aos elementos com rigidez não nula.

As características físicas dos materiais utilizados são:

- Bloco:
 $f_c = 3,135 \text{ kN/cm}^2$
 $f_t = 0,267 \text{ kN/cm}^2$
 $E_0 = 1484,77 \text{ kN/cm}^2$
- Argamassa:
 $f_c = 0,288 \text{ kN/cm}^2$
 $f_t = 0,0465 \text{ kN/cm}^2$
 $E_0 = 147,06 \text{ kN/cm}^2$

A [Tabela 2](#) mostra os resultados finais da variação de deslocamentos na direção z entre os nós N01 e N02, apresentados na [Figura 9](#).

A ruptura dos primeiros elementos ocorreu no incremento de força número 59 e que corresponde a uma força de 590 kN, caracterizando esta como a resistência última e final do processamento numérico.

INC.	FORÇA (kN)	DESLOC. (cm)	INC.	FORÇA (kN)	DESLOC. (cm)	INC.	FORÇA (kN)	DESLOC. (cm)
1	10	0,00054	23	230	0,02789	45	450	0,11533
2	20	0,00109	24	240	0,02963	46	460	0,12186
3	30	0,00166	25	250	0,03140	47	470	0,12839
4	40	0,00226	26	260	0,03320	48	480	0,13492
5	50	0,00288	27	270	0,03503	49	490	0,14145
6	60	0,00353	28	280	0,03691	50	500	0,14799
7	70	0,00422	29	290	0,03883	51	510	0,15452
8	80	0,00497	30	300	0,04082	52	520	0,16105
9	90	0,00580	31	310	0,04289	53	530	0,16758
10	100	0,00680	32	320	0,04508	54	540	0,17412
11	110	0,00836	33	330	0,04740	55	550	0,18065
12	120	0,00992	34	340	0,04997	56	560	0,18718
13	130	0,01149	35	350	0,05312	57	570	0,19371
14	140	0,01307	36	360	0,05796	58	580	0,20024
15	150	0,01466	37	370	0,06364	59	590	0,20678
16	160	0,01626	38	380	0,06997			
17	170	0,01787	39	390	0,07633			
18	180	0,01950	40	400	0,08276			
19	190	0,02114	41	410	0,08924			
20	200	0,02280	42	420	0,09573			
21	210	0,02448	43	430	0,10226			
22	220	0,02617	44	440	0,10879			

Tabela 2 – Variação de deslocamentos entre os nós N01 e N02

A [Figura 12](#) apresenta os primeiros elementos rompidos durante a análise numérica do Exemplo I, destacados em vermelho.

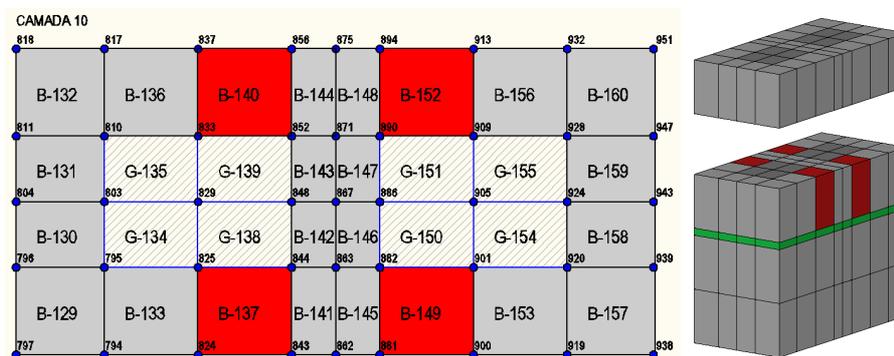


Figura 12 – Primeiros elementos a sofrerem ruptura no Exemplo I

A [Figura 13](#) apresenta os resultados força versus deslocamento para os nós cujos deslocamentos estão referenciados na [Tabela 2](#), comparados com os resultados obtidos experimentalmente para o prisma com as mesmas características.

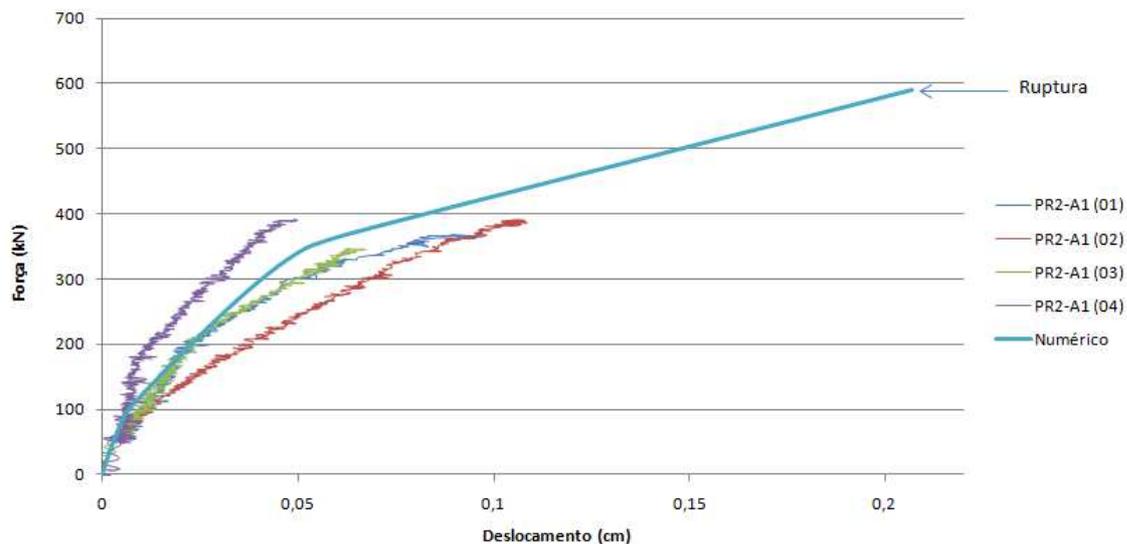


Figura 13 – Gráfico Força versus Deslocamento: prisma assentado com argamassa menos resistente

No gráfico apresentado na [Figura 13](#), apresenta-se a nuvem de dados obtida experimentalmente, nuvem esta limitada pela retirada dos equipamentos de aferição com uma força segura, antes da ruptura do prisma.

5.2 Exemplo II: prisma vazio assentado com argamassa mais resistente

Neste exemplo será feita a comparação entre os resultados dos ensaios dos prismas vazios, que foram feitos com a utilização da argamassa mais resistente, com os resultados numéricos.

A discretização, tais como as vinculações deste modelo, segue os mesmos parâmetros apresentados para o exemplo anterior, sofrendo apenas variações as características físicas dos materiais conforme segue.

As características físicas dos materiais utilizados são:

- Bloco:
 - $f_c = 3,135 \text{ kN/cm}^2$
 - $f_t = 0,267 \text{ kN/cm}^2$
 - $E_0 = 1484,77 \text{ kN/cm}^2$
- Argamassa:
 - $f_c = 0,612 \text{ kN/cm}^2$
 - $f_t = 0,1065 \text{ kN/cm}^2$
 - $E_0 = 312,49 \text{ kN/cm}^2$

A [Tabela 3](#) mostra os resultados finais da variação de deslocamentos na direção z entre os nós N01 e N02, apresentados na [Figura 14](#).

A ruptura dos primeiros elementos ocorreu no incremento de força número 53 e que corresponde a uma força de 530 kN, caracterizando esta como resistência última e final do processamento numérico.

INC.	FORÇA (kN)	DESLOC. (cm)	INC.	FORÇA (kN)	DESLOC. (cm)	INC.	FORÇA (kN)	DESLOC. (cm)
1	10	0,00043	19	190	0,01021	37	370	0,06415
2	20	0,00086	20	200	0,01104	38	380	0,07052
3	30	0,00131	21	210	0,01204	39	390	0,07689
4	40	0,00176	22	220	0,01402	40	400	0,08328
5	50	0,00222	23	230	0,01605	41	410	0,08976
6	60	0,00269	24	240	0,01812	42	420	0,09630
7	70	0,00317	25	250	0,02023	43	430	0,10287
8	80	0,00366	26	260	0,02241	44	440	0,10945
9	90	0,00416	27	270	0,02466	45	450	0,11602
10	100	0,00468	28	280	0,02698	46	460	0,12260
11	110	0,00521	29	290	0,02942	47	470	0,12917
12	120	0,00575	30	300	0,03199	48	480	0,13573
13	130	0,00631	31	310	0,03475	49	490	0,14230
14	140	0,00689	32	320	0,03781	50	500	0,14886
15	150	0,00749	33	330	0,04144	51	510	0,15542
16	160	0,00811	34	340	0,04597	52	520	0,16199
17	170	0,00877	35	350	0,05180	53	530	0,16855
18	180	0,00947	36	360	0,05779			

Tabela 3 – Variação de deslocamentos entre os nós N01 e N02

A [Figura 14](#) apresenta os primeiros elementos rompidos durante a análise numérica do Exemplo II, destacados em vermelho.

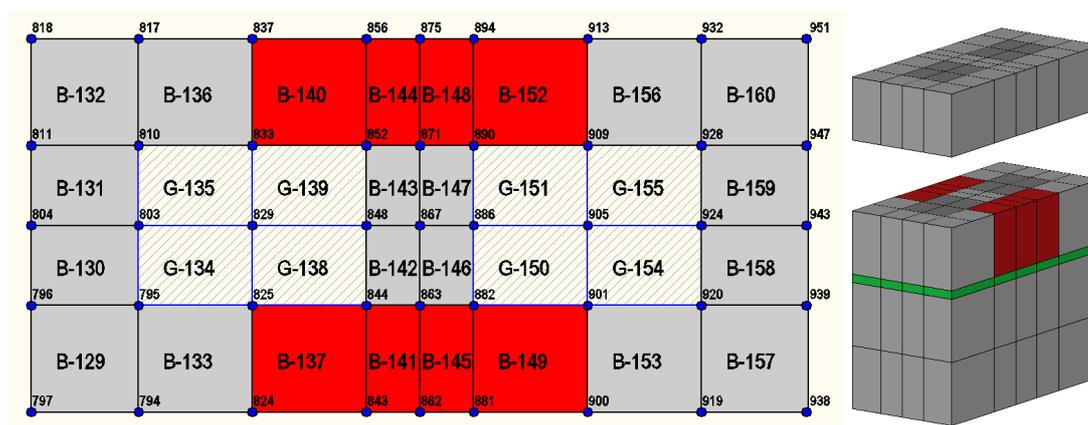


Figura 14 - Primeiros elementos a sofrerem ruptura no Exemplo II

A [Figura 15](#) apresenta os resultados força versus deslocamento para os nós cujos deslocamentos estão tabelados anteriormente, comparados com os resultados obtidos experimentalmente para o prisma com as mesmas características.

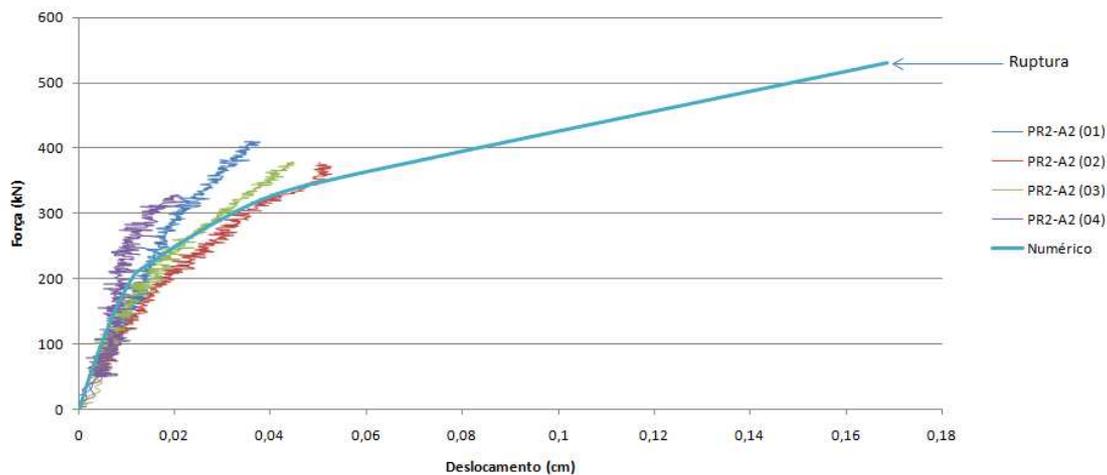


Figura 15 – Gráfico Força versus Deslocamento: prisma assentado com argamassa menos resistente

Destaca-se que no gráfico apresentado na [Figura 15](#), apresenta-se a nuvem de dados obtida experimentalmente, nuvem esta limitada pela retirada dos equipamentos de aferição com uma força segura, antes da ruptura do prisma.

6 CONCLUSÕES

Analisando-se os resultados das curvas força versus deslocamento do modelo numérico, sobrepostas aos dados experimentais, pode-se avaliar uma boa compatibilidade. Em todos os gráficos de comparação pode-se observar a sobreposição dos dados numéricos com os dados experimentais, traduzindo o comportamento força-deslocamento oferecido pelo modelo numérico proposto similar aos experimentais.

Com relação à ruptura dos elementos que constituíram o prisma, o Critério de Mohr-Coulomb foi capaz de prever os elementos que romperam inicialmente, sendo estes os mesmos elementos verificados experimentalmente.

Nos ensaios dos prismas, tanto no que foi feito com a argamassa mais fraca, quanto no que foi feito com argamassa mais forte, foi constatada a fissuração excessiva no bloco superior, instantes antes da ruptura, quando que numericamente os primeiros elementos a romperem foram justamente estes que tiveram tais fissurações durante a experimentação.

Com relação à força numérica de ruptura, para o prisma do Exemplo I, experimentalmente foi obtida uma força média de ruptura de 634,0 kN, enquanto que numericamente a força foi de 590 kN; já para o prisma do Exemplo II, a força média experimental foi de 519,4 kN, e numericamente esta teve magnitude de 530 kN.

Em relação aos resultados apresentados anteriormente pode-se observar a resistência maior do conjunto onde foi utilizada uma argamassa de menor resistência, prisma do Exemplo I. Esse fato pode ter sido consequência da grande deformabilidade da argamassa menos resistente, fazendo com que a espessura da junta ficasse muito reduzida, possibilitando a transferência das forças de forma quase direta entre os blocos.

Conforme apresentado anteriormente, pode-se concluir que o modelo numérico, composto pela discretização dos prismas, introdução incremental do carregamento, utilização do Critério de Mohr-Coulomb e com redutores de rigidez determinados com base em resultados experimentais, foi proposto com êxito, mostrando ser aplicável para simulação da alvenaria estrutural. Tal modelo oferece bons resultados, tanto quanto ao comportamento força versus

deslocamentos, como aos valores de ruptura para determinação da resistência média do prisma, podendo assim ser utilizado na elaboração de futuros projetos.

REFERENCIAS

- Andolfato, R.P. *Desenvolvimento das técnicas de produção de blocos de concreto para alvenaria estrutural na escala (1:4)*. Ilha Solteira, 2002. 110p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista.
- Logullo, B. G. *Influência do graute e da taxa de armadura no comportamento da alvenaria de blocos de concreto*. 2006. 192p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006.
- Mendes, R. J. K. *Resistência à compressão de alvenarias de blocos cerâmicos estruturais*. 1998. 185p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.
- Peleteiro, S.C. *Contribuições à modelagem numérica de alvenaria estrutural*. São Carlos, 2001. 143p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- Zienkiewicz, O. C.; Taylor, R. L. *The finite element method*. 5.ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000. 3v.