

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO TRIÂNGULO MINEIRO**  
**INSTITUTO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS E EXATAS**  
**PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM INOVAÇÃO TECNOLÓGICA**

**GUSTAVO MOREIRA DE OLIVEIRA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PORTÁTIL PARA**  
**ENSAIOS DE TRAÇÃO EM MATERIAIS BIOLÓGICOS**

**Uberaba**  
**2018**

**GUSTAVO MOREIRA DE OLIVEIRA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PORTÁTIL PARA  
ENSAIOS DE TRAÇÃO EM MATERIAIS BIOLÓGICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica (PMPIT) da Universidade Federal do Triângulo Mineiro como requisito para a obtenção do título de mestre.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Massao Shimano

Co-orientador: Prof. Dr. Vinícius Abrão da Silva Marques

**Uberaba  
2018**

**Catálogo na fonte: Biblioteca da Universidade Federal do  
Triângulo Mineiro**

G47d Oliveira, Gustavo Moreira de  
Desenvolvimento de um equipamento portátil para ensaios de tração em materiais biológicos / Gustavo Moreira de Oliveira. -- 2018. 67 f. : il., fig., graf., tab.

Dissertação (Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica) -- Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, MG, 2018  
Orientador: Prof. Dr. Marcos Massao Shimano  
Coorientador: Prof. Dr. Vinícius Abrão da Silva Marques

1. Instrumentos e aparelhos médicos - Projetos e construção. 2. Ferimentos e lesões - Tratamento. 3. Material biológico. 4. Tecido conjuntivo - Propriedades mecânicas. I. Shimano, Marcos Massao. II. Universidade Federal do Triângulo Mineiro. III. Título.

CDU 615.472

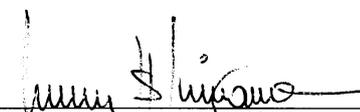
GUSTAVO MOREIRA DE OLIVEIRA

DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PORTÁTIL PARA ENSAIOS  
DE TRAÇÃO EM MATERIAIS BIOLÓGICOS

Trabalho de conclusão apresentado ao  
Programa de Mestrado Profissional em  
Inovação Tecnológica da Universidade Federal  
do Triângulo Mineiro, como requisito para  
obtenção do título de mestre.

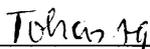
Uberaba, 27 de fevereiro de 2018

Banca Examinadora:



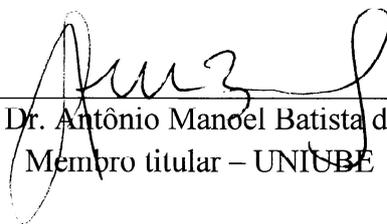
---

Prof. Dr. Marcos Massao Shimano  
Orientador – PMPIT – UFTM



---

Prof. Dr. Tobias Anderson Guimarães  
Membro Titular – UFTM



---

Prof. Dr. Antônio Manoel Batista da Siva  
Membro titular – UNISUBE

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus e toda minha família que sempre foi a base de toda minha inspiração e força para continuar com meus propósitos de vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente ao meu orientador Prof. Dr. Marcos Massao Shimano por ter acreditado em meu trabalho, por todo apoio prestado, pelas horas de orientação, pela paciência e pelo conhecimento compartilhado.

Ao meu co-orientador Prof. Dr. Vinícius Abrão da Silva Marques obrigado pelos ensinamentos e por tornar as dificuldades enfrentadas mais simples na sua maneira de ver.

À Prof. (a) Dr. Mônica pela disponibilidade de sempre ajudar com as dúvidas e sempre estar disposta a esclarece-las.

À minha esposa Loren por acreditar, apoiar e compartilhar vários momentos de alegria, me dando força para sempre buscar meus objetivos.

Aos meus familiares que sempre estiveram ao meu lado me apoiando e me dando base para todas as minhas conquistas.

À FAPEMIG que nos apoiou financeiramente para o desenvolvimento deste projeto, obrigado pela contribuição.

Ao PMPIT, obrigado por todo o suporte e base de conhecimento adquirido para que o projeto fosse executado com qualidade.

## RESUMO

Dentre os vários tipos de materiais biológicos, os tecidos conjuntivos moles são responsáveis por ligar, suportar e proteger o corpo humano. Dos estudos realizados com estes tipos de tecido, destaca-se a avaliação das propriedades mecânicas destes materiais, as quais são essenciais para conhecer o seu comportamento e embasar o desenvolvimento de novas técnicas de tratamentos de lesões e implantes. Um dos métodos mais simples e mais utilizados para a obtenção das propriedades mecânicas é o ensaio de tração. Apesar da relativa simplicidade, nota-se que esse tipo de método geralmente requer um processo de conservação do corpo de prova até a realização do ensaio, o que pode levar a alterações em suas propriedades. Visto a dificuldade dos pesquisadores de realizar o ensaio de tração logo após a retirada do material biológico, o objetivo deste trabalho foi construir um equipamento capaz de realizar os testes nos locais onde ocorre a retirada. O projeto foi dividido nas montagens mecânica, eletrônica e na validação das medidas para utilização em materiais biológicos. A primeira etapa foi composta pela idealização da estrutura mecânica e dos mecanismos do sistema de tração do equipamento, para tal, optou-se por utilizar o alumínio na composição da maioria das peças. Após o processo de desenho 3D e testes em programas de simulação computacional, a máquina foi construída e integrada a parte eletrônica. O desenvolvimento da eletrônica foi feito com módulos de fácil acesso no mercado, possibilitando uma prototipagem rápida, visando a obtenção de resultados para a validação do protótipo. Um relógio comparador foi utilizado para a medição da deformação do corpo de prova e pesos-padrão foram usados para a validação da medida da força durante o ensaio. O processo de validação da deformação foi realizado em 12 grupos variando os seguintes fatores: carga, velocidade e posição. Desta maneira, calculou-se os erros e os intervalos de confiança. O intervalo da média do erro da medida do deslocamento foi de  $0,0132 \pm 0,0064$  mm. Já a estimativa intervalar da média do erro da medida da força obtida foi de  $-0,0004$  e  $0,0012$  kgf. Portanto, por se tratar de uma material com característica anisotrópicas e baseando-se em trabalhos os quais mostram as variações deste tipo de material, concluiu-se que a máquina atende a essa aplicação, pois os erros obtidos são menores que a menor variação destas medidas.

Palavras chaves: material biológico, ensaio de tração, tecido conjuntivo mole e propriedades mecânicas.

## ABSTRACT

Among the various types of biological materials, the connective tissues are responsible for binding, supporting and protecting the human body. Of the studies carried out with these tissue types, an evaluation of the mechanical properties of these materials is essential to know their behavior and to base the development of new techniques implants and of lesions' treatment. One of the simplest and most widely used methods for obtaining mechanical properties is the tensile test. Despite the relative simplicity, it is noted that this type of method generally requires a process of preservation of the specimen until the test is performed, which may lead to changes in its properties. Considering the difficulty of the researchers to perform or test traction soon after a removal of the biological material, the objective of this work is to construct an equipment capable of performing the tests in the places where the withdrawal occurs. The project was divided into mechanical, electronic and measurement's validation for use in biological materials. The first stage was composed by the idealization of the mechanical structure and the mechanisms of the traction system of the equipment, for that, it was chosen to use aluminum in the composition of most pieces. After the 3D design process and tests in computer simulation programs, the machine was built and integrated into the electronic part. The development of the electronics was done with modules of easy access in the market, enabling rapid prototyping aiming at obtaining results for the validation of the prototype. A comparator watch was used to measure the deformation of the test piece and standard weights were used for the validation of the force measurement during the test. The deformation validation process was performed in 12 groups, varying the following factors: load, speed and position. In this way, the errors and the confidence intervals were calculated. The mean displacement error interval was  $0.0132 \pm 0.0064$  mm. Meanwhile the interval estimate of the mean of the force measurement error was  $-0.0004$  and  $0.0012$  kgf. Therefore, because it is a material with anisotropic characteristics and based on works that show the variations of this type of material, it was concluded that the machine meets this application, because the obtained errors are smaller than the smallest variation of these measures.

Key words: biological material, tensile test, soft tissue and mechanical properties.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Funcionamento básico de um ensaio de tração.....	15
Figura 2 - Modelo tradicional de máquinas universais de ensaio.....	16
Figura 3 - Representação esquemática do aparelho utilizado para a medida da força de ruptura. A- Transdutor de força. B- Sistema de tração. C- Monitor de força.....	20
Figura 4 - Vista 3D da máquina universal de ensaios.....	21
Figura 5 - Máquina de ensaio de tração em tecidos biológicos moles.....	22
Figura 6 - Desenho explodido da estrutura mecânica da máquina de ensaio de tração (1- Fuso M8 Inox; 2- Parafusos M8; 3- Base retangular; 4- Célula de carga; 5- Parafuso M8; 6- Motor de Passo; 7- Bucha de latão; 8- Braço Retangular; 9- Parafuso Allen; 10- Garra; 11- Porca M6; 12- Base suporte).....	25
Figura 7 - Vista explodida do sistema de movimentação.....	26
Figura 8 - Desenho do sistema de fixação do corpo de prova.....	27
Figura 9 - Foto demonstrando a fixação do corpo de prova na garra.....	28
Figura 10 - Equipamento após montagem final.....	29
Figura 11 - Diagrama de integração dos subsistemas da máquina de ensaio de tração.....	30
Figura 12 - Esquema de ligação dos módulos.....	31
Figura 13 - Comunicação serial para configuração e leitura do módulo HX711....	33
Figura 14 - Esquema de ligação da célula de carga com o módulo HX711.....	34
Figura 15 - Esquema de ligação do sistema de tração.....	36
Figura 16 - Funções do equipamento.....	40
Figura 17 - Modo de operação da função ajuste de posição.....	40
Figura 18 - Fluxograma da função que altera o número do ensaio.....	41
Figura 19 - Fluxograma da função do ensaio de tração.....	42
Figura 20 - Exemplo de tabela gerada pela máquina após tratamento dos dados.....	43
Figura 21 - Diagrama dos procedimentos de testes.....	46
Figura 22 - Posicionamento do relógio comparador para os testes com carga.....	47
Figura 23 - Pesos-padrão utilizados para validação da medida da força.....	48
Figura 24 - Método utilizado para teste da força medida pela máquina.....	48

Figura 25 - Gráfico de barras da média e intervalo de confiança de 95% do erro de cada grupo amostral .....	55
Figura 26 - Gráfico de controle para análise das medidas de deslocamento dos grupos experimentais.....	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Medidas de deslocamentos dos grupos experimentais em milímetros (mm).....	53
Tabela 2 - Tabela resumo dos fatores de cada grupo amostral .....	54

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CEP	Controle Estatístico do Processo
CI	Circuito Integrado
CS	Chip Select
CP	Corpo de Prova
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read Only Memory
I <sup>2</sup> C	Inter-Integrated Circuit
IDE	Integrated Development Environment
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia Qualidade e Tecnologia
MCU	Microcontrolador
MISO	Master Input Slave Output
MOSI	Master Output Slave Input
PCI	Placa de Circuito Impresso
PGA	Programmable Gain Amplifier
PWM	Pulse Width Modulation
SCL	Serial Clock
SDA	Serial Data
SPI	Interface Serial para Periférico
SPS	Samples Per Second
SCK	Serial Clock
UFTM	Universidade Federal do Triângulo Mineiro

## LISTA DE SÍMBOLOS

mm	Milímetro
$\mu\text{m}$	Micrômetro
V	Volt
MHz	Mega Hertz
mV	Mili Volt
A	Ampere
mm/min	Milímetro por minuto
mm/s	Milímetro por segundo
$\sigma$	Tensão
$\varepsilon$	Deformação
VDC	Volts Direct Current
Kgf	Quilograma-força
ms	milisegundos
SD.h	Biblioteca do cartão SD
P	Carga aplicada
L	Variação do comprimento
V1	Velocidade 1
V2	Velocidade 2
P1	Posição 1
P2	Posição 2
P3	Posição 3

# SUMÁRIO<sup>1</sup>

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>1.1 OBJETIVOS.....</b>	<b>13</b>
1.1.1 <i>Objetivo Geral.....</i>	13
1.1.2 <i>Objetivos específicos.....</i>	13
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1 Estado da Arte .....</b>	<b>14</b>
2.1.1 <i>Máquina universal de ensaio.....</i>	14
2.1.2 <i>Aplicações em materiais biológicos.....</i>	16
2.1.3 <i>Máquinas de ensaio de tração para materiais biológicos .....</i>	19
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>23</b>
<b>3.1 Mecânica .....</b>	<b>23</b>
<b>3.2 Eletrônica .....</b>	<b>29</b>
3.2.1 <i>Leitura da força.....</i>	32
3.2.2 <i>Sistema de tração.....</i>	36
3.2.3 <i>Sistema de armazenamento de dados.....</i>	37
3.2.4 <i>Interface com o usuário.....</i>	38
<b>3.3 Manual de operação .....</b>	<b>39</b>
3.3.1 <i>Ajuste de posição.....</i>	40
3.3.2 <i>Alterar número do ensaio.....</i>	41
3.3.3 <i>Ensaio de tração.....</i>	41
3.3.4 <i>Seleção da unidade da força.....</i>	42
<b>3.4 Pós processamento dos dados.....</b>	<b>43</b>
<b>3.5 Validação das medidas .....</b>	<b>44</b>
3.5.1 <i>Medida da deformação .....</i>	44
3.5.2 <i>Calibração da célula de carga.....</i>	47
<b>3.6 Análise estatística .....</b>	<b>49</b>
3.6.1 <i>Controle estatístico do processo .....</i>	50
<b>4 RESULTADOS .....</b>	<b>53</b>
<b>5 DISCUSSÃO .....</b>	<b>57</b>
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>60</b>

---

<sup>1</sup>- Normas de acordo com as diretrizes do Manual para apresentação de trabalhos acadêmicos baseado nas normas de documentação ABNT da Universidade Federal do Triângulo Mineiro de 2013.

## 1 INTRODUÇÃO

O tecido conjuntivo mole é um grupo primário de tecidos responsáveis por ligar, suportar e proteger o corpo humano e suas estruturas, como os órgãos. Os tendões, ligamentos, veias e pele são exemplos deste tipo de tecido (HOLZAPFEL, 2001).

Dentre os estudos realizados sobre este tipo de tecido, além da análise morfológica, constata-se a importância de se identificar suas propriedades mecânicas, mais especificamente, seu limite de resistência à tração, devido à sua função de sustentação e tração. Uma forma eficiente e simples de se obter as propriedades mecânicas de materiais é por meio do ensaio de tração. Este método consiste na aplicação de uma força de tração uniaxial a um corpo de prova (CP), até que ocorra sua ruptura. As variáveis de saída deste ensaio correspondem à variação do comprimento (L) em função da carga aplicada (P). A partir do processamento destes resultados é possível gerar uma curva de tensão ( $\sigma$ ) versus deformação relativa ( $\epsilon$ ) (GARCIA; SPIM; DOS SANTOS, 2012).

Para que se obtenham as características fisiológicas e mecânicas de um material biológico sem influência de qualquer tipo de fixadores e soluções, torna-se necessário um equipamento para ensaio de tração portátil, possibilitando analisar o material a fresco, imediatamente após sua retirada durante o processo cirúrgico. Assim este instrumento deve conter as especificações exigidas para que o mesmo possa ser utilizado dentro de uma sala de cirurgia.

Dentre os trabalhos encontrados sobre o tema foram selecionados dois autores que mais se enquadraram na área da pesquisa: Naresse (1987) e Guimarães et al. (1998). O primeiro elaborou uma máquina manual com leitura de força por meio de

um transdutor elétrico (*strain gauge*) montado em uma barra utilizando a variação da flexão para a medição da força de tração. Já Guimarães et al. (1998), aprimorou o conceito de Naresse (1987), inserindo um motor ao processo de aplicação da força, aprimorando a medição.

Em ambos os trabalhos, nota-se a ausência da medição da deformação do corpo de prova, importante variável para a obtenção de relações de tensão versus deformação. Além disso, os equipamentos não apresentam medição constante da força, como também não permitem que os dados sejam gravados automaticamente para análise posterior.

Visto a necessidade de um equipamento específico para tais aplicações, este trabalho tem como objetivo, apresentar o projeto de construção e validação de um dispositivo para ensaio de tração que atenda a aplicação, assim como, registro móvel de dados e simplicidade de operação, facilitando o processo de obtenção de dados sobre o comportamento mecânico de materiais biológicos.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

O objetivo deste trabalho foi desenvolver e validar um equipamento portátil para realização de ensaios de tração em materiais biológicos.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Projetar e construir um protótipo mecânico composto por uma estrutura base e um sistema de deslocamento;
- Desenvolver um sistema de controle utilizando de prototipagem rápida para validação das medidas;
- Demonstrar que as medidas produzidas pelo equipamento atendem a aplicação em questão (deformação do corpo de prova e força aplicada).

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo são apresentados os principais temas envolvidos no projeto e na construção do equipamento objeto deste trabalho. Na seção seguinte, o estado da arte é apresentado com a atual situação do tema trabalhado, assim como as possíveis aplicações do dispositivo proposto, de maneira a justificar este trabalho. Já na seção seguinte, demonstrou a existência e importância de construção de máquinas que atendam a necessidades específicas de pesquisas.

### **2.1 Estado da Arte**

No sentido de comprovar a real necessidade deste projeto, o conhecimento das máquinas existentes atualmente no mercado se faz necessário, assim como o nicho de aplicações carente de tecnologias mais específicas.

#### **2.1.1 Máquina universal de ensaio**

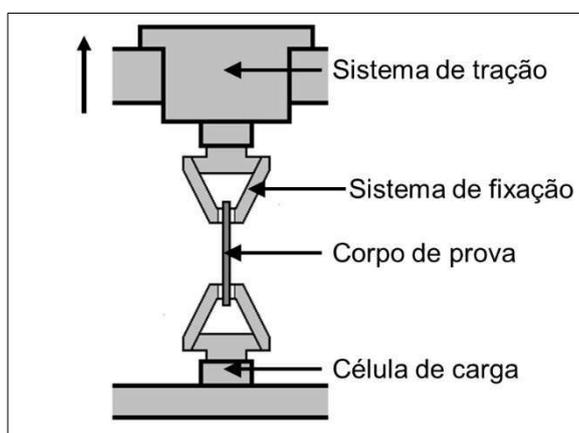
Atualmente as máquinas mais utilizadas para a realização de ensaios de tração são as máquinas universais de ensaio. Por se tratar de um equipamento universal, este é direcionado para aplicações em uma ampla variedade de materiais, como: compostos de borrachas (ANTONIA, 2003), titânio (BAUER, 2007), cerâmicas (BORBA, 2010), dentre vários outros materiais das mais diversas áreas do conhecimento, além da capacidade de realizar vários outros tipos de ensaios, como: ensaio de compressão, torção e flexão.

Na área acadêmica, as máquinas universais de ensaios são comumente utilizadas como ferramenta de pesquisa e para ministrar aulas práticas, abordando os ensaios de tração e compressão e as propriedades mecânicas envolvidas.

No âmbito empresarial, estas máquinas geralmente estão presentes nos setores de qualidade, pesquisa e desenvolvimento, com o objetivo de testar novos materiais e manter a qualidade dos produtos comercializados, como por exemplo, na construção civil.

Estes equipamentos podem ser divididos em subsistemas para melhor compreensão de seu funcionamento. Basicamente ela é composta por: uma estrutura robusta de sustentação; um sistema de movimentação; um sensor para medição de força (célula de carga); outro para medir o deslocamento; o sistema de obtenção e tratamento dos dados; interface com o usuário e estrutura de fixação do corpo de prova. A Figura 1 mostra o funcionamento básico de um ensaio de tração com a representação dos sistemas básicos. Como pode ser visto, o ensaio inicia fixando um corpo de prova no sistema de tração. Após a fixação, o equipamento é acionado e o ensaio se inicia, gravando geralmente a força medida pelo elemento sensor e a deformação do corpo de prova até sua ruptura.

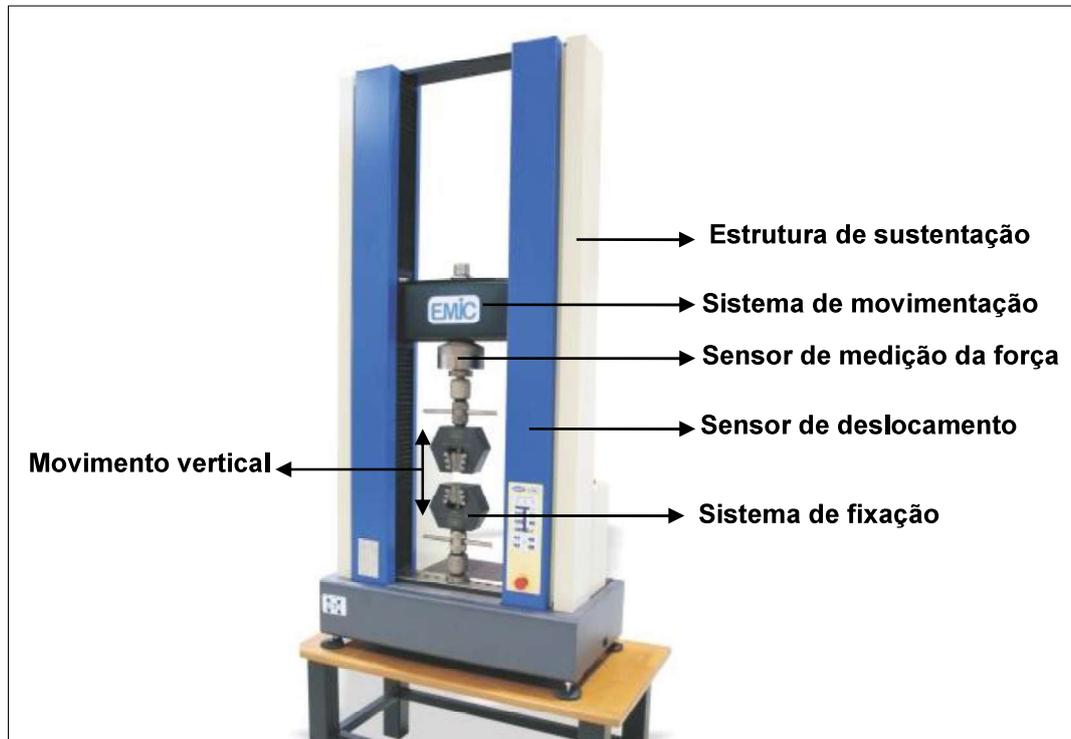
Figura 1 - Funcionamento básico de um ensaio de tração.



Fonte: Adaptado de [www.engineeringarchives.com](http://www.engineeringarchives.com), 2017

A Figura 2 ilustra a máquina universal de ensaio do fabricante EMIC® que mostra um modelo padrão encontrado no mercado.

Figura 2 - Modelo tradicional de máquinas universais de ensaio



Fonte: Adaptado de [www.emic.com.br](http://www.emic.com.br), 2017.

Pelo fato de atender os mais diversos tipos de demanda, o equipamento necessita de uma robustez considerável para suportar desde pequenas, até altas cargas, aumentando as dimensões, peso e custo do produto.

### 2.1.2 Aplicações em materiais biológicos

Os tendões, ossos, ligamentos e pele são exemplos de materiais que se busca conhecer os comportamentos diante de aplicações de cargas, cruciais tanto para desenvolver novas técnicas para tratamento de lesões (OLIVEIRA F., 2004), quanto para testar novas tecnologias para substituí-los (ISA et. al., 2015). Assim, existe um

alto interesse em conhecer tais propriedades dos materiais biológicos, pois diariamente estes são submetidos a esforços.

Devido a não linearidade e o comportamento anisotrópico dos tecidos conjuntivos moles, o desenvolvimento de um modelo genérico para o estudo das propriedades mecânicas foi elaborado por Holzapfel (2001), para prever a resposta mecânica de artérias submetidas a condições fisiológicas de carregamento.

Lebled, Grover e Paxton (2014), apresentaram uma nova forma de substituir tendões após lesões. Diante disso, os autores utilizaram o ensaio de tração para obter e comparar as propriedades mecânicas do novo material.

Isa et al. (2015), com o objetivo de “analisar o desempenho de duas telas cirúrgicas de composições diferentes durante o processo de cicatrização de defeito de parede abdominal de ratos”, utilizou o ensaio de tração para comparar a resistência à tração dos componentes por meio da deformação máxima e a tensão de ruptura.

Assim os trabalhos citados anteriormente ilustram a vasta aplicação de ensaios de tração em materiais biológicos no intuito de conhecer suas propriedades mecânicas.

A metodologia utilizada para a realização dos ensaios de tração em materiais biológicos possui elevada influência nos resultados. Os principais fatores mencionados na literatura são: a medida das características dimensionais, a determinação da velocidade do ensaio, o método de fixação do corpo de prova (CP) (CONSTANTINO et al., 2016) e o método de conservação (BATISTA et al., 1996; FERREIRA et al., 2015; GUIMARÃES G. et al., 2009; MIYAMOTTO et al., 2009; RABELO et al., 2006).

---

Neste sentido, um estudo metodológico para caracterização mecânica de tecidos biológicos moles foi proposto por Guzman, 2014, para diminuir as influências dos métodos nos resultados.

O início do procedimento metodológico para a obtenção do CP acontece, geralmente retirando este material de animais (BRINGEL, 2011; CONSTANTINO et al., 2016; GUZMAN, 2014; ISA et al., 2015; OLIVEIRA J., 2005; OLIVEIRA, F., 2004; PUGLIESI, MORO, PACCOLA, 2005; RESENDE et al., 2008; RODRIGUES, 2011), pacientes (BRINGEL, 2011) ou até cadáveres humanos (SILVARES, 2001). A principal forma se dá por meio de estudos com animais. Neste caso, o processo geralmente se inicia pela eutanásia e posteriormente o material biológico é retirado, preparado, mantido em solução salina 0,9% (BRINGEL, 2011) e congelado até a realização do ensaio (ISA et al., 2015; OLIVEIRA J., 2005; OLIVEIRA, F., 2004; PUGLIESI, MORO, PACCOLA, 2005).

Outra forma de obtenção de CP é feita utilizando cadáveres, que podem ser humanos (BRINGEL, 2011; SILVARES, 2001) ou animais (CONSTANTINO et al., 2016; GUZMAN, 2014; RODRIGUES, 2011), dos quais os materiais são retirados e congelados até a execução do ensaio de tração.

Em todas as aplicações citadas, antes do ensaio, o material deve passar pelo descongelamento. Assim o corpo de prova é mantido em temperatura ambiente (CONSTANTINO et al., 2016; ISA et al., 2015; OLIVEIRA J., 2005; OLIVEIRA, F., 2004; PUGLIESI, MORO, PACCOLA, 2005; RESENDE et al., 2008), como também podem ser colocadas sobre o CP compressas embebidas em solução fisiológica 0,9% (HUERTA, CORONA, OLIVA, 2010).

Também foram encontrados na literatura casos em que são aplicadas outras substâncias para conservação do material, por exemplo, a glicerina a 98% (BATISTA

et al., 1996; FERREIRA et al., 2015; GUIMARÃES G. et al., 2008) e o glutaraldeído (FERREIRA et al., 2015; MIYAMOTTO et al., 2009). Ambos os meios de conservação constaram modificação das propriedades mecânicas dos materiais ensaiados.

Nota-se portanto, que na maioria dos estudos, os ensaios de tração não acontecem logo após a retirada dos materiais, sendo necessários os procedimentos de conservação. Esta limitação geralmente acontece pelo fato do pesquisador não possuir uma máquina de tração acessível, pelo fato da máquina estar em outro local ou por não possuir conhecimento para operá-la.

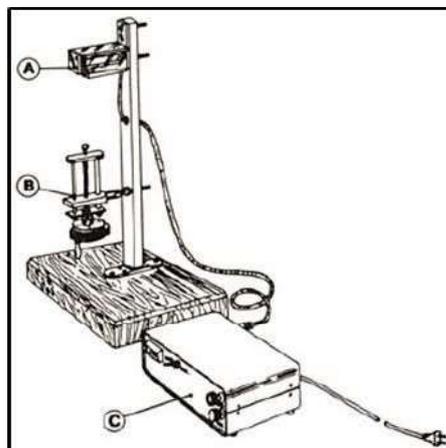
Neste sentido, fica claro a necessidade de uma máquina que possa ser deslocada para o local onde está sendo feito os procedimentos de obtenção do CP, como também possa ser operada facilmente sem necessidade de conhecimentos técnicos do usuário, possibilitando conservar as propriedades mecânicas dos materiais.

### **2.1.3 Máquinas de ensaio de tração para materiais biológicos**

Visto a necessidade de alguns pesquisadores de ensaiar materiais com características específicas, alguns trabalhos anteriores apresentaram máquinas de ensaio de tração que atendessem à novas abordagens.

Naresse (1987), desenvolveu um aparelho para medição da força de ruptura das cicatrizes decorrentes das anastomoses intestinais. O projeto ficou de simples operação e compacto, possibilitando o usuário transportar o equipamento.

Figura 3 - Representação esquemática do aparelho utilizado para a medida da força de ruptura. A- Transdutor de força. B- Sistema de tração. C- Monitor de força



Fonte: Luiz Eduardo Naresse, 1987

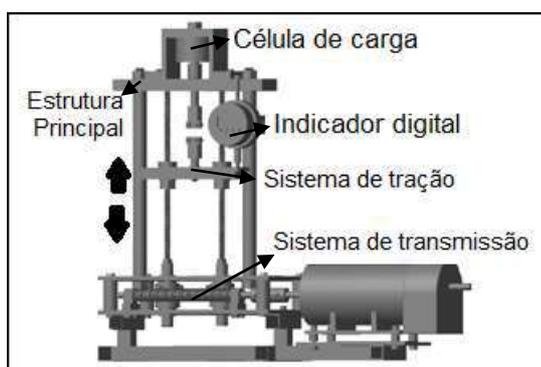
Como pode ser visto na Figura 3 o sistema de tração utilizado corresponde a uma manivela o qual movimenta o sistema de tração verticalmente. Já o monitor de força registra apenas a força instantânea, impossibilitando um registro contínuo durante o ensaio.

Atualizando os conceitos de anteriores, Guimarães et. al, (1998), propuseram melhorias no projeto, remodelando o sistema de tração e aperfeiçoando a medida da força de ruptura. Para isso, adicionaram um motor para o sistema de tração e aumentaram a sensibilidade do monitoramento de força. Porém o sistema ainda continuou registrando apenas a força instantânea, impossibilitando o acompanhamento contínuo do ensaio.

Já Huerta, Corona, Oliva (2010), apresentaram uma máquina de ensaios de tração voltada para obtenção das propriedades mecânicas de filmes finos, o que permitiria que pudesse ser aplicada à materiais biológicos. O projeto propôs construir e validar uma máquina que pudesse gerar resultados de deslocamento em escala de até 1 nanômetro. Todo o sistema foi projetado especificamente para atender essa demanda, onde as principais mudanças em relação às máquinas tradicionais se

deram no sistema de tração e no sensor de deslocamento. O aprimoramento no sistema de tração consistiu em diminuir significativamente a capacidade de movimentação do sistema de tração, resultando em deslocamentos menores que 0,001 mm (Figura 4).

Figura 4 - Vista 3D da máquina universal de ensaios

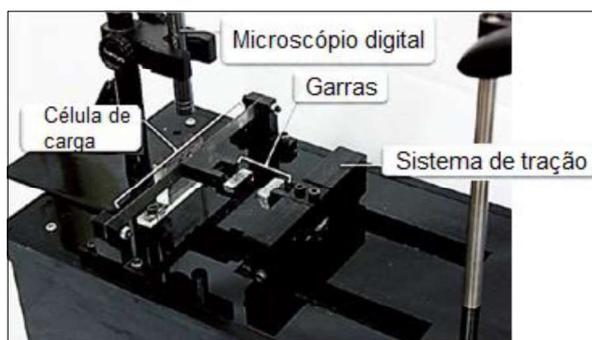


Fonte: Adaptado de Huerta, Corona, Oliva, 2010

Da mesma forma, Faturechi, Hashemi e Abolfathi (2014), apresentaram um novo conceito de máquina de tração (Figura 5). As principais contribuições deste trabalho foram no aprimoramento dos sistemas de tração e na medição de deslocamento. A velocidade obtida pelo sistema de tração foi ainda menor que no outro trabalho, de 0,01 a 800 mm/min, ou seja, 0,00016 mm/s a 13,33 mm/s. Ambos conseguiram este deslocamento por meio de motores de passo e um sistema de transmissão adequado. Já a medição do deslocamento foi feita a partir de um microscópio, obtendo também uma precisão de 1  $\mu\text{m}$  (0,001mm).

Nota-se nos trabalhos mencionados anteriormente a ausência de um equipamento que possa atender a demanda de ensaios de tração em materiais biológicos *in loco* principalmente pelo fato da dimensão das máquinas e da necessidade de um computador para a aquisição de dados.

Figura 5 - Máquina de ensaio de tração em tecidos biológicos moles



Fonte: Adaptado de Faturechi e Abolfathi, 2014

Entretanto, os trabalhos mencionados, comprovam que existe a necessidade de equipamentos com características específicas para suprir as especificidades de determinadas aplicações.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentada a metodologia do projeto, a qual foi dividida sequencialmente em: mecânica, eletrônica e o manual de operação do equipamento proposto.

#### 3.1 Mecânica

A primeira etapa desta fase consistiu no desenho da estrutura da máquina. Utilizou-se para este fim um programa gráfico de computador para desenhar em escala real e analisar as variáveis como montagem e dimensões dos elementos. Foi utilizado o programa SolidWorks® 2014 pela qualidade e simplicidade na utilização. Também foram definidos os componentes mecânicos e elétricos necessários para a montagem, como: motor, célula de carga e elementos eletrônicos para construção da placa de interface.

Para minimizar as possíveis mudanças na estrutura durante o processo de construção, mais especificamente no momento de orçamento dos materiais, uma consulta foi feita para levantar quais eram os materiais e dimensões comerciais disponíveis na região. Assim optou-se por utilizar o alumínio na construção da estrutura, uma vez que sua densidade, acabamento e características mecânicas se adequaram as necessidades do projeto.

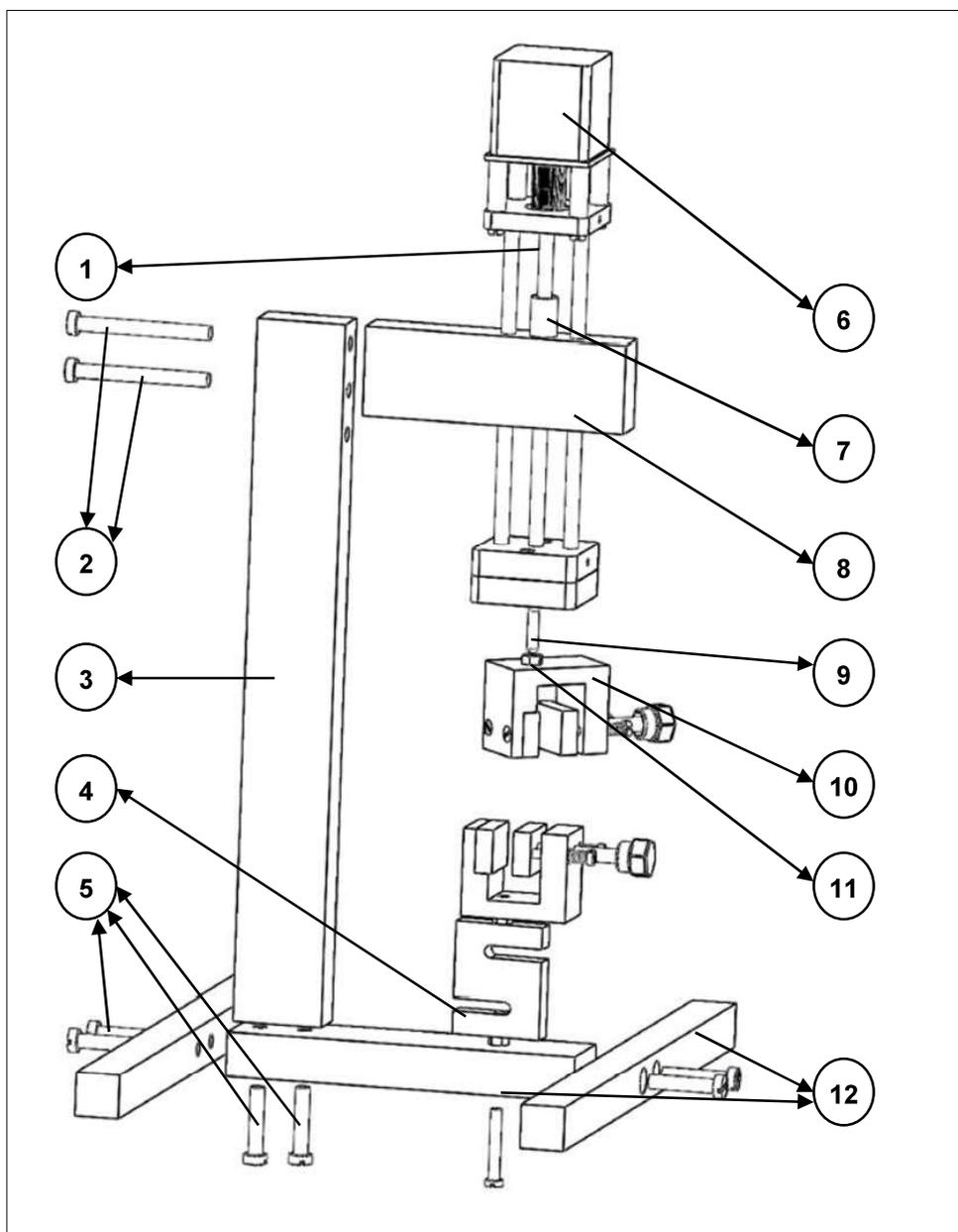
Com base nos estudos das máquinas existentes e no modo como estas dispõem os sistemas de tração, desenvolveu-se uma estrutura de forma a simplificar sua construção mantendo a robustez do dispositivo e principalmente obedecendo ao critério de portabilidade.

Deste modo foi projetado o sistema da Figura 6 composto pela estrutura de sustentação do equipamento (Itens 3, 12 e 8), o sistema de aplicação da força (Itens 1, 6 e 7), sistema de fixação do corpo de prova (Item 10) e sistema de medição da força (Item 4).

A coluna de sustentação da máquina foi desenvolvida de forma simples com apenas duas barras retangulares (Itens 3 e 8) parafusadas entre si e na base do equipamento (Item 12) com parafusos M8 (Itens 2 e 5). Na coluna (Item 3) foram feitos três furos para que seja possível ajustar a altura máxima do ensaio.

No braço (Item 8), onde o conjunto de tração foi acoplado, existem furos guias e uma bucha de latão (Item 7) com rosca M8 para transmitir o movimento giratório do motor de passo (Item 6) em movimento linear por meio do fuso (Item 1). Este movimento muda de sentido durante o ensaio, necessitando de um sistema de fixação que proporcione liberdade de descida e subida.

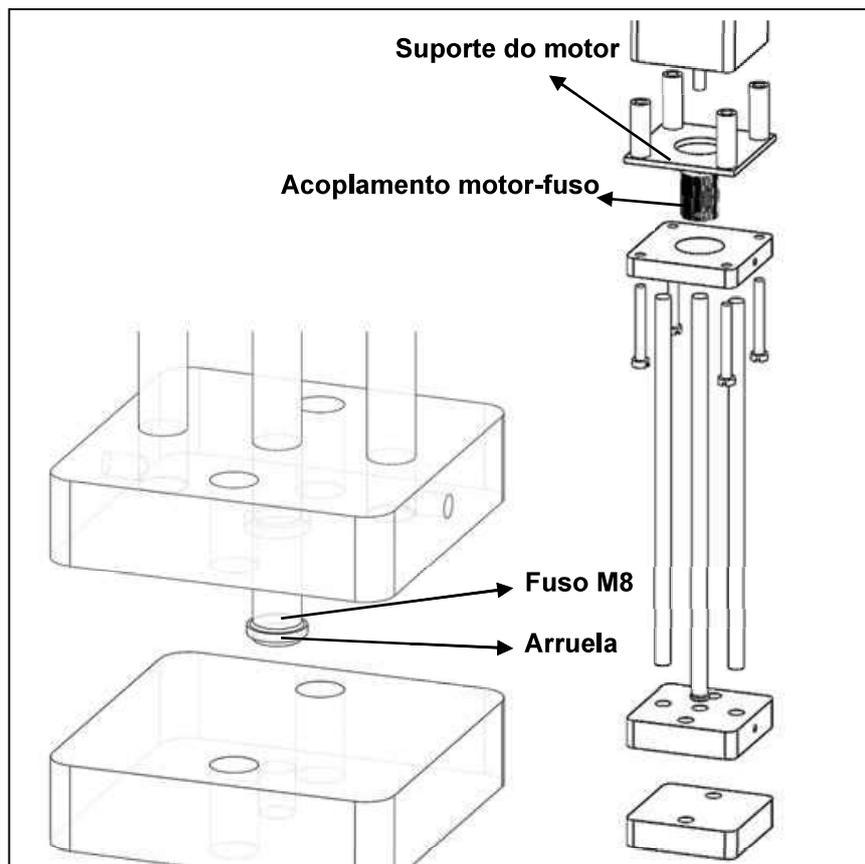
Figura 6 - Desenho explodido da estrutura mecânica da máquina de ensaio de tração (1- Fuso M8 Inox; 2- Parafusos M8; 3- Base retangular; 4- Célula de carga; 5- Parafuso M8; 6- Motor de Passo; 7- Bucha de latão; 8- Braço Retangular; 9- Parafuso Allen; 10- Garra; 11- Porca M6; 12- Base suporte)



Fonte: Do autor, 2017

Para tal propósito, optou-se por usar o fuso em uma de suas extremidades e inserir uma arruela para que a mesma não saia quando em movimento para cima, como mostra a Figura 7.

Figura 7 - Vista explodida do sistema de movimentação



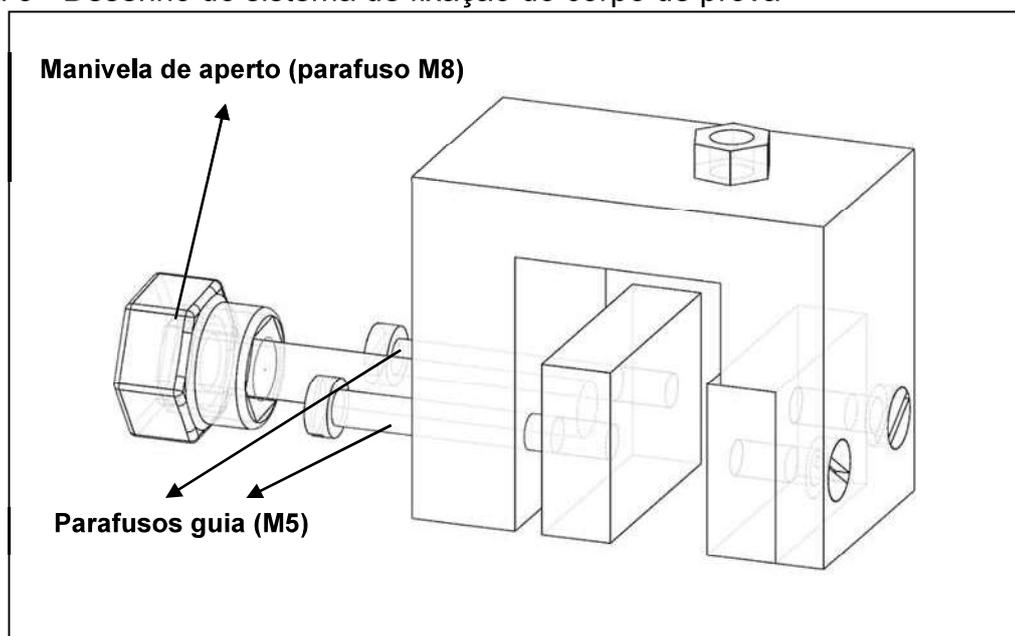
Fonte: Do autor, 2017

O acoplamento do motor no fuso foi produzido em uma impressora 3D com o intuito de diminuir o tempo de prototipagem, sem prejudicar a robustez do acoplamento, visto que o material é resistente. Um suporte para o motor de passo também impresso em 3D foi utilizado para alocar o motor a uma distância correta do fuso para melhor acoplá-los.

Concluído o sistema responsável por movimentar o elemento de fixação do corpo de prova, deu-se continuidade com a fixação da garra, assim também chamada, para a qual utilizou-se um parafuso allen M6 sem cabeça e duas porcas para ajuste, tanto na fixação do sistema de tração quanto na fixação na célula de carga.

Uma vez que a garra está fixada no sistema de tração, esta deve receber o corpo de prova. Portanto um sistema composto de um parafuso M8 exerce o movimento do elemento de aperto do corpo de prova, guiado por dois parafusos M5 com molas como pode ser visto na Figura 8.

Figura 8 - Desenho do sistema de fixação do corpo de prova



Fonte: Do autor, 2017.

Assim o corpo de prova pode ser posicionado no local como demonstrado na Figura 9. E para a fixação do mesmo, uma peça sextavada foi elaborada para melhorar a aderência do aperto, dispensando o uso de ferramentas adicionais. Importante salientar que para materiais moles como tecidos biológicos a utilização de uma pinça para posicionamento correto do corpo de prova se faz necessário.

Já em relação ao posicionamento da célula de carga, optou-se por colocá-la na base do equipamento, pois esta opção possibilita a calibração do dispositivo sem retirá-la da máquina.

Figura 9 - Foto demonstrando a fixação do corpo de prova na garra



Fonte: Do autor, 2017.

Do mesmo modo, as conexões dos acessórios de fixação do corpo de prova foram feitas seguindo o padrão da célula de carga, adotando conexão rosqueada de tamanho M6. Assim é possível utilizar acessórios de fixação comerciais de máquinas universais de ensaio.

Após os desenhos das partes independentes, efetuado a montagem de todos eles e concluindo a estrutura do equipamento, foram feitos os desenhos técnicos das partes a serem usinadas e enviados para uma empresa de usinagem. Com as partes prontas, a estrutura foi montada (Figura 10) e passou-se para o desenvolvimento da parte eletrônica.

Figura 10 - Equipamento após montagem final



Fonte: Do autor, 2017

A construção resultou em uma estrutura simples, robusta e específica para atender a demanda de ensaios em materiais biológicos.

### 3.2 Eletrônica

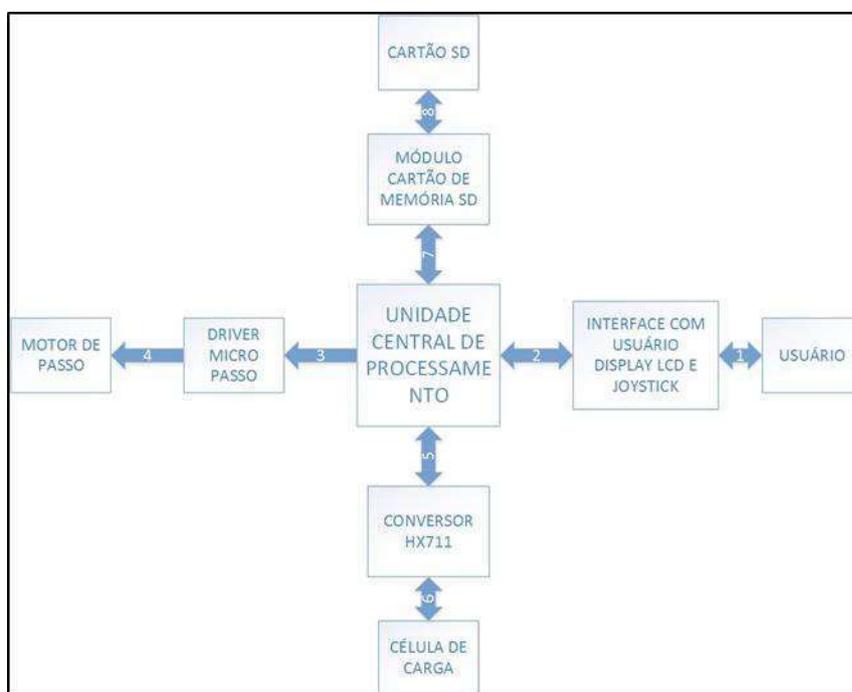
No intuito de validar o protótipo optou-se por utilizar módulos eletrônicos de uso geral para testar e adequar o funcionamento do equipamento para a aplicação proposta. Portanto, nesta seção, segue o desenvolvimento da eletrônica, como também o modo como foi feita a integração das partes resultando no protótipo.

A utilização de módulos é uma das características da prototipagem rápida que visa validar a ideia e levantar as principais dificuldades durante o projeto. Desta maneira, é possível minimizar o investimento na fase de prototipagem, validando o

conjunto, economizando tempo e investimento.

A lógica de funcionamento do equipamento consiste em integrar e processar dados dos seguintes subsistemas: sistema de tração, transdutor de força, sistema de registro de dados e interface com o usuário. Deste modo a unidade central de processamento dos dados trabalha processando os dados oriundos de cada subsistema, como mostra o diagrama da Figura 11.

Figura 11 - Diagrama de integração dos subsistemas da máquina de ensaio de tração



Fonte: Do autor, 2017.

Foram utilizados módulos para executar as funções específicas de cada subsistema, além de componentes auxiliares para o funcionamento adequado de cada um. Deste modo, cada subsistema foi testado individualmente para comprovar sua utilização para a aplicação em questão. Após os testes individuais, foi feita a primeira integração em placa de testes (*protoboard*), possibilitando testar a integração dos módulos compondo o sistema da máquina como um todo.



### 3.2.1 Leitura da força

A aquisição da força aplicada foi feita com uma célula de carga da marca Kratos® modelo CKS com capacidade de 50 kgf, sinal de saída de 2 mV/V e tensão de alimentação recomendada de 5 a 12 VDC. As ligações elétricas são identificadas de fábrica sendo 4 fios: Verde: sinal positivo, Branco: sinal negativo, Vermelho: excitação positiva e Preto: excitação negativa.

O sinal de saída da célula de carga possui intensidade de poucos milivolts, e, portanto, suscetível a ruídos. Diante disto, existe a necessidade de condicionar este sinal. Para isso, utilizou-se um módulo específico para células de carga baseado no circuito integrado HX711.

Este módulo engloba todos os tratamentos necessários para um condicionamento de sinal, desde a amplificação do sinal analógico até a conversão digital. Como pode ser visto no esquema de ligação básica para células de carga, encontrado no manual do componente.

O circuito possui um multiplexador de canal de entrada que possibilita o chaveamento de duas entradas, ou seja, possibilita a utilização de duas células de carga.

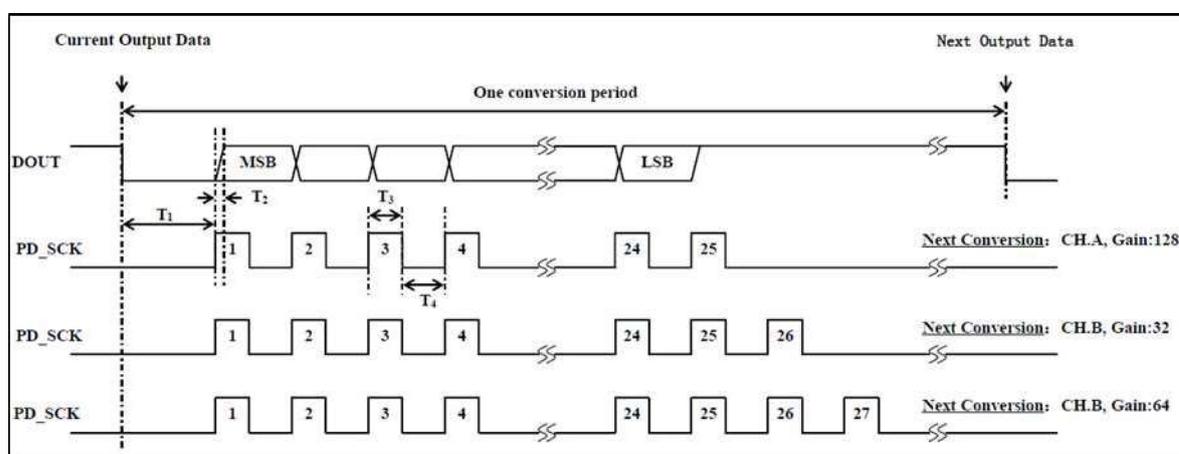
A etapa seguinte passa por um amplificador de ganho programável (*Programmable Gain Amplifier - PGA*), o qual o ganho pode ser programado por meio da comunicação serial. Esta etapa, amplifica o sinal da célula de carga multiplicando o valor obtido pelo ganho, que possui três valores possíveis: 32, 64 e 128. Por exemplo, utilizando um peso-padrão de 10 kgf sobre a célula de carga, sua variação conforme especificação (2mV/V) e tomando seu fundo de escala de 50kgf e a tensão de alimentação de 5V, utilizando o ganho de 128, teremos uma saída após o PGA de 264 mV.

Outra característica importante deste circuito é o conversor analógico para digital (A/D) com resolução de 24 bits. Cabe salientar que antes da conversão, para completar um circuito básico de condicionamento, é necessário filtrar o sinal, principalmente devido a interferências do sinal da rede elétrica. Assim, conforme o manual, o conversor A/D já possui um filtro simultâneo de frequências de 50 e 60 Hz.

A comunicação utiliza uma interface serial para ler e parametrizar o componente, o qual envia por meio do pino DOUT os 24 bits de conversão e recebe o valor do ganho do PGA no pino PD\_SCK, trabalhando conforme Figura 13. A comunicação serial utilizada por este dispositivo não segue um padrão usual, por isso a importância de entender este funcionamento para a aplicação em questão.

Conforme a Figura 13 o pino PD\_SCK é responsável por receber um *clock* vindo do microcontrolador (MCU) para que o módulo de forma sincronizada envie os 24 bits de leitura. Assim, para cada pulso no pino PD\_SCK, o MCU deve ler um bit no pino DOUT, repetindo esse procedimento 24 vezes. Após essa leitura, ainda no pino PD\_SCK, o MCU envia os três bits de configuração do PGA como mostra a Figura 13.

Figura 13 - Comunicação serial para configuração e leitura do módulo HX711



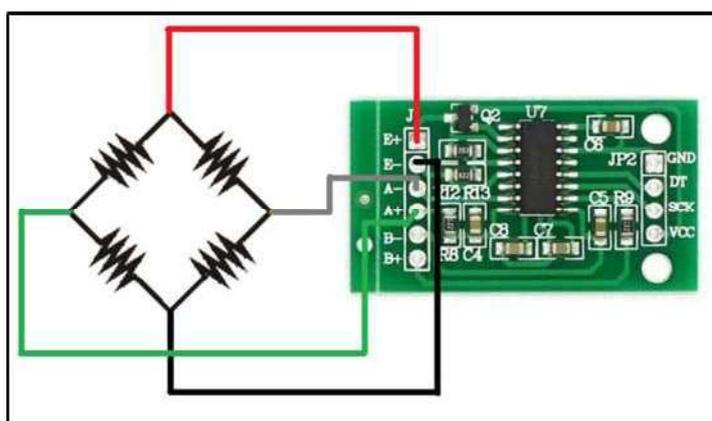
Fonte: AVIA Semiconductor, 2017

Outro fator considerado neste circuito integrado (CI) foi a questão da taxa de envio de dados, medida por meio da unidade amostra por segundos ou do inglês SPS (*Samples per second*). Conforme o manual, esta pode operar sem oscilador externo com 10 SPS ou 80 SPS, ou seja, a cada 100 ms ou 12,5 ms respectivamente, o dado está pronto para ser lido no pino de dados (DOUT).

Deste modo, a partir das especificações, a ligação da célula de carga com o módulo foi feito utilizando o canal A, conforme o esquema da Figura 14.

Feito a ligação da célula de carga com o módulo é preciso programar um dispositivo para executar essas funções de leitura. Esta tarefa cabe ao microcontrolador, portanto um Arduino Nano foi utilizado para esse propósito. Algumas das suas especificações foram determinadas devido aos módulos envolvidos, as quais foram: tensão de operação de 5V, velocidade de clock de 16MHz, 1Kb de EEPROM, 22 portas digitais, 6 PWM e dimensões de 18 x 45mm.

Figura 14 - Esquema de ligação da célula de carga com o módulo HX711



Fonte: Do autor, 2017

A ligação da saída do módulo de condicionamento de sinais foi então efetuada para que o microcontrolador fizesse a leitura e tratamento dos dados coletados pela célula de carga.

Para tal, qualquer porta digital poderia ser utilizada, visto que a comunicação serial não se trata de um padrão usual, portanto optou-se por utilizar uma biblioteca existente que trata a comunicação via software. Assim o pino de dados do condicionador (DT) foi ligado na porta digital (D2) e o pino de *clock* (SCK) na porta (D3).

Alguns testes de aquisição de dados foram realizados para obter o tempo gasto pelo circuito para converter os valores lidos pela célula. O teste procedeu da seguinte maneira: foi utilizado um pino de interrupção externa (D2/INT0) do MCU para detectar a borda de descida do pino DOUT do HX711 usado para indicar que o dado está pronto. Assim por meio da função de contagem de tempo, foi possível calcular o intervalo de cada amostragem real, ou seja, registrou-se o intervalo de tempo gasto entre cada ocorrência da interrupção.

O resultado confirmou as especificações do fabricante do condicionador. O primeiro teste foi feito sem nenhuma modificação do hardware e o tempo de amostragem foi em média de 81 ms relativo aos 10 SPS ou 100 ms presentes no manual.

Para o segundo teste foi feito uma alteração de hardware no circuito condicionador o qual o pino RATE foi colocado em nível lógico alto, alterando a amostragem para 80 SPS ou 12,5 ms. Da mesma forma foi executado o teste e constatou o mesmo resultado mencionado no manual.

Assim para se obter o maior número de pontos durante o ensaio, optou-se por trabalhar com amostragens mais rápidas mantendo esta última configuração.



O driver é acionado por meio de pulsos em seu pino STEP e sua direção determinada pelo pino DIR (Figura 15). Devido a divisão de passos em 32 vezes, o acionamento do motor mesmo em velocidades baixas, exige pulsos com intervalos pequenos. Deste modo, para que esses pulsos gerados pelo MCU não interferisse no funcionamento principal do mesmo, optou-se por utilizar um PWM no pino 10 do Arduino Nano.

O movimento do motor também foi utilizado como medida de deformação do corpo de prova, ou seja, como o motor movimenta por passos foi possível calcular o deslocamento do fuso nele acoplado e conseqüentemente sua distância percorrida.

O cálculo de quanto o sistema se desloca a cada passo do motor foi definido por duas especificações: o passo de rosca do fuso (1,25 mm), que corresponde a quanto o sistema vai se movimentar verticalmente quando o fuso gira 360°, e o número de passos do motor por volta (6400 passos). Portanto, o sistema de tração se move a cada passo, 0,0001953 mm.

Deste modo, foi possível registrar o valor do deslocamento do sistema de tração baseado nos passos do motor. Conseqüentemente, o CP por permanecer fixado ao sistema, sofre uma deformação correspondente a este deslocamento, sendo possível inferir a deformação por meio do deslocamento do sistema de tração.

### **3.2.3 Sistema de armazenamento de dados**

Este sistema tem a função de gravar os dados obtidos durante o ensaio em um cartão de memória para consulta e tratamentos posteriores. Ele integra o microcontrolador, um módulo de leitura e escrita e o cartão de memória.

O módulo possui comunicação serial padrão SPI, a qual é feita por quatro fios: MOSI, MISO, SCK e CS. Estes pinos já são identificados também no microcontrolador, pois ele possui um hardware específico para tratar esse tipo de comunicação. Além dos pinos de comunicação, o módulo foi alimentado com 5V vindos do regulador de tensão, mesmo este trabalhando com tensão de 3,3V, pois o módulo possui regulador acoplado.

A biblioteca utilizada para escrita e leitura no cartão foi a SD.h que já é incluída na IDE do Arduino. Deste modo, foram efetuados testes de leitura e gravação e um problema foi identificado. A distância dos fios deste sistema deve ser a mais curta possível, pois nos testes, quando utilizado fios mais longos, a comunicação não se estabelecia. Visto isso, o módulo foi inserido diretamente na PCI e bem próximo ao microcontrolador, eliminando assim o erro ocorrido.

#### **3.2.4 Interface com o usuário**

Este sistema é responsável por mostrar e receber dados do usuário. Para a ação de recebimento foi elaborado um conjunto de cinco botões do tipo *Push-Button*, constituídos por duas setas horizontais e duas verticais e um botão de seleção (OK).

No intuito de minimizar as quantidades de portas, os botões foram montados de forma a utilizar apenas uma porta analógica do microcontrolador. O sistema funciona variando a tensão da entrada analógica por meio de resistências. Quando cada botão é pressionado, a resistência associada a ele provoca uma queda de tensão na porta analógica, desta forma, conhecendo os valores é possível identificar qual botão foi pressionado.

Já o processo de visualização dos dados foi feita a partir de um display LCD com 2x16 caracteres, ou seja, duas linhas e dezesseis colunas, o suficiente para mostrar os parâmetros durante o ensaio e as demais funções.

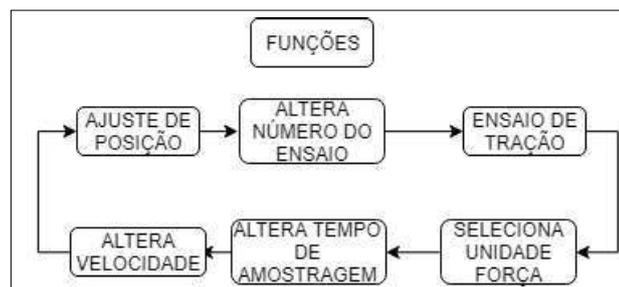
Acoplado ao display foi utilizado um módulo de comunicação I<sup>2</sup>C para minimizar a utilização dos pinos do microcontrolador. De acordo com o que foi demonstrado anteriormente, a comunicação I<sup>2</sup>C possui apenas um pino de clock (SCL) e um pino de data (SDA), a qual foram conectadas as saídas propriamente indicadas no MCU para este tipo de comunicação os quais são: SDA – porta analógica A4 e SCL – porta analógica A5.

As funções de escrita e comandos para o display foram tiradas da biblioteca LiquidCrystal\_I2C.h a qual já envolve a comunicação I<sup>2</sup>C baseada nos conceitos do CI HD44780.

### **3.3 Manual de operação**

Algumas funções foram pré-determinadas para atender as necessidades do usuário, e o principal diferencial desta máquina é a função de gravação do teste em cartão SD para atender aos ensaios in loco. Assim, as funções determinadas foram dispostas como pode ser visto na Figura 16. As principais funções foram detalhadas neste capítulo.

Figura 16 - Funções do equipamento



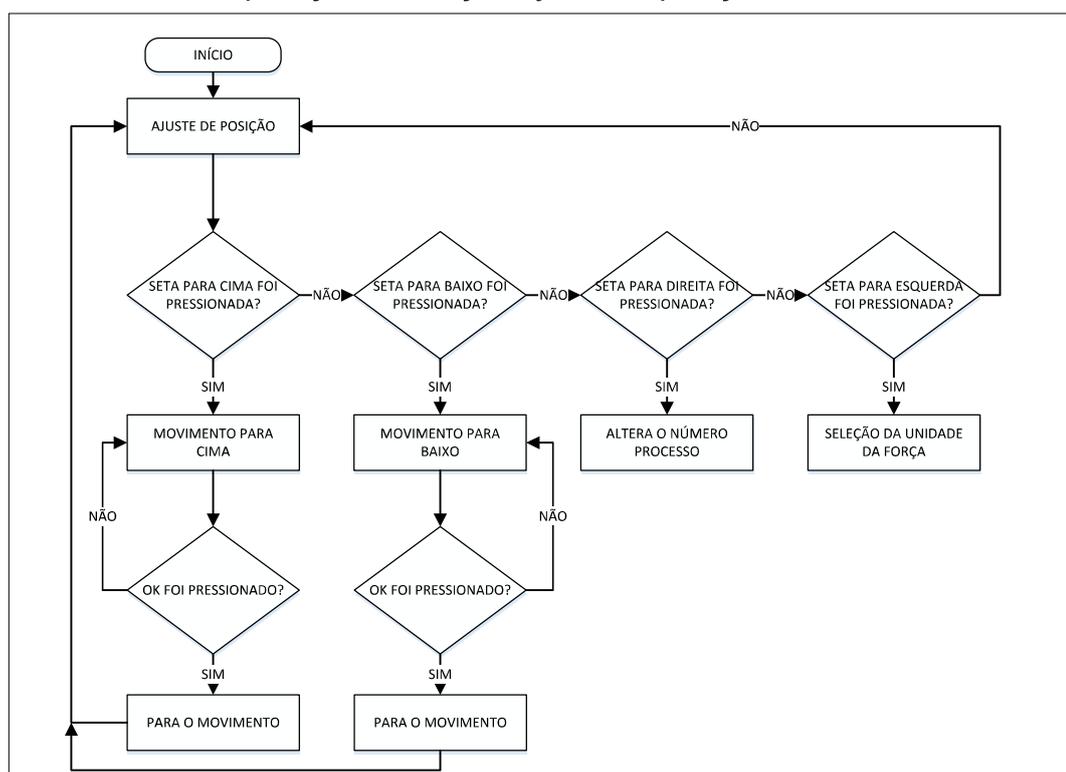
Fonte: Do autor, 2018

### 3.3.1 Ajuste de posição

Esta primeira função é utilizada para posicionar o sistema de fixação do corpo de prova adequadamente para iniciar o ensaio.

Por meio desta funcionalidade o usuário consegue movimentar este sistema para cima e para baixo posicionando o equipamento na posição mais adequado para o ensaio. O fluxograma da Figura 17 mostra o modo de operação desta etapa.

Figura 17 - Modo de operação da função ajuste de posição

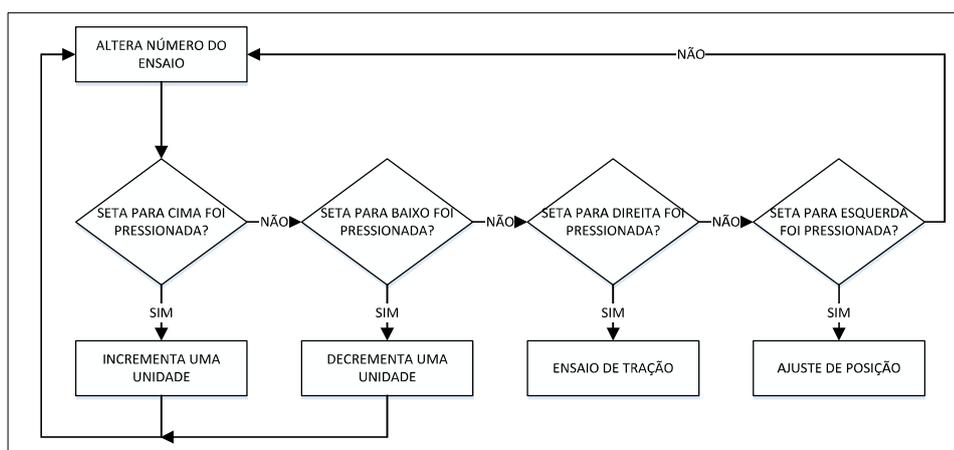


Fonte: Do autor, 2017

### 3.3.2 Alterar número do ensaio

Como a própria descrição já diz, esta função possibilita a alteração do número do ensaio que pode ser utilizado para controlar os resultados salvos no cartão de memória posteriormente, conforme Figura 18.

Figura 18 - Fluxograma da função que altera o número do ensaio



Fonte: Do autor, 2017

### 3.3.3 Ensaio de tração

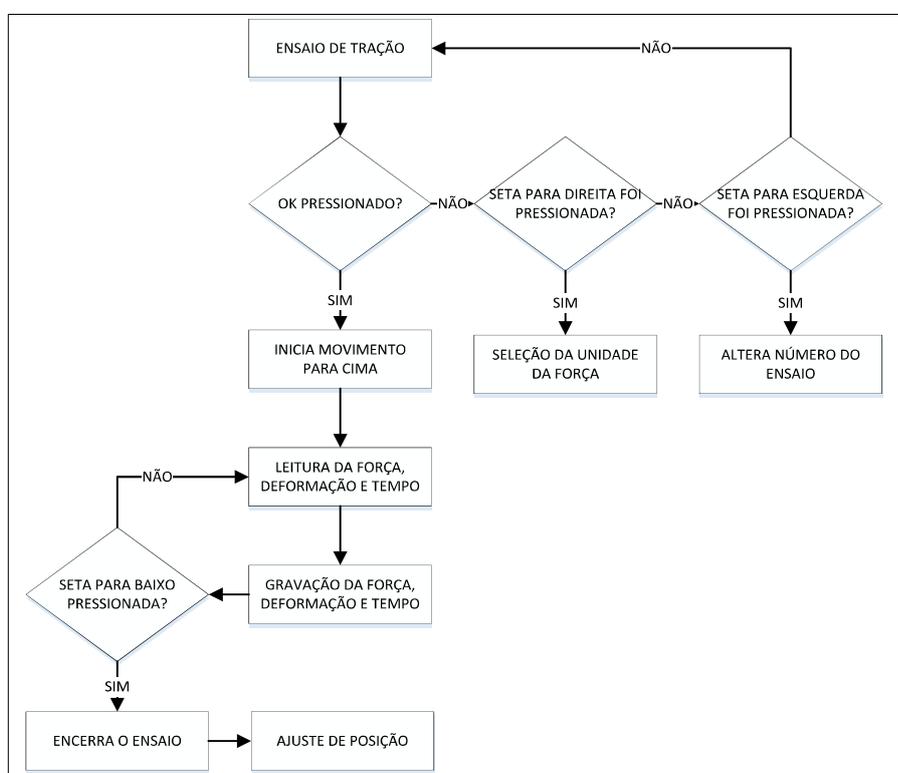
Neste momento o usuário pode iniciar o procedimento, portanto, após a inserção do corpo de prova e demais ajustes, o movimento de tração é acionado e a gravação dos dados no cartão de memória se inicia, de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 19.

Para facilitar o controle dos testes, o equipamento registra um documento de extensão “.csv” e salva todos os dados neste documento, o qual pode ser editado posteriormente. O padrão do nome dos arquivos deve ser um número de até quatro algarismos, por exemplo, “0001.csv”, determinado pela função de alteração do número do ensaio.

### 3.3.4 Seleção da unidade da força

Para facilitar na conversão de unidades de força, optou-se por disponibilizar uma função para alteração da unidade da força a qual pode ser trabalhada em quilograma força (kgf) ou em Newton (N). Para executar tal mudança, deve-se apenas apertar as setas para baixo ou para cima para fazer a transição entre as unidades e concluir com o botão “Ok”.

Figura 19 - Fluxograma da função do ensaio de tração

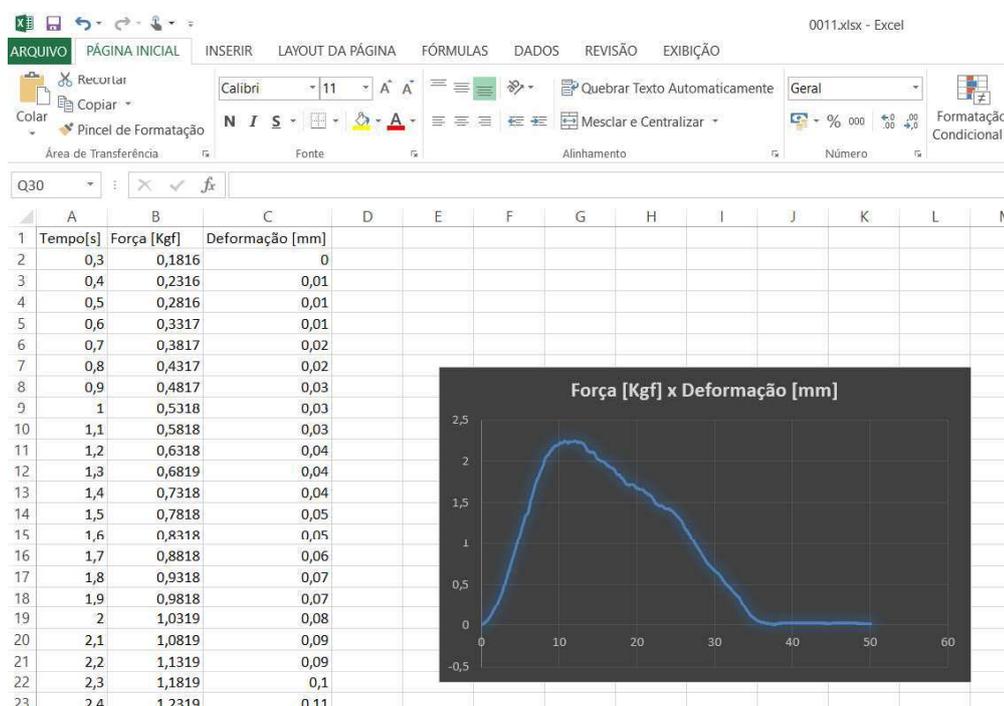


Fonte: Do autor, 2017

### 3.4 Pós processamento dos dados

Após o final do ensaio, o usuário tem acesso aos dados gerados pelo equipamento por meio do cartão de memória. De acordo com sua necessidade, o usuário processa os dados gerados na planilha gravada. Um exemplo de processamento seria a construção de um gráfico para análise, como pode ser visto na Figura 20.

Figura 20 - Exemplo de tabela gerada pela máquina após tratamento dos dados



Fonte: Do autor, 2017

### 3.5 Validação das medidas

Os resultados gerados pela máquina de ensaio de tração foram avaliados para validar o funcionamento do equipamento para a aplicação em materiais biológicos. Deste modo, foram realizados testes no Laboratório de Ensaio Mecânicos do Departamento de Engenharia Mecânica da UFTM para verificar a confiabilidade do equipamento. Para os procedimentos foram utilizados instrumentos de medida padrões para comparação das medidas geradas pelo equipamento.

#### 3.5.1 Medida da deformação

A medida de deformação é inferida a partir do deslocamento do motor de passo. Essa relação é possível pois o material é fixado em uma das extremidades e móvel na outra (acoplada ao sistema de tração). Portanto, o deslocamento está diretamente relacionado com a deformação do corpo de prova.

Deste modo, mediu-se o deslocamento do sistema de tração, simulando assim um ensaio, para confrontar as medidas de deformação do corpo de prova geradas pela máquina. Utilizou-se um relógio comparador digital da marca *Digimess*®, modelo 2, calibrado com precisão de um centésimo de milímetro (0,01mm) para obtenção das medidas.

Alguns fatores foram determinados para conduzir os experimentos no intuito de analisar o quanto cada um deles influencia os resultados, são eles: carga, posição e velocidade.

### 3.5.1.1 Posição

A posição do sistema de tração ao longo da faixa de trabalho do equipamento foi um dos fatores estabelecidos. Optou-se por este fator para validar as características construtivas do equipamento.

Neste caso, o objetivo foi comprovar que a deformação medida não se altera quando o sistema se encontra em posições distintas. Causas possíveis dessa influência podem estar ligadas a defeitos de construção como, por exemplo, guias não alinhados.

Para a execução dos testes, foram determinadas três posições ao longo da faixa de trabalho do equipamento, as quais foram referenciadas com base no braço de sustentação do sistema de tração.

O procedimento consistiu em posicionar o sistema medindo sempre a distância entre ele e o braço, onde determinou-se os valores de 40, 60 e 80 mm (P1, P2 e P3).

### 3.5.1.2 Carga

O fator carga foi escolhido principalmente com o objetivo de validar tanto as características construtivas quanto a eletrônica, visto que, a variação desta pode influenciar no desempenho do motor e nas possíveis folgas do sistema mecânico.

O teste se baseou em duas etapas, uma fase com carga e outra sem carga. Para o experimento com carga, foi construído uma peça com acoplamento direto no sistema de tração, com massa de 10 kg.

### 3.5.1.3 Velocidade

A máquina de ensaio pode operar em várias velocidades conforme a necessidade do usuário. Assim a influência da velocidade nos resultados deve ser

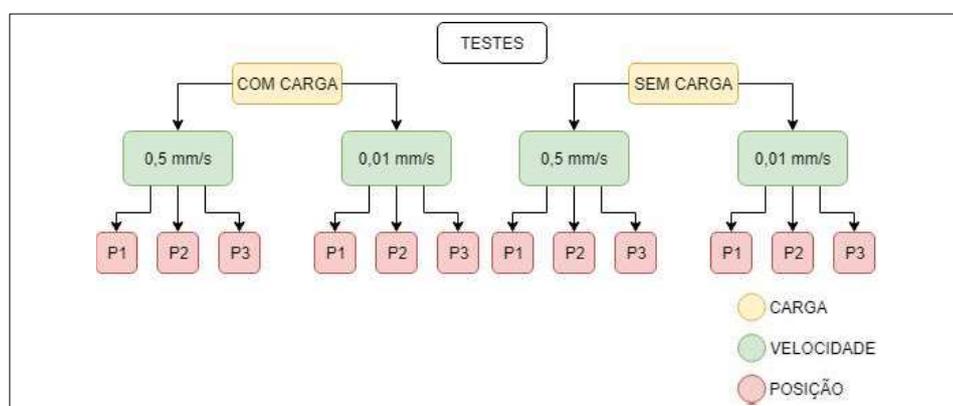
mínima, sendo portanto escolhida como um fator na validação dos resultados.

Deste modo, variou-se a velocidade em 0,5 mm/s e 0,01 mm/s, para que seja testado a sua influência nos resultados. Esta variação pode ser notada devido tanto a características mecânicas, quanto a problemas no programa desenvolvido para o controle do motor e demais funcionalidades do equipamento.

#### 3.5.1.4 Procedimento

Com base nos fatores determinados, o procedimento consistiu em duas etapas principais tomando como referência o fator carga. Portanto, o experimento foi realizado com carga e sem carga, variando-se as velocidades (0,5 e 0,01mm/s) e variando-se as posições (P1, P2 e P3), conforme a Figura 21.

Figura 21 - Diagrama dos procedimentos de testes.

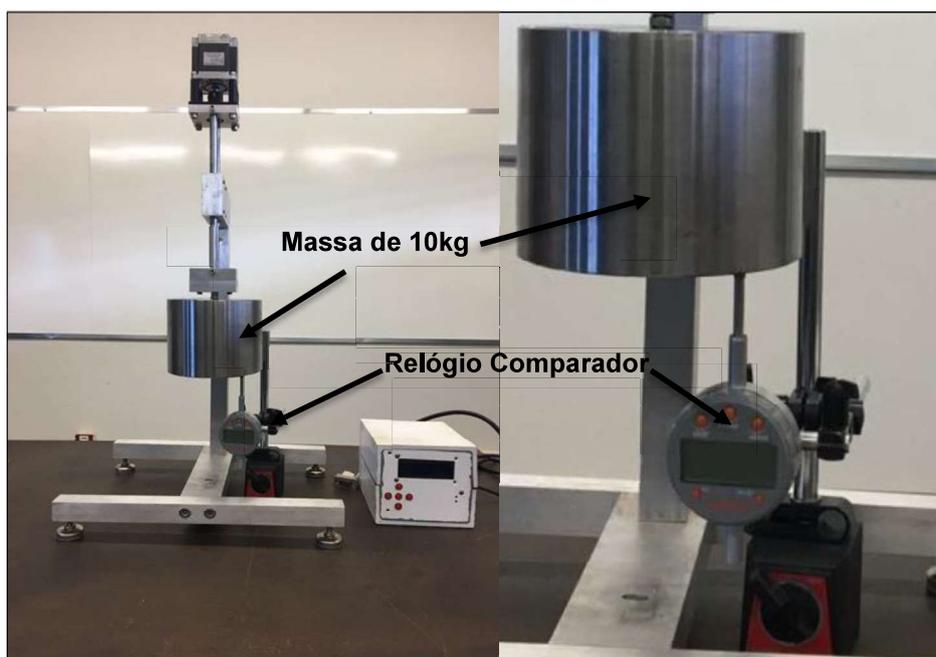


Fonte: Do autor, 2018

O relógio comparador foi posicionado de forma a medir o deslocamento do sistema de tração (Figura 22). Em cada teste, mediu-se um deslocamento de 20 mm registrado pela máquina e anotado o valor indicado pelo relógio comparador.

Foram realizados 10 testes em cada posição mencionada, promovendo o movimento para cima e anotando os valores em planilha para tratamento dos dados, resultando em 12 grupos, totalizando 120 medidas.

Figura 22 - Posicionamento do relógio comparador para os testes com carga



Fonte: Do autor, 2018

### 3.5.2 Calibração da célula de carga

Além de medir a deformação do corpo de prova, o equipamento registra também a força aplicada durante todo o ensaio. Diante disso, foi necessário elaborar um procedimento de validação da leitura da força feita pela célula de carga.

De modo análogo ao deslocamento, utilizou-se instrumentos de medida, devidamente calibrados para confirmar a precisão e exatidão da força medida (Figura 23).

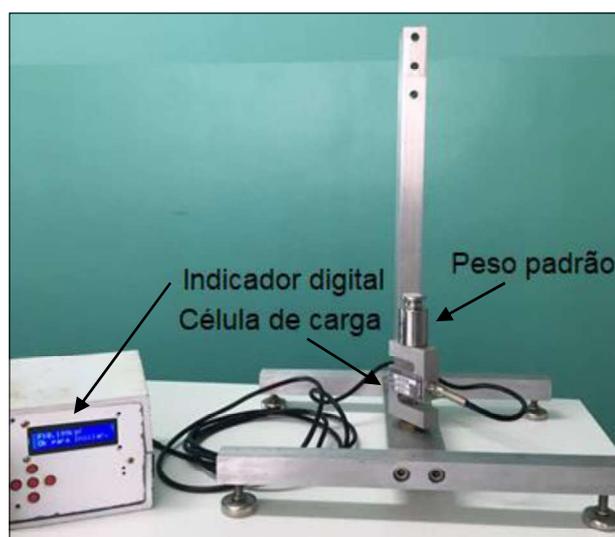
Figura 23 - Pesos-padrão utilizados para validação da medida da força



Fonte: Do autor, 2018

Conforme mostra a Figura 24, pesos padrões foram colocados sobre a célula de carga, assim, registrou-se os valores gerados para comparação com os valores padrões dos pesos.

Figura 24 - Método utilizado para teste da força medida pela máquina



Fonte: Do autor, 2018

### 3.5.2.1 Procedimento

O procedimento se iniciou retirando as peças de fixação para possibilitar a colocação de forma mais regular e sem risco de queda dos pesos-padrão. Durante todo o procedimento os pesos foram manuseados com luvas específicas para evitar alterações nas medidas.

A sequência de valores utilizada foi a seguinte: até 0,1 kg variou-se os pesos em 0,01 kg, após isso, de 0,1 a 1 kg a variação aumentou para 0,1 kg e de 1 kg a 10 kg variou-se em 1 kg. Esse procedimento foi repetido cinco vezes com um intervalo de 1 minuto entre cada um. Portanto cada teste gerou 28 medidas, resultando em um total de 140.

## 3.6 Análise estatística

Após a obtenção de todos os dados e a organização dos mesmos em tabelas, foram feitos cálculos estatísticos para comprovar que as medidas resultantes da máquina atendem as especificações da aplicação.

Os valores obtidos pelos experimentos de modo geral são considerados dados amostrais, portanto, utiliza-se métodos de estimação para construir intervalos que contenham os parâmetros populacionais. Essas estimativas intervalares possuem um nível de confiança, o qual determina a probabilidade de que a média calculada esteja dentro deste intervalo.

Com base na aplicação a qual o equipamento será utilizado, optou-se por construir nas duas medidas analisadas (força e deslocamento), um intervalo de confiança da média da diferença entre o valor real e o valor esperado. Sendo assim, calculou-se a diferença entre esses valores e depois a estimativa intervalar com 95% de confiança, utilizando a Distribuição  $t$ , pois neste caso, a variância populacional é desconhecida.

O procedimento consistiu em organizar as medidas obtidas pela máquina em tabelas e calcular a diferença. Deste modo, foi possível obter os intervalos de confiança a partir dos dados agrupados e também dos grupos separadamente para analisar as influências dos fatores.

### **3.6.1 Controle estatístico do processo**

Para assegurar a qualidade dos resultados produzidos pelo equipamento em estudo e promover uma melhoria contínua no processo de prototipagem, visando a produção final do produto, o controle estatístico do processo (CEP) se mostrou a melhor opção para análise dos resultados e obtenção de ações de correção para o desenvolvimento deste projeto, principalmente para a análise dos resultados da medida de deformação.

Segundo Caten e Ribeiro (2012), um dos objetivos do CEP é monitorar variáveis do processo, afim de mantê-las dentro do limite preestabelecido. Deste modo, aplicado ao desenvolvimento de equipamento, este controle norteará as decisões de melhorias futuras para a continuação do projeto.

Qualquer processo produtivo apresenta uma variabilidade independente de como ele foi projetado ou como ele é operado. As fontes de variabilidade podem influenciar o processo de várias formas, por isso é importante que se investigue as causas.

Dentro do estudo do CEP as causas são divididas em dois tipos: comuns e especiais. “As causas comuns são as diversas fontes (causas) de variação que atuam de forma aleatória no processo, gerando uma variabilidade inerente do processo.” Um processo que apresenta apenas causas comuns é chamado de um processo estável (CATEN; RIBEIRO, 2012).

Já as causas especiais possuem efeito maior e não seguem um padrão, por isso são consideradas falhas operacionais. Estas geralmente são ocasionadas por três principais motivos: máquinas mal ajustadas, erros na operação ou matéria prima fora do padrão. Um processo que apresenta causas atribuídas, como também pode ser chamada, é considerado fora de controle (MONTGOMERY; RUNGER, 2012).

Segundo Montgomery e Runger (2012), “Gráficos de controle podem também ser usados para estimar parâmetros de um processo de produção e, por meio dessa informação, determinar a capacidade de um processo de atingir as especificações.”

O gráfico de controle é uma das ferramentas mais importantes utilizadas no controle estatístico de processo. Ele é composto basicamente por uma linha central (LC) que corresponde o valor média da medida analisada, as médias das amostras experimentadas e um intervalo limite, composto pelo limite superior e inferior de controle (LSC e LIC). Estes limites indicam se o processo está ou não sob controle estatístico. Uma observação importante é que a maioria dos processos não opera em um estado de controle estatístico.

Além da análise se as médias estão ou não dentro do limite de controle, qualquer padrão identificado no comportamento das médias, mesmo que dentro desses limites, indica a presença de causas especiais.

Diante disso, utilizou-se do CEP para analisar o comportamento da variável deslocamento diante dos fatores escolhidos, identificar possíveis causas especiais e comuns e criar um processo de melhoria contínua do desenvolvimento deste equipamento.

## 4 RESULTADOS

As medidas de deslocamento de cada grupo experimental foram obtidas e organizadas de forma a se obter a Tabela 1. A média amostral foi calculada possibilitando uma visão geral dos experimentos.

Tabela 1 - Medidas de deslocamentos dos grupos experimentais em milímetros (mm)

	Grupo1	Grupo2	Grupo3	Grupo4	Grupo5	Grupo6	Grupo7	Grupo8	Grupo9	Grupo10	Grupo11	Grupo12
Deslocamento	19,98	20,00	20,03	19,95	19,95	19,95	19,98	19,97	19,98	19,92	19,93	19,93
	19,98	20,00	20,00	19,95	19,95	19,95	19,99	19,98	19,99	19,94	19,94	19,95
	19,98	20,00	20,01	19,96	19,95	19,95	20,00	19,98	20,02	19,95	19,95	19,95
	19,99	20,01	20,01	19,96	19,96	19,96	20,01	19,99	20,02	19,95	19,97	19,96
	20,00	20,01	20,01	19,96	19,96	19,96	20,01	20,01	20,02	19,95	19,97	19,97
	20,00	20,01	20,02	19,96	19,97	19,96	20,01	20,03	20,03	19,96	19,97	19,97
	20,00	20,01	20,02	19,96	19,97	19,96	20,02	20,03	20,03	19,97	19,97	19,98
	20,00	20,01	20,02	19,96	19,97	19,96	20,02	20,04	20,04	19,97	19,98	19,98
	20,00	20,03	20,03	19,96	19,97	19,97	20,02	20,04	20,05	19,98	19,99	19,98
	20,01	20,03	20,04	19,97	19,97	19,97	20,04	20,05	20,06	19,98	20,00	20,00
	<b>Média Amostral</b>	<b>19,994</b>	<b>20,011</b>	<b>20,019</b>	<b>19,959</b>	<b>19,962</b>	<b>19,959</b>	<b>20,010</b>	<b>20,012</b>	<b>20,024</b>	<b>19,957</b>	<b>19,967</b>

Fonte: Do autor, 2018

A partir da Tabela 1, o cálculo dos erros dos deslocamentos (diferenças entre os valores medidos e esperados) foi feito para possibilitar a obtenção da faixa de valores para a média do erro dos deslocamentos.

Essa análise geral dos erros de todos os valores obtidos, possibilita a inferência do intervalo de confiança para a média dos erros. O resultado dos cálculos utilizando a Distribuição  $t$  foi de  $0,0132 \pm 0,0064$  mm, ou seja, um limite inferior de  $0,0069$  e superior de  $0,0196$  mm. Nota-se que a estimativa intervalar da média do erro se manteve na segunda casa do milímetro.

Para facilitar a análise dos grupos experimentais e das influências dos fatores, a Tabela 2 relaciona as características dos doze grupos.

Tabela 2 - Tabela resumo dos fatores de cada grupo amostral

FATORES			
GRUPOS	CARGA	VELOCIDADE	POSIÇÃO
GRUPO 1	COM	V1 = 0,5mm/s	P1
GRUPO 2	COM	V1 = 0,5mm/s	P2
GRUPO 3	COM	V1 = 0,5mm/s	P3
GRUPO 4	COM	V2 = 0,1mm/s	P1
GRUPO 5	COM	V2 = 0,1mm/s	P2
GRUPO 6	COM	V2 = 0,1mm/s	P3
GRUPO 7	SEM	V1 = 0,5mm/s	P1
GRUPO 8	SEM	V1 = 0,5mm/s	P2
GRUPO 9	SEM	V1 = 0,5mm/s	P3
GRUPO 10	SEM	V2 = 0,1mm/s	P1
GRUPO 11	SEM	V2 = 0,1mm/s	P2
GRUPO 12	SEM	V2 = 0,1mm/s	P3

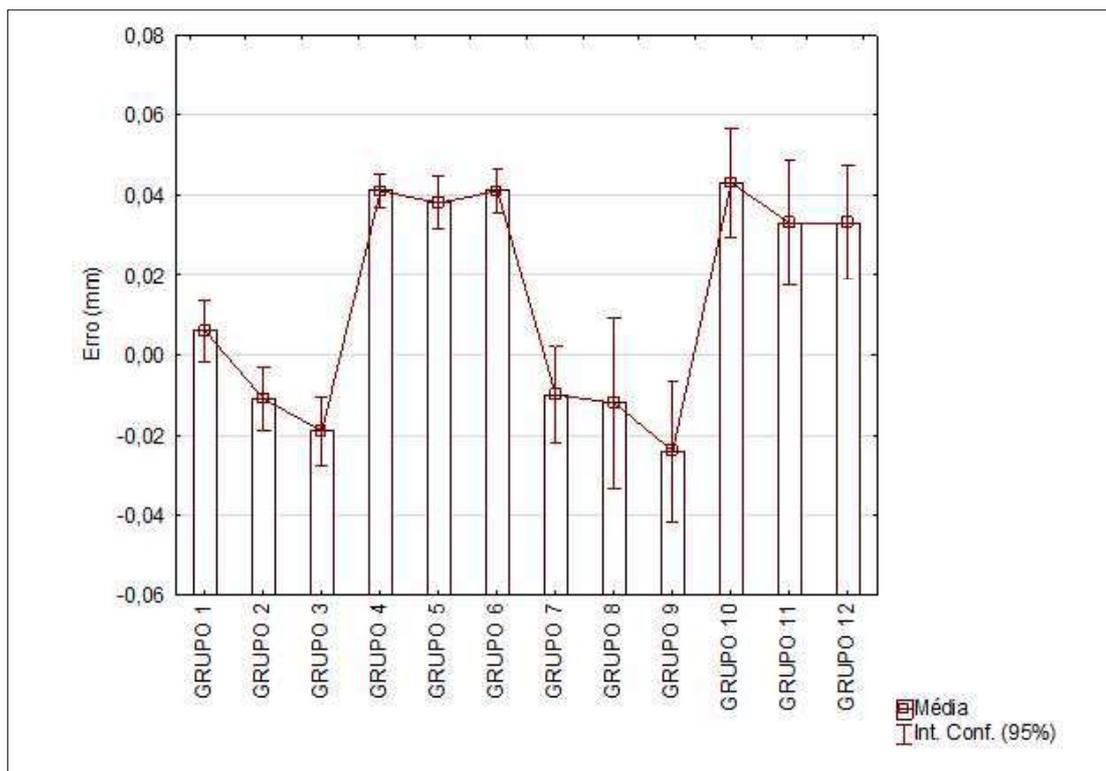
Fonte: Do autor, 2018

De acordo com o gráfico de barras da Figura 25, o intervalo de confiança da média dos erros aumentou nos grupos onde os testes ocorreram sem carga acoplado ao sistema de tração (Grupos 7 ao 12). Isso mostra que o sistema obteve maior exatidão nos grupos mencionados. O contrário pode ser visto nos grupos 1 ao 6 onde a faixa de valores se manteve menor.

No caso do fator velocidade, a influência pode ser vista na variação das médias e não diretamente no intervalo de confiança. Nota-se na Figura 26, por exemplo, que as médias dos deslocamentos com a velocidade de 0,5 mm/s se mantiveram mais próximas do valor esperado do que os experimentos com velocidade 0,01 mm/s. O que pode ser constatado também na Figura 25, onde a média dos erros estão mais próximos de zero.

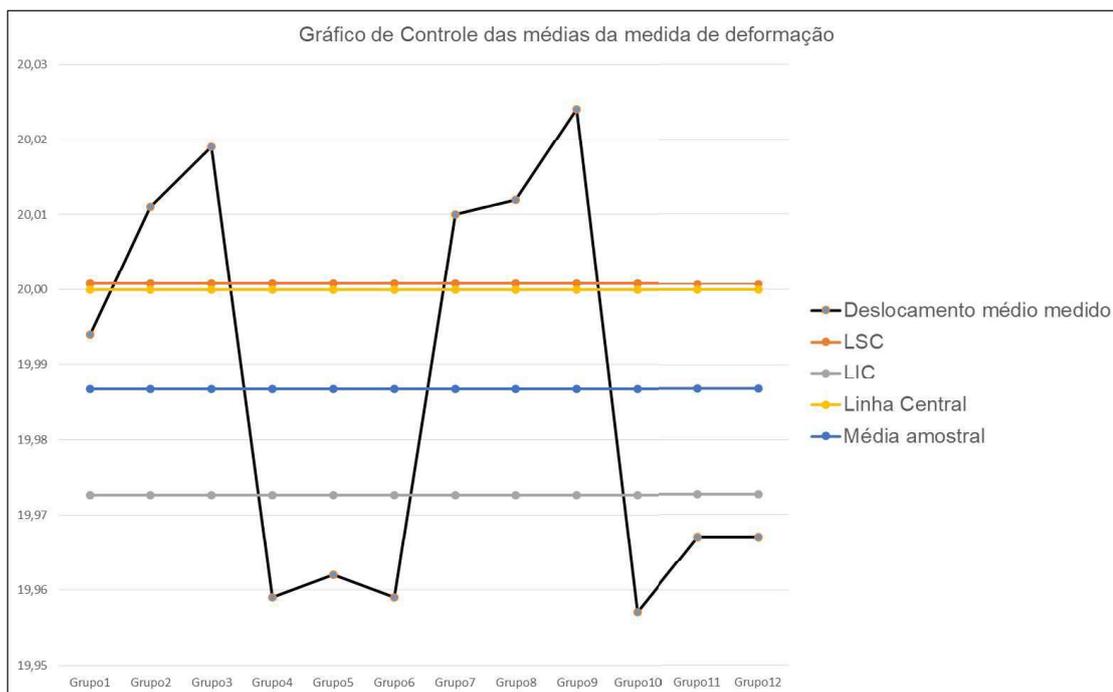
Já o fator posição, como pode ser visto tanto no comportamento do erro (Figura 25) quanto das médias (Figura 26) não demonstra influência significativa sobre a medida do deslocamento.

Figura 25 - Gráfico de barras da média e intervalo de confiança de 95% do erro de cada grupo amostral



Fonte: Do autor, 2018

Figura 26 - Gráfico de controle para análise das medidas de deslocamento dos grupos experimentais



Fonte: Do autor, 2018

Por meio do gráfico de controle da Figura 26, nota-se a presença clara de causas especiais sobre o processo. Conforme análise do gráfico, é possível identificar alguns padrões de comportamento. A velocidade pode ser considerada uma causa especial, pois houve uma mudança de tendência da média da medida de deformação quando variou-se a velocidade nos grupos.

A diferença entre as leituras da célula de carga e os valores dos pesos-padrão, do mesmo modo que o deslocamento, foi calculada e obteve-se o intervalo de confiança da média das diferenças com 95% de probabilidade. Deste modo, a faixa de valores obtida foi de  $-0,0004$  e  $0,0012$  kg, demonstrando uma variação satisfatória para a aplicação em materiais biológicos.

## 5 DISCUSSÃO

O estudo das características mecânicas de materiais biológicos ainda é um desafio para os pesquisadores devido sua característica anisotrópica. A influência dos métodos de conservação nos resultados dos ensaios de tração encontrados nos estudos realizados, mostra a importância de reduzir estes fatores. A pouca incidência de trabalhos envolvendo ensaio em materiais biológicos a fresco, mostra a dificuldade dos pesquisadores em realizar esse procedimento, mesmo ressaltando a influência dos métodos de conservação (GUZMAN, 2014; MIYAMOTTO et al., 2009; BATISTA et al., 1996; RABELO et al., 2006).

Neste sentido, a criação de novas tecnologias que facilitem a obtenção de dados quantitativos destes materiais torna-se fundamental para a comprovação destes estudos. Foram encontrados na literatura alguns trabalhos que evidenciaram a criação de ferramentas para atender a estes nichos específicos, ressaltando as especificidades de cada aplicação (NARESSE, 1987; GUIMARAES et. Al., 1998; FATURECHI et al., 2014; HUERTA et al, 2010).

Deste modo, a proposta deste trabalho foi desenvolver um dispositivo que atenda a demanda de obtenção das propriedades mecânicas de materiais biológicos, possibilitando o ensaio de tração sem a necessidade de uso de métodos de conservação. Isso foi possível pelo fato do equipamento ter sido projetado justamente para atender essa aplicação, o que envolve características como: portabilidade, baixo grau de complexidade e gravação contínua de dados.

A proposta inicial do trabalho foi desenvolver uma máquina de simples construção, tanto da parte eletrônica quanto da mecânica. Deste modo, foi possível de forma simples, validar o equipamento utilizando a maior quantidade de recursos tecnológicos existentes, reduzindo o tempo de desenvolvimento. Esta metodologia de prototipagem é fundamental para concretizar a demanda sem que haja elevado investimento, processo imprescindível na inovação tecnológica.

A precisão dos resultados gerados pelo equipamento foi o maior desafio enfrentado no processo de prototipagem eletrônica. Porém, como o foco do trabalho foi de validar um equipamento que atenda a aplicação em materiais biológicos, concentrou-se em atender a demanda desse nicho específico. Por isso, o uso de módulos foi a maneira mais adequada para se focar no resultado final de utilização.

Como pode ser visto nos resultados do teste de simulação da deformação do corpo de prova, a medida do deslocamento do sistema de tração apresentou um intervalo de confiança pequeno em relação a aplicação em materiais biológicos. Pois como pode ser visto em trabalhos como o de Lebled, Grover e Paxton (2014), Constantino et al. (2016) e Isa et al. (2015), os desvios padrões das medidas de deformação estão em média acima de 2,5 mm, portanto as variações encontradas na segunda casa do milímetro podem ser utilizadas sem comprometer os resultados dos experimentos.

Entretanto, por ter sido comprovado que os fatores experimentados influenciam os resultados do deslocamento, medidas podem ser tomadas para aperfeiçoar a técnica e possibilitar a expansão da área de aplicação. Uma das causas que podem ter gerado essa variação de deslocamento devido ao fator carga, pode ser a construção mecânica, pois quando o mesmo sofria a ação de uma massa, o sistema se ajustava, portanto, ajustes podem ser feitos para diminuir essa ocorrência.

Outro fator que influenciou na medida da deformação foi a velocidade, a qual dentro dos grupos, provocou uma mudança nas medidas de tendências (médias). Este fato pode ter ocorrido por uma falha no sistema de controle do equipamento.

A medida da força aplicada sobre a célula de carga no procedimento de ensaio também se mostrou válida para o uso do equipamento com materiais biológicos. Em trabalhos como o de Constantino et al. (2016), Rabelo et al. (2006), Batista et al. (1996) e Pugliesi, Moro e Paccola (2005), ensaios de tração em materiais biológicos foram realizados e foi constatado que as mínimas variações percebidas estão na segunda casa do quilograma-força.

Além dos trabalhos que mostram exemplos da aplicação e suas especificações para a força, os trabalhos de Naresse (1987) e Guimarães et al. (1998), os quais construíram um equipamento para aplicações em materiais biológicos, utilizaram a medida da força também com precisão na segunda casa decimal da unidade quilograma-força. Portanto, o erro resultante dos procedimentos de validação, obtidos na terceira casa decimal, viabiliza a utilização em ensaios com esses materiais.

## 6 CONCLUSÃO

O desenvolvimento do equipamento demonstrou viável ao ponto de possibilitar a construção de uma máquina direcionada para aplicações em materiais biológicos.

A estrutura mecânica composta por uma estrutura de sustentação e um sistema de deslocamento linear foi construída e se mostrou estável e robusta, não influenciando criticamente os resultados.

Já o desenvolvimento do sistema de controle eletrônico também teve êxito com o processo de prototipagem rápida, executando as funções necessárias para o funcionamento do equipamento. Mesmo apresentando limitações, gerou-se dados confiáveis para a aplicação em questão.

A medida de deformação do corpo de prova e da força aplicada geradas pela máquina, demonstraram satisfazer as especificações do uso com materiais biológicos.

Trabalhos futuros poderão aprimorar o equipamento obtendo resultados mais precisos e exatos com pequenas melhorias nas características mecânicas e no sistema de controle como foi demonstrado nas análises estatísticas.

## REFERÊNCIAS

ANTONIA, A.C. D. **Estudo do desempenho mecânico e térmico de compostos de borracha natural (NR) de diferentes clones**. 2003. 104 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. Disponível em: < [www.teses.usp.br](http://www.teses.usp.br) >. Acesso em: 03 mar. 2017.

BATISTA, L. C.; DALECK, C. R.; SHIMANO, A. C.; ALESSI, A. C.; ABRAHÃO, M. S. Estudo comparativo da resistência à tração do peritônio (bovino, eqüino, suíno e canino) a fresco e conservado em glicerina. **Brazilian Journal of Veterinary Research and Animal Science**, São Paulo, v. 33, p. 305-312, dec. 1996.

BAUER, J. R. O. **Propriedades mecânicas do titânio comercialmente puro e da liga Ti-6Al-4V fundidos em diferentes ambientes**. 2007. Tese (Doutorado em Materiais Dentários) - Faculdade de Odontologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. Disponível em: <[www.teses.usp.br](http://www.teses.usp.br)>. Acesso em: 03 mar. 2017.

BORBA, M. **Comportamento mecânico de cerâmicas utilizadas na confecção de próteses parciais fixas**. 2010. Tese (Doutorado em Materiais Dentários) - Faculdade de Odontologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. Disponível em: <[www.teses.usp.br](http://www.teses.usp.br)>. Acesso em: 03 mar. 2017.

BRENDOLAN, A.P.; REZENDE, C.M.F.; PEREIRA, M.M. Propriedades biomecânicas da fâscia lata e do ligamento cruzado cranial de cães. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia.**, Belo Horizonte , v. 53, n. 1, p. 27-36, Fev. 2001.

BRINGEL, F. A. **Avaliação morfofuncional de pele humana conservada em glicerol e submetida à radiação gama: estudo em camundongos atômicos**. 2011. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear - Aplicações) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: <[www.teses.usp.br](http://www.teses.usp.br)> Acesso em: 09 Mar. 2017.

CONSTANTINO, A. C.; FARIA, M. D.; OLIVIER, N. C.; PEREIRA, J. N.; LOPES, I. B. L.; LIRA, N. R. C. Determinação das propriedades biomecânicas do ligamento patelar de cães (*canis familiaris linnaeus*, 1758). **Ciência Animal Brasileira**, Goiânia, v. 17, n. 2, p. 260-266, Jun. 2016.

COSTA-FERREIRA, A.. S. Fascia Preservation during Abdominoplasty: Randomized 6 – Clinical Study of Efficacy and Safety. **Journal of the American Society of Plastic Surgeons**. Birmingham, v. 131, n. 3, 2013.

FATURECCHI, R.; HASHEMI, A.; ABOLFATHI, N. A tensile machine with a novel optical load cell for soft biological tissues application. **J. Med. Eng. Technol.** Tehran: 2014, v. 38, n. 8, p. 411-415, nov. 2014.

FERREIRA, C. D.; SILVA, L. A. F. S.; QUEIROZ, P. J. B.; ÁVILA, S. H. F.; VULCANI, V. A. S. Métodos de conservação, obtenção e avaliação de implantes cartilagosos. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 11, n. 22, p.2214, 2015.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; DOS SANTOS, C. A. **Ensaaios dos Materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: [s.n.].

GERE, J. M. Introduction to Mechanics of Materials. GERE, James M. **Mechanics of Materials**. 7 ed. Belmont: Thomson Learning, 2004.

GUIMARÃES, M. A.; FORTES, J. V.; LUCCHIARI, P. H.; RAHAL, S. C. Otimização da medida da força de ruptura em processos de cicatrização. **Archives of Veterinary Science**, v. 3, n. 1, p. 123-128, dez. 1998.

GUIMARÃES, G. C.; MACHADO, M. R. F.; SHIMANO, A. C.; TERÇARIOL, C. A. S.; VOLPON, J. B., DALECK, C. R. Propriedades tensiométricas comparadas entre fragmentos do centro tendíneo do diafragma, pericárdio fibroso e peritônio parietal de bovinos não conservados e conservados em glicerina. **Brazilian Journal of Veterinary Research and Animal Science**, São Paulo, v. 45, p.127-135, dec. 2008.

GUZMAN, A. I. A. **Metodologia para caracterização mecânica de tecido biológico mole**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Controle e Automação Mecânica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. Disponível em: [www.teses.usp.br](http://www.teses.usp.br). Acesso em: 09 Mar. 2017.

HOLZAPFEL, G. A. Biomechanics of Soft Tissues. **Handbook of Material Behavior: Nonlinear Models and Properties**. Boston, v. 3, p. 1057-1071, 2001. Disponível em: < [https://biomechanics.stanford.edu/me338/me338\\_project02.pdf](https://biomechanics.stanford.edu/me338/me338_project02.pdf) > Acesso em: 28 mar. 2016.

HUERTA, E.; CORONA, J. E.; OLIVA, A. I. Universal testing machine for mechanical properties of thin materials. **Revista Mexicana de Física**. Chihuahua, 2010. v. 56, n. 4, p. 317-322, ago. 2010.

ISA A. C.; MATIAS, J. E. F.; YAMAMOTO, C. T.; ISA, R. H.; CAMPOS, A. C. L.; COELHO, J. C. U. Emprego de telas cirúrgicas de diferentes composições na correção de defeito da parede abdominal de ratos. **Revista do Colégio Brasileiro de Cirurgiões**. Curitiba, 2015. v. 42, n. 5, p. 329-336.

LEBLED, C.; GROVER, L. M.; PAXTON, J. Z. Combined decellularisation and dehydration improves the mechanical properties of tissue-engineered sinews. **Journal of Tissue Engineering**. Edinburgh, v. 5, p. 1-11, 2014.

MIYAMOTTO, M.; DEL VALLE, C. E.; MOREIRA, R. C. R.; TIMI, J. R. R. Resistência tensional do pericárdio bovino fixado em glutaraldeído comparada com a da veia safena magna. **Jornal Vascular Brasileiro**, Porto Alegre, v. 8, n. 2, p. 103-111, Jun. 2009. Disponível em: <<http://www.scielo.br>>. Acesso em: 13 Mar. 2017.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 5 ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2012.

NARESSE, L. E. Aparelho para medida da força de ruptura das anastomoses intestinais. **Revista do Hospital das Clínicas da Faculdade de Medicina de São Paulo**, (42), 1987.

OLIVEIRA, F. B. **O ultra-som terapêutico adicionado à imobilização gessada nas propriedades mecânicas da reparação muscular pós-trauma por mecanismo de impacto**. 2004. Dissertação (Mestrado em Bioengenharia) - Bioengenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004. Disponível em: <[www.teses.usp.br](http://www.teses.usp.br)>. Acesso em: 08 mar. 2017.

OLIVEIRA, J. G. P. **Efeitos da imobilização e reabilitação aquática em propriedades mecânicas do músculo gastrocnêmico de ratas treinadas e sedentárias**. 2005. Dissertação (Mestrado em Bioengenharia) - Bioengenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005. Disponível em: <[www.teses.usp.br](http://www.teses.usp.br)> Acesso em: 08 mar. 2017.

PUGLIESI, H. B.; MORO, C. A.; PACCOLA, C. A. J. Estudo da resistência mecânica do ligamento cruzado anterior em ratos que praticaram natação. **Revista Brasileira de Ortopedia**, Franca, 2005. v. 40, n. 5, p.269.

RABELO, R. E.; TAVARES, G. A.; PAULO, N. M.; SILVA, L. A. F.; DAMASCENO, A. D.; ANDRADE, M. A.; MARTINS, F. G.; ROMANI, A. F.; SILVA, O. C.; TRINDADE, B. R. Características físicas e microbiológicas do centro tendíneo diafragmático bovino conservado em glicerina a 98% e no glutaraldeído a 4%. **Ciência Animal Brasileira**, [S.I.], v. 5, n. 4, p. 229-236, out. 2006.

RESENDE, J. L.; CORREA, M. T. F.; CASAS, E. B. L.; SAFFAR, J. M. E.; OLIVEIRA, E. A. Determinação das propriedades mecânicas dos ligamentos cruzados via ensaios uniaxiais de tração. **Revista Brasileira de Biomecânica**. Minas Gerais, 2008: v. 9, n. 17 p.73-80, nov. 2008.

RIBEIRO, J. L. D; CATEN, C. S. **Controle Estatístico do Processo**. Porto Alegre, RS: FEENG/UFRGS, 2012.

RODRIGUES, F. T. **Desenvolvimento de membranas acelulares de colágeno derivadas de pericárdio porcino para uso em engenharia de tecido**. 2011. Tese (Doutorado em Química Analítica) - Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. Disponível em: <[www.teses.usp.br](http://www.teses.usp.br)> Acesso em: 09 Mar. 2017.

SILVARES, P. R. A. **Análise das propriedades mecânicas do ligamento cruzado anterior, ligamento da patela e tendão do músculo semitendíneo triplicado: estudo experimental em cadáveres humanos**. 2001. 168 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Medicina de Botucatu, 2001. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/101030>>. Acesso em 08 Mar. 2017.