

# ENSAIO COMPRESSÃO: INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA SEÇÃO TRANSVERSAL NO ESTADO TRIAXIAL DE TENSÃO EM CORPOS DE PROVA SUJEITOS A ENSAIOS DE COMPRESSÃO<sup>1</sup>

*Alysson Lucas Vieira<sup>2</sup>*  
*Fábio Fernandes Veríssimo<sup>3</sup>*  
*Janes Landre Junior<sup>4</sup>*  
*Márcio Eduardo Silveira<sup>5</sup>*

## Resumo

A fim de manter a integridade estrutural de peças e componentes maciços submetidos a esforços de compressão, é necessário avaliar a influência da forma geométrica no estado triaxial de tensão sob este tipo de esforço. Desta forma, o objetivo deste trabalho será avaliar a influência da forma da seção transversal de corpos de provas submetidos à compressão no comportamento da curva força x deslocamento e conseqüentemente no estado triaxial de tensão. A análise do estado de tensão dos corpos submetidos a compressão será executada posteriormente em um programa de elementos finitos, com código comercial com formulação não-linear implícita. Os resultados obtidos com os modelos numéricos, serão comparados com ensaios experimentais de compressão, realizados em três tipos de seções transversais distintas.

**Palavras-chave:** Compressão; Tensão; Elementos finitos.

## COMPRESSION TEST: INFLUENCE OF CROSS SECTION GEOMETRY IN THE TRIAXIAL STRESS STATE ON SPECIMENS UNDER COMPRESSION TESTS

## Abstract

In order to maintain the structural integrity of parts and components subjected to compressive loads, it is necessary to evaluate the geometrical shape influence on the triaxial state stress under this type of loads. Thus, the objective of this study is to evaluate the influence of specimen's cross section submitted to the compression on the curve force versus displacement and consequently the state of triaxial stress. The analysis of the stress state of specimen subjected to compression will be performed later in a finite elements program with commercial code with non-linear implicit formulation. The results obtained with the numerical models are compared with experimental compression performed on three distinct types of cross sections.

**Key words:** Compression; Stress; Finite elements.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

<sup>2</sup> *Engenheiro Mecânico, Mestrando, PUC-MG, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

<sup>3</sup> *Engenheiro Mecânico, Mestrando, PUC-MG, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

<sup>4</sup> *Engenheiro Mecânico, Doutor. Docente, PUC-MG, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

<sup>5</sup> *Engenheiro Mecânico, Doutor. Docente, UFSJ, São João Del Rey, MG, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

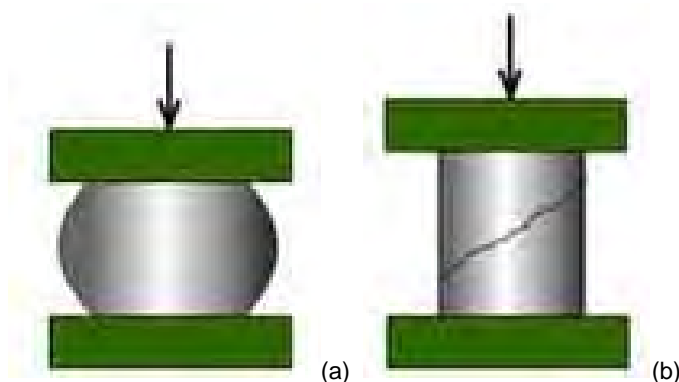
Em se tratando de projeto ou manufatura para a engenharia, é de suma importância o conhecimento das propriedades mecânicas dos materiais, isto é, o conhecimento do comportamento do material. Para que se possa prever esse comportamento em condições de trabalho, esses parâmetros são determinados através de ensaios mecânicos.<sup>(1)</sup>

Alguns textos tratam o comportamento na compressão pelos parâmetros do ensaio de tração, que é um dos ensaios para a obtenção da curva tensão x deformação mais utilizado,<sup>(2)</sup> mas a resposta dos materiais, quando submetidos à compressão, tende a ser diferente.<sup>(1)</sup>

Existem seguimentos onde se faz necessário o ensaio de compressão, como na indústria de construção mecânica. Esse ensaio fornece importantes dados de carregamentos para estruturas submetidas à compressão pura,<sup>(3)</sup> como bases de máquinas.

O ensaio é semelhante ao de tração, porém a força é compressiva e o corpo de prova se contrai ao longo da direção da tensão.<sup>(2)</sup>

O ensaio de compressão é mais usual em materiais frágeis, como o concreto, sendo pouco utilizado em metais. Os metais, por apresentarem geralmente comportamento dúctil, não se rompem ao final do ensaio, impedindo assim, a verificação do limite de ruptura a compressão.



**Figura 1.** (a) Ensaio de compressão material Dúctil; (b) ensaio de compressão em material Frágil.<sup>(1)</sup>

Geralmente os ensaios de compressão são executados em corpos de prova circular, padrões,<sup>(4)</sup> mas atualmente encontramos várias formas, diferentes da circular, utilizadas para sustentação de equipamentos, submetidas à compressão. Esta variação de forma pode influenciar no comportamento da curva tensão x deformação, estabelecendo informações errôneas para o projeto. Assim se faz necessário a verificação do ensaio em outras seções transversais.

**TABLE 2 Suggested Solid Cylindrical Specimens<sup>A</sup>**

NOTE 1—Metric units represent converted specimen dimensions close to, but not the exact conversion from inch-pound units.

| Specimens | Diameter    |            | Length      |           | Approx<br>L/<br>D Ra-<br>tio |
|-----------|-------------|------------|-------------|-----------|------------------------------|
|           | in.         | mm         | in.         | mm        |                              |
| Short     | 1.12 ± 0.01 | 30.0 ± 0.2 | 1.00 ± 0.05 | 25. ± 1.  | 0.8                          |
|           | 0.50 ± 0.01 | 13.0 ± 0.2 | 1.00 ± 0.05 | 25. ± 1.  | 2.0                          |
| Medium    | 0.50 ± 0.01 | 13.0 ± 0.2 | 1.50 ± 0.05 | 38. ± 1.  | 3.0                          |
|           | 0.80 ± 0.01 | 20.0 ± 0.2 | 2.38 ± 0.12 | 60. ± 3.  | 3.0                          |
|           | 1.00 ± 0.01 | 25.0 ± 0.2 | 3.00 ± 0.12 | 75. ± 3.  | 3.0                          |
|           | 1.12 ± 0.01 | 30.0 ± 0.2 | 3.38 ± 0.12 | 85. ± 3.  | 3.0                          |
| Long      | 0.80 ± 0.01 | 20.0 ± 0.2 | 6.38 ± 0.12 | 160. ± 3. | 8.0                          |
|           | 1.25 ± 0.01 | 32.0 ± 0.2 | 12.50 min   | 320 min   | 10.0                         |

<sup>A</sup> Other length-to-diameter ratios may be used when the test is for compressive yield strength.

**Figura 2.** Tabela de corpos de prova padrões.<sup>(4)</sup>

O entendimento do comportamento a compressão se faz de grande importância, principalmente nos projetos envolvendo deformação plástica.<sup>(1)</sup>

Além do ensaio físico, outra ferramenta que pode ser utilizada para se comparar os resultados do ensaio de compressão é a utilização de um modelo numérico por elementos finitos.

As ferramentas de elementos finitos têm em sua grande vantagem a antecipação dos resultados, por meios computacionais, de problemas físicos, auxiliando assim o projeto, antecipando possíveis falhas e diminuindo o tempo de provas físicas e de construção de protótipos, além de se poder estudar os detalhes dos ensaios.

O objetivo do presente trabalho foi verificar a influência da seção transversal na curva força x deslocamento no ensaio de compressão físico e virtual e de metal, e de metal, consequência o estado triaxial de tensões na seção transversal do corpo de prova

Foram utilizados três tipos de seções diferentes: circular, quadrada e sextavada e posteriormente os resultados foram confrontados.

## 2 ENSAIO EXPERIMENTAL

Foram executados ensaios de compressão em 3 amostras em metal de seções transversais distintas, em máquina universal EMIC (Figura 3), com velocidade de 10 mm/min e limite de carga de 180 KN. O limite de carga foi estabelecido para segurança da máquina, mas não prejudicou o ensaio, pois o que se busca no presente trabalho é a verificação da curva de Força x Deslocamento e não do limite de resistência a compressão.



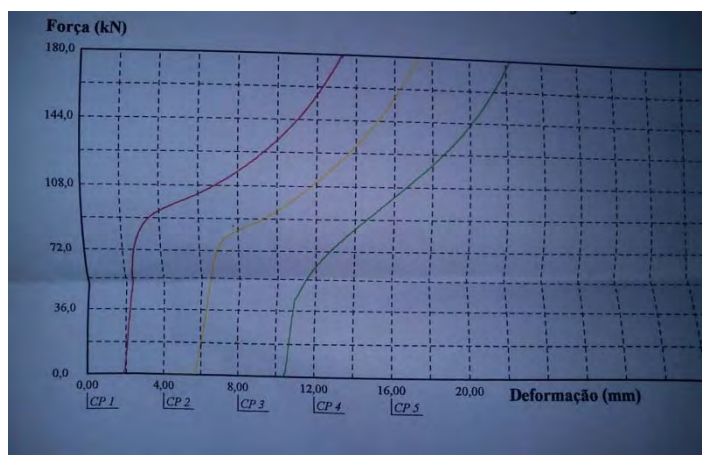
**Figura 3.** Ensaio de compressão.

As seções transversais ensaiadas foram a circular (por ser a seção empregada nos ensaios de compressão e assim serve como base de comparação) a quadrada e a sextavada, com altura de 20 mm e área de seção aproximada de 115 mm<sup>2</sup> (Figura 4).



**Figura 4.** Corpos de provas, seções transversais.

Com o ensaio físico foram extraídos os dados de Força, através de célula de carga e deslocamento (Figura 5).



**Figura 5.** Saída de resultados máquina de ensaio de compressão.

### 3 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

A fim de se estudar com maiores detalhes a influência da seção transversal, realizou-se uma simulação numérica do ensaio de compressão, baseado em técnicas de elementos finitos de formulação implícita não-linear. O *software* utilizado foi Abaqus®,<sup>(5)</sup> e as amostras foram modeladas com elementos hexaédricos.

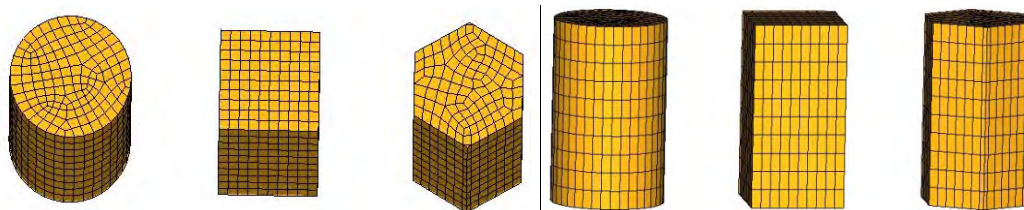


Figura 6. Corpos de prova virtuais.

A análise consistiu em deslocar uma placa indeformável modelada com elementos 2D, pressionando os corpos de prova com o mesmo deslocamento obtido na prova prática (Figura 7).

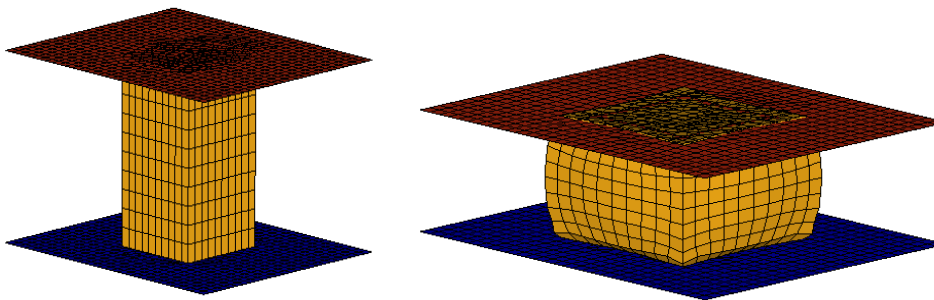


Figura 7. Simulação Numérica do ensaio de compressão.

### 4 RESULTADOS

Após a realização das provas, foram extraídas as curvas de Força x Deslocamento para as três seções, conforme mostra o gráfico da Figura 8.

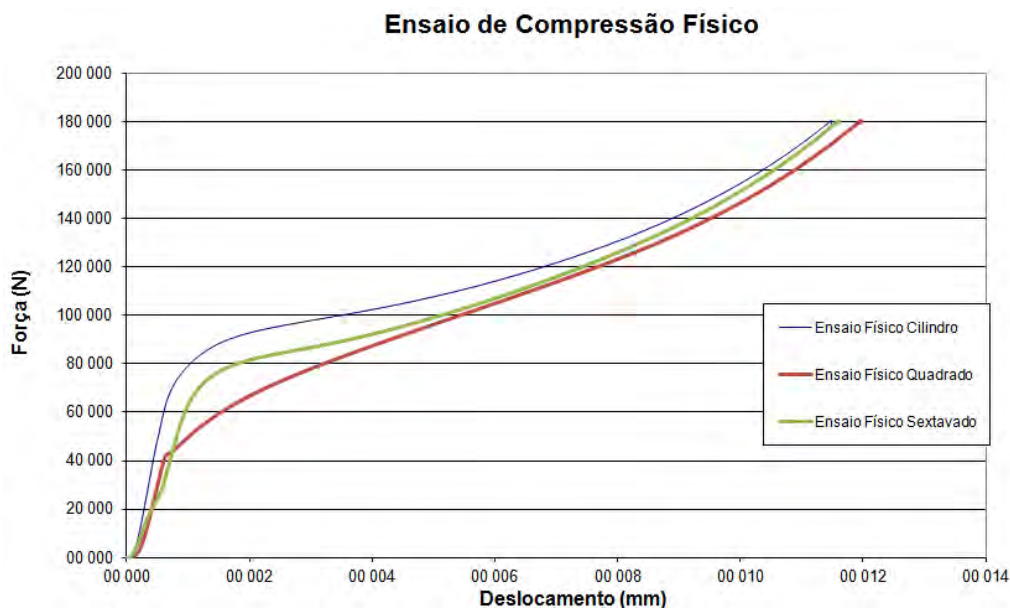
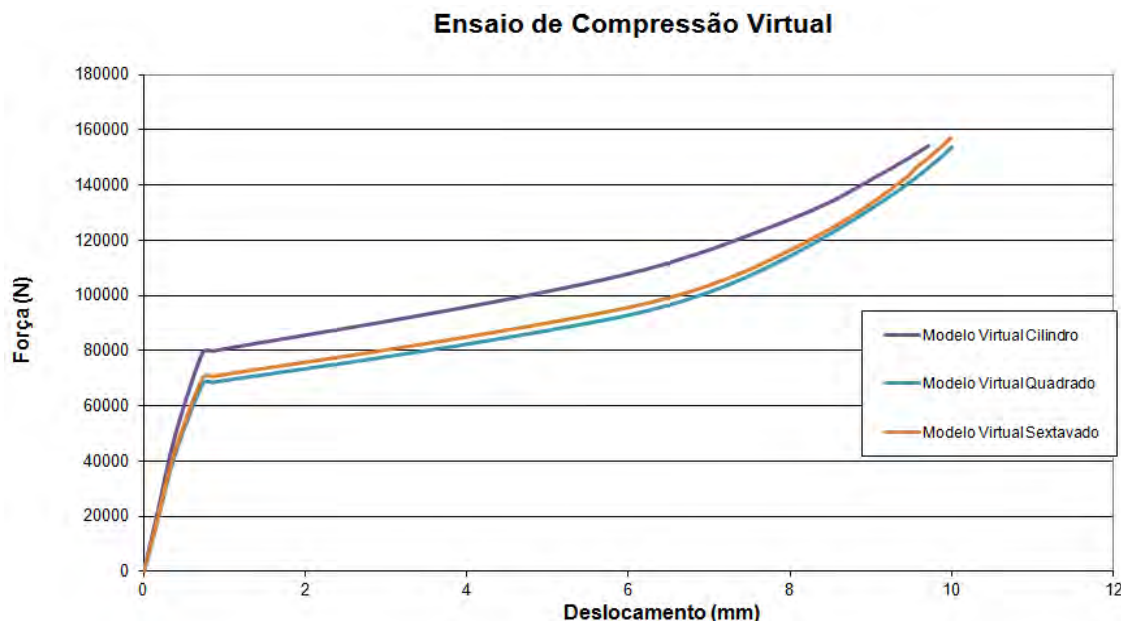


Figura 8. Curvas Força x Deslocamento do ensaio físico para três seções diferentes.



Pode-se observar que o ensaio para a seção transversal circular obteve maior força, com isso maior resistência à compressão. Como os corpos de provas tem as mesmas áreas de seções transversais, era de se esperar um comportamento semelhante sob o ensaio de compressão, uma vez que a tensão é a mesma. Porém, como pode-se observar na Figura 8, o forma da seção transversal influenciou consideravelmente na curva do material.

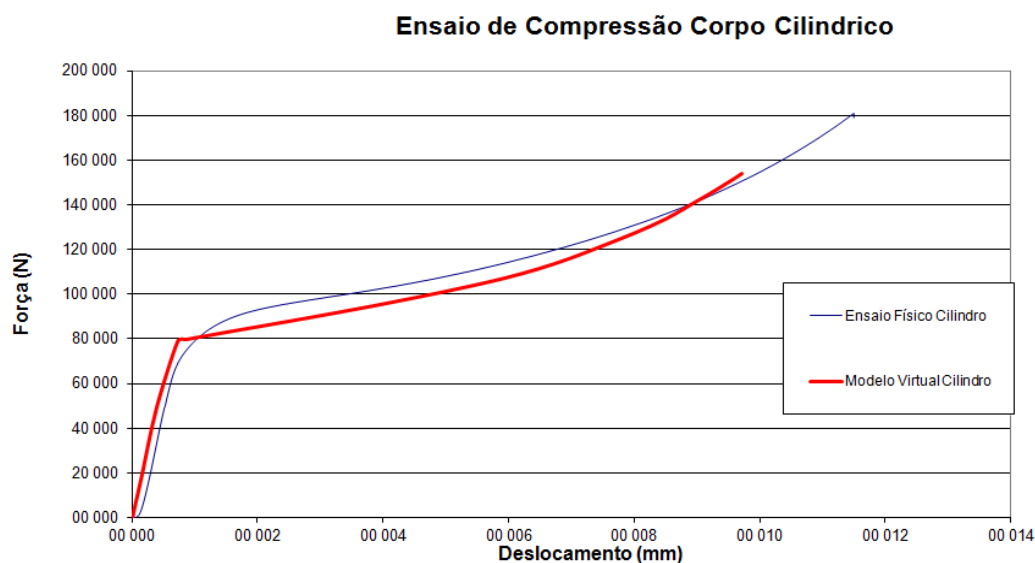
Abaixo, a Figura 9 mostra o comparativo para as seções transversais feito por simulação numérica.



**Figura 9.** Curvas Força x Deslocamento ensaio Virtual.

Assim como no ensaio físico, nota-se uma maior resistência para a seção circular. Porém, as curvas apresentam o mesmo padrão de comportamento.

Comparando o ensaio físico com o virtual, obtemos uma diferença considerável entre as curvas (Figuras 10, 11 e 12).



**Figura 10.** Comparativo Ensaio compressão Físico e Virtual – Corpo Cilíndrico.

### Ensaio de Compressão Corpo Quadrado

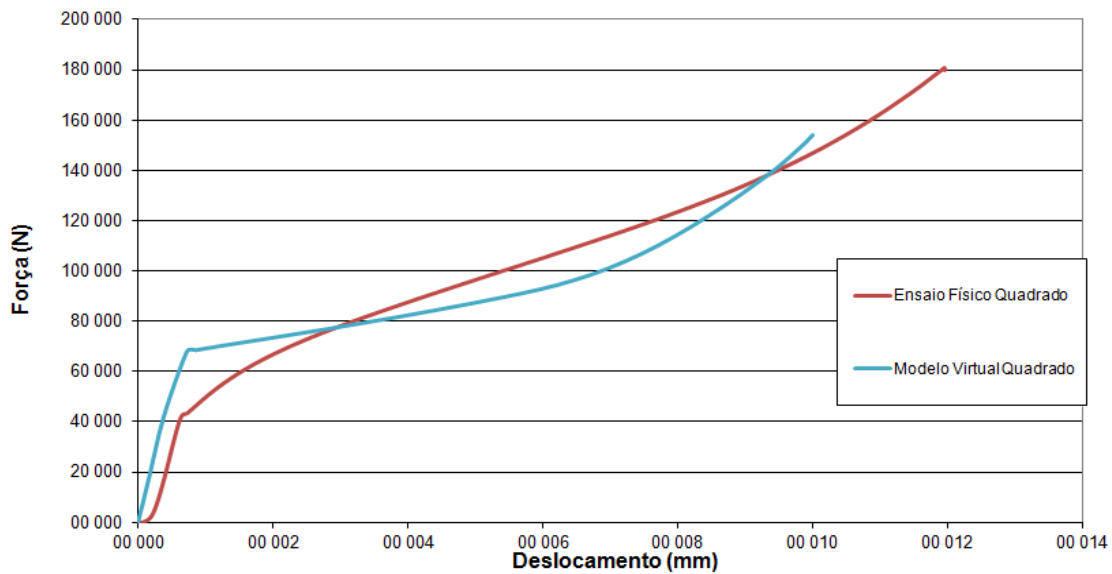


Figura 11. Comparativo Ensaio compressão Físico e Virtual – Corpo Quadrado.

### Ensaio de Compressão Corpo Sextavado

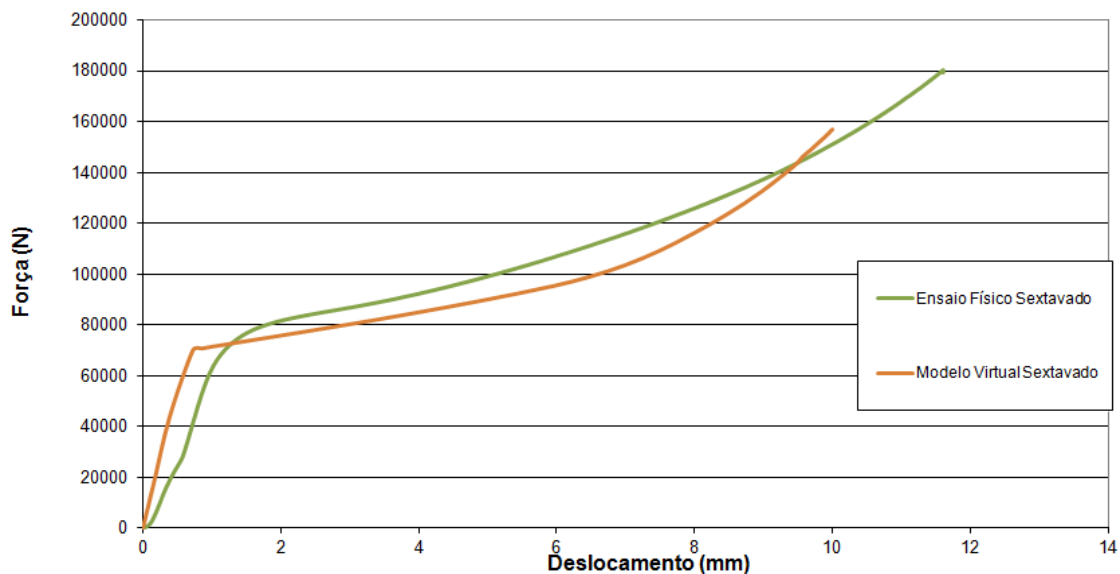


Figura 12. Comparativo Ensaio compressão Físico e Virtual – Corpo Sextavado.

A diferença encontrada nos gráficos se deve provavelmente a alguns problemas ocorridos no ensaio físico, como a falta de extensômetro e aplicação de bases na máquina de compressão, que foram marcados pelo corpo de prova e a torção ocorrida nos corpos de prova. No modelo numérico, as bases foram consideradas indeformáveis, enquanto no ensaio físico, estas bases se deformaram plasticamente (Figura 13c). Esta deformação permanente das bases pode ter alterado as condições de atrito e deslizamento entre as amostra e as bases.



**Figura 13.** Ensaio de compressão Físico – (a) Final ensaio de tração; (b) corpos de prova após os ensaios; e (c) placas usadas para proteger a máquina.

Apesar da diferença entre os ensaios físicos e virtuais, pode-se constatar o mesmo comportamento para ambos, a curva para o corpo cilíndrico com maior carga, seguida do corpo sextavado e depois do corpo quadrado, verificando assim com duas ferramentas distintas essa influência da seção transversal.

Comparando o valor final de força das curvas, com o valor da seção circular em uma análise qualitativa (Tabela 1).

**Tabela 1.** Comparativo de força entre as seções transversais

| Comparativo de Força Final de Compressão Entre as Seções – Ensaio Físico  |                        |             |           |
|---|------------------------|-------------|-----------|
|   | Força Seção Cilíndrica | Força Seção | Diferença |
| Quadrada  | 180680 N               | 171570 N    | 5.0 %     |
| Sextavada   | 180680 N               | 177590 N    | 1.71 %    |
| Comparativo de Força Final de Compressão Entre as Seções – Ensaio Virtual |                        |             |           |
|   | Força Seção Cilíndrica | Força Seção | Diferença |
| Quadrada  | 154158 N               | 146607 N    | 4.8 %     |
| Sextavada   | 154158 N               | 152124 N    | 1.32 %    |

O quadro mostra qualitativamente a mesma tendência no que se diz respeito ao se comparar a força obtida em cada ensaio de compressão.

Para o cálculo das tensões nos 3 eixos,  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  e  $\sigma_{zz}$ , para os corpos de prova físicos, será utilizada as seguintes equações:

Para  $\sigma_{zz}$ , conforme Equação 1 tem-se:

$$\sigma_{zz} = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Onde  $\sigma_{zz}$  é a tensão no eixo Z, F é a força axial e A a área da seção transversal.



Para os cálculos de  $\sigma_{xx}$  e  $\sigma_{yy}$ , usa-se a Equação 2, proposta por Hollomon:

$$\sigma = k \times \varepsilon^n \quad (2)$$

Onde  $\sigma$  é a tensão no eixo que se deseja encontrar,  $k$  é constante,  $\varepsilon$  é a deformação no sentido do eixo e  $n$  é o encruamento do material.

A Figura 15 mostra as direções utilizadas para os eixos X e Y, o eixo Z é o axial do corpo de prova.

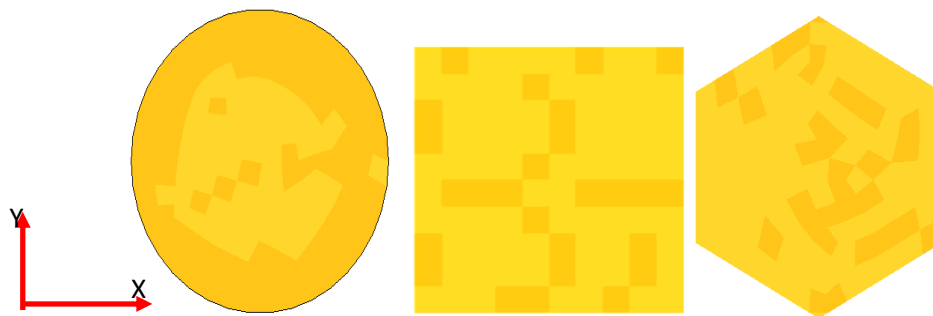


Figura 15. Posição do eixo das seções transversais.

A Tabela 2 mostra o valor inicial e final das dimensões da seção transversal dos corpos de prova do ensaio físico.

Tabela 2. Dimensões das seções dos corpos de prova

| Corpo      | Dimensão Inicial |        | Dimensão final |        | Deformação |        |
|------------|------------------|--------|----------------|--------|------------|--------|
|            | X (mm)           | Y (mm) | X (mm)         | Y (mm) | X          | Y      |
| Cilíndrico | 12.2             | 12.2   | 17.63          | 17.63  | 0.4454     | 0.4454 |
| Quadrado   | 10               | 10     | 15.05          | 15.05  | 0.505      | 0.505  |
| Sextavado  | 11               | 12.6   | 16.3           | 17.45  | 0.4818     | 0.3849 |

Com os dados das deformações podemos utilizar as fórmulas para o cálculo das tensões e assim obtendo os resultados da Tabela 3.

Tabela 3. Resultados de tensões nos 3 eixos dos corpos de prova Físico

| Corpo      | Tensões             |                     |                     |
|------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|            | $\sigma_{xx}$ (MPa) | $\sigma_{yy}$ (MPa) | $\sigma_{zz}$ (MPa) |
| Cilíndrico | 334.15              | 334.15              | 571.826             |
| Quadrado   | 336.06              | 336.06              | 618.536             |
| Sextavado  | 353.77              | 300.53              | 547.787             |

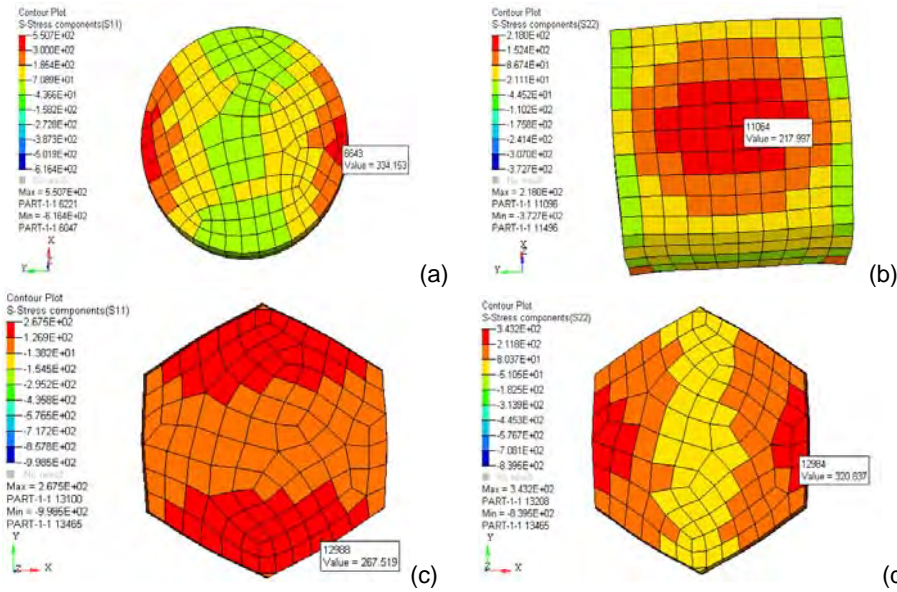
As tensões iguais nos corpos quadrados e cilíndrico se deve a forma do corpo de prova, pois ficam com a mesma região nesses 2 sentidos, diferente para o corpo de prova sextavado.

A Tabela 4 mostra os resultados de tensões na seção transversal do modelo numérico.

Tabela 4. Resultados de tensões nos 3 eixos dos corpos de prova Virtuais

| Corpo      | Tensões             |                     |                     |
|------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|            | $\sigma_{xx}$ (MPa) | $\sigma_{yy}$ (MPa) | $\sigma_{zz}$ (MPa) |
| Cilíndrico | 334.15              | 334.15              | 930.0               |
| Quadrado   | 218.0               | 218.0               | 757.0               |
| Sextavado  | 267.52              | 320.0               | 950.0               |

A Figura 16 apresenta as tensões obtidas nos modelos numéricos.



**Figura 16.** Tensões modelos numéricos (a)  $\sigma_{xx}$  e  $\sigma_{yy}$  corpo cilíndrico; (b)  $\sigma_{xx}$  e  $\sigma_{yy}$  corpo quadrado; (c)  $\sigma_{xx}$  corpo sextavado; e (d)  $\sigma_{yy}$  corpo sextavado.

Verificando a Tabela 4 e a Figura 16, não se nota o mesmo comportamento do ensaio físico, isso provavelmente pelas dificuldades encontradas no ensaio físico, já relatadas anteriormente, dificultando assim a melhor correlação com o modelo numérico. O valor de tensão igual do cilindro se deve ao fato dessa tensão ser usada para calibrar o parâmetro de encruamento.

## 5 CONCLUSÃO

O objetivo principal desse trabalho é a verificação da influência da seção transversal nos ensaios de compressão. Diferente de um ensaio de tração onde geralmente o estado de tensão pode ser aproximado para um estado uniaxial, em um ensaio de compressão temos um ensaio triaxial de tensão, onde a forma pode influenciar consideravelmente no escoamento e na evolução plástica do material.

Neste trabalho, foi usado um metal de média resistência para os ensaios. Porém, as bases da máquina de ensaio de compressão também foram feitas de material de resistência semelhante, o que causou deformação plástica nestas bases, mascarando os resultados finais do ensaio físico. Para futuros trabalhos, os ensaios serão feitos em amostras de metal menos resistente, tal como o alumínio. A falta de extensômetro pede cautela nas avaliações dos resultados de deformação, uma vez que a deformação medida pela máquina é a distância percorrida pelo servomecanismo.

A simulação numérica se mostrou muito útil na avaliação geral dos resultados, sendo possível avaliar o estado de tensão triaxial presente nos três tipos de amostras. As condições ideais de contato (bases indeformadas e atrito de Coulomb), levaram a um resultado com menos influência das condições de contorno existente no ensaio físico.

## REFERÊNCIAS

- 1 Portal CIMM, Centro de Informação Metal Mecânica. Disponível em: [http://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir\\_noticia/7242-a-utilizacao-do-ensaio-de-compressao](http://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/7242-a-utilizacao-do-ensaio-de-compressao) e [http://www.cimm.com.br/portal/noticia/material\\_didatico/6549#.UTz0vzA3tLk](http://www.cimm.com.br/portal/noticia/material_didatico/6549#.UTz0vzA3tLk)> Acesso em: 03 Março 2013
- 2 CALLISTER Jr., W.D., Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução – LTC. – Sétima Edição, 2008
- 3 CHAN, T. M., GARDNER, L.; Development of design rules for elliptical hollow sections – Technical Note, 2009. Disponível em: <http://www.istructe.org/technical/files/young/TakMingChan.pdf>, Acesso em: 07 Março 2013
- 4 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. E9 – Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature ASTM, USA, 2003.
- 5 ABAQUS/Standard User Manual, Version 6.10, 2011.