

## **Estudo de caracterização mecânica de blocos de concreto vibro-compactados à seco**

Mohamad, G.<sup>I</sup>, Lourenço, P. B.<sup>II</sup>, Roman, H. R.<sup>III</sup>, Rizatti, E.<sup>IV</sup>, Barbosa, C. S.<sup>V</sup>

<sup>I</sup>Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA – Av. Tiarajú, 810 – Bairro Ibirapuitã – CEP.: 97546-550, Alegrete, RS.

e-mail: [gihad.civil@gmail.com](mailto:gihad.civil@gmail.com),

<sup>II</sup>Universidade do Minho – Escola de Engenharia, Campus de Azurém – 4800-058, Guimarães.

e-mail: [pbl@civil.uminho.pt](mailto:pbl@civil.uminho.pt)

<sup>III</sup>Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC – R. João Pio Duarte da Silva, 205 – Bairro Córrego Grande – CEP.: 88040-970 Florianópolis, SC.

e-mail: [humberto@ecv.ufsc.br](mailto:humberto@ecv.ufsc.br)

<sup>IV</sup>Universidade Federal de Santa Maria – Departamento de Estruturas e Construção Civil– Avenida Roraima, Prédio 07, Centro de Tecnologia, Santa Maria, RS.

e-mail: [edu\\_rizzatti@yahoo.com.br](mailto:edu_rizzatti@yahoo.com.br)

<sup>V</sup>Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Estruturas, São Carlos, 13566-590, Brasil.

e-mail: [claudiusbarbosa@yahoo.com.br](mailto:claudiusbarbosa@yahoo.com.br)

---

### **RESUMO**

O objetivo principal deste trabalho é determinar as características físicas e mecânicas dos concretos vibro-compactados a seco para fins estruturais. Foram realizados ensaios para a determinação da área líquida, absorção de água, massa específica, resistência à tração e compressão, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, modo de ruptura à compressão e tenacidade à fratura à tração e compressão. Além disso, procurou-se simular as distribuições das tensões por métodos numéricos computacionais lineares e não-lineares para verificar o nível das tensões, no intuito de reproduzir os resultados experimentais a fim de desenvolver componentes de melhor desempenho para fins estruturais. Pode-se concluir que, pelas análises nas deformações de compressão e tração, ocorreu uma maior dispersão de valores em função da propagação da fissura, em que a variação média do coeficiente de Poisson foi da ordem dos 60% e para o módulo de elasticidade foi de 13%. A resistência à tração característica do concreto vibro-compactado foi 1,91 MPa, calculada para um nível de confiança de 95%. A resistência à tração direta foi 0,58 vezes a resistência à tração na flexão. Nas simulações, o modelo proposto permitiu uma boa aproximação, para a previsão da resistência última, entre os resultados obtidos numericamente e os experimentais. Houve uma aproximação nos valores das deformações laterais do modelo numérico comparado ao experimental até, aproximadamente, 50% da resistência última. Já para as deformações axiais, não se conseguiu reproduzir os resultados experimentais, devido à rigidez medida nos modelos teóricos serem maiores que as experimentais. A mudança de parâmetros, como o módulo de elasticidade no modelo teórico, não produziu uma equivalência entre a tensão última obtida numericamente com a resistência à compressão experimental.

**Palavras chaves:** Bloco de Concreto Vibro-compactado à Seco. Alvenaria estrutural. Caracterização Mecânica.

---

## **Mechanical Characterization of Vibro-dry Concrete Blocks**

### **ABSTRACT**

The aim of this work is to determine the physical and mechanical behavior of vibro-dry concrete for structural purposes. Tests have been made to determine the net area, water absorption, density, axial compression, elasticity modulus, Poisson ratio, failure mode under compression, tenacity under tensile and compression strain. After a sequence of tests made in the laboratory, it was possible to understand the mechanical properties of vibro-dry concrete block for developing new components for structural purpose. Furthermore, the results of a combined experimental program and numerical modeling to evaluate the linear and non-linear behavior of vibro-dry concrete block were done. For compression and tensile strain, it can be concluded from this work that there was an increasing on the dispersion values due to propagation of the failure. The average coefficient variation of Poisson's ratio was around 60% and for the elasticity modulus

was 13%. Characteristic tensile strength of the vibro-compacted concrete was 1.91 MPa, calculated for a confidence level of 95%. The direct tensile strength was 0.58 times the flexural strength. The model proposed for numerical simulations gave a better approach between experimental and numerical results to predict the limit of compressive strength of a block. There was a good approach between numerical models and experimental results of lateral strain until 50% of the limit tensile strength. The numerical model was not being able to reproduce the axial strain on experimental results, due to stiffness measurement on the theoretical models being larger than the experimental ones. The changing of elasticity modulus did not produce difference on compressive strength of numerical model.

**Keywords:** Vibro-dry Concrete Block. Structural masonry. Mechanical Characterization.

---

## 1 INTRODUÇÃO

A alvenaria estrutural é um sistema construtivo largamente empregado, onde a parede tem dupla função, ou seja, compartimentar os diferentes ambientes e absorver as cargas devido ao peso próprio, lajes e vento. Os blocos e as argamassas são os principais constituintes das alvenarias estruturais e a sua capacidade de suporte depende, fundamentalmente, da resistência do bloco, da argamassa e das tensões que surgem por ventura do carregamento atuante. Quando uma alvenaria é submetida à compressão, a deformabilidade ou rigidez entre os blocos de concreto e a argamassa induzem tensões que fazem com que os blocos de concreto rompam por tração e a argamassa por compressão. O bloco de concreto é o principal componente da alvenaria, o mais resistente, e estudos precisam ser realizados para se conseguir desenvolver unidades de alto desempenho para funções estruturais na construção civil ([1-14]).

Os blocos de concreto vibro-compactados a seco em estruturas são normalmente produzidos por indústrias de pré-fabricação de concreto, conforme a NBR-6136 [15], e encontrados com diferentes geometrias e resistências à compressão. As suas características mecânicas dependem dos materiais constituintes, umidade do material usado na moldagem, do proporcionamento destes, do grau de compactação e do método de cura. Normalmente, as propriedades mecânicas dos blocos de concreto vibro-compactados a seco sofrem influência da geometria ou formato do bloco que podem induzir tensões localizadas que leva o material a ruptura, caso atingir os seus limites de resistência à tração e compressão ([16] e [17]).

No Brasil, os estudos dos blocos de concreto estão centrados em estudos de dosagem dos materiais, sendo utilizado pelas empresas um método empírico de proporcionamento, sem considerar o arranjo entre os agregados, pressão de compactação e o teor de cimento, que pode afetar as características mecânicas como à tração, compressão e módulo de elasticidade. Portanto, existe a necessidade de estudos específicos de caracterização mecânica de análise de blocos estruturais, para simular numericamente o comportamento dos componentes estruturais de forma a desenvolver componentes com alto desempenho para fins estruturais. estarei na área

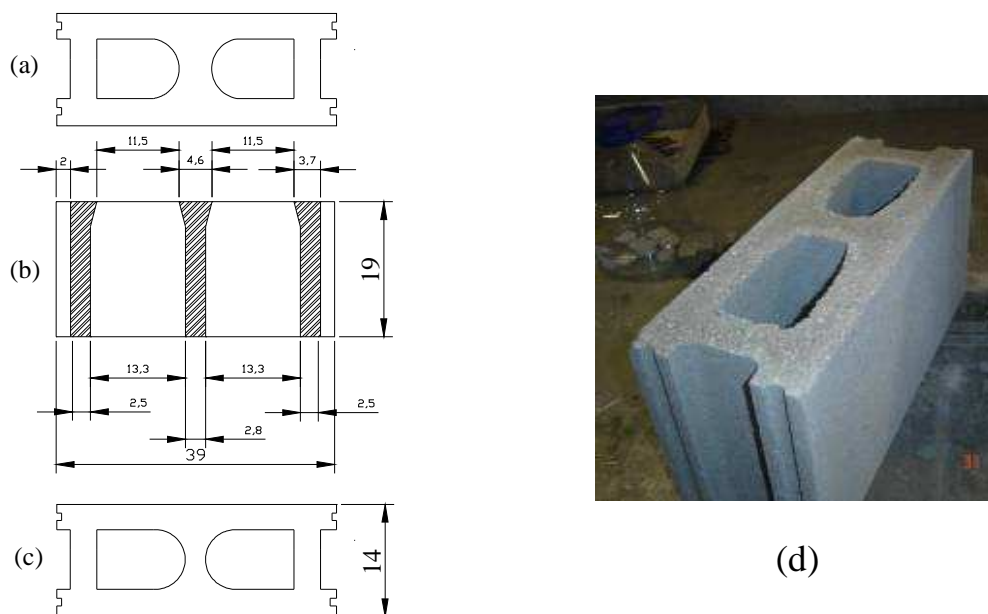
## 2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS BLOCOS

Os blocos de concreto adotados foram fornecidos pela empresa Presdouro e são unidades compostas por areia, cimento e agregado com dimensão máxima de 6,3 milímetros. Os blocos são vibro-compactados, com a mistura praticamente seca. Possuem uma seção tronco-cônica, ou seja, a área líquida ao longo da altura do bloco não é constante em função do processo de fabricação e desmoldagem. Para a obtenção da área líquida da superfície do bloco foram utilizados dois métodos: o do papel com um peso-específico conhecido e o método do peso submerso do bloco. O método do papel de peso-específico conhecido, conforme o estabelecido pela ES 772-2 [18], utiliza uma balança de precisão de 0,01 gramas, onde se desenha a geometria das faces dos blocos e recorta-se para, posteriormente, se pesar. Também, pode-se obter a área líquida por meio do peso submerso do bloco e do conseqüente cálculo do empuxo produzido, ou seja, volume de líquido deslocado NBR-12118 [19]. A divisão entre o volume de líquido deslocado e a altura fornece a área líquida média. Neste método deve existir a garantia de que o bloco se encontre completamente saturado antes do ensaio. Os resultados apresentados neste trabalho são os valores individuais e a média entre os valores das superfícies inferiores e superiores do bloco. A absorção de água das unidades foi calculada usando quatro unidades, por meio da diferença entre o peso do bloco seco e do saturado em água a temperatura ambiente durante o período de 24 horas. A Tabela 1 apresenta as características físicas das unidades adotadas no presente programa de ensaio. A Figura 1 apresenta a forma da seção transversal com as dimensões das paredes que compõem o bloco, juntamente com uma perspectiva do bloco.

**Tabela 1:** Características físicas dos blocos (peso-específico,  $A_{Liq}/A_{bruta}$  e Absorção).

Dimensões nominais (L x H x C)* (mm)	Massa-específica (kg/m <sup>3</sup> )	Área líquida (cm <sup>2</sup> )		$A_{Liq}/A_{bruta}$	Área líquida média (cm <sup>2</sup> )	$A_{Liq}/A_{bruta}$ (média)	Absorção média 24 h (%)
		Superior	Inferior				
Bloco (140 x 190x 390)	1917,7	Superior	374,0	,68	338,1	0,62	7,72
		Inferior	302,2	0,55			

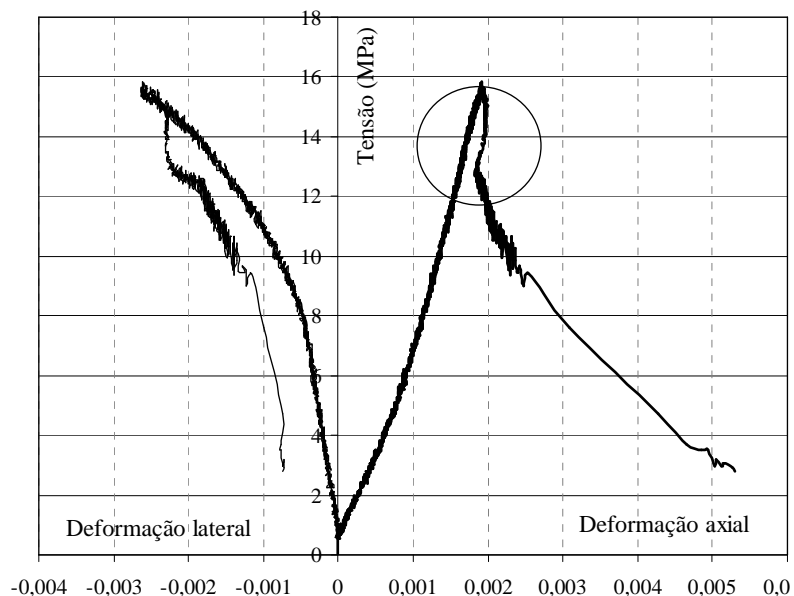
\* L = largura do bloco; H= altura do bloco; C= comprimento do bloco.



**Figura 1:** (a) Face de maior área líquida. (b) Seção transversal do bloco com as dimensões das paredes transversais e longitudinais. (c) Face de menor área líquida. (d) perspectiva do bloco.

### 3 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS BLOCOS

Preliminarmente aos ensaios de compressão retificaram-se as superfícies dos blocos usando um equipamento abrasivo que permite o ajuste vertical, conforme a necessidade do utilizador. Esta operação foi necessária, devido à existência de grãos de agregados no topo e na base do bloco, que poderiam gerar concentração de tensão e eventuais trincas localizadas. Além disso, foram realizados testes preliminares para analisar a influência da flexão das chapas de aço na transmissão da carga de compressão ao longo da extensão do bloco. Uma série de ensaios permitiu verificar que a espessura da chapa é de significativa importância para a configuração final dos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade. Foram empregados nos experimentos sensores para a medição dos deslocamentos lineares lvdts (linear variable differential transformer). O posicionamento de um lvdt vertical na extremidade evidenciou a flexão da chapa e a conseqüente influência nos resultados de deformação vertical. Isto foi verificado através do diagrama tensão-deformação, onde existia a tendência para a relaxação nas deformações do bloco pós-ruptura como é destacado na Figura 2 com um círculo. Esta relaxação é causada pela flexão das chapas de aço durante o carregamento, devido ao surgimento das fissuras no bloco durante a ruptura, gerando, conseqüentemente, uma diminuição nas deformações. Tão logo isso aconteça, ocorre o gradativo aumento nas deformações verticais. Por isso, buscou-se outra disposição das chapas de aço de modo a melhorar a distribuição das forças em toda a superfície do bloco e se evitar a flexão.



**Figura 2:** Influência da espessura da chapa de aplicação de carga.

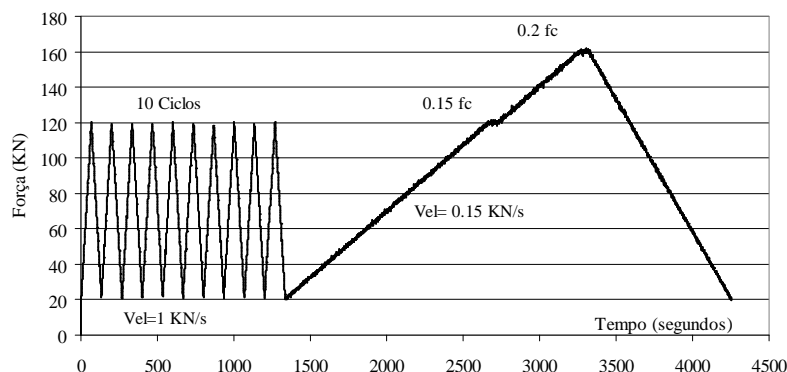
As conclusões obtidas nos estudos permitiram verificar a necessidade de aumentar a espessura da chapa inferior para 10 cm. Além disso, nos ensaios experimentais, deve ser colocada uma chapa de aço superior para distribuir melhor a carga. Para isso, foi posicionado um disco de aço com 30 cm de diâmetro e 5 cm de altura e acima do disco de aço foi utilizada uma rótula de 7,5 cm de altura, conforme mostra a Figura 3. Na aquisição das deformações verticais foram utilizados dois lvdts posicionados em pontos equidistantes, a 6 cm das extremidades do bloco. Isto possibilitou a comparação das deformações medidas nos dois pontos e o posterior ajuste, caso aconteça concentração de tensões em apenas um dos lados do bloco e a verificação da possibilidade de rotação do prato superior.



**Figura 3:** Esquema de teste para o módulo de elasticidade e Poisson.

Os ensaios para a determinação do módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson inicial (20% da resistência à compressão) foram realizados com controle de força, estabelecendo patamares de carga em função da resistência estimada (NBR-8522 [20]). A Figura 4 mostra 10 ciclos de carga e descarga, desde um nível de tensão aproximado de 0,5 MPa até aos patamares de 0,15 e 0,20 da resistência à compressão estimada do bloco. A velocidade de carga durante os 10 ciclos foi de 1 kN/s. Para o tempo de ensaio restante a velocidade foi de 0,15 kN/s. A velocidade de carregamento, durante os ciclos e patamares, foi definida em função do tempo de teste para cada amostra. Quando se atinge o valor de  $0,15.f_c$  e  $0,2.f_c$ , a força permanece constante por um período de 60 segundos. Finalizadas as medições foi efetuada a descarga do bloco. Após isso, são verificadas as deformações medidas em dois extremos do bloco, comparando as diferenças entre ambos. Caso o deslocamento obtido entre os lvdts fosse maior que 30% do maior deslocamento, se procedia a nova centragem da amostra, ajustando novamente o corpo-de-prova. A velocidade de carregamento, para o

ensaio de módulo de elasticidade, foi fixada a partir do tempo de teste considerado suficiente para a resposta do material durante os ciclos e os patamares. Partiu-se do critério de que, para materiais porosos, o aumento da velocidade de carregamento causa uma diminuição no valor das deformações e, por consequência, o aumento do valor do módulo de elasticidade. Por isso, foi estabelecido o critério de carregamento apresentado na Figura 4 para a obtenção do módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. Para a determinação da resistência à compressão dos blocos e para a obtenção do diagrama tensão-deformação pós-pico, mudou-se o controle da prensa e manteve-se um deslocamento constante ao longo do ensaio. A velocidade de deslocamento escolhida foi de 0,002 mm/s. O coeficiente de Poisson foi determinado para diferentes relações  $\sigma/f_c$  pela divisão entre as deformações laterais e axiais obtidas em diferentes pontos ( $\sigma/f_c = 0,2, 0,4, 0,5, 0,63$  e  $0,74$ ). Com isso era possível determinar o diagrama entre a tensão e as deformações da amostra (axial e lateral).



**Figura 4:** Ciclo de carga e descarga para o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson.

A ES 772-1 [21] estabelece que as resistências dos blocos devam ser calculadas conforme a proporção entre a área líquida e a área bruta. Caso esta porcentagem seja superior a 0,35 ou 35%, a resistência à compressão deve ser obtida na área líquida. A mesma norma recomenda que a velocidade de carregamento, a ser usada nos ensaios de resistência à compressão, pode ser fixada conforme a necessidade do usuário, mas não deverá ser menor do que um minuto. A utilização da velocidade de 0,002 mm/s foi devida à necessidade de uma menor dispersão nos valores das deformações do bloco e da obtenção do comportamento pós-pico do material.

### 3.1 Resultados de resistência à compressão, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson

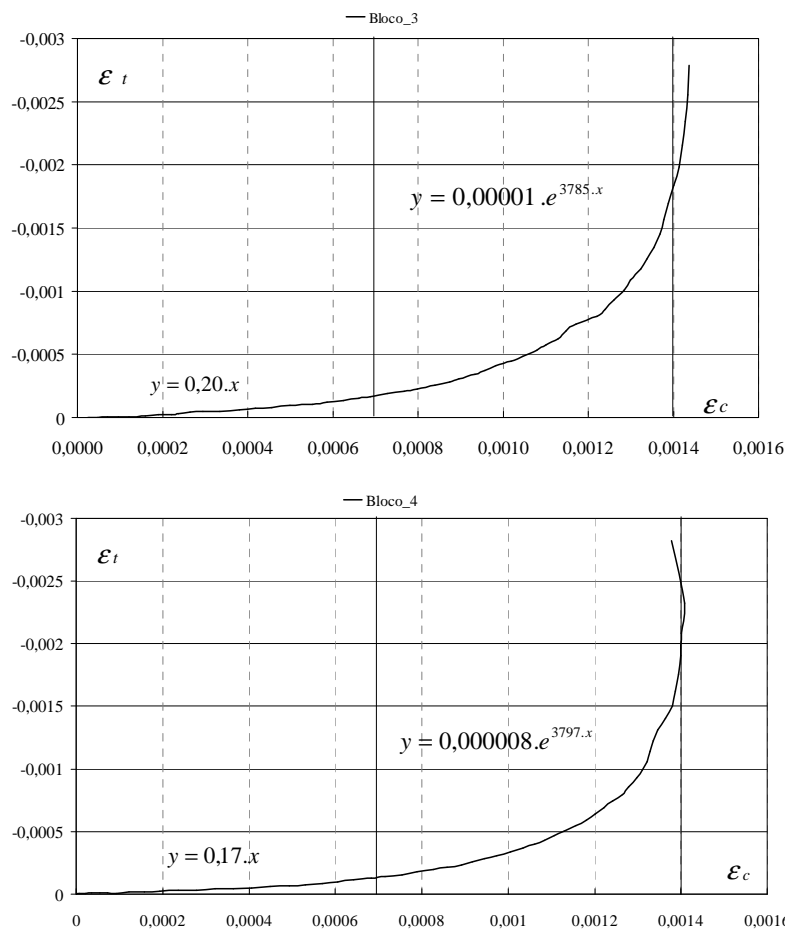
Os resultados de resistência à compressão média obtida na área líquida, juntamente com as deformações verticais e horizontais últimas, são apresentados na Tabela 2, com o respectivo desvio-padrão e coeficiente de variação amostral. Foram utilizados quatorze (14) blocos nos ensaios, tendo sido obtidos resultados não satisfatórios em dois dos corpos-de-prova (bloco 5 e 7) que acabaram sendo descartados, em função do modo de ruptura não ser centrado, indicando concentração de carga em um dos lados do bloco.

**Tabela 2:** Resistência à compressão e deformação de compressão ( $\epsilon_c$ ) e tração ( $\epsilon_t$ ) dos blocos.

BLOCO (Designação)	$f_{bloco}$ (MPa)	$\epsilon_c$	$\epsilon_t$
1	20,01	0,001883	0,002141
2	22,93	0,001258	0,002028
3	22,96	0,001444	0,003207
4	22,22	0,001413	0,002168
6	22,17	0,003506	0,000581
8	24,14	0,002498	0,000879
9	21,88	0,002838	0,000981
10	24,29	0,002751	0,000574
11	22,93	0,003071	0,000698
12	22,49	0,002060	0,000757
13	25,35	0,001899	0,001340

14	26,19	0,002341	0,001013
Média	<b>23,1</b>	<b>0,002247</b>	<b>0,001364</b>
Desvio-padrão (MPa)	1,66	0,000710	0,000833
Coefficiente de variação (%)	7,66	31,60	61,00

O coeficiente de variação obtido nos resultados de resistência à compressão dos blocos foi considerado pequeno, isso demonstra uma boa qualidade na produção das unidades. As deformações de compressão ( $\epsilon_c$ ) e de tração ( $\epsilon_t$ ) na ruptura apresentaram uma elevada dispersão nos valores, fator este considerado normal em função da aleatoriedade dos defeitos e do surgimento dos mesmos em relação aos pontos de medição. Considerando os resultados médios de deformações obtidos nos ensaios, pode se concluir que: as deformações últimas de tração são aproximadamente 0,60 vezes as deformações de compressão. Portanto, o valor da proporção entre deformações laterais e axiais na ruptura foi de 0,61 (média de doze unidades). A Figura 5 mostra a relação entre a deformação de tração em função da compressão dos blocos designados por 3 e 4. Nota-se um comportamento linear entre as mesmas, para um nível de deformação de compressão próximo de 0,0007, ou seja, cuja proporção entre  $\sigma/f_c$  é de 0,3. Após isto, acontece um aumento desproporcional, cuja função pode ser aproximada por uma equação exponencial até a deformação de compressão atingir 0,0014.



**Figura 5:** Comportamento das deformações de tração e compressão do bloco.

Os valores individuais do módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) para diferentes níveis de tensões atuantes são apresentados nas Tabelas 3, 4, 5, 6 e 7.

**Tabela 3:** Poisson e módulo de elasticidade para o nível de tensão 4,74 MPa.

Tensão (4,74 MPa) $\sigma/f_c=0,2$		Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )	$E_{20\%}$ (MPa)
	Bloco 1	0,22	-
	Bloco 2	0,19	-
	Bloco 3	0,18	-
	Bloco 4	0,19	-
	Bloco 6	0,05	-
	Bloco 8	0,12	20651
	Bloco 9	0,14	24287
	Bloco 10	0,12	20245
	Bloco 11	0,29	20215
	Bloco 12	0,32	20017
	Bloco 13	0,31	20710
	Bloco 14	0,18	20186
	Média	<b>0,19</b>	<b>20901</b>
	Desvio-padrão (MPa)	<b>0,08</b>	<b>1514</b>
Coefficiente de variação (%)	<b>42,67</b>	<b>7,24</b>	

**Tabela 4:** Poisson e módulo de elasticidade para o nível de tensão 9,23 MPa.

Tensão (9,23 MPa) $\sigma/f_c=0,4$		Poisson ( $\nu$ )	$E_{40\%}$ (MPa)
	Bloco 1	0,31	-
	Bloco 2	0,29	-
	Bloco 3	0,30	-
	Bloco 4	0,27	-
	Bloco 6	0,07	-
	Bloco 8	0,13	14992
	Bloco 9	0,08	14745
	Bloco 10	0,05	14385
	Bloco 11	0,08	12990
	Bloco 12	0,13	16246
	Bloco 13	0,35	19469
	Bloco 14	0,16	16337
	Média	<b>0,19</b>	<b>15595</b>
	Desvio-padrão (MPa)	<b>0,11</b>	<b>2054</b>
Coefficiente de variação (%)	<b>59,77</b>	<b>13,20</b>	

**Tabela 5:** Poisson e módulo de elasticidade para o nível de tensão 11,3 MPa.

Tensão (11,3 MPa) $\sigma/f_c=0,5$		Poisson ( $\nu$ )	$E_{50\%}$ (MPa)
	Bloco 1	0,38	-
	Bloco 2	0,35	-
	Bloco 3	0,38	-
	Bloco 4	0,33	-
	Bloco 6	0,09	-
	Bloco 8	0,14	14401
	Bloco 9	0,10	13839
	Bloco 10	0,08	13450
	Bloco 11	0,10	12215
	Bloco 12	0,16	15414
	Bloco 13	0,36	18854
	Bloco 14	0,18	15666

	Média	<b>0,22</b>	<b>14834</b>
	Desvio-padrão (MPa)	<b>0,13</b>	<b>2127</b>
	Coefficiente de variação (%)	<b>57,39</b>	<b>14,30</b>

**Tabela 6:** Poisson e módulo de elasticidade para o nível de tensão 14,5 MPa.

Tensão (14,5 MPa) $\sigma/f_c=0,63$		Poisson ( $\nu$ )	$E_{63\%}$ (MPa)
	Bloco 1	0,56	-
	Bloco 2	0,48	-
	Bloco 3	0,55	-
	Bloco 4	0,46	-
	Bloco 6	0,12	-
	Bloco 8	0,17	14398
	Bloco 9	0,14	12558
	Bloco 10	0,12	12776
	Bloco 11	0,13	11416
	Bloco 12	0,21	14496
	Bloco 13	0,39	17735
	Bloco 14	0,22	14843
	Média	<b>0,30</b>	<b>14032</b>
	Desvio-padrão (MPa)	<b>0,18</b>	<b>2054</b>
Coefficiente de variação (%)	<b>60,01</b>	<b>14,60</b>	

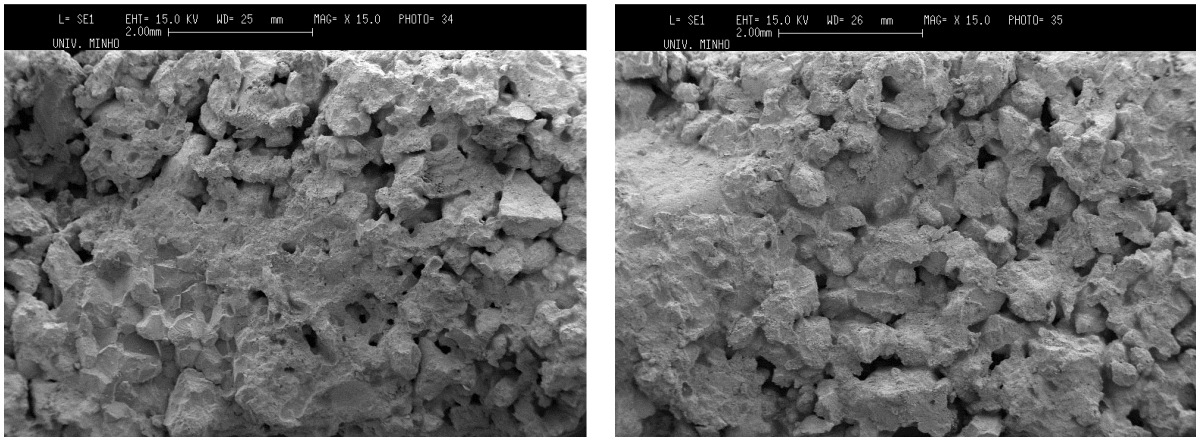
**Tabela 7:** Poisson e módulo de elasticidade para o nível de tensão 17,2 MPa.

Tensão (17,2 MPa) $\sigma/f_c=0,74$		Poisson ( $\nu$ )	$E_{74\%}$ (MPa)
	Bloco 1	0,74	-
	Bloco 2	0,69	-
	Bloco 3	0,77	-
	Bloco 4	0,65	-
	Bloco 6	0,14	-
	Bloco 8	0,21	12862
	Bloco 9	0,20	11260
	Bloco 10	0,16	12119
	Bloco 11	0,17	10701
	Bloco 12	0,26	13656
	Bloco 13	0,44	16829
	Bloco 14	0,26	14244
	Média	<b>0,39</b>	<b>13096</b>
	Desvio-padrão (MPa)	<b>0,25</b>	<b>2069</b>
Coefficiente de variação (%)	<b>64,23</b>	<b>15,80</b>	

Nota-se, nos resultados experimentais, um coeficiente de variação médio do coeficiente de Poisson da ordem dos 60%. O coeficiente de variação do módulo de elasticidade foi de aproximadamente 13%. A alta dispersão dos valores do coeficiente de Poisson deve-se ao modo de ruptura e, portanto, ao surgimento de fissuras, ou seja, quando a mesma passou pelo lvdv ocorreu um aumento significativo do valor do coeficiente de Poisson.

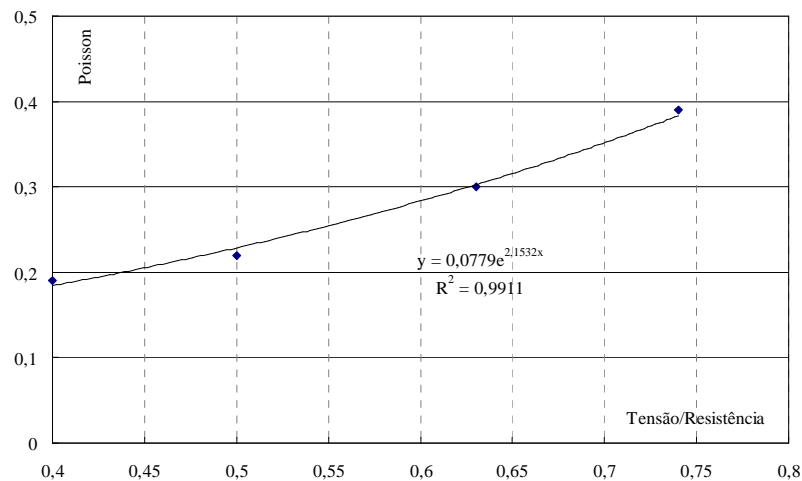
A Figura 6 mostra a imagem, utilizando o microscópio eletrônico de varredura, da superfície do bloco ampliada 15 vezes, onde pode se verificar a existência de vazios internos, de uma faixa granulométrica contínua de areia e a pouca quantidade de finos (pasta) envolvendo as partículas, diminuindo a área de contato entre o aglomerante e agregado, o que facilitaria o aumento repentino do coeficiente de Poisson próximo da ruptura.





**Figura 6:** Imagens da microestrutura do bloco de concreto aumentada em 15 vezes.

Observou-se nas imagens da Figura 06 a existência de vazios internos provocados por uma faixa granulométrica contínua de areia visualizada no microscópio eletrônico de varredura (MEV), devido a pouca quantidade de finos envolvendo as partículas de areia do bloco. A Equação 1 representa o comportamento do coeficiente de Poisson médio em função da proporção entre tensão/resistência ( $\sigma/f_c$ ), válida para o intervalo entre 0,4 e  $0,75.\sigma/f_c$ , conforme mostra a Figura 7.



**Figura 7:** Relação entre Poisson e a proporção entre  $\sigma/f_c$ .

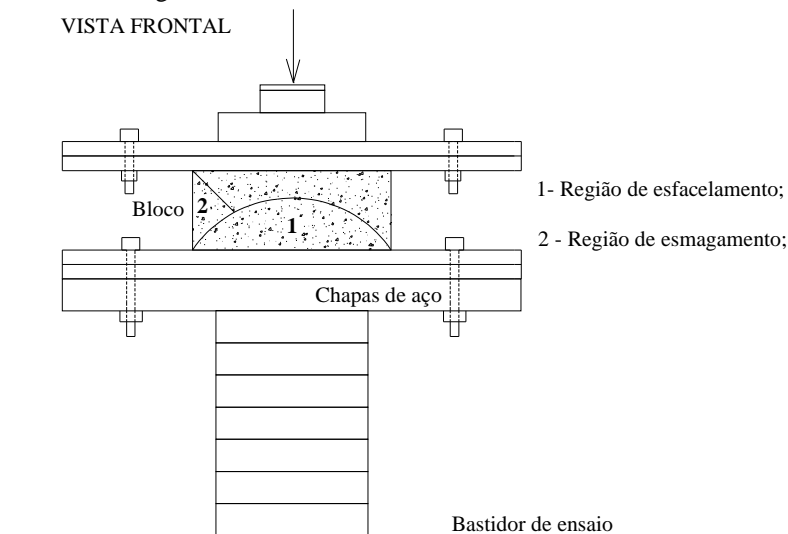
$$\nu = 0,078.e^{2,1532.(\sigma / f_c)} \quad (1)$$

A proporção entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão, denominada de constante k da unidade, é apresentada na Tabela 8. O módulo de elasticidade do bloco foi calculado para diferentes proporções de  $\sigma/f_c$ . Nota-se, por meio dos resultados experimentais, uma diminuição no valor do módulo de elasticidade com o aumento da tensão aplicada.

**Tabela 8:** Relação entre  $\sigma/f_c$  e a constante k.

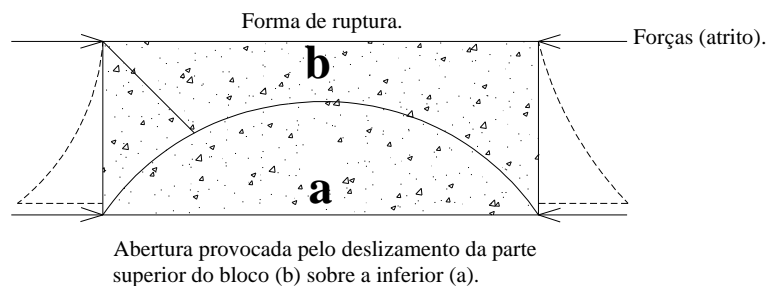
$\sigma/f_c$	$E/f_c=k$
0,20	21011 / 23,1=909
0,40	15595 / 23,1=675
0,50	14834 / 23,1=642
0,63	14032 / 23,1=607
0,74	13096 / 23,1=567

A Figura 8 mostra uma vista frontal do esquema de teste, juntamente com o modo de ruptura verificado nos ensaios de compressão dos blocos. Observam-se duas formas básicas de ruptura assinaladas como região um (1) e dois (2). A região 1 caracteriza-se pelo esfacelamento da superfície do bloco gerado pelas tensões biaxiais devido o atrito entre a placa e o bloco. Essas fissuras são as primeiras a aparecer; logo após surge, na região 2, o esmagamento das paredes laterais do bloco de concreto, causado pelo deslizamento entre a parte superior do bloco e a região 1.



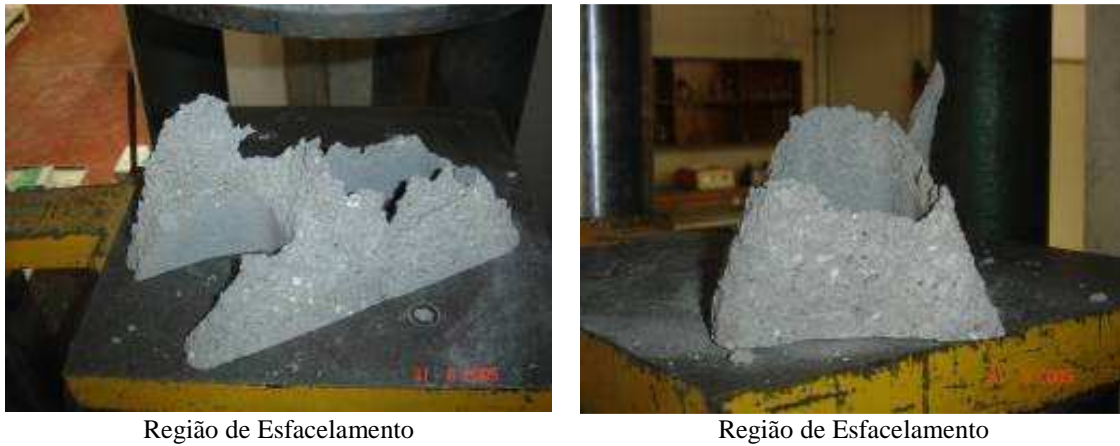
**Figura 8:** Vista frontal do esquema de ensaio e modo de ruptura.

A Figura 9 mostra a forma de ruptura do bloco, onde as forças de atrito impõem um deslocamento horizontal maior na base, definindo a região de ruptura “a” (região de esfacelamento). A região de ruptura “b” desliza sobre a “a”, como mostra a linha tracejada e induz rupturas diagonais no bloco.



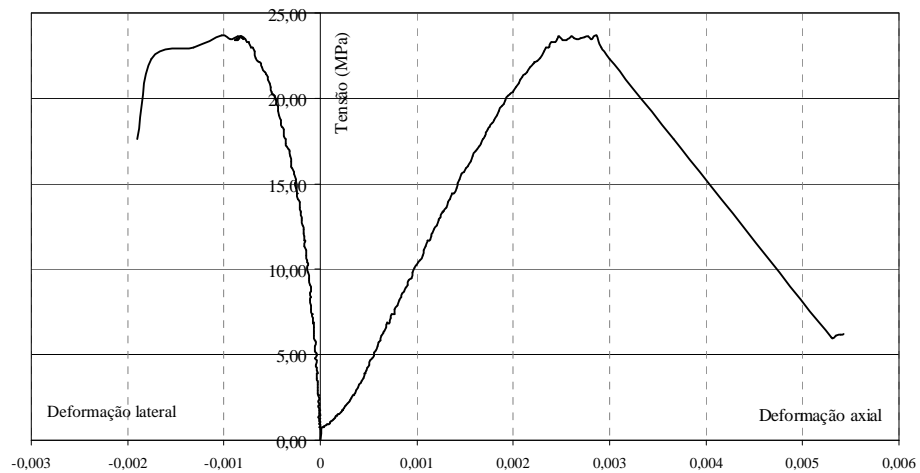
**Figura 9:** Forma de ruptura padrão dos ensaios à compressão do bloco.

A existência de tensões de aderência entre a chapa e o bloco faz com que a ruptura seja tronco-cônica, como mostra a Figura 10. Este modo de ruptura é gerado pelo deslocamento restringido produzido pelo atrito entre a chapa e o bloco, surgindo um estado de tensões multiaxiais. A Figura 10 apresenta os modos de ruptura do bloco, juntamente com as respectivas regiões de esfacelamento e esmagamento.



**Figura 10:** Modo de ruptura dos blocos de concreto.

A Figura 11 apresenta os resultados típicos de tensão e deformação de tração (lateral) e de compressão (axial) medidas nos blocos. É possível visualizar que as deformações de tração aumentam linearmente até, aproximadamente,  $0,6\sigma_{f_c}$ . Pode se verificar que após o bloco atingir a ruptura as deformações de tração são de difícil controle, aumentando desproporcionalmente com a carga atuante. A deformação vertical apresentada na figura 11 é a média das deformações obtidas em dois pontos do bloco.



**Figura 11:** Diagrama tensão-deformação de compressão e tração do Bloco 8.

Nos resultados experimentais, se pode verificar que as deformações de compressão do bloco possuem um comportamento linear até a relação  $\sigma/f_c$  atingir, aproximadamente, o valor de 0,85. Já para as deformações de tração, as não linearidades são mais acentuadas quando a relação  $\sigma/f_c$  atinge 0,60. A energia à fratura na compressão foi calculada por meio da curva média do diagrama tensão-deslocamento dos blocos 8, 9, 10 e 11 (Figura 12). O comportamento pós-pico foi multi-linear, onde a energia de fratura média à compressão ( $Gf_c$ ) foi de  $9,92 \text{ N.mm/mm}^2$ .

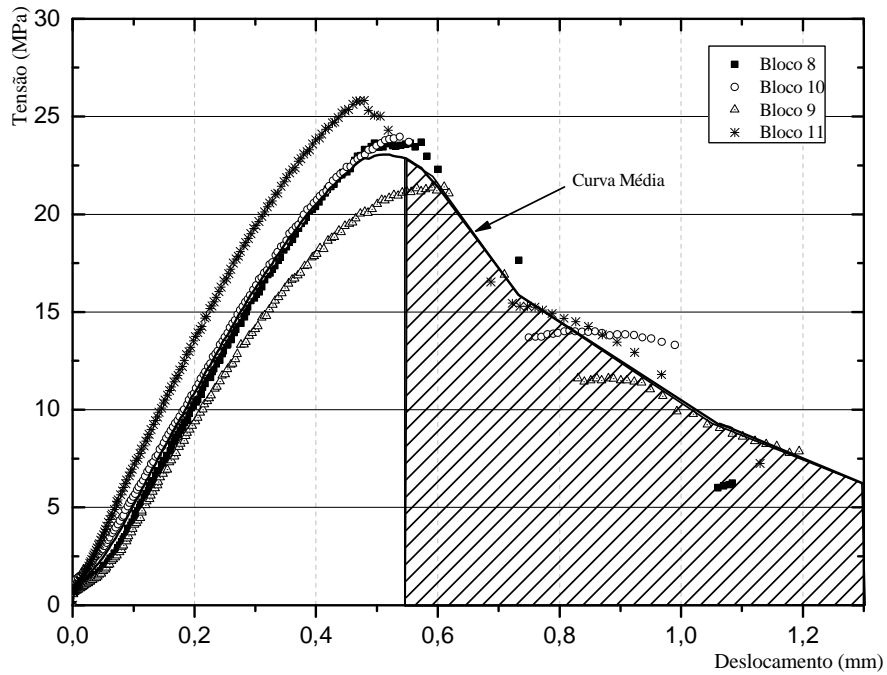


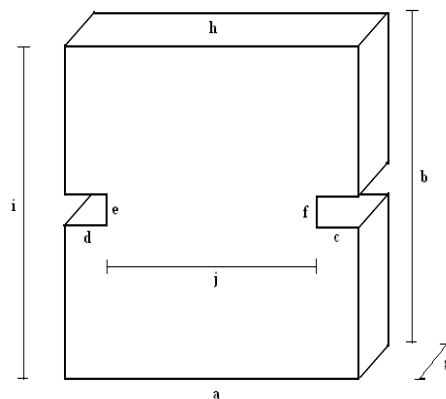
Figura 12: Diagrama tensão-deslocamento médio e individual dos blocos.

### 3.2 Ensaio de caracterização da resistência à tração

Ensaio de resistência à tração direta foram realizados utilizando amostras cortadas dos blocos. As dimensões, forma e área da seção transversal são apresentadas na Tabela 9. Devido ao formato tronco-cônico dos blocos, as amostras foram retificadas até atingir uma espessura uniforme. Foram ainda introduzidos entalhes na amostra por onde o plano de ruptura deve ocorrer, a fim de criar uma superfície enfraquecida que permita o controle do ensaio.

Tabela 9: Dimensões das amostras extraídas dos blocos de concreto.

Amostra	a (mm)	b (mm)	c (mm)	d (mm)	e (mm)	f (mm)	g (mm)	h (mm)	i (mm)	j (mm)	Área (j.g) (mm <sup>2</sup> )
1	87,9	79,4	14,7	14,2	4,1	4,1	26,3	88,1	79,0	57,2	1504,4
3	91,1	78,2	17,1	16,5	3,9	3,8	26,3	91,4	77,7	56,7	1491,2
5	88,7	79,6	14,4	14,5	3,9	3,9	26,5	89,3	78,9	59,0	1563,5
6	88,9	82,3	15,9	15,0	4,0	4,0	26,4	88,2	81,8	57,0	1504,8
7	93,0	79,9	16,0	15,8	3,8	3,8	27,6	93,4	80,0	58,7	1620,1
12	92,0	81,9	15,6	15,1	3,5	3,7	28,4	92,0	82,3	60,9	1729,6
13	92,2	81,0	14,4	14,4	3,8	3,8	27,8	91,5	81,8	60,0	1668,0

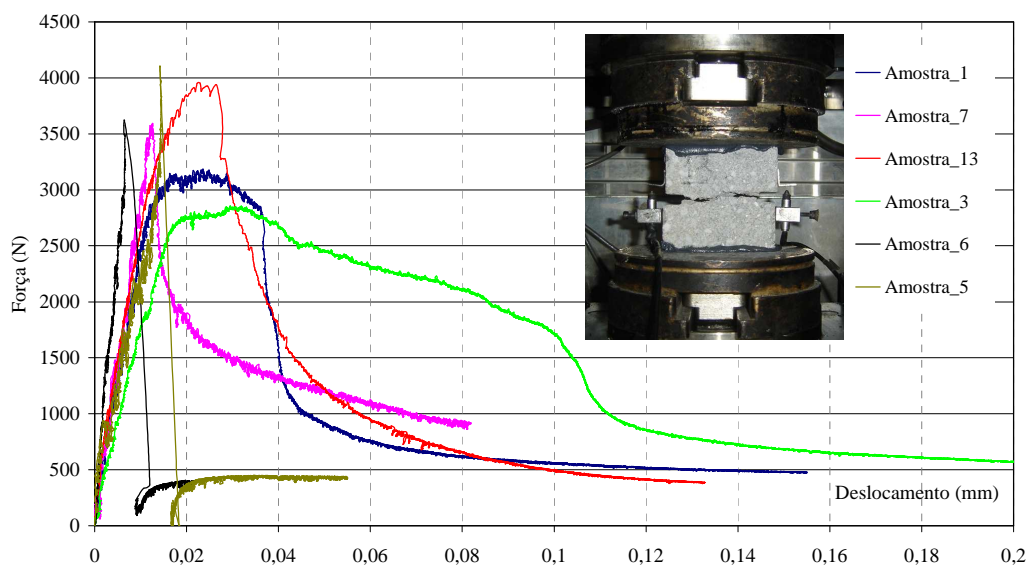


A amostra de concreto era colada previamente sob uma base guia de aço, garantindo assim a ausência de erros de paralelismo entre a amostra e os pratos. Após isso, a mesma era posicionada no equipamento, onde acontece o fechamento das garras superiores e inferiores, criando um engastamento entre a chapa e a amostra, como mostra a Figura 13. Dois lvdt's com campo de  $\pm 0,5$  milímetros foram colados nas extremidades dos entalhes, para determinar o deslocamento relativo à meia altura da amostra e obter a abertura de trinca.



**Figura 13:** Dispositivo para o ensaio de tração e máquina universal de tração.

Os resultados de resistência à tração direta e na flexão das unidades, força de tração última, deformação de ruptura, desvio-padrão e coeficiente de variação são apresentados na Tabela 10. Foram ensaiados 14 corpos de prova, sendo possível apenas controlar a progressão da fissura em sete (7) amostras. Nota-se, que a resistência à tração foi de aproximadamente 10% da resistência à compressão. O coeficiente de variação dos resultados foi de 10,23%. Esse valor é baixo quando consideradas as características do material frágil do concreto compactado a seco. A resistência à tração característica ( $f_{tk}$ ), calculada para um nível de confiança de 95%, foi 1,91 MPa. A deformação de tração média na ruptura foi de 0,00121. A Figura 14 apresenta os resultados de força (N) em função do deslocamento médio das amostras de concreto.



**Figura 14:** Relação entre força (N) em função do deslocamento médio (mm).

O trecho ascendente do diagrama força e deslocamento a tração foi aproximado por uma função linear, como mostra a Equação (2). O trecho descendente ou pós-pico pode ser aproximado por duas funções que seguem um comportamento exponencial (Equação (3)). A energia de fratura à tração média ( $G_{ft}$ ) foi 0,06

$N.mm/mm^2$ , calculado para os limites dos deslocamentos correspondentes a tensão máxima à tração e o deslocamento de 0,08 mm.

$$y = 177,1.x \quad (2)$$

$$y = 3,2.e^{-24.x} \quad (3)$$

Foram realizados ensaios de flexão em três pontos, a fim de se obter a resistência à tração em flexão. A velocidade estabelecida, em função do equipamento, para o ensaio foi de 0,001 mm/s. A Figura 15 apresenta o esquema do ensaio executado



**Figura 15:** Esquema de ensaio à flexão das amostras cortadas do bloco a três pontos.

Para o cálculo da resistência à flexão ( $f_f$ ) foi usada a equação recomendada pelo projeto de norma prEN 1015-11 (1995), cuja expressão é apresentada na Equação (4).

$$f_f = 1,5. \frac{Fl}{b.d^2} \quad (4)$$

**Tabela 10:** Resultados de resistência à tração direta, tração na flexão, deformação de tração e variabilidades.

Amostra	Força de tração (N)	$\epsilon_t$	Resistência à tração na flexão $f_f$ (MPa)	Resistência à tração direta $f_t$ (MPa)
1	3183	0,00157	4,26	2,12
2	2858	0,00197	4,13	1,92
3	4100	0,00095	3,41	2,62
4	3621	0,00043	3,73	2,41
5	3595	0,00084	3,79	2,22
6	4134	-	4,55	2,39
7	4125	0,00153	-	2,47
Média (MPa)	<b>3659</b>	<b>0,00121</b>	<b>3,98</b>	<b>2,31</b>
Desvio-padrão (MPa)	501,8	0,00057	0,41	0,24
Coefficiente de variação (%)	13,71%	47,00%	10,36	10,23
$f_{tk}$ (MPa)				<b>1,91</b>

### 3.3 Estimativa dos parâmetros materiais de acordo com CEB-FIP [22]

O CEB-FIP [22] estabelece a relação entre as resistências à compressão, tração e o módulo de elasticidade para concretos convencionais. A Tabela 11 apresenta os resultados comparativos entre CEB-FIP [22] e os experimentais. Verificou-se uma diferença significativa no módulo de elasticidade pelo proposto pelo CEB-FIP [22] e os resultados experimentais. Isso pode ter ocorrido em função da natureza do concreto dos blocos serem vibro-compactados a seco, diferentemente dos concretos produzidos convencionalmente com uma quantidade de água maior.

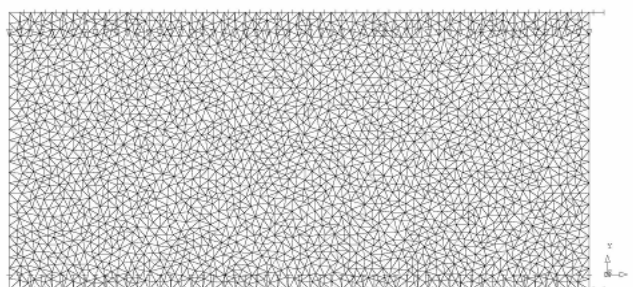
**Tabela 11:** Resultados comparativos entre o CEB-FIP [22] e os experimentos.

CEB-FIP [22] (MPa)	Resultados experimentais (MPa)	Relação CEB-FIP/ Experimento
$E_c = E_{co} \cdot \left( \frac{f_{cm}}{f_{cmo}} \right)^{1/3} = 33048$	15595 Obtido para a relação $\sigma/f_c=0,4$	2,12
$f_{ct,m} = f_{cko,m} \cdot \left( \frac{f_{ck}}{f_{cko}} \right)^{2/3} = 2,24$	2,31	0,97
$Gf = Gf_o \cdot \left( \frac{f_{cm}}{f_{cmo}} \right)^{0,7} = 0,045$	0,06	0,75

Aqui  $f_{cm}$  é igual à resistência à compressão média (MPa),  $E_{co}$  é igual a  $2,5 \cdot 10^4$  MPa,  $f_{cmo}$  é a resistência à compressão média de referencia igual a 10 MPa,  $f_{ck}$  é a resistência à compressão característica,  $f_{ct,m}$  é igual a 1,4 MPa,  $f_{cko}$  é igual a 10 MPa e  $Gf_o$  é o valor base da energia de fratura e depende do tamanho máximo do agregado. Para o caso dos blocos foi usado um diâmetro máximo de agregado de 8 mm e  $Gf_o$  de  $0,025 \text{ N} \cdot \text{mm}/\text{mm}^2$ .

### 3.4 Simulação numérica do comportamento à compressão do bloco

Com o intuito de se obterem as distribuições das tensões e deformações axiais e laterais, foi realizada a simulação numérica dos blocos considerando estado plano de tensão. Para tanto foi utilizado o programa comercial Diana [23]. O objetivo principal desta análise é verificar se o comportamento do coeficiente de Poisson no modelo teórico é equivalente ao dos resultados experimentais. As medidas de altura e comprimento usadas na simulação foram de 200 mm e 400 mm, respectivamente. Para a simulação numérica foi imposto ao bloco um deslocamento de 0,43 mm, sendo este compatível com o deslocamento último medido nos ensaios experimentais e proporcional à altura do bloco. A malha definida é triangular baseada no algoritmo de Delaunay. Este tipo de algoritmo cria uma malha triangular livre de três nós em qualquer tipo de superfície. A Figura 16 apresenta a malha e as condições de fronteira para a simulação. Para os modelos numéricos foram consideradas as características não-lineares dos materiais - modelo material I e modelo material II, Tabela 12 e Tabela 13, respectivamente. O objetivo desta análise é tentar descrever um modelo material compatível com os resultados de tensão e deformação obtidos experimentalmente, bem como comparar a resposta numérica do coeficiente de Poisson da simulação.



**Figura 16:** Simulação numérica de blocos (malha e condições de fronteira).

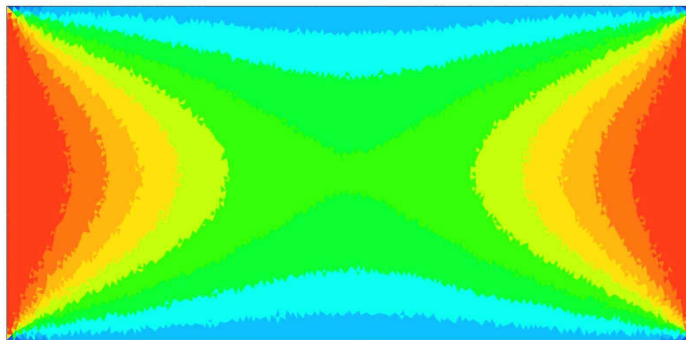
**Tabela 12:** Características mecânicas do bloco, modelo Material 1.

PROPRIEDADES MECÂNICAS	
Módulo de elasticidade	16000 MPa
Coefficiente de Poisson	0,19
Resistência à tração	2,13 MPa
Coesão	9,00 MPa
Seno do ângulo de atrito	0,24
Seno do ângulo de dilatância	0,24
Energia de fratura à compressão	11 MPa.mm
Energia de fratura à tração	0,094 MPa.mm

**Tabela 13:** Características mecânicas do bloco, modelo Material 2.

PROPRIEDADES MECÂNICAS	
Módulo de elasticidade	16000 MPa
Coefficiente de Poisson	0,19
Resistência à tração	2,13 MPa
Energia de fratura à tração	0,094 MPa.mm
Resistência à compressão	23 MPa
Energia de fratura à compressão	11 MPa.mm
Fator de retenção do cisalhamento	0,01

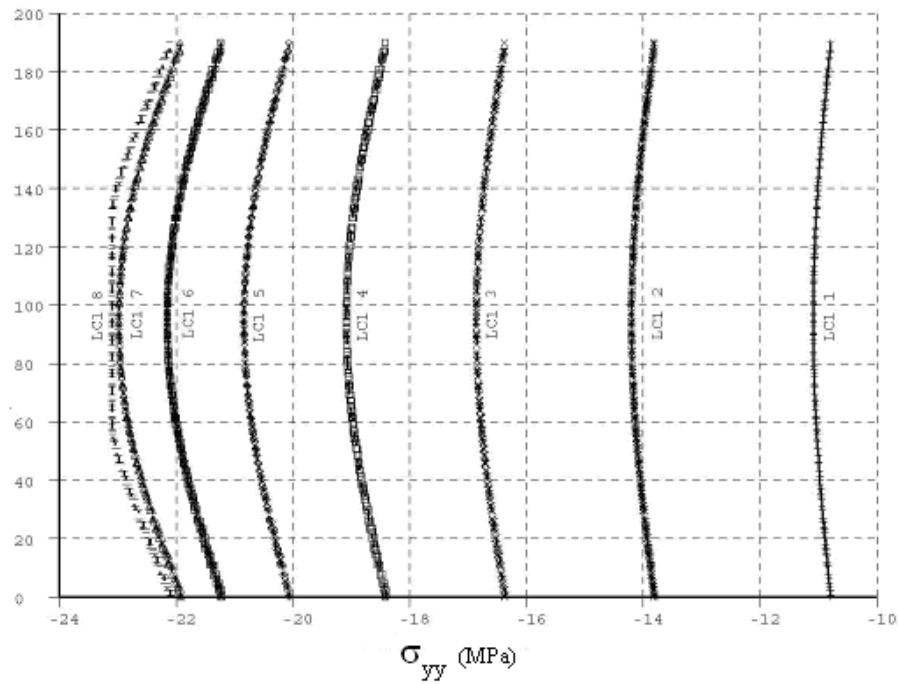
A Figura 17 mostra a distribuição das tensões na direção  $x$  obtida, onde existe o impedimento ao deslocamento horizontal do topo e da base. A distribuição das tensões na direção  $x$  possui a forma tronco-cônica e é semelhante aos modos de ruptura verificados em ensaios experimentais e visualizados anteriormente na Figuras 10. As características mecânicas tais como módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson foi designado a partir dos resultados experimentais, juntamente com os parâmetros não-lineares.



**Figura 17:** Distribuição das tensões ( $\sigma_{xx}$ ) na direção  $x$ .

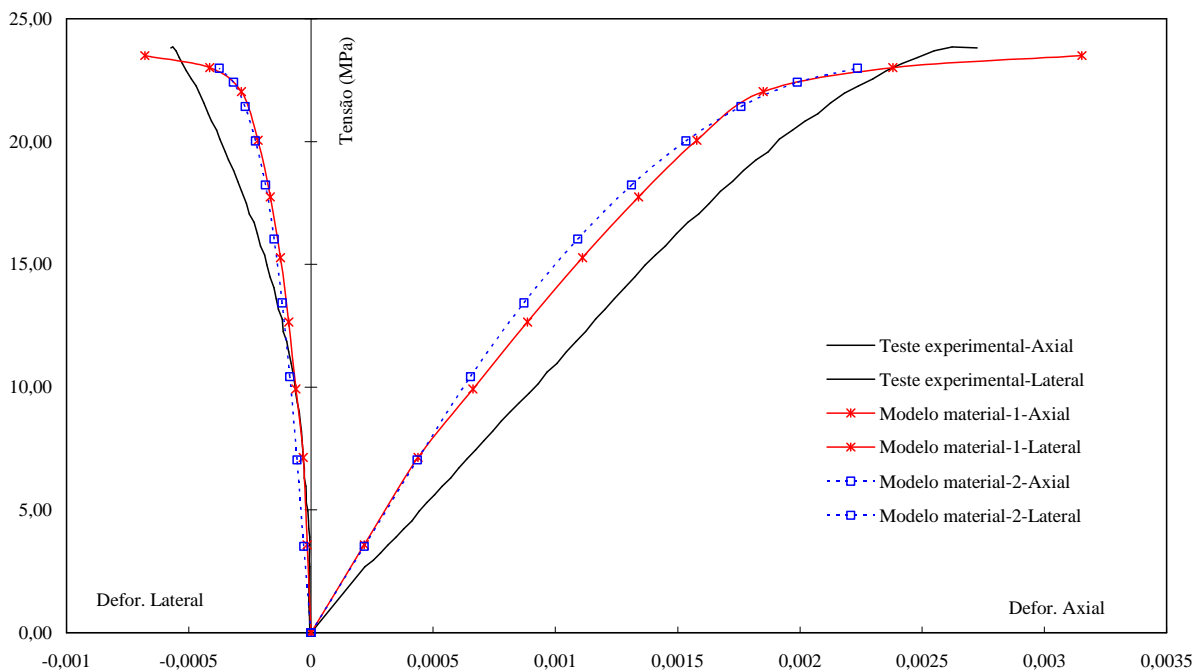
Nas simulações foram empregados oito passos de carga designados por LC1-1 até LC1-8. No passo LC1-1 aplicou-se 30% do deslocamento imposto ao bloco. O incremento posterior foi de 10% até completar o deslocamento imposto ao bloco de 0,43 mm. A Figura 18 apresenta o gráfico da distribuição das tensões na direção  $y$  (eixo  $x$ ), em função da altura da unidade (eixo  $y$ ), para diferentes incrementos de deslocamento imposto.





**Figura 18:** Distribuição das tensões na direção ( $\sigma_{yy}$ ) em função da altura do bloco.

No intuito de comparar as respostas numéricas e experimentais, traçou-se o gráfico da tensão e deformação axial e lateral do bloco designado por 10. A Figura 19 apresenta os resultados teóricos e experimentais, considerando duas situações de contato, dita 1 e 2. Nota-se que, para as deformações laterais, houve uma boa aproximação até, aproximadamente, 50% da resistência última. Após este ponto as deformações foram maiores nos experimentos. Para as deformações axiais não conseguiram reproduzir os resultados experimentais. A rigidez medida nos modelos teóricos foi maior que a experimental. Caso se reduza o valor do módulo de elasticidade no modelo teórico, não existe uma equivalência entre a tensão última obtida numericamente com a resistência à compressão experimental.



**Figura 19:** Comparação entre o modelo teórico e numérico para o bloco 10.

A Tabela 14 apresenta os resultados das deformações e tensões nas direções x e y, juntamente com o coeficiente de Poisson calculado para as diferentes proporções entre o deslocamento aplicado e o imposto ( $k$ ). Nas análises efetuadas verificou-se que os resultados de tensão vertical última foram próximos da resistência à compressão do bloco.

**Tabela 14:** Resultado obtido da simulação numérica para diferentes proporções entre o deslocamento aplicado e o imposto ( $k$ ).

Modelo material 1 e situação 1					
$k$	$\epsilon_{xx}$	$\epsilon_{yy}$	$\sigma_{xx}$	$\sigma_{yy}$	Poisson
0,1	0,00001549	0,0002183	0,43	3,58	0,07
0,2	0,00003124	0,0004384	0,88	7,14	0,07
0,3	0,00006100	0,0006628	1,49	9,93	0,09
0,4	0,00009120	0,0008861	2,12	12,66	0,10
0,5	0,0001245	0,0011110	2,72	15,28	0,11
0,6	0,0001658	0,0013400	3,27	17,75	0,12
0,7	0,0002162	0,0015780	3,81	20,06	0,14
0,8	0,0002842	0,0018500	4,50	22,04	0,15
0,9	0,0004142	0,0023800	6,37	23,01	0,17
1,0	0,0006796	0,0031530	7,47	23,51	0,22

Nota-se que, nos resultados de deformação axial e lateral, as modificações das propriedades mecânicas tais como a coesão, o ângulo de atrito e a dilatação produzem maiores diferenças nas deformações para  $k$  acima de 0,8.

#### 4 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados experimentais pode-se concluir o que segue abaixo.

As variações nos resultados de resistências à compressão dos blocos vibro-compactados foram consideradas pequenas quando comparado com valores de resistência de concretos convencionais obtidos na literatura em geral (não-vibrados), demonstrando uma boa qualidade na produção das unidades.

As deformações de compressão ( $\sigma_c$ ) e tração ( $\sigma_t$ ) últimas apresentaram uma dispersão de valores elevada em função da propagação da fissura em relação ao ponto de medição (localização do lvdt). Por consequência da propagação da fissura em relação ao ponto de medição, verificou-se um alto coeficiente de variação nos resultados experimentais. Considerando os resultados médios das deformações obtidas nos ensaios, observou-se que os experimentos apresentaram uma variação média do coeficiente de Poisson da ordem dos 60% e para o módulo de elasticidade esta variação foi de 13%.

A resistência à tração característica ( $f_{ik}$ ) foi 1,91 MPa, calculada para um nível de confiança de 95%. A deformação de tração média na ruptura foi de 0,001214, ou seja, próxima da deformação de tração máxima medida no bloco. Pelos resultados experimentais a resistência à tração direta pode ser aproximada como 0,58 vezes a resistência à tração na flexão.

Houve uma boa aproximação dos resultados numéricos com os experimentais em termos de previsão da resistência última. O modelo proposto permitiu obter parâmetros suficientes para reproduzir o comportamento numérico dos blocos de concreto vibro-compactados a seco. As deformações laterais obtidas no modelo numérico conseguiram representar os resultados experimentais até, aproximadamente, 50% da resistência última. Nas deformações axiais não se conseguiu reproduzir os resultados experimentais, pois a rigidez medida nos modelos teóricos foi maior que a experimental. A mudança de parâmetros como o módulo de elasticidade no modelo teórico não produziu uma equivalência entre a tensão última obtida numericamente com a resistência à compressão experimental.

#### 5 BIBLIOGRAFIA

- [1] HILSDORF, H.K., “Investigation into the failure mechanism of brick masonry loaded in axial compression”, In: *Proceedings of International Conference on Masonry Structural Systems*, pp. 34-41, Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 1969.
- [2] HENDRY, A. W. *Structural brickwork*. Edited by Halsted Press book. John Wiley & Sons. New York, USA. ISBN 0-470-27109-4, 1981.

- [3] HEGEMEIR, G. A., KRISHNAMOORTHY, G., NUMM, R.O. AND MOORTHY, T.V, “Prism tests for the compressive strength of concrete masonry”, In: *Proceedings of North American Masonry Conference*, University of Colorado, Boulder, August, pp. 181-1 – 18-7, 1978.
- [4] HAMID, A. A. AND DRYSDALE, R. G, “Behavior of concrete block masonry under axial compression” *American Concrete Institute Journal*, v. 76, n 6, pp. 707-721, 1979.
- [5] KHOO, C. L. A, *failure criterion for brickwork in axial compression*, Thesis presented to University of Edinburgh, University of Edinburgh, Scotland, 1972.
- [6] ATKINSON, R. H., NOLAND, J. L., ABRAMS, D. P. AND MCNARY S., “A deformation failure theory for stack-bond brick masonry prisms in compression”, In: *Proceeding 3rd North America Masonry Conference*, Boulder, Col.,TMS, Paper 18, 1985.
- [7] ATKINSON, R. H.; NOLAND, J. L. AND ABRAMS, D. P., “A deformation failure theory for stack-bond brick masonry prism in compression”, In: *Proceedings 7th International Brick Masonry Conference*, Melbourne, February, v.1, pp. 577-592, 1985.
- [8] CHEEMA, T. S. AND KLINGNER R. E., “Compressive Strength of Concrete Masonry Prism”, *American Concrete Institute - ACI Structural Journal*, January, v. 83, n. 1, pp. 88-97, 1986.
- [9] Afshari, F. and Kaldjian M. J., “Finite element analysis of concrete masonry prisms”, *American Concrete Institute- ACI Materials Journal*, v. 86, n. 5, pp. 525-530, Set/Out, 1989.
- [10] VERMELTFOORT A.T., *Brick-mortar interaction in masonry under pressure*, PhD thesis, Eindhoven University of Technology, The Netherlands, 2005.
- [11] KNUTSON, H. H., “The stress-strain relationship for Masonry”, *Masonry International- Journal of the British Masonry Society*, v. 7, n. 1, pp. 31-33, 1993.
- [12] MOHAMAD, G., *Comportamento mecânico na ruptura de prismas de blocos de concreto*, Tese de M. Sc, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, SC, Brasil, 1998,
- [13] MOHAMAD, G., NETO, A.B. da S.S., PELISSER, F.; LOURENÇO, P.B., ROMAN, H.R., “Caracterização mecânica das argamassas de assentamento para alvenaria estrutural – Previsão e modo de ruptura”, *Revista Matéria*, v. 14, n. 2, pp. 824-844, 2009.
- [14] MOHAMAD, G., LOURENÇO, P.B., ROMAN, H.R., “Mechanics of hollow concrete block masonry prisms under compression: Review and Prospects”, *Cement and Concrete Composite*, v. 29, pp. 181-192, 2007.
- [15] NBR 6136. “Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Requisitos” - ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2007.
- [16] SHRIVE, N. G. “Compressive strength and strength testing of masonry” In: *Proceeding 7 IBMAC*, Eds. T. McNeilly and J. C. Scrivener, Melbourne, BDRI, pp. 699-710, 1985.
- [17] SHRIVE, N. G. AND EL-RAHMAN., “Understanding the cause of cracking in concrete: A diagnostic aid”, *Journal Concrete International*, v. 7, n. 5, May, 1985.
- [18] EUROPEAN STANDARD 772-2. “*Specification for masonry units- Part 2: Determination of percentage area of voids in aggregate concrete masonry units (by paper indentation)*”, 1998.
- [19] NBR 12118, “Bloco vazado de concreto simples para alvenaria – Determinação da absorção de água, teor de umidade e área líquida”, *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, Rio de Janeiro, 1991.
- [20] NBR 8522, “Concreto - determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão e deformação”, *Associação Brasileira de Normas Técnica*, Rio de Janeiro, 2003.

- [21] EUROPEAN STANDARD 772- , “*Specification for masonry units- Part 1: Determination of compressive strength*”, 2000.
- [22] COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. CEB-FIP Model Code, 1990.
- [23] DIANA. “Finite element code: user’s manual – release 9”. TNO Building and Construction Research, Delft.