

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PROJETO, DIMENSIONAMENTO E TESTES DE UM DISPOSITIVO PARA ENSAIOS  
DE COMPRESSIBILIDADE EM ELASTÔMEROS

por

Andrés Heemann Pereira Neto

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Novembro de 2020

## DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

### CIP - Catalogação na Publicação

Pereira Neto, Andrés Heemann  
PROJETO, DIMENSIONAMENTO E TESTES DE UM DISPOSITIVO  
PARA ENSAIOS DE COMPRESSIBILIDADE EM ELASTÔMEROS /  
Andrés Heemann Pereira Neto. -- 2020.  
15 f.  
Orientador: Rogério José Marczak.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2020.

1. Borracha. 2. Ensaio mecânico. 3. Projeto. I.  
Marczak, Rogério José, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Andrés Heemann Pereira Neto

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mário Roland Sobczyk Sobrinho

Coordenador(a) do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Rogério José Marczak

Comissão de Avaliação:

Prof. Rogério José Marczak

Prof. Jakson Manfredini Vassoler

Prof. Ignacio Iturrioz

Porto Alegre, Dezembro de 2020

## AGRADECIMENTOS

Um agradecimento especial ao Grupo de Mecânica Aplicada, GMAp, e seus componentes, que desde o começo do curso foram incansáveis na arte de ensinar, também ao Laboratório de Metalurgia Física.

Heemann Pereira Neto, Andrés. Projeto, dimensionamento e testes de um dispositivo para ensaios de compressibilidade em elastômeros. 2020. 27 páginas. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

## **RESUMO**

O ensaio de compressibilidade é um dos ensaios de caracterização constitutiva de elastômeros, juntamente com os ensaios de tração uni e bi-axial, de cisalhamento e de compressão. Este ensaio possibilita a determinação direta do módulo de compressibilidade do material, e sua magnitude permite inferir sobre o uso de modelos constitutivos incompressíveis ou compressíveis para um dado material. Dentre as variações deste ensaio, o de compressão confinada é a mais comum. No entanto, é um ensaio raramente utilizado devido à necessidade de um aparato que suporte as altas pressões envolvidas, e a manufatura de corpos de prova cilíndricos. Este trabalho apresenta o projeto, construção e testes de um dispositivo para realização do ensaio de compressibilidade. O dispositivo foi calculado para suportar cargas típicas com segurança e testado para duas amostras de borracha, uma compressível e outra incompressível. O equipamento apresentou desempenho desejado e está sendo incorporado ao Grupo de Mecânica Aplicada (GMAp) da UFRGS.

**PALAVRAS-CHAVE:** Elastômeros, Ensaios mecânicos, Compressibilidade, Não linearidade.

Heemann Pereira Neto, Andrés. Design, dimensioning and testing of a device for compressibility tests on elastomers. 2020. 27 pages. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

## ABSTRACT

The compressibility test is one of the constitutive characterization tests of elastomers, together with the uni- and bi-axial tensile, shear and compression tests. This test allows the direct determination of the material's compressibility module, and its magnitude allows inferring about the use of incompressible or compressible constitutive models for a given material. Among the variations of this test, the one of confined compression is the most common. However, it is a test rarely used due to the need for an apparatus that withstands the high pressures involved, and the manufacture of cylindrical specimens. This work presents the design, construction and testing of a device to perform the compressibility test. The device was calculated to safely support typical loads and tested for two rubber samples, one compressible and the other incompressible. The equipment presented the desired performance and is being incorporated into the Applied Mechanics Group (GMAp) at UFRGS.

**KEYWORDS:** Elastomers, Mechanical tests, Compressibility, Non-linearity.

## Lista de Símbolos

### Caracteres Romanos

$C_{ij}$	Constante constitutiva	
$D_k$	Constante constitutiva	
$E$	Modulo de elasticidade	[N/m <sup>2</sup> ]
$E_{ij}$	Matriz de deformações global	
$f$	Função	
$G$	Modulo de cisalhamento	[N/m <sup>2</sup> ]
$g$	Função	
$h$	Altura instantânea	[m]
$h^0$	Altura inicial	[m]
$I_i$	Invariantes da deformação	
$J$	Jacobiano da deformação	
$K$	Modulo de compressibilidade	[N/m <sup>2</sup> ]
$T_{ij}$	Tensor tensão	[N/m <sup>2</sup> ]
$W$	Energia de deformação por unidade de volume	[J/m <sup>3</sup> ]

### Caracteres gregos

$\sigma$	Tensor de Cauchy-Green	[N/m <sup>2</sup> ]
$\varepsilon$	Tensor deformação	
$\mu$	Modulo de cisalhamento	[N/m <sup>2</sup> ]
$\lambda$	Alongamento	[m]
$\nu$	Coefficiente de Poisson	

### Símbolos e operadores matemáticos

$\sum_{ij}$	Operador somatório	
$\frac{\partial}{\partial x}$	Operador derivada com respeito a x	
$ \cdot $	Determinante	

### Síglas

GMAP	Grupo de Mecânica Aplicada
LAMEF	Laboratorio de Metalurgia Física

## **Sumário**

1 INTRODUÇÃO	1
1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
1.3 MODELO POLINOMIAL	2
1.4 ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO DE ELASTÔMEROS	3
2 PROJETO DO DISPOSITIVO	4
2.1 Construção do equipamento	5
2.2 Modelagem computacional	5
2.3 Detalhamento do projeto	7
3 DISPOSITIVO FINALIZADO	10
4 TESTES EXPERIMENTAIS	11
4 RESULTADOS	12
5 CONCLUSÃO	16
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	17
APÊNDICE	18

## 1 INTRODUÇÃO

Os materiais elastoméricos, como a borracha, são amplamente utilizados, não só como pneus, mas também em elementos de absorção de impactos como amortecedores, placas anti terremotos em prédios e pontes, elementos de transmissão, materiais hospitalares, entre outros. Este aumento de seu uso gera uma necessidade de conhecer profundamente o comportamento do material utilizado, para tanto, ensaios mecânicos são realizados e, com suas curvas, propriedades são adquiridas e usadas em suas análises.

Para que um material linear elástico seja descrito, dois parâmetros constitutivos, dentre  $E$ ,  $G$ ,  $\nu$  e  $K$ , são o suficiente para qualquer deformação. Entretanto, os materiais elastoméricos possuem comportamento não linear o que faz com que seja necessário um par desses parâmetros para cada deformação (OGDEN, 1984). Para que isso seja possível, deve-se realizar o ensaio de tração uniaxial, que gera o  $E$ , mas para gerar a segundo parâmetro, no caso o  $\nu$  que é de extrema importância para este tipo de material, devemos capturar a deformação volumétrica durante o ensaio, que é possível com leitura ótica, mas que possui uma grande complexidade, alto custo e baixa disponibilidade, ou então, realizando o ensaio de compressibilidade.

Este ensaio gera o parâmetro  $K$ , que pode ser manipulado juntamente com  $E$  para encontrar o  $\nu$ . Dessa forma menos complexa, custosa e rápida pode-se adquirir o par para caracterizar o material e calcular outros parâmetros, como o  $G$  e  $\lambda$ .

Visto que para o estudo completo de materiais hiperelásticos deve-se realizar um ensaio não usual, a necessidade de possuir formas de realizar este ensaio se torna fundamental para uma análise qualificada. Sendo assim, devido à grande demanda de análises de materiais poliméricos, foi necessária a criação de um equipamento que pudesse realizar o ensaio de compressibilidade, já que nenhum laboratório vinculado ao departamento de engenharia mecânica possuía este instrumento. O projeto e a fabricação do equipamento necessário para este ensaio, juntamente com a realização de ensaios que comprovem sua utilidade são o objetivo do trabalho, para tanto, o equipamento foi desenhado, analisado numericamente via software e criado para este trabalho.

### 1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

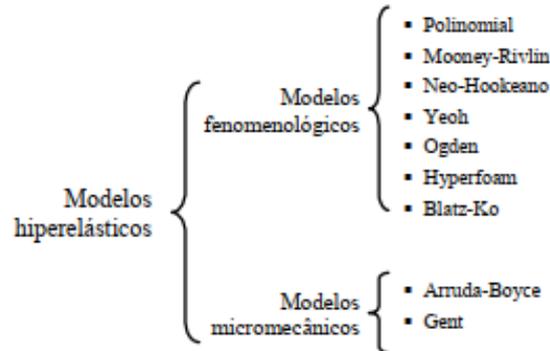
Os materiais utilizados no trabalho são elastômeros e possuem diversos comportamentos específicos deste tipo de material, tais como a hiperelasticidade, a qual diz respeito à relação constitutiva do material. Estes materiais possuem esta denominação por manifestarem grandes deformações elásticas bem maiores que as encontradas em materiais mais convencionais. Nestes casos, a Lei de Hooke não é aplicável, isto é, não é possível relacionar tensão com deformação utilizando apenas dois parâmetros do material. A forma mais comum de relacionar uma medida apropriada de tensão ( $T_{ij}$ ) e uma medida de deformação ( $E_{ij}$ ), nestes casos, é através de uma função energia de deformação:

$$T_{ij} = f\left(\frac{\partial W}{\partial E_{ij}}\right) \quad (1)$$

Relações constitutivas hiperplásticas geram diagramas tensão  $\times$  deformação muito distintos daqueles obtidos para materiais metálicos (HOSS, GHELLER, & MARCZAK, 2007). Quando se pretende modelar numericamente um material com tal comportamento, deve-se, primeiramente, escolher o grupo de modelos que melhor se adequa à análise, após este passo, devemos estudar o modelo escolhido e aplicar os dados obtidos na análise do ensaio. Como

exemplo, o modelo polinomial. A Figura 1 mostra a classificação de alguns grupos de modelos que podem ser escolhidos (HOSS, GHELLER, & MARCZAK, 2007).

Figura 1 – Modelos hiperelásticos clássicos e seus grupos.



### 1.3 MODELO POLINOMIAL

Este modelo fenomenológico se baseia na utilização dos dois primeiros invariantes da deformação ( $I_{ij}$ ) para o ajuste de curva via um polinômio de grau escolhido do diagrama tensão  $\times$  deformação. A energia de deformação é dada pela equação:

$$W = \sum_{i+j}^n C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j + \sum_{k=1}^n \frac{1}{D_k} (J - 1)^{2k} \quad (2)$$

onde  $D$ ,  $J$ ,  $I_1$  e  $I_2$  são dados por:

$$D_1 = \frac{2}{K} \quad (3)$$

$$J = \left| \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} \right| \quad (4)$$

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (5)$$

$$I_2 = \frac{1}{\lambda_1^2} + \frac{1}{\lambda_2^2} + \frac{1}{\lambda_3^2} \quad (6)$$

$$\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1 \quad (7)$$

Sendo que a Equação 7 só é válida quando o material é incompressível. Sendo  $I_1$  e  $I_2$  o primeiro e o segundo invariantes, respectivamente, e os  $\lambda_i$  os alongamentos principais.

A forma de energia de deformação dada pela Equação 2 é típica de modelos hiperelásticos, contendo um termo rígido pelas deformações deviatóricas (1º termo) e outro contendo a parte relativa à compressibilidade do material (parte hidrostática - 2º termo).

Visto na Equação 3 que o fator  $D_1$  depende do parâmetro  $K$ , o ensaio de compressibilidade é de grande importância para a caracterização correta do material.

Por sua vez, o módulo de compressibilidade é dado por  $K_i = \frac{1}{3} \frac{d\sigma_i}{d\varepsilon_i}$ . Para a sua determinação, transforma-se a curva força  $\times$  deslocamento em  $\sigma \times \varepsilon$  e com estes dados descobre-se o  $K$ . Como o ensaio de compressibilidade confinada ocorre sem que haja variação do diâmetro do corpo de prova, a  $\varepsilon$  é obtida pela relação entre a altura inicial ( $h^0$ ) e a instantânea ( $h$ ), representado por:

$$\varepsilon = \frac{h^0 - h}{h^0} \quad (8)$$

#### 1.4 ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO DE ELASTÔMEROS

Para a caracterização mecânica de um material deve-se obter alguns parâmetros que são obtidos através de ensaios, no caso de borrachas os mais utilizados são: Tração uniaxial, compressão uniaxial, cisalhamento puro, cisalhamento simples, tração biaxial e de compressibilidade. Abaixo uma breve introdução sobre cada um dos ensaios (HOSS, GHELLER, & MARCZAK, 2007).

Ensaio de tração uniaxial consiste em submeter o corpo de prova a uma solicitação de tração até sua ruptura, obtendo-se as cargas e os deslocamentos do ensaio, os quais serão analisados em forma de tensão e deformação. Sendo normatizado pela ASTM D412, o qual rege suas especificidades, dentre elas o corpo de prova em forma de gravata borboleta, mostrado na Figura 2(a).

Ensaio de compressão uniaxial compreende a aplicação de cargas uniaxiais de forma a comprimir o corpo de prova. Neste ensaio, assim como no anterior, se obtém força e deslocamento e se analisa as tensões e deformações. É regido pela norma ASTM D575, diferentemente do ensaio de tração, seu corpo de prova consiste de um disco ou pequeno cilindro, como mostra a Figura 2(b).

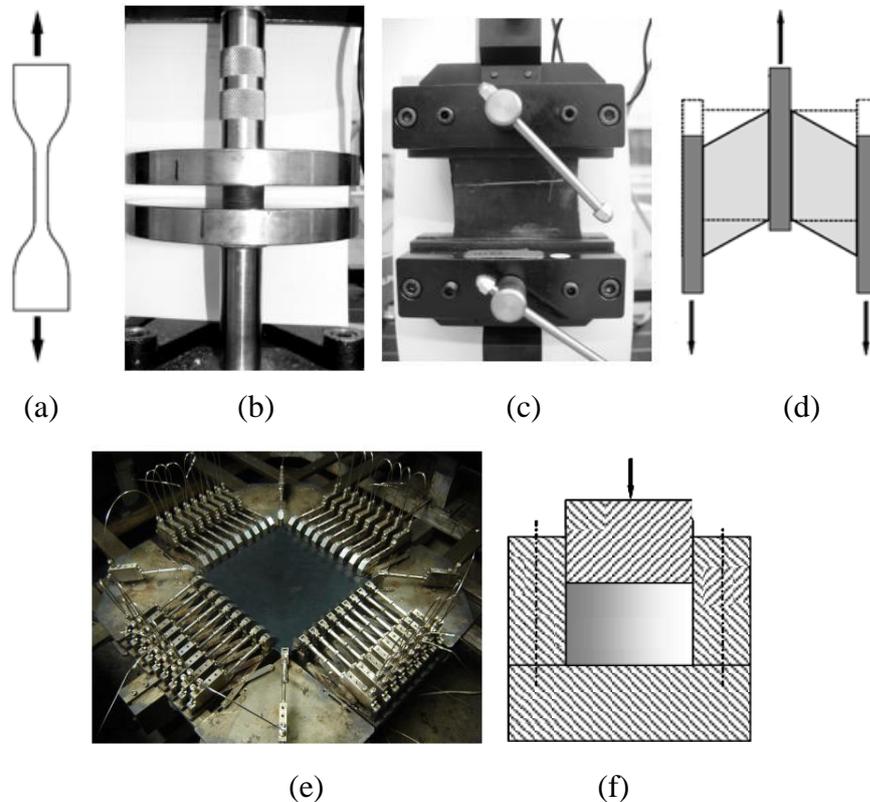
Ensaio de cisalhamento puro possui uma forte relação com o ensaio de tração devido à aplicação da força e a leitura dos resultados. Entretanto, recomenda-se que sua largura seja dez vezes maior que sua altura, Figura 2(c).

Ensaio de cisalhamento simples possui uma grande importância na caracterização dos materiais, no entanto não é muito comum devido à sua complexidade. Possui normatização pela ISO 1827, Figura 2(d).

Ensaio de tração biaxial consiste em submeter uma lâmina de borracha a deformações iguais em duas direções. Este ensaio é raramente realizado devido à complexidade da máquina e de seus mordentes, como demonstrado na Figura 2(e).

Ensaio de compressibilidade é realizado de forma muito parecida com o ensaio de compressão, consiste em comprimir um corpo de prova em forma de disco ou cilindro de maneira confinada, de modo a permitir somente deformações no sentido longitudinal à força. É realizado para a determinação do módulo de compressibilidade, que entrará nas equações para a determinação do nível de compressibilidade do material, demonstrado na Figura 2(f).

Figura 2 – (a) Representação do ensaio de tração uniaxial; (b) Ensaio de compressão; (c) Ensaio de cisalhamento puro; (d) Representação do ensaio de cisalhamento simples; (e) Ensaio de tração bi axial; (f) Representação do ensaio de compressibilidade. (HOSS, GHELLER, & MARCZAK, 2007)



## 2 PROJETO DO DISPOSITIVO

O ensaio de compressibilidade, escopo do trabalho, possui duas formas principais de realização, o hidrostático e enclausurado. No primeiro o material é encapsulado por uma membrana semipermeável e aplica-se uma pressão hidrostática a partir do deslocamento de um embolo, este deslocamento realizado pelo fluido é o mesmo sofrido pelo corpo devido à compressão, o segundo se coloca um disco ou cilindro do material em um sistema camisa pistão e se comprime o disco, onde este não pode se expandir lateralmente. Visto que o equipamento para o ensaio hidrostático possui uma criação e um manejo muito mais complexo e seu custo de fabricação é elevado, se optou pela criação do sistema camisa pistão.

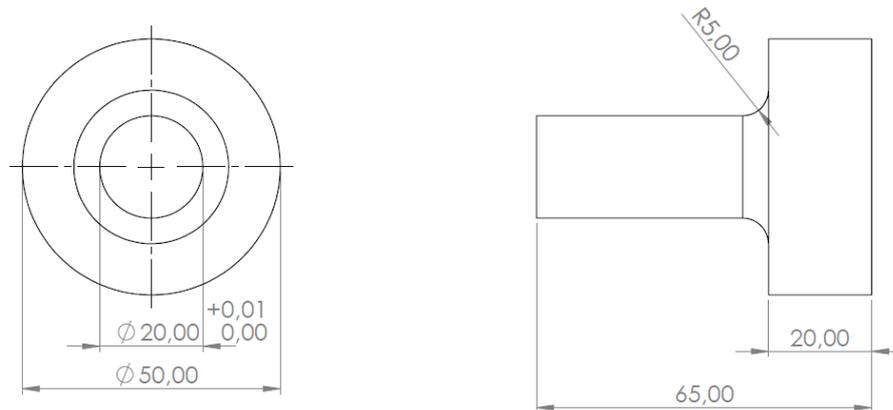
A primeira fase do projeto do dispositivo foi o desenvolvimento do equipamento no software de CAD, a segunda fase foi uma análise preliminar no software comercial de elementos finitos, a terceira se baseou em melhorias estruturais e condições de uso mais reais que as da fase dois e a quarta fase a fabricação dos componentes pelo método de usinagem em laboratório de usinagem da universidade.

Para a análise qualitativa foi utilizado um critério de escoamento do material, SAE 4140, cuja tensão de escoamento é de aproximadamente 661MPa (TURATTI, BIRCK, & TOSO, 2017). A carga máxima utilizada para os cálculos foi de 100kN.

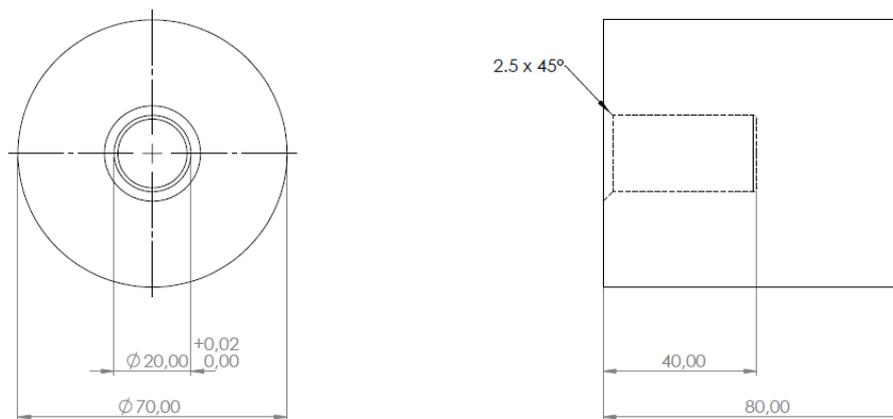
## 2.1 Construção do equipamento

Após um breve estudo de outros equipamentos desenvolvidos para ensaio de compressão (SHI, LIU & CHEN, 2017) e compressibilidade (Shu H. Peng, 1994) e as dimensões do equipamento e corpo de prova, foi estabelecido um desenho inicial para o aparato. O dispositivo foi desenhado baseando-se em um sistema camisa pistão, as Figuras 3 (a) e (b) mostram os desenhos de fabricação destes componentes.

Figura 3 - (a) Desenho de fabricação do pistão; (b) Desenho de fabricação da camisa.



(a)



(b)

## 2.2 Modelagem computacional

Foi realizada uma análise de tensões e deformações no equipamento para determinar se as cargas planejadas no uso seriam seguras. Foram utilizadas condições de análises específicas para a camisa e para o pistão baseadas em axissimetria no eixo y. Na camisa, a pressão aplicada na face interna inferior e na face lateral interna até 10mm de altura possui a magnitude de

319MPa, pressão correspondente a uma carga de 100kN. As condições de contorno aplicadas foram, na face inferior externa do cilindro o nó central da malha, a qual é composta por elementos 2D quadriláteros com 0,5mm de comprimento, possuía deslocamento zero em ambas as direções e linha inferior externa com restrição de deslocamento vertical, como mostra a Figura 4. Já no pistão a pressão foi aplicada na face de menor área com magnitude de 319Mpa e na linha externa da base maior com restrição de deslocamento em y, Figura 5.

Figura 4 – Condições de aplicação de carga e restrições na camisa.

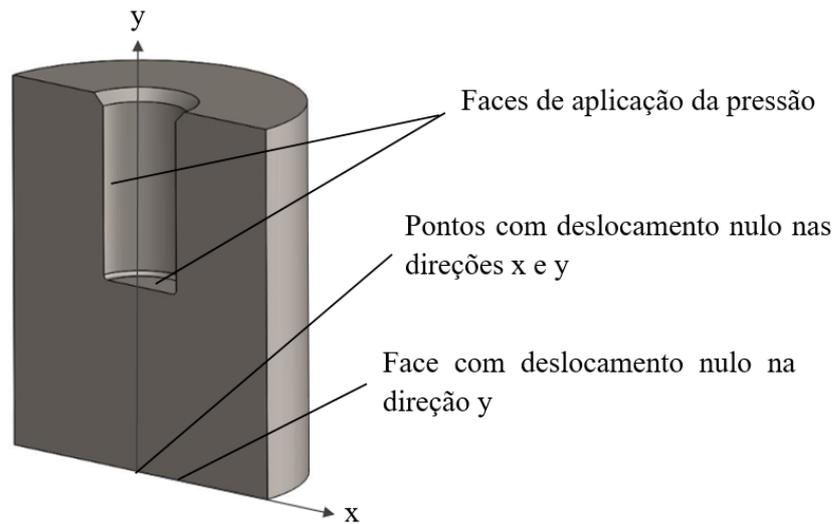
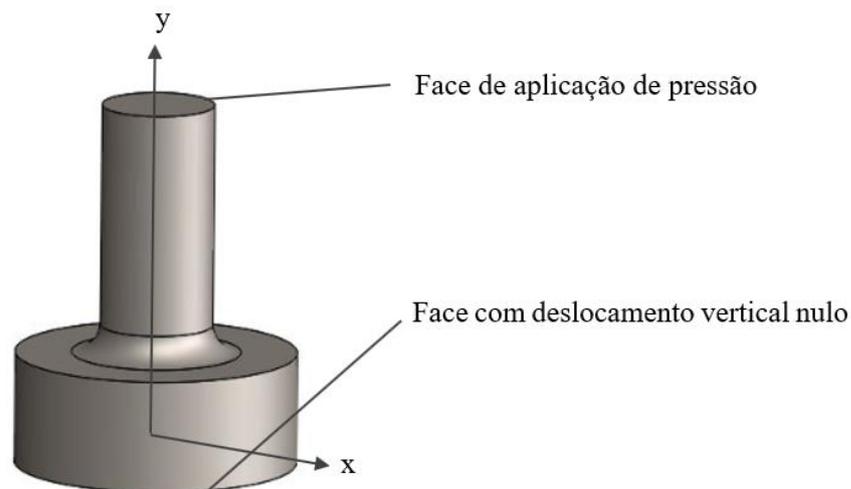
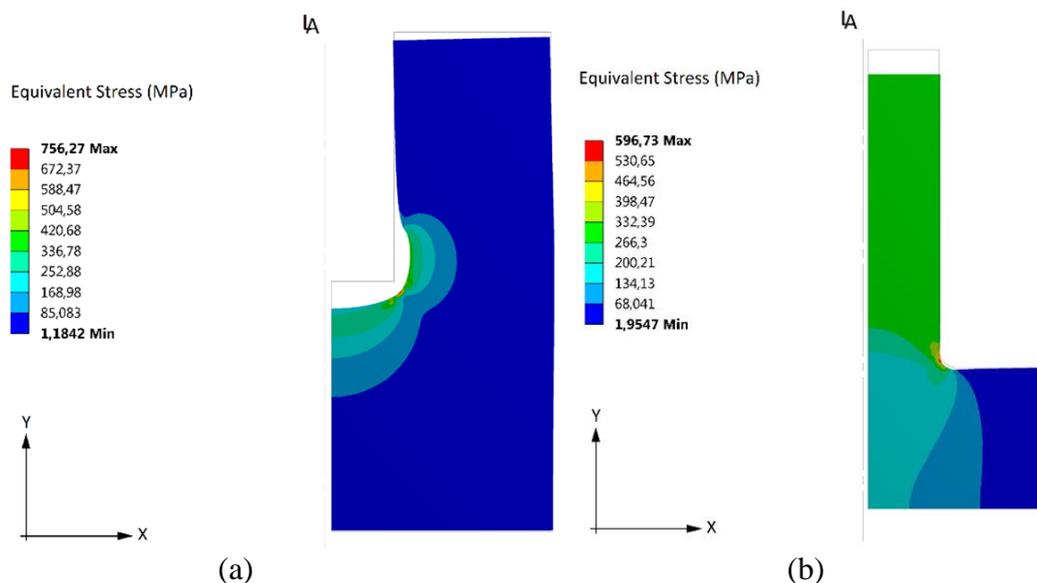


Figura 5 – Condições de aplicação de carga e restrições no pistão.



As Figuras 6 (a) e (b) ilustram as tensões nas análises realizadas. Como pode-se ver, existem pontos, tanto na camisa quanto no pistão, onde a tensão pode ultrapassar o limite de escoamento do material, podendo gerar um Joelho de compressão (local onde ocorre uma deformação localizada sem afetar o seu redor gerando um encruamento do material, elevando sua resistência a futuras deformações). Contudo, em grande parte da estrutura as tensões são significativamente menores que a tensão de escoamento.

Figura 6 – (a) Níveis de tensões equivalentes na camisa; (b) Níveis de tensões equivalentes no pistão.

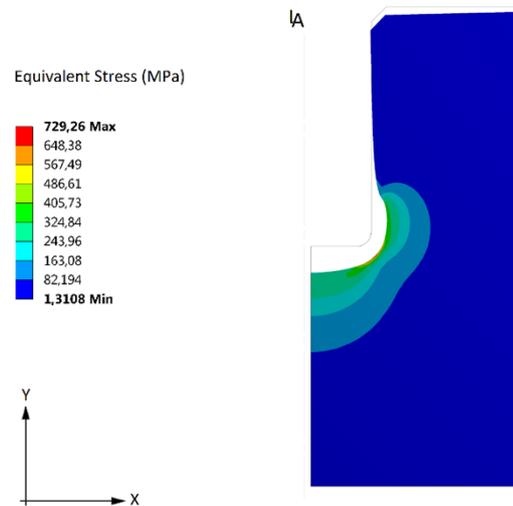


### 2.3 Detalhamento do projeto

Após a análise anterior, foram realizadas algumas alterações no desenho do equipamento, para que o estudo tenha uma melhor aproximação com a realidade da fabricação, tais como: chanfro na parte superior da abertura da camisa, para melhor colocação do corpo de

prova, criação de um raio de curvatura na base interna, a análise de tensões foi refeita. A Figura 7 mostra o resultado da nova análise na camisa.

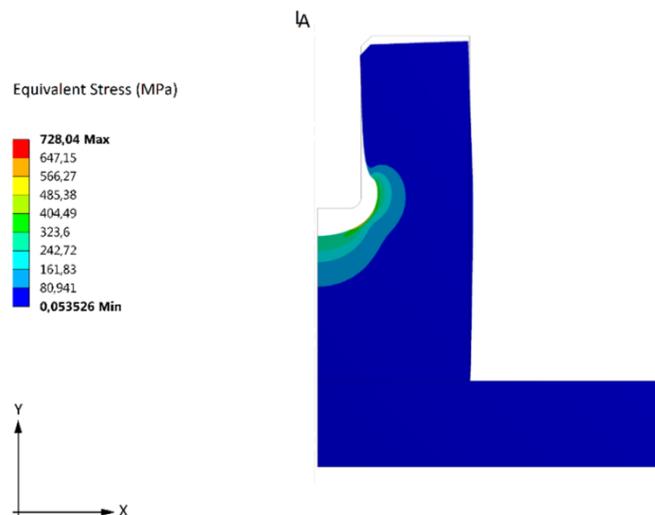
Figura 7 – Níveis de tensões equivalentes na nova camisa.



Foi constatado que não houve mudanças significativas no comportamento do equipamento após a aplicação das modificações.

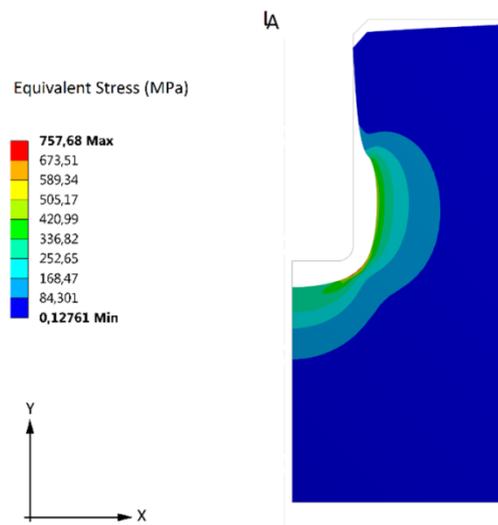
Como forma de complementar o estudo, foi realizada uma análise de contato da camisa com a base da máquina de ensaios, Figura 8 mostra a análise das tensões no estudo de contato. Entretanto houve modificações nas condições de contorno. Nas bases de apoio foi utilizado o contato do tipo “Frictionless” (sem atrito), no qual existiria escorregamento entre as superfícies, esse novo comportamento foi acrescentado de forma a maximizar a semelhança com a realidade do ensaio.

Figura 8 – Níveis de tensões equivalentes na análise com contato.



Como só haviam sido considerados corpos de prova de 10mm de altura, foi realizado um estudo com a aplicação de carga em 20mm de altura, caso fosse utilizado um corpo de prova com maior altura que o projetado originalmente, a Figura 9 mostra o resultado das tensões desta análise.

Figura 9 – Resultado da análise de tensões com um corpo de prova com altura de 20mm.



Como visto nas Figuras 8 e 9, somente em pontos muito localizados, menores que a dimensão de um elemento, a tensão máxima foi excedida. Entretanto, em grande parte do corpo, a tensão média era menor que a tensão de escoamento, sendo em média 340MPa, de acordo com os dados gerados pelo software, o que gera um coeficiente de segurança de aproximadamente 2. Fazendo com que haja uma grande segurança tanto para o componente como para seus usuários.

### 3 DISPOSITIVO FINALIZADO

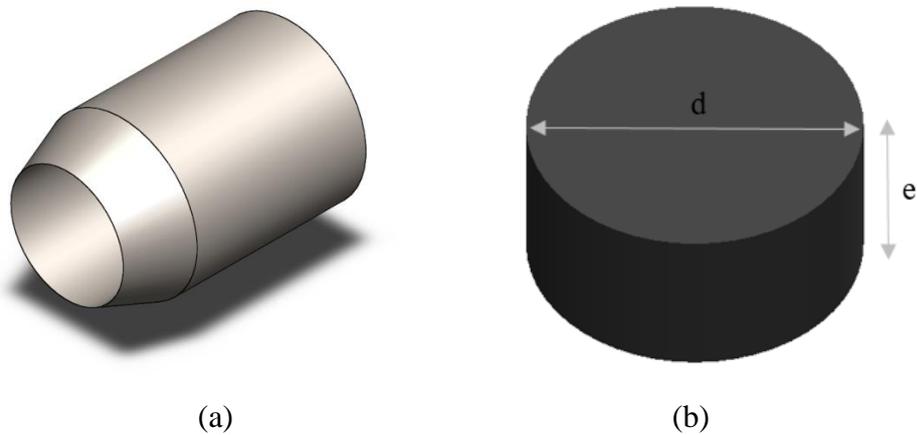
Após a fabricação o equipamento passou por uma análise visual e comportamental, para saber se estava dentro dos parâmetros pré-estabelecidos. A usinagem foi tão bem realizada que houve dificuldade para a saída do ar de dentro da camisa, entretanto, devido a sua precisão, as superfícies estavam extremamente lisas, mas sem tratamento superficial, o que poderia ocasionar pontos de oxidação no aço, prejudicando o nível de ajuste entre as peças. Para solucionar este problema, foi realizado o processo de oxidação negra, o qual foi escolhido devido à camada de deposição de material, que realiza a proteção, ser muito fina e seu custo baixo. A Figura 10 mostra o equipamento após o tratamento superficial.

Figura 10 – Equipamento desenvolvido com a aplicação do tratamento superficial.



Para que os ensaios pudessem ser realizados de forma padronizada, foi criada também uma faca de corte, dessa forma excluem-se grandes discrepâncias entre os corpos de prova. Esse equipamento foi criado com o mesmo material usado para o conjunto do ensaio. As Figuras 11 (a) e (b) mostram o projeto da faca de corte e o corpo de prova.

Figura 11 – (a) Desenho 3D da faca de corte; (b) Representação do corpo de prova.



#### 4 TESTES EXPERIMENTAIS

Uma vez fabricado, foi realizada uma bateria de testes para a determinação da eficácia do equipamento. Foram realizados ensaios com dois tipos de borrachas já conhecidas para que os resultados obtidos pelo dispositivo pudessem ser verificados.

##### Metodologia

Os ensaios foram realizados em uma máquina de ensaios universais da marca Shimadzu, utilizando seu sistema de aquisição de dados de força, composto de uma célula de carga de 250kN, deslocamento e extensometria, formado por um extensômetro da própria máquina.

##### Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova foram cortados com a faca previamente descrita, sendo colocada sobre a manta de borracha e, com uma prensa hidráulica foi aplicado um deslocamento prescrito, fazendo com que os cilindros de borracha fossem cortados sem interferências externas ou erros de dimensionamento. As amostras possuem um diâmetro ( $d$ ) de  $19,5 \pm 0,2\text{mm}$  e espessura ( $e$ ) de  $9 \pm 0,3\text{mm}$ .

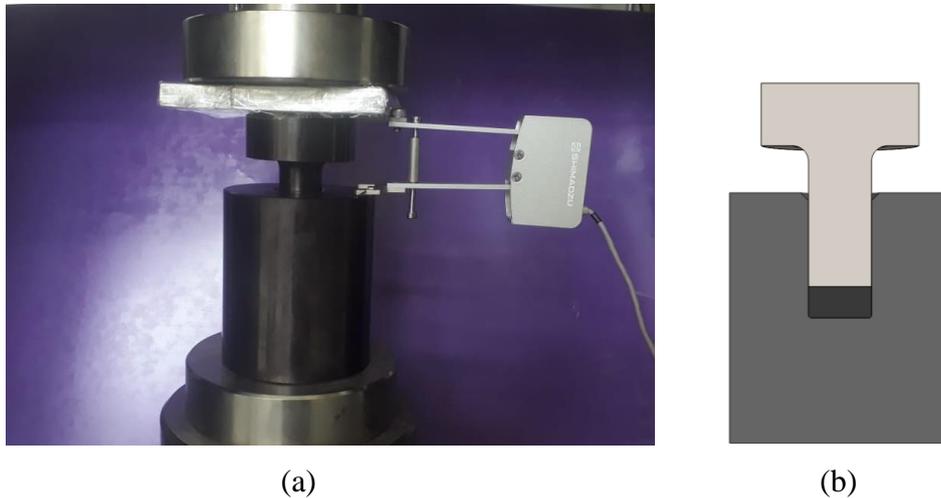
O material escolhido para a retirada dos corpos de prova é um lençol de borracha com dureza de  $65 \pm 5$  Shore A, com resistência a ruptura de aproximadamente 4MPa, alongamento de 260% e composição de 35% de Neoprene e 65% de borracha SBR (DIPEBOR borrachas).

##### Procedimentos experimentais

Os corpos de prova após colocados dentro da camisa, são levemente pressionados para que o encaixe seja completo, então fechado com o pistão. Após seu alinhamento com o punção da máquina de ensaio, é aplicada uma força de 2kN por 10s, para que quaisquer folgas sejam retiradas. Só então é iniciado o ensaio com velocidade de carregamento de 1,27mm/min (Shu H. Peng, 1994) que só é finalizado quando sua carga atinge os 100kN, carga estipulada para manter a segurança dos equipamentos e dos envolvidos no ensaio.

A Figura 12 (a) mostra a realização do ensaio de compressibilidade confinada com extensômetro, que mede seu deslocamento e a Figura 12 (b) demonstra como o corpo de prova fica alojado no equipamento.

Figura 12 – (a) Ensaio de compressibilidade confinada com extensômetro; (b) Vista em corte do equipamento durante o ensaio.



#### 4 RESULTADOS

Após a realização do ensaio de compressibilidade confiado, deu-se início à análise dos dados, onde foi preciso calcular as tensões, pela Equação 12, e as deformações pela Equação 13, para todos os pontos da curva.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (12)$$

$$\varepsilon = h_0 - h/h_0 \quad (13)$$

De acordo com (GENT, A. N, 2001) que recomenda que o material pode ser considerado incompressível quando o  $K > 10^4 G$ , outro critério recomendado é o valor de  $\nu$  próximo de 0,5. Dessa forma, deve-se utilizar a Equação 14 para calcular o  $E$  e para tanto, foram realizados ensaios de tração, dos quais foram retirados os dados de  $\sigma$  e  $\varepsilon$ . Com os valores de  $E$  e  $K$ , obteve-se os valores de  $G$ , pela Equação 16. Finalizando a análise, calculou-se o coeficiente de Poisson, de acordo com a Equação 17.

$$E_i = \frac{\sigma^{i+1} - \sigma^i}{\varepsilon^{i+1} - \varepsilon^i} \quad (14)$$

Após a obtenção da curva  $\sigma \times \varepsilon$ , estima-se o valor de  $K$  para cada ponto  $i$  da curva, com a Equação 15.

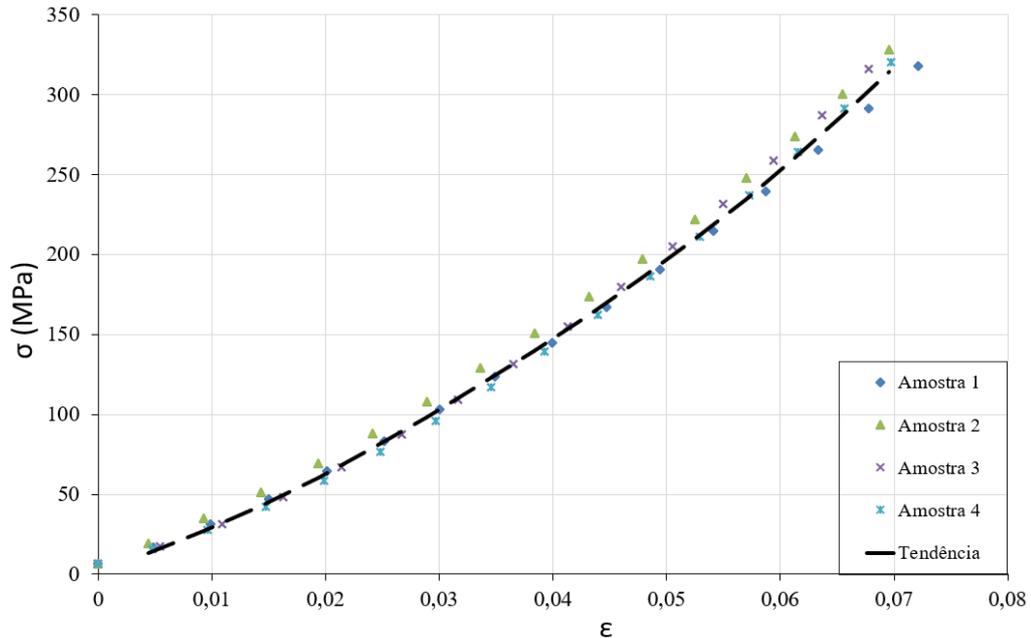
$$K_i = \frac{1}{3} \frac{\sigma^{i+1} - \sigma^i}{\varepsilon^{i+1} - \varepsilon^i} \quad (15)$$

$$G_i = \frac{3E_i K_i}{9K_i - E_i} \quad (16)$$

$$\nu_i = \frac{3K_i - E_i}{6K_i} \quad (17)$$

As figuras a seguir dizem respeito às análises dos ensaios realizados. Para uma melhor compreensão dos dados, foi utilizada uma curva de tendência. A Figura 13 mostra o comportamento do material durante o ensaio de compressibilidade confinada, demonstrando sua não linearidade, crescimento rápido da tensão e baixas deformações, característico de uma curva deste tipo de ensaio.

Figura 13 – Curva tensão por deformação do ensaio de compressibilidade confinada do material incompressível.



Visto que o número de pontos gerado pelos ensaios era diferente e que as deformações do ensaio de tração eram muito superiores às do ensaio de compressibilidade confinada, foi determinado que seriam utilizados pontos onde as duas deformações pudessem ser comparadas. Dessa forma, a deformação do ensaio de compressibilidade confinada foi dividida em quatro intervalos, compreendida pelo ponto inicial, o final e dois pontos equidistantes. Os dados das curvas  $K \times \epsilon$ , Figura 14,  $E \times \epsilon$ , Figura 15,  $G \times \epsilon$  na Figura 16 e  $\nu \times \epsilon$ , presente na Figura 17, foram analisadas com os mesmos pontos de deformação, visto que pequenas variações nos dados de  $\sigma$  e  $\epsilon$  geram grandes variações nos dados de  $E$ , que se repetem nas demais curvas.

Figura 14 – Curva do módulo de compressibilidade por deformação do ensaio de compressibilidade confinada do material incompressível.

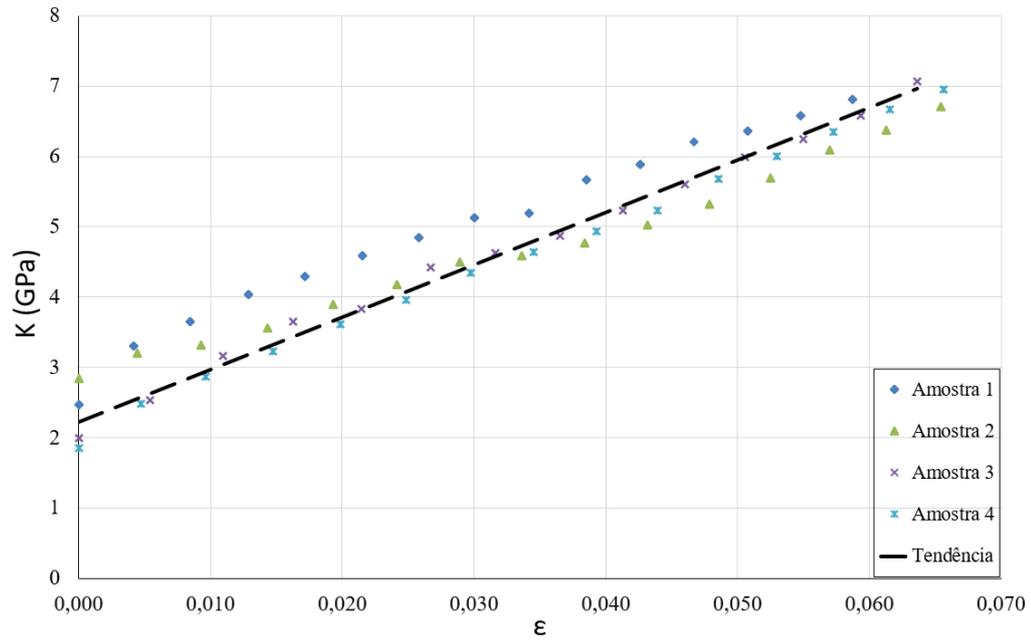


Figura 15 – Curva do módulo de elasticidade por deformação do ensaio de tração do material incompressível.

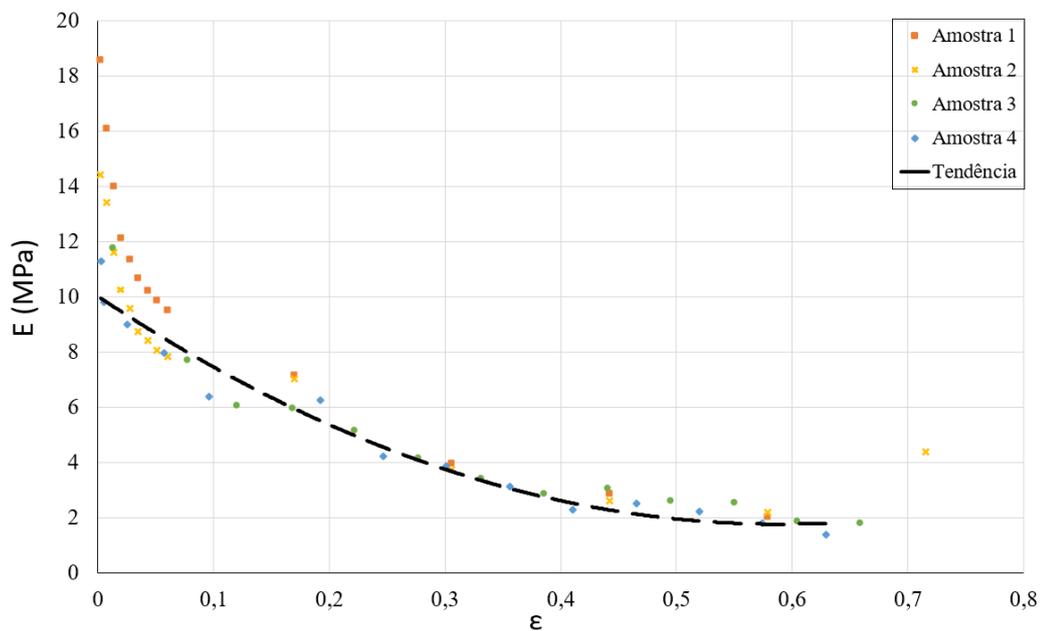


Figura 16 – Curva do módulo de cisalhamento por deformação do material incompressível.

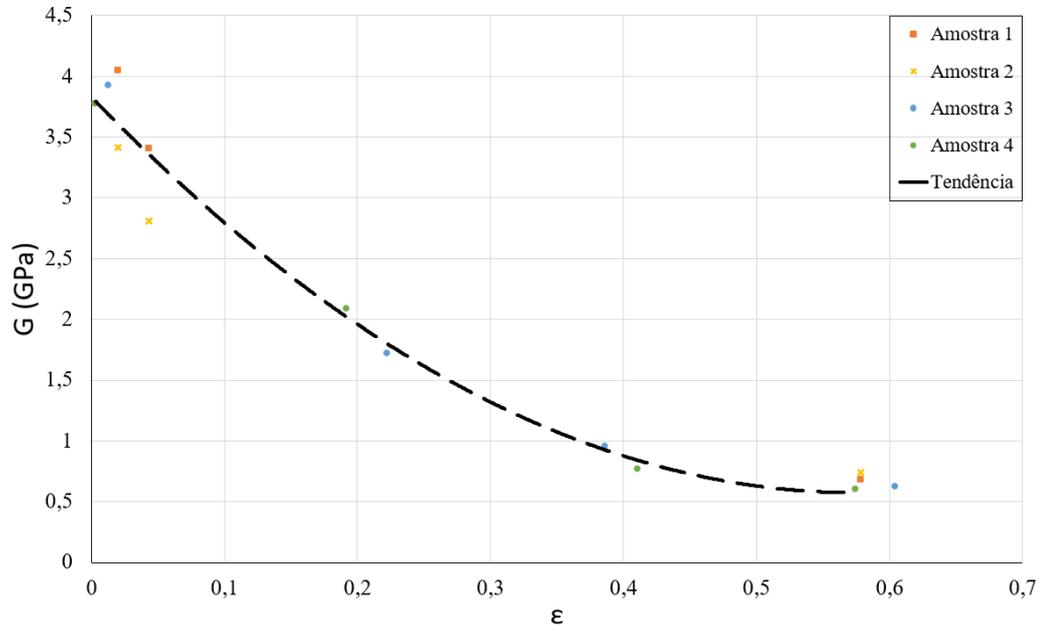
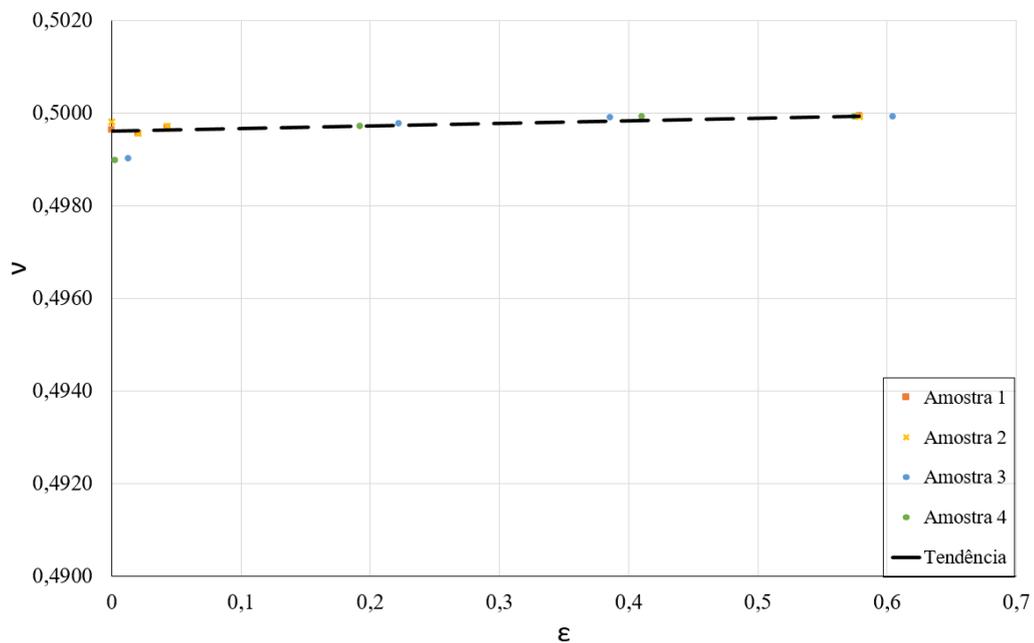


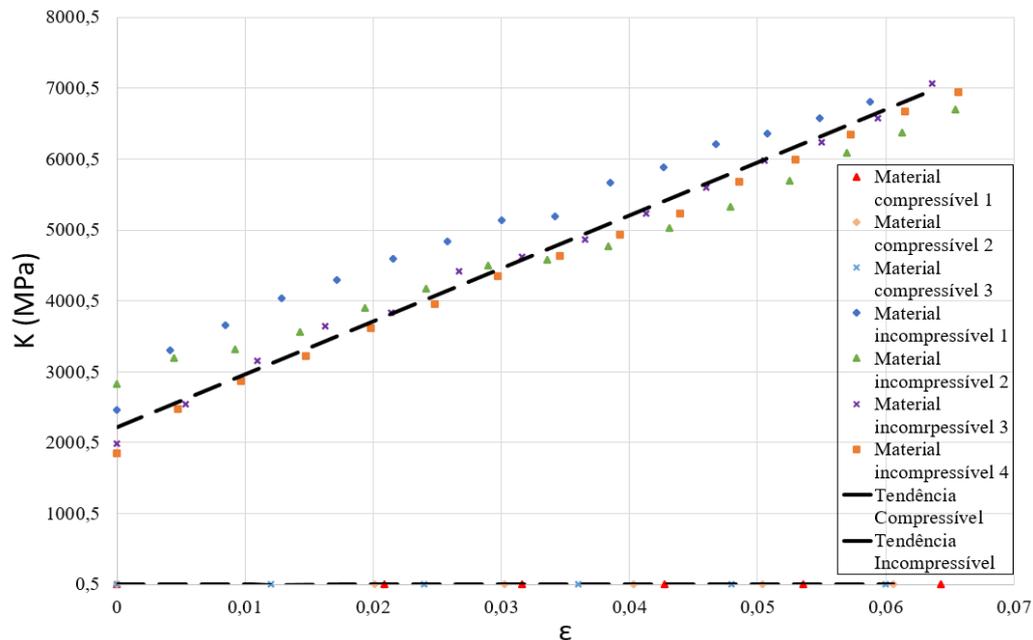
Figura 17 – Curva do coeficiente de Poisson por deformação.



Como forma de complementar a análise do equipamento, foram realizados ensaios de compressibilidade confinada com um material de comportamento compressível, já era sabido que este material possuía este comportamento, mas o equipamento deveria ser capaz de ensaiar este material com a mesma precisão que uma borracha incompressível. Os resultados dos

ensaios do material compressível se encontram no Apêndice A, assim como as conclusões dessa análise. A Figura 18 mostra uma comparação entre os dados do módulo de compressibilidade dos dois materiais.

Figura 18 – Comparação dos módulos de compressibilidade.



Como demonstrado na Figura 18, o módulo de compressibilidade do material compressível é muito menor que o do incompressível. Isso comprova que o equipamento possui capacidade para ensaiar ambos materiais sem que haja perda de precisão ou variação nos dados devido a erros vindos da sua criação.

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho projetou, construiu e testou um dispositivo para ensaios de compressibilidade confinada em elastômeros. O equipamento foi testado com duas amostras de materiais elastoméricos, uma considerada incompressível e outra com compressibilidade significativa. Utilizando o dispositivo proposto, foi possível demonstrar que o módulo de compressibilidade do material considerado incompressível é maior que  $10^3 G$  e o coeficiente de Poisson correspondente muito próximo de 0,5, mostrando sua eficiência para realização desse tipo de ensaio. Dessa forma pode-se considerar que o equipamento cumpriu com o propósito de realizar ensaios de compressibilidade confinada em materiais compressíveis e incompressíveis. Como o dispositivo foi criado com base em recomendações práticas, ele pode sofrer alterações que o tornem mais preciso, como a incorporação de extensômetros à sua estrutura para medir as tensões atuantes durante o ensaio. Sinalizadores também podem ser incorporados para uso de transdutores de deslocamento óticos.

Como nenhum laboratório vinculado à Escola de Engenharia da UFRGS possui este equipamento, ele será incluído no acervo do Depto. Eng. Mecânica para que possa ser melhorado e utilizado em futuros estudos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

OGDEN, R. W. **Non-Linear Elastic Deformations**. Dover Publications, 1984.

HOSS, L.; GHELLER, J.; MARCZAK, R. J.; **Caracterização de Elastômeros para Simulação Numérica**, 2007.

ASTM D412-16, **Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers—Tension**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, [www.astm.org](http://www.astm.org)

ASTM D575-91(2018), **Standard Test Methods for Rubber Properties in Compression**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, [www.astm.org](http://www.astm.org)

ISO, Rubber, vulcanized or thermoplastic – **Determination of modulus in shear or adhesion to rigid plates**. Quadruple shear method, International Organization for Standards, standard ISO 1827, ISO/TC 45, Switzerland, 1991.

TURATTI, E. ; BIRCK, G. ; TOSO, M. A. . **Avaliação do Comportamento Mecânico do Aço SAE 4140**. DESTAQUES ACADÊMICOS, v. 09 n.04, p. 204-223, 2017.

SHI W, LIU G, CHEN Z. Effects of the bulk compressibility on rubber isolator's compressive behaviors. *Advances in Mechanical Engineering*, 2017.

PENG, S. H., et al. **Measurement of Elastomers Bulk Modulus by Means of a Confined Compression Test**, *Rubber Chemistry and Technology*, v.7, p.871-879, 1994.

Dipebor borrachas indl eireli. Disponível em: <<http://www.dipebor.com.br>>.

GENT, A. N. **Engineering with Rubber - How to Design Rubber Components**. Hanser Publishers, 2001.

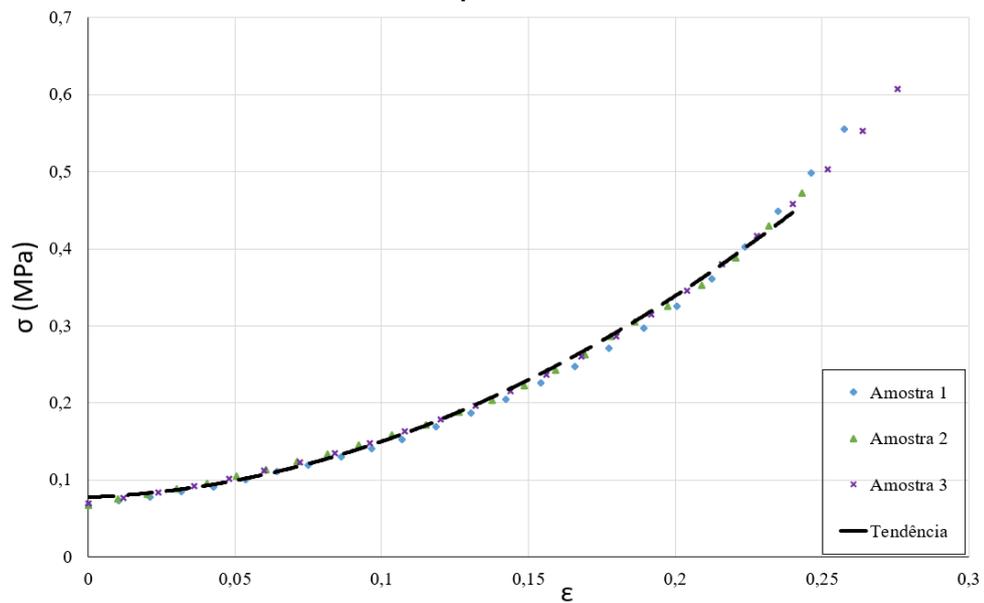
DA SILVA, S. ; MARTINS, N. ; VIEIRA, A. ; DUTRA, L. ; SILVA, F. (2017). **Análise de Tensão e Fadiga Axial do Aço ABNT 4140 Utilizando o Método de Elementos Finitos**. 10.26678/ABCM.COBEF2017.COF2017-1204.

## APÊNDICE

### Ensaio de compressibilidade confinada em material compressível

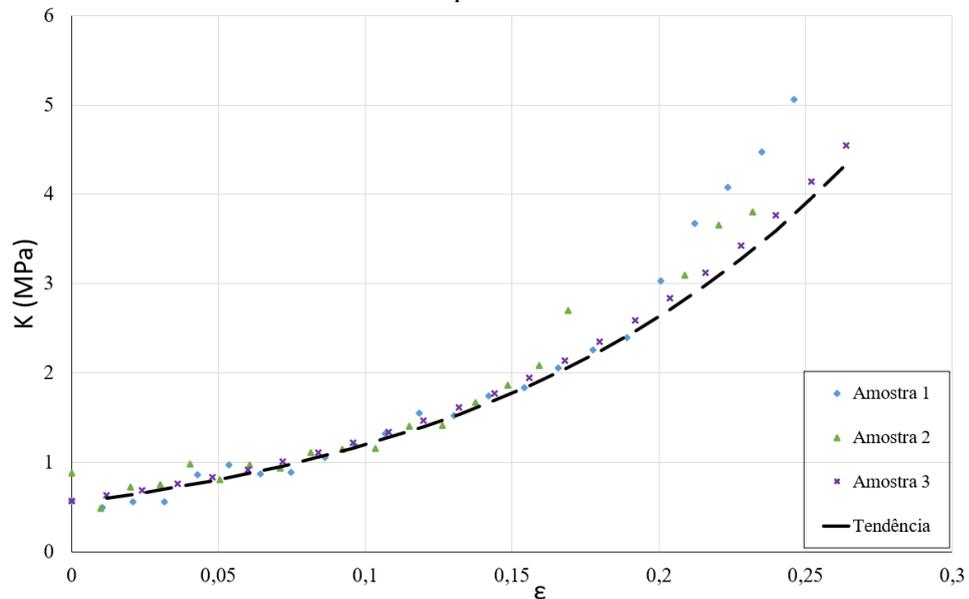
Foram realizados ensaios de compressibilidade em um material compressível para determinar se o equipamento conseguiria captar os dados com a mesma precisão devido às grandes deformações e baixas cargas. A Figura A.1 mostra o gráfico de tensão  $\times$  deformação destes ensaios.

Figura A.1 - Curva de tensão por deformação do ensaio de compressibilidade do material compressível.



Com base nos dados destes ensaios pôde-se calcular o  $K$ , da mesma forma como foi realizado na determinação do módulo do material incompressível. A Figura A.2 mostra o resultado desta análise.

Figura A.2 - Gráfico do módulo de compressibilidade por deformação do material compressível.

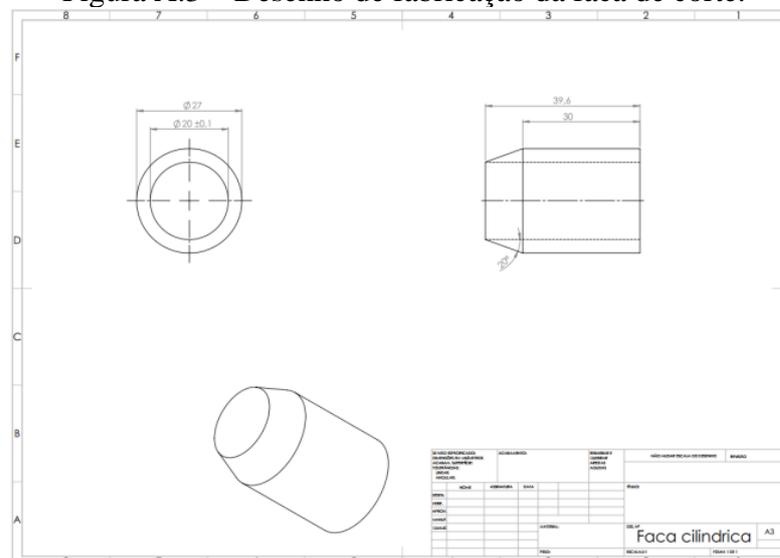


Ao comparar os dados dos dois ensaios, podemos afirmar que o  $K$  do material compressível é significativamente menor que o do material incompressível. Isso se deve ao fato de que este material possui, internamente, um número muito maior de micro vazios, fazendo com que seja possível maiores deformações com menores tensões. Sendo assim, pode ser considerado compressível.

### Faca de corte

Para que os corpos de prova tivessem as mesmas dimensões e não houvesse erro de corte, devido a cortes feitos à mão, foi produzida uma faca especial com o mesmo material do equipamento de ensaio, baseada na faca da norma do ensaio de compressão. A Figura A.3 mostra o desenho de fabricação dessa faca.

Figura A.3 – Desenho de fabricação da faca de corte.

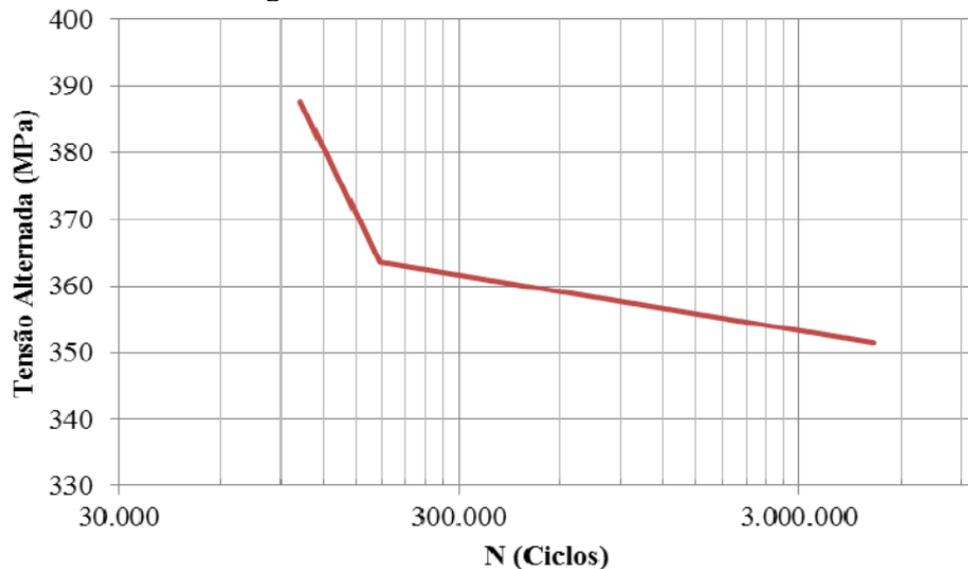


## Fadiga

Como forma de complementar o estudo do equipamento foi feito um estudo rápido sobre o comportamento do equipamento quando submetido a vários ensaios. Visto que este aparato estará disponível para uso da escola de engenharia, ele estará sujeito a realizar inúmeros testes.

A Figura A.4 mostra a curva S-N do aço SAE 4140 (da Silva, Martins, Alysson, Dutra, Silva, 2017). Considerando uma tensão de trabalho de aproximadamente 365MPa, superior à média das tensões obtidas nas análises realizadas, tem-se uma média de 300.000 ciclos de carregamento.

Figura A.4 – Curva S-N do SAE 4140.



Considerando um caso extremo de 10 ensaios por dia, durante todos os dias uteis do ano, 253 em média, gerando aproximadamente 2530 ensaios em um ano. Sendo assim, podemos dizer que o equipamento irá durar algo próximo a 118 anos. Uma vida extremamente longa para um equipamento de testes. Sabe-se que esta estimativa é considerada uma idealização, pois não está sendo considerado um eventual mal uso, queda ou qualquer acontecimento que possa diminuir sua vida útil.