

DESENVOLVIMENTO DE EXTENSÔMETRO PARA ENSAIO MECÂNICO DE TRAÇÃO

Gabriel de Moura Reis

gabrielmoura.g@hotmail.com

Reinaldo Jose Tonete

toneterrj@gmail.com

Rodrigo Biscaro Nogueira

rodrigobiscaro@gmail.com



Extensômetros são dispositivos essenciais para realização de ensaios mecânicos de tração. Diante disso, este trabalho buscou desenvolver um extensômetro eletromecânico, partindo da hipótese de que estes dispositivos podem ser fabricados em estrutura simples e apresentar boa precisão de medida. A metodologia para desenvolvimento do dispositivo consistiu em estudo de modelos de extensômetros, cálculos estruturais para o dimensionamento do protótipo, escolha do material e do design do dispositivo, projeto mecânico, fabricação do protótipo e teste de funcionamento do dispositivo. Os resultados apontaram um protótipo funcional, com inovação tecnológica e que atende as necessidades dos ensaios de tração.

Palavras-chave: Extensômetro, strain gauge, Ensaios Mecânicos

1. Introdução

O conhecimento das propriedades mecânicas, bem como dos processos de fabricação dos materiais no desenvolvimento de projetos e/ou produtos permite selecionar, entre várias opções viáveis, aquela que permite melhores desempenhos (REIS & MOREIRA, 2009).

A seleção de materiais deve se basear em dados de ensaios mecânicos, pois é por meio deles que se verifica se os materiais apresentam as propriedades adequadas ao seu uso, o que é importante para garantir a segurança, redução de custos e qualidade para produção, descoberta de novas informações sobre os materiais e desenvolvimento de tecnologias e novas formas de fabricação (CALLISTER JR & RETHWISCH, 2015).

Um dos principais ensaios mecânicos utilizados para estudo das propriedades dos materiais é o teste de tração. Garcia *et al* (2013) explica que este teste consiste em submeter um corpo de prova com formato e dimensões padronizadas a uma carga gradativa de tração uniaxial nas suas extremidades que tende a esticá-lo. Os resultados do ensaio são registrados na forma de um gráfico que relaciona a tensão aplicada em função da deformação sofrida pelo corpo de prova.

Os acessórios que permitem mensurar a deformação de um corpo de prova são chamados de extensômetros. São dispositivos com tecnologia amplamente difundida e uso consolidado na engenharia e estão disponíveis em várias formas, tamanhos e com diferentes tecnologias, adaptadas ao tipo de ensaio que o corpo de prova do material será submetido. (SHAKEEL et al, 2017).

Os extensômetros eletromecânicos estão entre os dispositivos mais utilizados na realização de ensaios mecânicos. A tecnologia envolvida no funcionamento desse tipo de extensômetro é a base de *strain gauges*, que são sensores atrativos por sua versatilidade e precisão. Esses sensores destacam-se sobre os demais, principalmente quando trata de dimensões, simplicidade de uso, eficácia e menor custo, além de apresentarem fator de sensibilidade constante e alto grau de precisão na medição (SHAKEEL et al, 2017; NI MEASUREMENT, 2013).

O objetivo deste trabalho é projetar e construir um extensômetro eletromecânico para realização de testes de tração de materiais poliméricos, compósitos e metais dúcteis, partindo da hipótese de que os extensômetros podem ser fabricados com estruturas simples, boa

funcionalidade e alta precisão de medida, além de colaborar para o desenvolvimento de tecnologia dentro da Universidade.

2. Revisão da literatura

2.1 Propriedades mecânicas dos materiais

A ciência e engenharia dos materiais propõem estudos sobre as composições, estruturas internas e propriedades dos materiais, além de estabelecer a dependência regular entre elas, auxiliando, portanto, na seleção ideal de materiais para diversos usos e na determinação das suas propriedades e qualidades tecnológicas (LOPES, 2009).

As propriedades mecânicas são determinadas quando um material está sujeito a esforço de natureza mecânica, ou seja, essas propriedades determinam o maior ou o menor poder que o material tem para transmitir ou resistir aos esforços que lhe são aplicados (CALLISTER JR & RETHWISCH, 2015).

De modo geral, segundo Garcia et al (2013), todo projeto de engenharia requer amplo conhecimento das propriedades dos materiais envolvidos para sua viabilização. Callister e Rethwishch (2015) dizem, ainda, que a compreensão das várias propriedades mecânicas dos materiais e suas representatividades é obrigação dos engenheiros.

2.2 Ensaios mecânicos

As propriedades mecânicas dos materiais são determinadas pela realização dos ensaios mecânicos, que são testes que reproduzem experimentalmente as condições de serviço. A realização dos ensaios e a interpretação dos seus resultados são padronizados por normas estabelecidas por sociedades profissionais, como a Sociedade Americana para Ensaios e Materiais (ASTM – *American Society for Testing and Materials*) e a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (CALLISTER JR & RETHWISCH, 2015).

Blanco (2006) diz que estes ensaios são essenciais para formação do engenheiro, uma vez que são usados para comparação ou seleção de materiais, controle de qualidade e certificação de produtos.

Um dos principais ensaios mecânicos é o ensaio de tração, que consiste em submeter um corpo de prova a uma carga gradativa de tração uniaxial nas suas extremidades que tende a esticá-lo. Este ensaio é amplamente utilizado na indústria devido a vantagem de fornecer dados quantitativos das características mecânicas dos materiais como: limite de resistência à tração, limite de escoamento, módulo de elasticidade, módulo de resiliência, módulo de tenacidade, ductilidade, coeficiente de encruamento e coeficiente de resistência (CALLISTER JR & RETHWISCH, 2015).

2.4 Extensômetros

Nos ensaios de tração, um dado essencial para determinação das propriedades mecânicas do material testado é o alongamento do corpo de prova. Para medi-lo, é feito o uso de extensômetros, que são dispositivos utilizados para medir comprimento, permitindo, assim, medir a deformação dos materiais ensaiados (ASKELAND & PHULÉ, 2008).

Os primeiros extensômetros eram essencialmente mecânicos, apresentando limitações e erros de medição. Com a evolução da tecnologia, foram desenvolvidos diversos outros tipos de aparelhos, aplicáveis à medição de deformação em diversas áreas de estudo, como o acompanhamento do crescimento e recuperação de ossos na medicina (ANDOLFATO, 2007).

Um dos extensômetros mais populares no mercado são os extensômetros elétricos, pois permitem que computadores realizem a leitura dos dados de deformação medidos pelo dispositivo. Apresentam alta precisão de medida, além de facilidade e versatilidade quanto a sua utilização. Estes extensômetros consistem basicamente em transdutores que convertem os valores de deformação em sinal de resistência elétrica. A grande desvantagem é que são destruídos durante a realização dos ensaios, uma vez que são aplicados diretamente aos corpos de prova e sofrem o mesmo módulo de deformação que eles. Frente a isso, os extensômetros eletromecânicos têm ganhado espaço no mercado, pois apresentam as mesmas vantagens que os extensômetros elétricos, mantendo sua estrutura intacta durante e após a realização dos ensaios (SHAKEEL *et al*, 2017).

2.5 Strain gauges

Os transdutores que convertem deformação mecânica em sinais de variação de resistência elétrica são chamados de *strain gauges*. Eles são resistores construídos por uma base de poliamida ou epóxi e por um filamento metálico que possui configuração em ziguezague (OLIVEIRA, 2009).

A grande atratividade sobre esses sensores se dá pelas dimensões, simplicidade, eficácia e custo, além de apresentarem fator de sensibilidade constante e alto grau de precisão na medição, o que contribuiu para sua utilização generalizada na análise experimental de tensão e deformação. (NI MEASUREMENT, 2013).

Atualmente o mercado disponibiliza diversos tipos de *strain gauges* para diversas aplicações. Muitos pesquisadores têm estudado novas tecnologias para produzi-los, a fim de proporcionar maior flexibilidade de utilização, aumentando sua resistência e potencializando sua capacidade de medição (HONG *et al*, 2012).

3. Métodos

3.1 Modelo conceitual

Inicialmente foi realizado um estudo documental e bibliográfico em *datasheets* de extensômetros comerciais e artigos científicos, buscando os modelos existentes no mercado e analisando suas características e funcionalidades e as principais tecnologias envolvidas nos diferentes modelos.

Em um *brainstorm*, foram feitas considerações sobre dimensionamento, material, custo e procedimento de fabricação, funcionalidade e eficiência para cada modelo. A partir daí, foi determinado o modelo ideal para ser desenvolvido neste trabalho.

3.2 Seleção da matéria-prima

A matéria-prima para fabricação da estrutura foi escolhida de acordo com seus componentes, seguindo critérios de grande zona elástica do material que atua como mola, fácil acesso e manuseio e baixo custo de aquisição.

Para os braços, que precisam ser rígidos, optou-se por barras de alumínio em formato I, de 1 mm de espessura e 20 mm de largura. Este material foi escolhido devido sua facilidade de acesso, baixo custo e fácil manuseio.

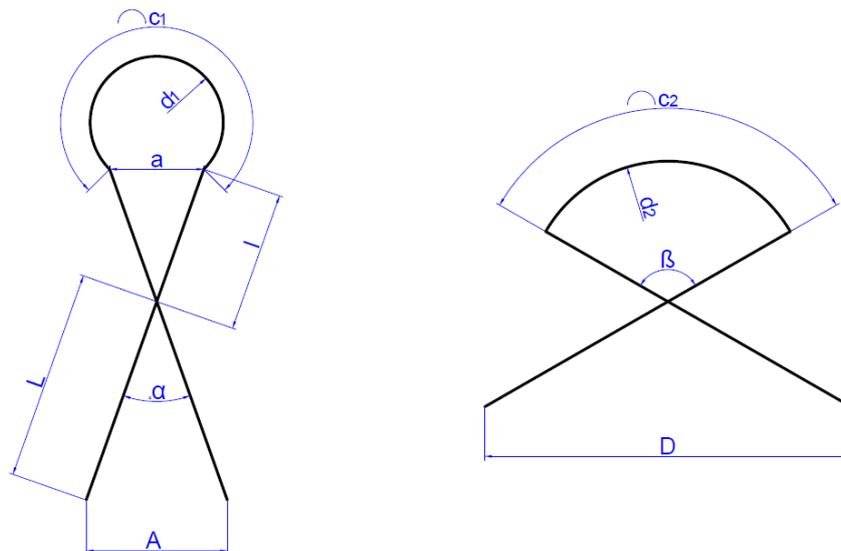
Para a mola, optou-se pelo Aço SAE 1070 foi escolhido devido sua larga utilização na fabricação de molas para instrumentação. Esse material tem densidade $7,85\text{g/cm}^3$, Limite de Escoamento (σ_e) de 490 Mpa, Módulo de Elasticidade (E) de 200 GPa e Coeficiente de Poisson (ν) de 0,29 e deformação máxima na zona elástica (ϵ) de 0,2%. O aço selecionado tem espessura 0,2 mm.

O *strain gauge* escolhido para o dispositivo foi um modelo BF350, de resistência de 350 Ω , fator de sensibilidade 2 - 2,20 e limite de deformação de 2%, grade de *constantan* e base de poliamida, e dimensões 4,4mm x 7,4mm (Figura 1).

3.3 Projeto mecânico

A Figura 2 serviu como modelo gráfico para orientação durante realização dos cálculos.

Figura 2 – Esquema básico da estrutura para orientação de cálculos.



Fonte: Próprio autor (2017)

Inicialmente, foi considerado um comprimento de braço de 160 mm. Levando isso em consideração, adotou-se uma relação de transmissão para os braços com base na posição do pino de articulação de 2,2. Também foi definido que o arco da mola fosse igual a 3/4 de circunferência, sendo que, quando deformado ao máximo, fosse igual a 1/3. De modo a estar de acordo com a padronização, determinou-se a abertura inicial A dos braços do extensômetro como sendo 50 mm, pois a norma ASTM 8M indica que a menor área útil de corpos de prova

metálicos para testes de tração tem comprimento de 50 mm. A partir daí, foram determinadas as demais dimensões.

O diâmetro (d_1) e comprimento (c_1) do arco da mola em estado inicial foram definidos conforme as Equações 1 e 2.

$$d_1 = a\sqrt{2} \quad (1)$$

$$c_1 = \frac{3}{4}\pi d_1 \quad (2)$$

Uma vez que o comprimento da mola no estado de maior deformação (c_2) foi definido como 1/3 de circunferência, o ângulo de abertura do arco (β) foi igualado ao ângulo máximo de abertura dos braços (D) do extensômetro (Equação 3).

$$D = 2 L \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (3)$$

Com as informações dos materiais da fabricação do protótipo, foi possível definir a deflexão máxima (f) pela Equação 4.

$$f = \frac{M c_1^2}{3EJ} \quad (4)$$

Em que M é o momento fletor, E é o módulo de elasticidade e J o momento de inércia da mola metálica do extensômetro.

Os desenhos técnicos do extensômetro foram realizados com tecnologia CAD (*Computer Aided Design*), no *software AutoCAD®* após o dimensionamento.

Também foram realizadas simulações estruturais com o *software Autodesk Inventor®* para obtenção das regiões de concentração de tensão para estudo dos locais de fixação do sensor. Todos os dados de propriedades mecânicas da mola (módulo de Young Limite de escoamento, densidade, resistência à tração) foram inseridos de modo a aproximar, o mais fielmente possível, a simulação das condições reais de solicitações.

3.5 Fabricação do protótipo

A tecnologia, referente às técnicas e métodos que foram utilizados na fabricação do protótipo, foi fundamentada na utilizada pela indústria, adaptada às características das instalações do laboratório em que a pesquisa foi desenvolvida.

As barras de alumínio usadas para fabricação foram marcadas e cortadas nas dimensões definidas pelo projeto mecânico. Após o corte, as peças foram lixadas com lixa com mesh 300, e lavadas com água e álcool para remoção de resíduos.

A mola foi submetida a tratamento de recozimento, conformação plástica e têmpera, para obtenção do *design* e dimensões projetadas com elevado valor de limite de escoamento.

As peças foram fixadas, conforme o modelo, utilizando resina epóxi como material de adesão, e um rebite de aço foi usado para proporcionar a articulação dos braços.

Para acoplagem do sensor para medir a deformação à estrutura do extensômetro, foi utilizada a metodologia de colagem recomendada no *datasheet* do fabricante Kyowa®. A área da mola que recebeu *strain gauge* foi lixada com lixa mesh 400 e 600, de modo a uniformizar a superfície, e em seguida passou por limpeza com água e álcool, a fim de eliminar quaisquer impurezas. Para fixação do sensor, também foi utilizada a resina epóxi. Os fios para transmissão dos sinais de resistência elétrica do sensor foram fixados por soldagem.

3.6 Testes do dispositivo

O comportamento elástico da mola do dispositivo foi testado promovendo deformações em seu estado inicial. Com o auxílio do paquímetro centesimal, foi medida a distância entre as pontas da mola, anterior e posterior à deformação aplicada, conforme Figura 3. Ao final de cada teste, a distância final mensurada era usada como parâmetro inicial para o procedimento seguinte.

Figura 3 – Matéria-prima do extensômetro



Fonte: Próprio autor (2017)

Com os dados, foram calculadas a deformação alcançada (ϵ_a) e a deformação residual (ϵ_r) para cada teste, conforme as equações a seguir.

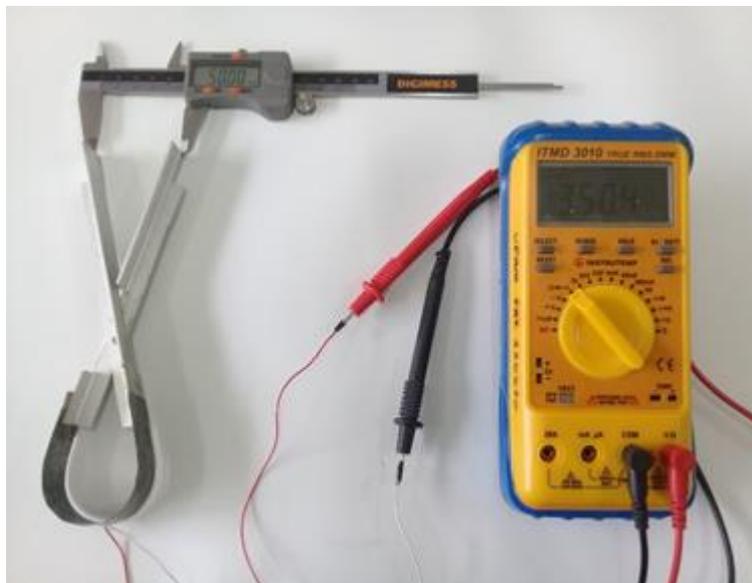
$$\epsilon_a = \frac{Da - Di}{Di} \quad (5)$$

$$\epsilon_r = \frac{Df - Di}{Di} \quad (6)$$

Em que, Di é a distância inicial das extremidades da mola; Da é a distância alcançada com a deformação aplicada; e Df é a distância final, após os valores o esforço da deformação.

Para teste de funcionamento do dispositivo desenvolvido, o extensômetro foi apoiado sobre uma base plana, e um paquímetro foi colocado entre os braços do dispositivo, ajustando a medida do paquímetro para a distância entre os braços da estrutura, conforme Figura 4. Foram realizadas variações na abertura dos braços e verificadas as alterações da resistência do sensor *strain gauge*, em conformidade com a abertura dos braços. A leitura das variações de resistência elétrica foi realizada com *Multímetro Digital Portátil True Rms Itmd 3010*.

Figura 4 – Matéria-prima do extensômetro



Fonte: Próprio autor (2017)

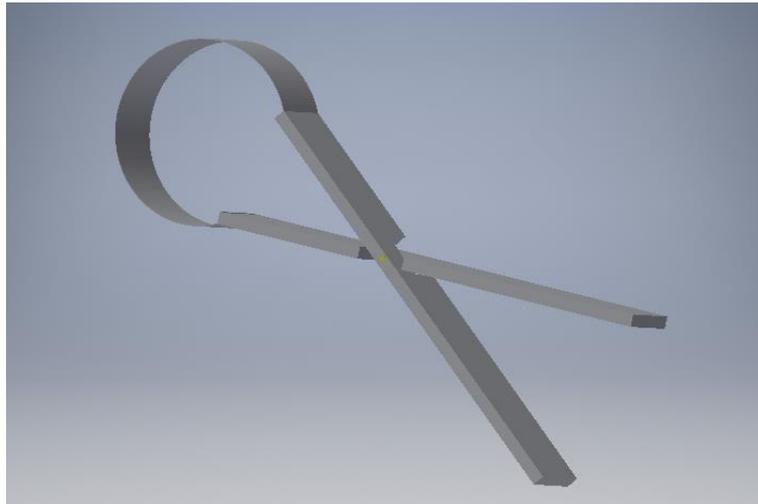
Ao final, foi calculada a média das resistências medidas a fim de relacioná-la com a deformação aplicada. Foram realizadas variações da distância entre os braços de acordo com as porcentagens de deformação principais (50%, 100% e 150%).

4. Resultados e discussão

4.1 Modelo conceitual

O modelo conceitual desenvolvido neste trabalho foi selecionado seguindo critérios de funcionalidade, alta precisão em medida e baixo custo e facilidade de fabricação, Figura 5.

Figura 5 – Modelo conceitual



Fonte: Próprio autor (2017)

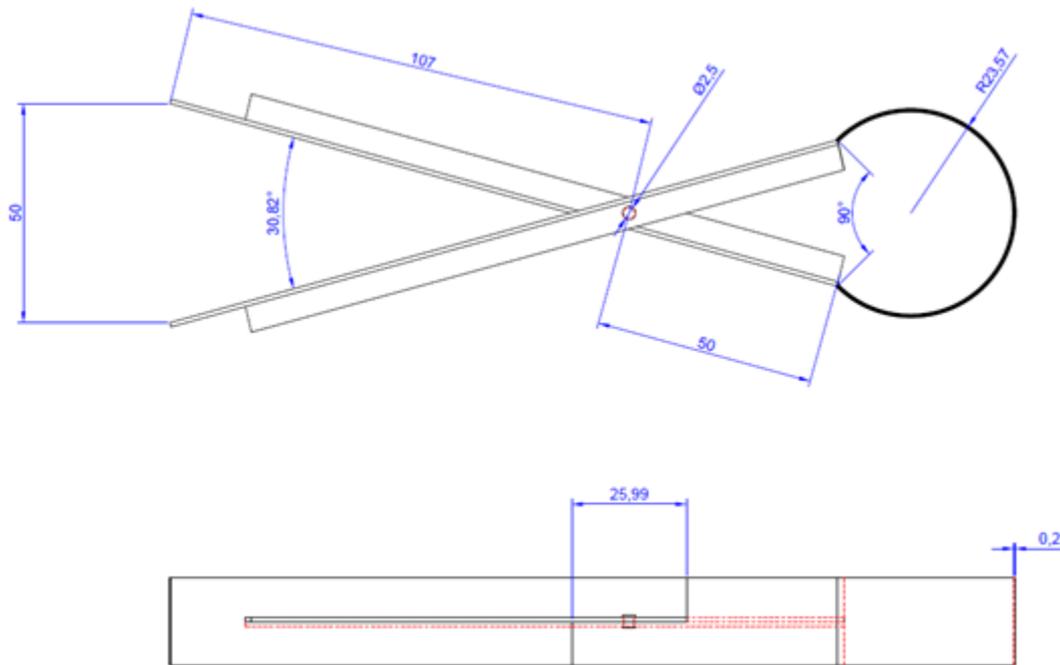
O funcionamento deste modelo se dá pelo movimento dos braços como um alicate, que por sua vez flexionam uma chapa metálica curva. Os braços rígidos são conectados por um pino que cria a articulação que permite o movimento. O alongamento do corpo de prova movimenta os braços, que por sua vez transmitem esse alongamento para as outras extremidades e então deformam a chapa metálica e os sensores acoplados a ela.

Como ponto positivo o modelo apresenta inovação tecnológica, facilidade de fabricação, *design* inovador e permite a utilização sem fraturar o *strain gauge*.

4.2 Projeto mecânico

A Figura 6 mostra o desenho técnico do extensômetro elaborado no *software* AutoCAD® com as dimensões calculadas pelas Equações 1 e 2.

Figura 6 – Desenho técnico do protótipo de extensômetro desenvolvido



Fonte: Próprio autor (2017)

A deflexão máxima da mola, formada pela abertura dos braços, sem que ela sofra deformação permanente, foi de **99,16mm**, e a abertura máxima dos braços foi de **129,9mm**, o que corresponde a 159,8% da abertura inicial.

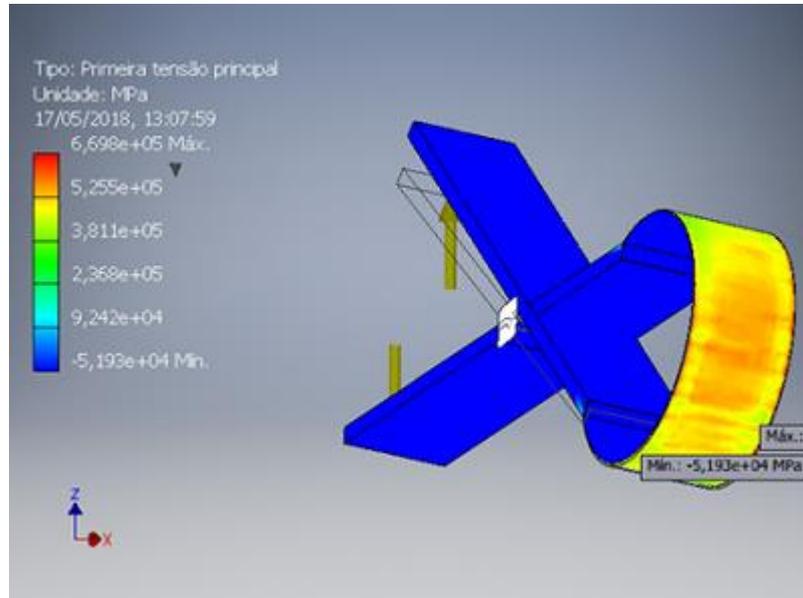
A consideração inicial sobre os braços do extensômetro foi feita para facilitar o manuseio e fabricação do dispositivo, além de assegurar que seu peso não fosse capaz de interferir na realização dos ensaios, uma vez que este é fixado perpendicularmente ao corpo de prova. O ponto de articulação e relação de transmissão, além da relação entre os arcos de mola nos estado inicial e final, foram definidos de modo a facilitar o dimensionamento e fabricação.

Além disso, a norma ASTM 8M indica que a menor área útil de corpos de prova metálicos para testes de tração tem comprimento de 50 mm. Medidas iniciais menores que 50% da região útil do corpo de prova podem gerar erros nos resultados dos ensaios, pois a estrição pode ocorrer fora dos pontos de fixação do extensômetro. Por isso, determinou-se a abertura inicial do extensômetro como sendo o comprimento da área útil do corpo de prova considerado (50mm).

4.3 Simulações estruturais

Foi simulado o comportamento do dispositivo quando submetido a condições de serviço, simulando os esforços característicos de um ensaio de tração (Figura 7).

Figura 7 – Resultado da simulação estrutural



Fonte: Próprio autor (2018)

Os resultados das simulações, representados na Figura 7, indicam a região de maior concentração de tensão no extensômetro. Sendo assim, foi definido que esta região seria usada para acoplamento do *strain gauge*, uma vez que é onde o sensor também terá maior deformação, ampliando sua resposta a abertura dos braços do extensômetro.

4.4 Protótipo

O protótipo de extensômetro desenvolvido (Figura 8) foi fabricado conforme as especificações descritas na metodologia. O produto obtido atende às principais exigências do projeto mecânico.

Figura 8 – Protótipo do extensômetro



Fonte: Próprio autor (2018)

Após a fabricação do protótipo, foi executado um teste rápido e verificou-se que a mola ainda alcançava a deformação ideal proposta no projeto.

O sensor acoplado à estrutura é mostrado na Figura 9.

Figura 9 – Sensor acoplado ao protótipo



Fonte: Próprio autor (2017)

4.5 Testes

Os testes para analisar o comportamento elástico da mola foram feitos para comparação dos cálculos de resistência dos materiais feitos, com a deformação real da estrutura. O intuito destes testes foi averiguar a capacidade da mola de se deformar e retornar ao seu estado inicial, sem a ocorrência de deformação plástica, o que acarretaria na não viabilização do dispositivo, uma vez que as deformações permanentes refletiriam na resistência elétrica inicial

do *strain gauge* a cada vez que fosse utilizado e, conseqüentemente, em dados não confiáveis de deformação. Os dados dos testes são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Testes de comportamento elástico da mola

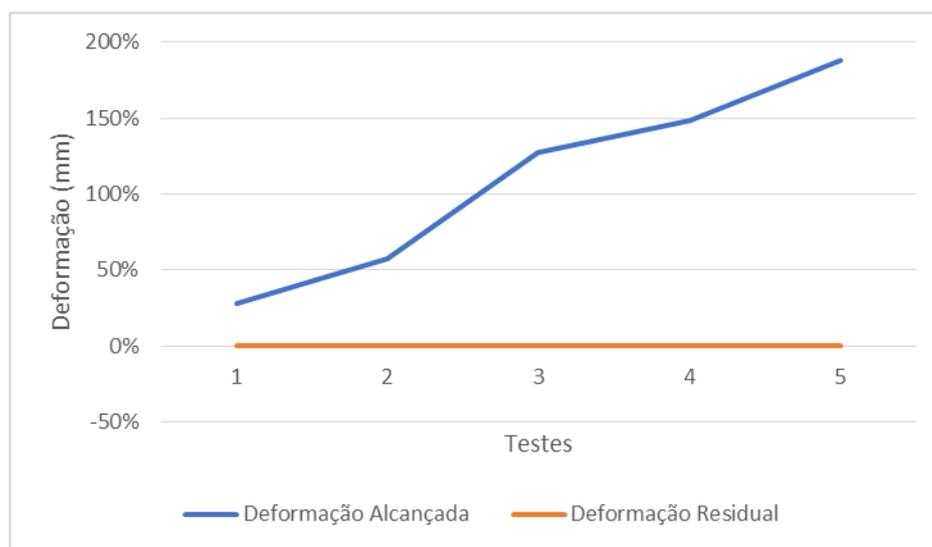
Distância Inicial (mm)	Distância Alcançada (mm)	Distância Final (mm)	Deformação Alcançada (%)	Deformação Residual (%)
38,20	48,95	38,21	28	0,03
38,21	60,33	38,20	58	-0,03
38,20	86,85	38,20	127	0,00
38,20	95,10	38,21	149	0,03
38,21	110,00	38,21	188	0,00

Fonte: Próprio autor (2018)

Os valores de deformação permanente desta magnitude podem ser desconsiderados, pois estão dentro da margem de erro do paquímetro (0,01 mm).

O Figura 10 demonstra os resultados dos testes relacionando as deformações alcançadas em cada um dos testes, e demonstra o comportamento elástico da mola.

Figura 10 – Comportamento elástico da mola



Fonte: Próprio autor (2018)

Os testes de leitura do sinal de do *strain gauge* foram realizados para verificar a capacidade do dispositivo de medir a variação da abertura dos braços pela variação do sinal de resistência elétrica. A Tabela 2 expõe os dados resultantes do teste de funcionamento.

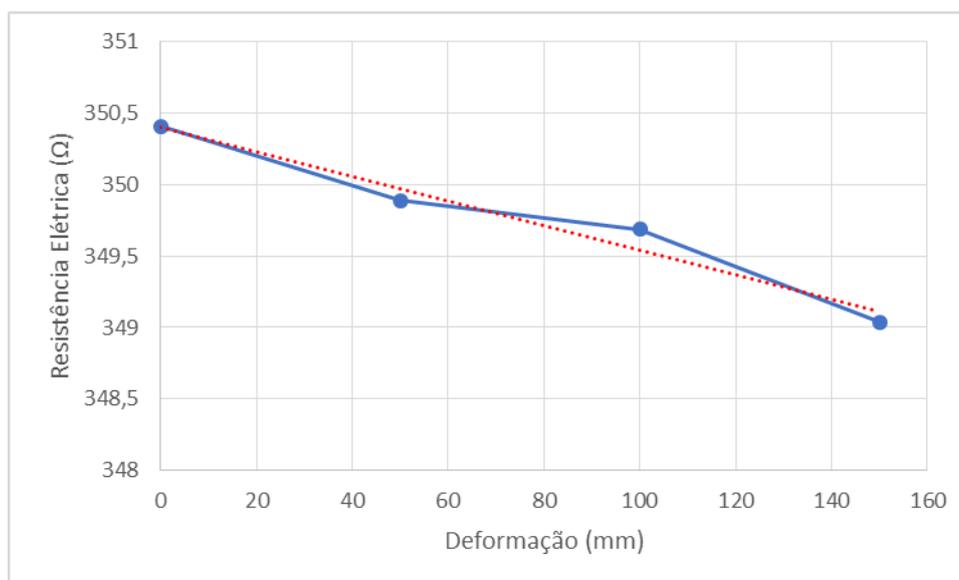
Tabela 2 – Testes de leitura da variação de resistência elétrica do dispositivo

Comprimento Nominal (mm)	Deformação (%)	Resistência Elétrica	
		Média (Ω)	Desvio Padrão (%)
50	0	350,41	0,057
75	50	349,89	0,057
100	100	349,69	0,057
125	150	349,04	0,070

Fonte: Próprio autor (2018)

A Figura 11 demonstra o comportamento da variação de resistência elétrica em função da deformação.

Figura 11 – Variação da resistência elétrica em função da variação de deformação



Fonte: Próprio autor (2018)

Os resultados dos testes comprovam o funcionamento do dispositivo, uma vez que foi verificada a variação do sinal do *strain gauge* quando modificada a posição inicial dos braços do extensômetro e apontam um comportamento linear da variação da resistência elétrica em relação à deformação gerada no corpo de prova em ensaios de tração.

5. Conclusão

Os testes para avaliar o comportamento elástico da mola permitiram estudar sua resistência a solicitações sem que sofresse deformação plástica, pois este fator interferiria na precisão do extensômetro.

Quanto aos testes de leitura de dados, os resultados implicam num extensômetro funcional, que atende às exigências do projeto, capaz de medir a variação da deformação e informá-la em sinal de resistência elétrica transmitida pelo *strain gauge*.

O modelo desenvolvido apresentou *design* inovador, facilidade de fabricação e inovação tecnológica, além de ser capaz de viabilizar o uso dos sensores *strain gauges* em mais de um ensaio de tração.

Referencias

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM, Philadelphia. E-8M; standard test methods for tension testing of metallic materials. Philadelphia, 2010.

ANDOLFATO R. P, Camacho J. S. Extensometria Básica, Universidade Estadual Paulista - Julio de Mesquita Filho – UNESP. Ilha Solteira, São Paulo, 2007.

ASKELAND, Donald R.; PHULÉ, Pradeep P. Ciência e Engenharia dos Materiais. 1a ed. São Paulo: Cengage Learning, 2008.

CALLISTER JR., William D. *RETHWISCH*, David G. Ciência e Engenharia dos. Materiais: Uma Introdução, 8a ed., Rio de Janeiro, Gen LTC, 2015.

GARCIA, Amauri; Spim, Jaime Alvares; Santos, Carlos Alexandre dos. Ensaio dos Materiais. Rio de Janeiro: Gen LTC 2ª Ed. 2013.

KYOWA ELECTRONIC INSTRUMENTS CO. LTD. Introduction to Strain Gages. Disponível em: <<http://www.kyowa-ei.com>>. Acesso em 30 de março de 2017.

LEE, Dongil. HONG, Hyun Pyo. LEE, Myung Jin. PARK, Chan Won. MIN, Nam Ki. A prototype high sensitivity load cell using single walled carbon nanotube strain gauges. Sensors and Actuators A: Physical - Elsevier. Pág. 120-126. 2012.

LOPES, J. T. de B. Materiais de Construção Mecânica. 2008. Universidade Federal do Pará – UFPA, 2008. NI MEASUREMENT. Medindo distensão com Strain Gages. Janeiro de 2013, Disponível em: <<http://www.ni.com>>. Acesso em 31 de março de 2017.

OLIVEIRA, A.W.C. Estudo para desenvolvimento de um novo conceito de extensômetros impressos. - Manaus: UFAM, 2009.

REIS, M. L.; MOREIRA, A. M, 2008. Propriedades dos materiais. Instituto Superior de Tecnologia de Tomar – ESTT. 2008.

SHAKEEL, Muhammad. KHAN, Wasim A. RAHMAN, Khalid. Fabrication of cost effective and high sensitivity resistive strain gauge using DIW technique. Sensors and Actuators A: Physical – Elsevier. Pág. 123-130. Mar. 2017.