

DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAIOS MECÂNICOS COM CONTROLE DA VELOCIDADE DE ENSAIO

Erick Cardoso Costa

erickcardosocosta@hotmail.com

Rodrigo Loureiro

rodrigopaesloureiro@gmail.com

Rodrigo Biscaro Nogueira

rodrigobiscaro@gmail.com

Reinaldo Jose Tonete

toneterrj@gmail.com

Max Costa

maxadilsonl1@gmail.com



As máquinas universais de ensaios mecânicos são empregadas para auxiliar na obtenção das características intrínsecas aos materiais sob determinadas condições de esforços. Essa máquina submete um corpo de prova a uma carga de tração, compressão ou flexão mensurando a deformação resultante para quantificar as propriedades mecânicas do material. Essa condição de esforço imposta é promovida por um sistema de movimentação. Para tanto, devido as desconformidades intrínsecas ao sistema, o controle da velocidade real de ensaio deve ser monitorado e corrigido para garantir a confiabilidade e reprodutibilidade dos ensaios. Dessa forma, este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma máquina universal de ensaios mecânicos com a implementação de um sistema de malha fechada para autocorrigir a velocidade real de ensaio baseado na plataforma arduino. Para o projeto da máquina empregou-se a metodologia PRODIP para auxiliar na fase de desenvolvimento do conjunto mecânico e eletrônico. Para o sistema de controle da velocidade real de ensaio foi desenvolvido um projeto de software para garantir o funcionamento do sistema de movimentação de acordo com as normas. Para avaliar o desempenho da máquina foram executados testes de deslocamento da plataforma móvel. A validação do sistema de malha fechada foi efetuada através de testes com método convencional de movimentação comparando-o com o método desenvolvido neste trabalho. A máquina apresentou estabilidade e rigidez permitindo efetuar ensaios de tração e compressão. O sistema de controle desempenhou papel fundamental proporcionando ajuste da velocidade de ensaio e taxa de deformação mantendo-as próximas aos valores estabelecidos pelas normas vigentes.

*Palavras-chave: Máquina universal de ensaios mecânicos,
Desenvolvimento de máquina-ferramenta, PRODIP, Automação e
Controle, Engenharia de produto*

1. Introdução

No decorrer dos anos, com o intuito de aumentar a confiabilidade e eficiência de projetos estruturais, deu-se maior importância às características dos materiais utilizados como matéria-prima, tanto aqueles já existentes quanto novos. Dentro dessa realidade, para garantir a qualidade e otimizar os projetos e produtos desenvolvidos pela engenharia, aumentou-se às exigências quanto aos testes para avaliar as propriedades e o comportamento mecânico destes materiais (REBOUÇAS, 2007; GARCIA et al., 2013).

A obtenção destas propriedades e comportamento mecânico dos materiais é realizada com o auxílio dos ensaios mecânicos que consiste em submeter estruturas a determinadas condições de esforços (CALLISTER, 2013; BOYCE e DILMORE, 2008). Estes ensaios são empregados com o objetivo de avaliar o desempenho mecânico de materiais que constituirão peças estruturais dos mais diversos produtos como máquinas, ferramentas, edifícios, dentre outros (GERE, 2003). A partir destes ensaios é possível obter as características intrínsecas aos materiais pela análise da relação entre a tensão gerada e a deformação produzida. Este método possibilita expressar, de forma quantitativa e qualitativa, as propriedades mecânicas necessárias para aplicação, certificação de produtos, controle de qualidade, seleção de materiais, pesquisa e desenvolvimento de novos materiais (SOUZA, 1982; BLANCO, 2006).

Para a execução destes testes, geralmente, é utilizada uma máquina universal de ensaios mecânicos que submete um corpo de prova (amostra com dimensões normatizadas) do material a solicitação mecânica (tração, compressão ou flexão), mensurando a deformação resultante da condição de esforço. A geração de carga é efetuada por um sistema de movimentação que proporciona o deslocamento da plataforma móvel na direção vertical induzindo uma carga axial ao corpo de prova (CP) resultando na deformação deste até sua ruptura (ASKELAND e PHULÉ, 2008; GRUPO CIMM, 2016).

Para gerar esta carga, deve haver um sistema que acione o movimento da plataforma móvel. Além disso, as velocidades reais de ensaio devem atender faixas de valores de acordo com o tipo de material a ser analisado que são pré-estabelecidas por normas técnicas (LEMOS et al., 2013). Dessa forma, o sistema de movimentação deve possibilitar velocidade variável e interagir com uma unidade controladora para que os parâmetros de entrada de ensaio possam ser definidos através de uma interface com o operador, de forma que o ensaio possa ser monitorado concomitante a operação (DE FAVERI, 2015).

O presente trabalho faz parte de um conjunto de projetos que têm por finalidade desenvolver uma máquina universal de ensaios mecânicos e um sistema de controle sobre a taxa de deformação. O desenvolvimento da máquina é extremamente complexo por envolver diversos sistemas responsáveis pelo seu funcionamento, tais como estrutura mecânica, eletrônica envolvida, programação, dentre outros, e os acessórios que auxiliam na obtenção dos dados de ensaio, como célula de carga e extensômetro. Devido sua extensão, o desenvolvimento deste projeto foi executado em etapas complementares de acordo com os trabalhos de Costa e Nogueira (2018), Fonseca e Nogueira (2018) e Loureiro (2017).

Assim, este trabalho teve como objetivo desenvolver a estrutura mecânica, o sistema de acionamento e de controle da máquina universal de ensaios mecânicos. Um diferencial desta máquina é a relação custo-benefício, no que diz respeito à eletromecânica envolvida, uma vez que os componentes usados possuem facilidade de fabricação, disponibilidade, baixo custo e, principalmente, funcionalidade quando comparado aos equipamentos disponíveis no mercado.

2. Desenvolvimento e fabricação da máquina universal de ensaios mecânicos

O desenvolvimento de um equipamento envolve diversas áreas de conhecimento da engenharia, principalmente aqueles relacionados ao dimensionamento estrutural, fabricação, eletrônica envolvida, seleção de materiais, elementos mecânicos, integração de CLP, automação, interação homem-máquina (IHM), dentre outros (BACK et al., 2008; BERTRÁN, 2009). Essas variedades de campos tendem gerar uma barreira para a determinação das possíveis soluções a serem empregadas durante a elaboração do projeto de produto. Para isso, podem ser usadas abordagens metodológicas que auxiliem desde a etapa preliminar à execução, não somente para a escolha de soluções individuais, mas também no que diz respeito à compatibilidade entre os elementos (SABRAVATI et al., 2013; SILVEIRA, 2015).

Neste contexto, o presente trabalho apresenta os componentes utilizados e os métodos empregados para o desenvolvimento da máquina universal de ensaios mecânicos. Para tanto, o modelo adotado para este projeto foi o Processo de Desenvolvimento Integrado de Produtos (PRODIP), apresentado por Back et al. (2008), com destaque as três fases iniciais da macrofase intitulada de Processo de Projeto: projeto informacional, projeto conceitual e projeto preliminar.

2.1. Projeto informacional

A máquina universal de ensaios mecânicos é um equipamento utilizado para submeter uma amostra (corpo de prova – CP) de um determinado material a condições de esforços para mensurar a tensão imposta e a deformação gerada durante o ensaio mecânico. Devido à característica geração de esforço, as propriedades de rigidez e estabilidade da máquina são fatores de extrema importância para manter as condições de trabalho de acordo com as especificações. Somado a isso, a imposição dessa condição sobre o CP é efetuada através de um sistema de movimentação que, por meio de um princípio cinemático, gera uma carga linear e, ao mesmo tempo, o sistema de controle deve adquirir os dados relativos a deformação do CP com o auxílio de um extensômetro. O sistema de geração de carga pode ter o acionamento oriundo de diferentes princípios de movimentação: hidráulico, pneumático e eletromecânico. Para este caso específico são comumente utilizados os sistemas hidráulicos e eletromecânicos devido a possibilidade de geração maiores cargas de ensaio.

Para o desenvolvimento da máquina, a primeira etapa é a definição da função global do equipamento, sendo esta a geração da carga de ensaio e aquisição de dados de deformação. Dessa forma, a determinação da função global permitiu visualizar um cenário mais claro com relação às possíveis soluções. Além disso, é necessária a implementação de um sistema de controle da velocidade real de ensaio por meio da integração entre o extensômetro resistivo e o sistema motriz. A partir disso, foram elencados os principais requisitos de funcionalidade que a máquina deveria atender, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Requisitos de funcionalidade

REQUISITOS DE FUNCIONALIDADE	
1	Rigidez e estabilidade da estrutura mecânica
2	Controle e variação da velocidade de ensaio
3	Sistema de movimentação
4	Permitir ensaio de tração e compressão
5	Proporcionar carga suficiente para materiais poliméricos
6	Integração do sistema de movimentação com o extensômetro com malha fechada
7	Controle da taxa de deformação do CP
8	Controle através de um microcomputador

Fonte: Autor

2.2. Projeto conceitual

Para elaboração do projeto conceitual, a primeira etapa para o desenvolvimento da máquina foi a concepção da estrutura mecânica de maneira que esta atendesse aos requisitos anteriormente citados. Como pré-requisito, foi necessária a determinação do princípio de movimentação a ser empregado e os respectivos componentes, uma vez que o *design* deve prever o alojamento destes elementos. Dentre as possíveis soluções para movimentação, apesar dos atributos dos dois sistemas, hidráulico e eletromecânico, ambos serem amplamente empregados neste tipo de equipamento e atenderem as principais características, o sistema eletromecânico foi escolhido devido este destacar-se dada a modularidade dos componentes mecânicos e eletrônicos, além da maior variedade de elementos a serem empregados.

A partir desse ponto, o projeto da máquina foi dividido em dois subgrupos: 1 – estrutura mecânica; e 2 – sistema eletrônico. Essa ramificação proporcionou uma visualização sistemática da função de cada subgrupo e facilitou a determinação dos componentes necessários, sendo estes descritos a seguir.

2.2.1. Estrutura mecânica

Para o desenvolvimento da máquina a estrutura mecânica deve ter rigidez e estabilidade suficiente de forma a impossibilitar introduções de erros oriundos de deformações da mesma para manter a confiabilidade da análise. Além disso, para possibilitar a execução dos ensaios mecânicos, o sistema está restrito a um grau de liberdade devido à geração de carga ser na direção axial ao CP, ou seja, deslocamento em um único eixo cartesiano. Portanto, foram usados elementos de máquina para conversão do movimento rotativo em linear. Os componentes empregados no subgrupo intitulado de “estrutura mecânica” são mostrados na Tabela 2.

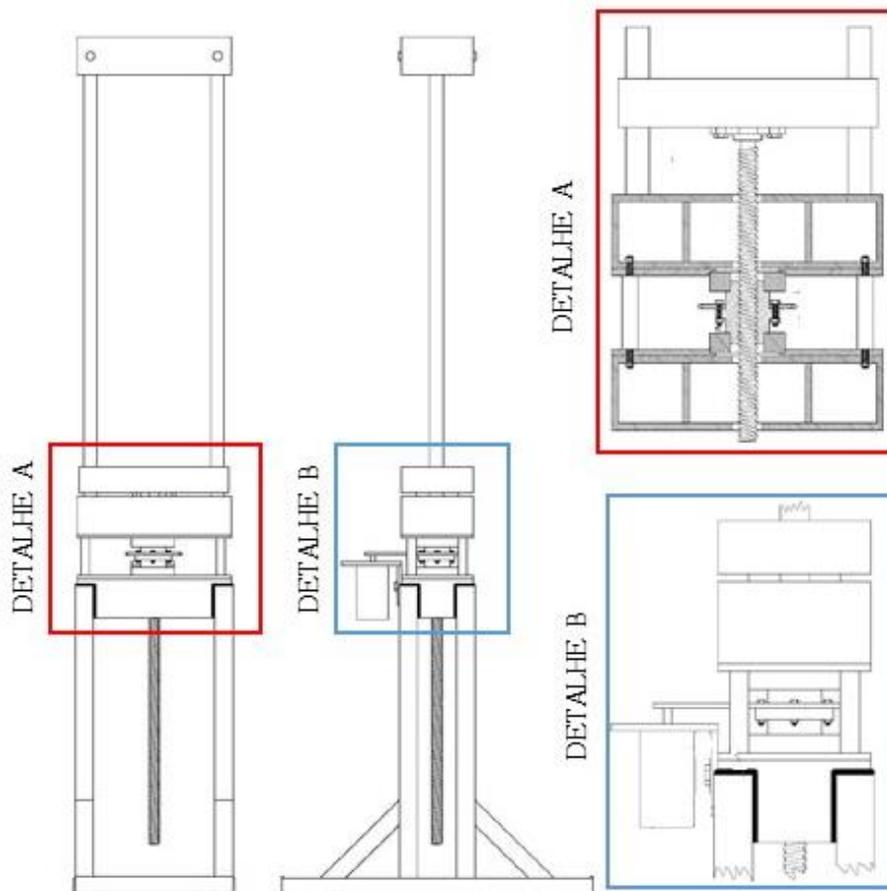
Tabela 2 - Componentes da estrutura mecânica

ESTRUTURA MECÂNICA	Estrutura base
	Eixo para deslocamento
	Plataformas fixas e móvel
	Acoplamento do motor elétrico
	Parafuso de potência com castanha
	Sistema de transmissão
	Rolamento

Fonte: Autor

Após a definição dos principais componentes foi elaborado um modelo 2D (bidimensional) em CAD da máquina universal de ensaios mecânicos, conforme Figura 1. A máquina foi fabricada com estrutura metálica de forma a apresentar rigidez e estabilidade. Foi empregado um único parafuso de potência sendo necessário o uso de dois eixos guias verticais. Foram feitas três plataformas fixas, sendo as plataformas 1 e 2 para acoplar o sistema de transmissão e as plataformas 2 e 3 para manter fixos os eixos guias. O motor elétrico foi fixado na parte traseira do equipamento. O sistema de transmissão implementado era constituído de um conjunto pinhão, corrente e coroa agregado a uma castanha rosqueada ao parafuso de potência. A castanha rosqueada conta com dois rolamentos nas extremidades inferior e superior.

Figura 1 – CAD 2D da máquina universal de ensaios mecânicos



Fonte: Autor

2.2.2. Sistema eletrônico

O sistema eletrônico a ser implementado deve atender os requisitos de funcionalidade elencados na fase do projeto informacional. Conforme apresentado na Tabela 3, para compor o sistema eletrônico optou-se em utilizar a plataforma de prototipagem arduino, mais especificamente o modelo UNO, devido este ser de fonte aberta, possibilitar interação com operador por meio de um microcomputador e ser de fácil aquisição.

O componente motriz escolhido foi um motor de passo NEMA 37, apesar de este ser um elemento de acionamento foi alocado neste subgrupo devido às características de controle serem possibilitadas pela eletrônica envolvida. Em decorrência de este motor de passo requerer maior potência para movimentação, empregou-se um driver de controle modelo HY-DIV268N-5A. Para comunicação entre os instrumentos eletrônicos foram utilizados *jumpers*. Como fonte de alimentação usou-se uma fonte chaveada de 24V e 5A. O sistema de controle foi implementado por meio de um microcomputador agregado a interface de programação do arduino (IDE).

Tabela 3 - Componentes do sistema eletrônico

SISTEMA ELETRÔNICO	Arduino uno
	<i>Jumpers</i>
	Driver de controle
	Fonte de alimentação
	Microcomputador

Fonte: Autor

Agregado ao sistema de acionamento, foi implementado um sistema de controle de malha fechada para autocorreção da velocidade real de ensaio por meio da rotação do motor de passo a partir de dados relativos à taxa de deformação, obtidos por um extensômetro resistivo fixado ao CP. A eletrônica envolvida dedicada a esta função conta com *strain gages* aderido a uma estrutura mecânica que funciona como um protótipo de extensômetro resistivo. Utilizando a ponte de *Wheatstone* e um amplificador de sinal, o extensômetro foi conectado ao arduino. A Tabela 4 mostra os componentes utilizados no sistema de controle de velocidade de ensaio.

Tabela 4 – Componentes para controle de malha fechada

SISTEMA A	<i>strain gages</i> (BF350-3AA)
	Módulo amplificador de sinal HX711
	Resistor de 350 Ω

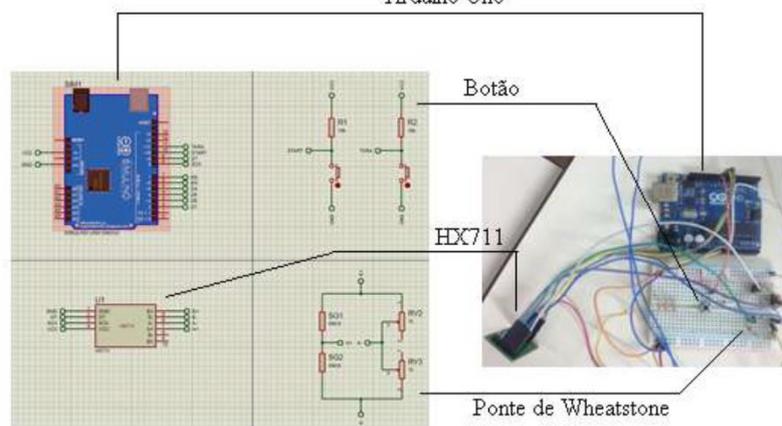
Botão táctil

Placa *protoboard*

Fonte: Autor

O esquema de ligação do sistema eletrônico é ilustrado pela Figura 2. Este esquema foi empregado para atuar como conjunto responsável pelo gerenciamento e comando do sistema motriz da máquina universal de ensaios mecânicos e auxiliar na aquisição dos dados relativos ao ensaio mecânico, tais como: velocidade convencional de ensaio, taxa de deformação e deformação.

Figura 2 – Circuito do sistema de controle de velocidade de ensaio



Fonte: Autor

Agregado ao sistema eletrônico, foi implementado um algoritmo capaz de controlar a taxa de deformação no CP. O algoritmo permitiu imprimir na tela do computador os ciclos de aquisição de dados como: variação do tempo, deslocamento, velocidade do ensaio, deformação, taxa de deformação e velocidade de rotação do motor de passo. A Equação 1 foi utilizada no algoritmo para efetuar o controle da velocidade do motor de passo.

$$n_{motor} = \frac{i V}{p} \quad \text{Equação 1}$$

A equação implementada considerou a relação de transmissão (i), o passo do parafuso de potência (p) e a velocidade de ensaio (V).

2.3. Projeto preliminar

A etapa do projeto preliminar consistiu na fabricação, adaptação e montagem dos componentes da máquina universal de ensaios mecânicos. No que diz respeito à fabricação, foram feitas bases metálicas com cantoneiras de duas polegadas para sustentar toda a estrutura mecânica de movimentação do equipamento. As plataformas fixas e móvel são de chapa de aço com 10mm de espessura, sendo duas fixas para acoplar o sistema motriz (conjunto de transmissão de movimento e motor de passo), uma fixa na parte superior do equipamento e uma plataforma móvel para executar o movimento na direção vertical. Fabricou-se também uma castanha de latão rosqueada para ser agregada ao parafuso de potência. Foram usados dois eixos com buchas de teflon de forma a facilitar e restringir o movimento da plataforma móvel. A Figura 3 mostra a máquina universal de ensaios mecânicos.

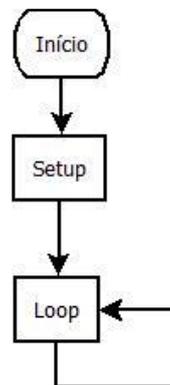
Figura 3 - Máquina universal de ensaios mecânicos



Fonte: Autor

Para o sistema de controle de velocidade de ensaio foi desenvolvido um projeto de *software* com o intuito de garantir o funcionamento do equipamento. Nessa etapa, foi usado a interface de desenvolvimento (IDE) do arduino para implementar as funções em um fluxo lógico. A Figura 3 ilustra o fluxograma da programação para sistematizar a lógica base de execução do controle do sistema de movimentação.

Figura 4 – Fluxograma de *software* base no arduino



Fonte: Autor

Na função *setup* foi configurado os dispositivos de entrada e saída utilizado no arduino. Foram configurados nas portas do arduino o motor de passo, módulo amplificador (HX711) e botão de inicialização. Na sequência, definiu-se a velocidade inicial do motor de passo de acordo com a velocidade de ensaio desejada, sendo adotado 5 mm/min, e posteriormente a inicialização da porta *serial* para comunicar-se com *software* Excel®.

A função *loop* inicializa realizando a leitura do botão *start*. Caso este botão seja pressionado, um evento *trigger* (intertravamento) é disparado de modo a coibir múltiplas leituras em um mesmo instante. Em seguida, é realizada a verificação do estado do disparo do botão. Caso seja efetuado o *start*, o *software* é conduzido à rotina de inicialização das leituras e cálculos, na qual uma *flag* interna é iniciada. Esta *flag* (*start_flag*) é importante para o fechamento dos cálculos e limpeza das variáveis internas. Caso o botão *start* seja pressionado, e *start_flag* ainda é 1 (nível lógico alto), significa que deve ser registrado o tempo de início da aquisição de dados. Caso *start_flag* já tenha sido iniciado, significa que o processador já não está no primeiro ciclo de aquisição, deste modo, o *software* é encaminhado para as rotinas realizando o cálculo de variação de tempo, deslocamento, velocidade convencional de ensaio, taxa de deformação e obtenção do ajuste do motor para diferentes tipos de velocidade de ensaio convencional.

3. Validação da máquina universal de ensaios mecânicos

Na sequência, são apresentados os principais resultados obtidos para validar a máquina universal de ensaios mecânicos desenvolvida neste trabalho e as potencialidades do sistema de controle que engloba a instrumentação deste equipamento.

3.1 Sistema de controle da máquina universal de ensaios mecânicos

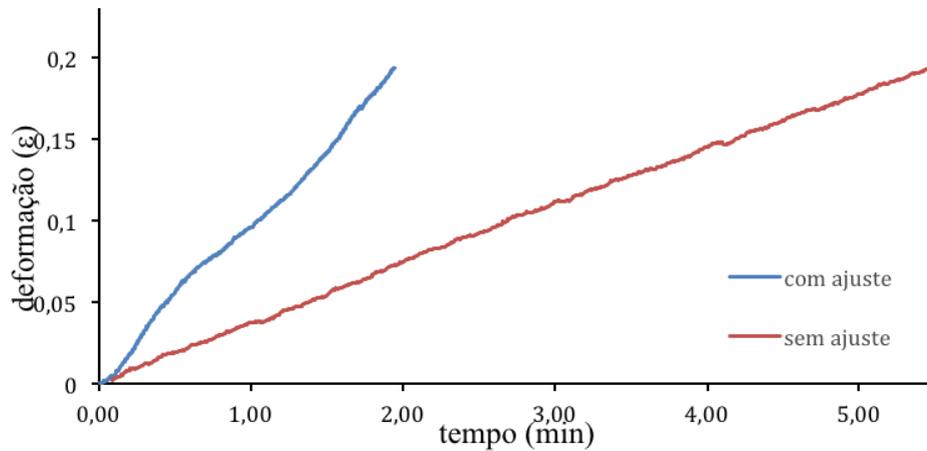
Com o intuito de validar o sistema de movimentação, seu respectivo desempenho e evidenciar as principais diferenças entre o método tradicional de movimentação e o desenvolvido neste trabalho foram efetuados testes referentes ao controle da velocidade real de ensaio e da taxa de deformação do CP.

Devido ao sistema de controle ser responsável por gerenciar e processar os dados adquiridos através da plataforma arduino, este foi o principal elemento avaliado. Concomitante a esta validação, a verificação da atuação dos elementos que compõem a máquina foi avaliada a partir dos respectivos desempenhos. No primeiro passo, o botão de acionamento foi pressionado para dá início ao ensaio mecânico. Em seguida, o motor de passo desloca a plataforma móvel no sentido longitudinal tracionando o CP. O extensômetro, devido estar em contato direto com o CP que se encontra sob deformação, é excitado por meio do deslocamento das hastes possibilitando a captura de dados referente ao deslocamento. O algoritmo recebe os dados e efetua os cálculos e plota na interface do computador, com auxílio do Excel®, as variáveis de velocidade convencional, deslocamento, variação do tempo, taxa de deformação, deformação e controle do motor.

Para a configuração dos testes estabeleceu-se a velocidade do ensaio de 5 mm/min, de acordo com a norma ASTM D638-02a. Os testes foram executados em duas etapas distintas, sendo estas: 1 – com controle da velocidade de deformação do CP; e 2 – sem o ajuste da velocidade de deformação do CP.

Conforme ilustrado pela Figura 5, referente à etapa 1, o comportamento da deformação, com a utilização do sistema de controle o ajuste da velocidade de deformação do CP atingiu uma maior deformação em um intervalo de tempo relativamente curto. Isto ocorreu porque o sistema proporciona estabilidade à velocidade de deformação, nesse caso específico estabelecida em 5 mm/min, ocasionando um alongamento mais acelerado do CP. Para o teste executado sem o ajuste da velocidade, a deformação do CP ocorreu de forma mais lenta quando comparado com o ajuste da velocidade de deformação.

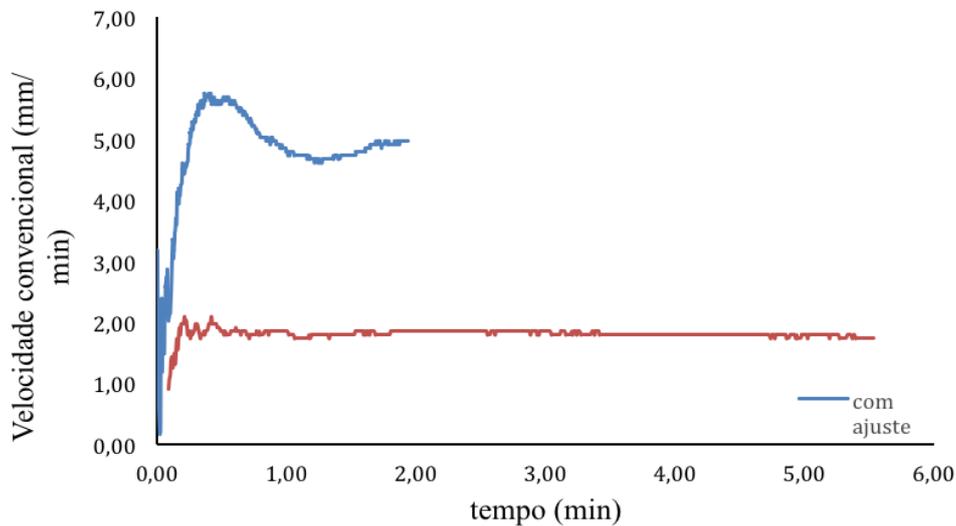
Figura 5 – Gráfico de deformação em função do tempo



Fonte: Autor

Similar ao teste de velocidade de deformação, a velocidade convencional foi avaliada em duas etapas: 1 – com ajuste; e 2 – sem ajuste. A Figura 6 mostra a velocidade convencional de deformação em função do tempo. Para manter o ajuste da velocidade de deformação o algoritmo apresentou um tempo de resposta lento ao tentar manter a velocidade de ensaio constante, conforme pré-estabelecido em 5 mm/min. Sem o ajuste da velocidade de deformação, a velocidade convencional permaneceu constante, com média de 1,8 mm/min. Entretanto o teste sobre o CP foi realizado com velocidade convencional inferior ao proposto pela norma ASTM D638-02a (5 mm/min), tornando o sistema sem ajuste de velocidade incapaz de reproduzir ensaios de acordo com as normas vigentes, comprometendo a confiabilidade dos resultados.

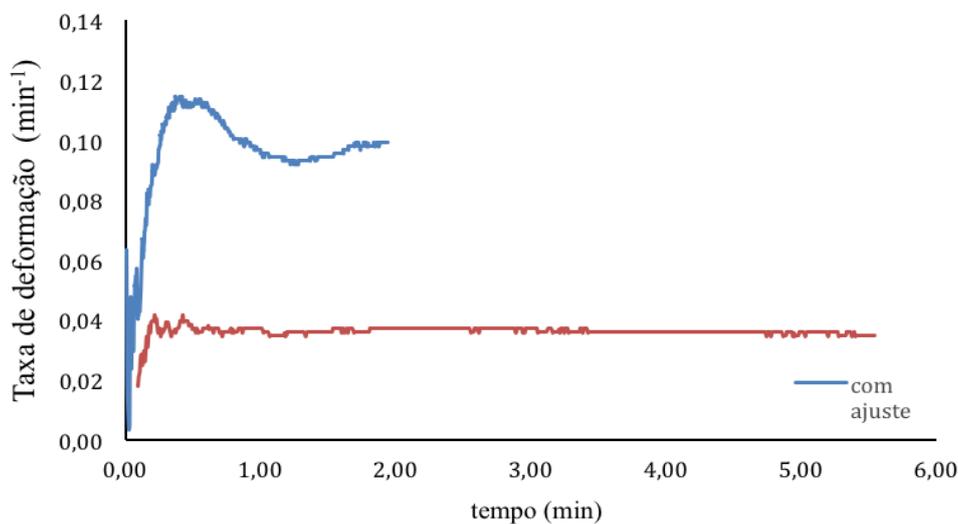
Figura 6 – Gráfico de velocidade convencional em função do tempo



Fonte: Autor

A Figura 7 mostra o ajuste da velocidade aproximando a taxa de deformação para $0,1 \text{ min}^{-1}$, próximo ao especificado pela norma ASTM D638-02a. Entretanto, para a taxa de deformação sem o ajuste de velocidade, permaneceu próximo a $0,04 \text{ min}^{-1}$. Isto reafirma que o desempenho do sistema sem o devido controle de movimentação torna o ensaio desconforme à norma. Além disso, evidencia que a taxa de deformação do CP é influenciada diretamente pelo sistema de acionamento, uma vez que este efetua e submete o CP a uma carga axial.

Figura 7 - Gráfico taxa de deformação em função do tempo



Fonte: Autor

4. Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver uma máquina universal de ensaios mecânicos. Devido à complexidade e extensão do projeto, esta etapa consistiu em desenvolver parcialmente o equipamento enfatizando a estrutura mecânica e eletrônica de acionamento e geração de carga com sistema de controle. Os componentes mecânicos usados são de fácil aquisição e simples fabricação com funcionalidade adequada para esta finalidade.

Somado à mecânica empregada na máquina, o desenvolvimento do sistema eletrônico possibilitou efetivo controle da taxa de deformação, velocidade convencional e deformação aplicada no CP, com o desenvolvimento e adaptação de um protótipo de extensômetro que permitiu mensurar o alongamento do CP e, agregado ao arduino, efetuar lógica que possibilitou controlar a velocidade do motor em função da velocidade de deformação que ocorre no CP durante o ensaio de tração.

Os resultados proporcionaram analisar o funcionamento da máquina e do sistema de controle através de comparações e análises das discrepâncias entre os parâmetros: velocidade de ensaio, deformação e taxa de deformação, em um ensaio de tração, mensurados diretamente no CP ou apenas pela movimentação da plataforma móvel da máquina.

A utilização do sistema de controle desenvolvido permitiu o ajuste da velocidade convencional e da taxa de deformação mantendo-as próximas aos valores estabelecidos pela norma ASTM D638-02a a partir de dados obtidos pelo extensômetro. Entretanto, sem o emprego deste controle de ajuste, embora a velocidade convencional, deformação e a taxa de deformação permanecessem constantes, os resultados ficaram fora da faixa de valores especificados pela referida norma.

Apesar da eficiência da máquina, o sistema de controle apresentou tempo de resposta relativamente lento para estabilizar a variação da velocidade de deformação, devido à resposta do motor de passo para controlar as oscilações ocorridas durante o ensaio de tração.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM) pelo auxílio financeiro, ao Programa de Educação Tutorial (PET-Engenharias) do Instituto de Ciências Exatas e Tecnologias – ICET/UFAM e a todos os membros do Laboratório de Pesquisa do ICET/UFAM que colaboraram direta ou indiretamente para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ASKELAND, D. R.; PHULÉ, P. P., *Ciência e Engenharia dos Materiais*. 1 ed.- São Paulo: Cengage Learning, 2008.
- BACK, N.; OGLIARI, A.; DIAS, A.; SILVA, J. C. DA. *Projeto integrado de produtos. Planejamento, Concepção e Modelagem*. São Paulo: Manole, 2008.
- BETRÁN, J. A. R. *Sistematização do processo de projeto em automação de máquinas cartesianas com acionamento eletromecânico – ênfase no posicionamento*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.
- BLANCO, C., *Mecânica dos Materiais*. 4ª Edição ed. 2006: Fundação Calouste Gulbenkian.
- BOYCE, B. L.; DILMORE, M.F. The dynamic behavior of tough, ultrahigh-strength steels at strain-rates from 0.0002 s⁻¹ to 200 s⁻¹. *International Journal of Impact Engineering*, 2008.
- CALLISTER, WILLIAM D. JR., *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. 8 ed. – Rio de Janeiro: LTC: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2013.
- COSTA, E. C.; NOGUEIRA, R. B. *Máquina universal de ensaios mecânicos: Projeto de acionamento e controle*. 1 ed., p. 84. Editora: Novas Edições Acadêmicas, 2018.
- DE FAVERI, G. *Projeto de máquina de ensaios universais para materiais poliméricos*. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia dos Materiais) – Universidade do Estado de Santa Catarina, 2015.
- FONSECA, J. H. L.; NOGUEIRA, R. B. *Extensômetro eletromecânico: máquina universal de ensaios mecânicos*. 1 ed., p.80. Editora: Novas Edições Acadêmicas, 2018.
- GARCIA, A.; SPIM, J. A. E DOS SANTOS, C., A. *Ensaio dos Materiais – 2ª ed.* – Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- GERE, J. M. *Mecânica dos materiais*. São Paulo: Thomson, 2008.
- GRUPO CIMM. *Máquina de Ensaio Universais*. Disponível em:
http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6545-maquinas-de-ensaio-universais#.Vv0uEE_N3_g.
Acessado em 31 de janeiro de 2016.
- LEMOS, G. V. B.; VIEIRA, D. M. M.; dos SANTOS, B. P.; HAAG, J.; COSTA, V. M.; MEINHARDT, C. P.; FABRÍCIO, D. A. K.; CHIOSSI, T. P.; STROHAECKER, T. R. *O efeito da velocidade de deformação no ensaio de tração em aço SAE 4340*. 68º Congresso anual da ABM. Belo Horizonte, Minas Gerais – BR, 2013.
- LOUREIRO, R. C. P. *Desenvolvimento de sistema para controle da taxa de deformação no corpo de prova em ensaio de tração*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Amazonas, 2017.
- REBOUÇAS, P. P. *Desenvolvimento de sistema de aquisição de dados para cálculos automáticos das propriedades mecânicas em um ensaio de tração*. VII Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação – CONNEPI. Fortaleza: 2007.
- SABRAVATI, B; MORENO, D. A. N.; SCHROETER, R. B. *Desenvolvimento de um dispositivo de parada súbita para processos de furação*. 7º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação – COBEF, 2013.
- SILVEIRA, C. A. *Integração de um sistema de impressão 3D em uma arquitetura modular de posicionamento cartesiano*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.



SOUZA, S. A. *Ensaio mecânicos de materiais metálicos. Fundamentos teóricos e práticos*. São Paulo: Edgard Blücher, 1982.