

Equipamento para utilização em ensaios não destrutivos através de correntes de foucault

Equipment for use in non-destructive tests through eddy currents

DOI:10.34117/bjdv7n9-163

Recebimento dos originais: 07/08/2021

Aceitação para publicação: 10/09/2021

Gabriel Ferreira Trindade

Graduando em Engenharia Mecânica pelo IFMG Congonhas
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais
Campus Congonhas
Endereço: Rua Livorno, 45, Jardim Itália - Campo Belo - Minas Gerais
E-mail: gabriel.ferreira9854@gmail.com

Samuel Vitor da Cunha Souza

Graduando em Engenharia Mecânica pelo IFMG Congonhas
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais
Campus Congonhas
Endereço: Rua Monsenhor Barreto, 1000, Sion - Conselheiro Lafaiete - Minas Gerais
E-mail: samuka-vitor@hotmail.com

Edson Peixoto de Oliveira

Graduando em Licenciatura em Física pelo IFMG Congonhas
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais - Campus
Congonhas
Endereço: Rua Nova, 109, Centro - Piranga - Minas Gerais
E-mail: edson.p.oliveira@outlook.com

Fabício Carvalho Soares

Doutor em Eng. Mecânica pela Universidade Federal de Minas Gerais
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG)
Campus Congonhas
Endereço: Av. Michael Pereira de Souza, 3007, Bairro Campinho, Congonhas - MG
E-mail: fabricio.soares@ifmg.edu.br

RESUMO

Os Ensaios Não Destrutivos (END) são técnicas utilizadas na inspeção de materiais de equipamentos sem danificá-los, sendo executadas nas etapas de fabricação, de construção, de montagem e de manutenção. Nesse trabalho foi desenvolvido um protótipo para a utilização em ensaios não destrutivos, através de aplicação de correntes parasitas, a fim de descobrir a descontinuidade na superfície de uma peça padrão. Para realizar esses estudos foi utilizado um sensor de efeito Hall e um controlador Arduino, que servirá para a leitura e análise dos dados gerados. Também foi utilizado um ímã para gerar os campos magnéticos que irão induzir as correntes elétricas na superfície e no interior da peça. Desta forma, atingiu-se o objetivo de criar um sistema capaz de fazer os ensaios não destrutivos em peças metálicas, com baixo custo e facilidade de interpretação.

Palavras-chave: Correntes parasitas, Correntes de Foucault, Ensaios Não Destrutivos, Sensor Hall, Arduino.

ABSTRACT

Non-Destructive Testing (NDT) are techniques used to inspect equipment materials without damaging, being performed in the manufacturing, construction, assembly and maintenance stages. In this work, a prototype was developed for use in non-destructive tests, through the application of eddy currents, in order to discover the discontinuity on the surface of a standard part. To carry out these studies, a Hall effect sensor and an Arduino controller were used, which will serve to read and analyze the generated data. A magnet was also used to generate the magnetic fields that will induce electrical currents on the surface and inside the piece. Thus, the objective of creating a system capable of performing non-destructive tests on metallic parts was achieved, with low cost and ease of interpretation.

Keywords: Eddy currents, non-destructive tests, Hall sensor, Arduino.

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos (ABENDI, 2021), “os Ensaios Não Destrutivos (END) são técnicas utilizadas na inspeção de materiais e de equipamentos sem danificá-los, sendo executados nas etapas de fabricação, de construção, de montagem e de manutenção”.

Dentre as utilizações desses ensaios podemos citar a análise da matéria prima antes de sua utilização, a avaliação do material durante o processo, a análise do produto acabado e a análise da estrutura depois de ter sido colocado em operação (HELLIER, 2003).

A utilização desses ENDS em empresas pode proporcionar uma redução de custo e de tempo, uma vez que alguns destes testes são mais rápidos e mais baratos que os tradicionais métodos de inspeção. Sendo assim, os ENDS proporcionam um aumento da competitividade de uma empresa perante as demais, visto que esta poderá oferecer aos seus clientes produtos melhores e com preços reduzidos. (CANTÚ, 2013)

Para a realização desses ensaios diversas técnicas estão sendo utilizadas e desenvolvidas durante todos os anos. Dentre essas técnicas podemos destacar a utilização de corrente parasitas, ensaio visual, líquido penetrante, partícula magnética, ultrassom, entre outros. (ABENDI, 2021)

De forma geral, existem diversas vantagens em se fazer uso de correntes parasitas para a realização de inspeções em metais, tais como o custo razoável, o potencial de automação, a boa sensibilidade em falhas próximas ou na superfície do material, a

capacidade de dimensionar o tamanho da falha e a portabilidade do equipamento (GARCÍA-MARTÍN, 2011).

1.1 OBJETIVOS GERAIS

Desenvolver um protótipo para a utilização em ensaios não destrutivos, através da aplicação de correntes parasitas, com o objetivo de descobrir a descontinuidade na superfície do material analisado.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Coletar e analisar os dados obtidos do sensor de corrente parasita.
- Aplicar as metodologias relacionadas a correntes parasitas.
- Desenvolver o protótipo.
- Avaliar a confiabilidade do protótipo.

1.3 JUSTIFICATIVA

Pelo fato de alguns dos métodos e aparelhos já existentes para esses ensaios serem muito caros e demandarem grande tempo para a realização da leitura completa feita pelo sensor no material, observou-se a necessidade de construção de um equipamento capaz de ter um valor agregado mais baixo, para viabilizar sua compra e simultaneamente oferecer um produto com o tempo de resposta do ensaio mais rápida e mais confiável.

Buscando suprir as necessidades do mercado para END, será proposto um método para detectar descontinuidades que seja de baixo-custo, que demonstre confiabilidade e rapidez de execução.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O ensaio não destrutivo de correntes parasitas teve sua origem em 1831 quando Michael Faraday demonstrou a introdução eletromagnética e formulou experimentalmente as leis da indução. No ano de 1879, Hughes registrou que a propriedade da bobina sofria uma mudança quando entrava em contato com metais de diferentes condutividades e permeabilidades. (MARQUES, 2017)

Tempos depois, Friedrich Foerster, desenvolveu um equipamento utilizando a técnica de correntes de Foucault (CANTÚ, 2013). De acordo com (HELLIER, 2003), “sua grande contribuição foi o desenvolvimento de um painel de impedância, que auxilia

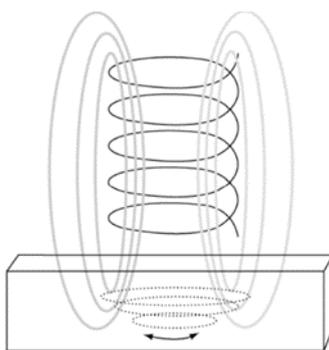
na apresentação dos resultados do teste, possibilitando uma análise paramétrica do resultado.

2.1 CORRENTES PARASITAS

Essa técnica se baseia na excitação de uma bobina através de uma corrente alternada ou um ímã, para assim gerar um campo magnético. O campo magnético gerado será perpendicular à superfície da amostra, denominado de campo indutor ou campo primário (SOUZA, 2007).

Ao colocar essa bobina ou esse ímã próximo a superfície do material analisado, o campo indutor gerado irá induzir as correntes elétricas na superfície e no interior da amostra, chamado de correntes parasitas ou corrente de Foucault (MOORE, 2004).

Figura 1 - Correntes parasitas



Fonte: (HELLIER, 2003)

Pode-se observar na figura 1, que ao colocar uma amostra de metal sobre a exposição de um fluxo magnético variável, as correntes parasitas serão induzidas sobre essa amostra. Para definir o sentido da corrente, pode-se utilizar a lei de Lenz. De acordo com (CANTÚ, 2013), como as linhas do campo magnético estão orientadas entrando no material, as correntes induzidas tendem a criar um campo magnético que se oponha a variação do fluxo. Assim, as correntes parasitas serão paralelas à superfície da amostra, com sua orientação circular.

2.2 FATORES QUE INFLUENCIAM NO ENSAIO DE CORRENTES PARASITAS

Alguns fatores deverão ser considerados para a realização do trabalho, pois terão interferência direta ou indireta sobre as correntes parasitas induzidas no material metálico. Os principais fatores que influenciam neste ensaio são: condutividade do material,

permeabilidade magnética, geometria e posicionamento das falhas, distância da peça e profundidade de penetração.

2.2.1 Condutividade do material

A condutividade do material é um fator muito importante a ser analisado, porque esta influencia diretamente sobre as correntes parasitas geradas. Materiais com alto nível de condutividade tendem a produzir mais fluxos de correntes parasitas, entretanto tem-se uma redução na penetração da corrente. Isso ocorre devido ao enfraquecimento do fluxo magnético original, pois tem uma grande geração de fluxos de correntes parasitas e resta menos força do fluxo original para induzir correntes em maiores profundidades (HANSEN, 2004).

Alguns fatores podem mudar a condutividade do material: composição, tratamento térmico, endurecimento, encruamento, entre outros (BUCKLEY, 1998).

2.2.2 Permeabilidade magnética

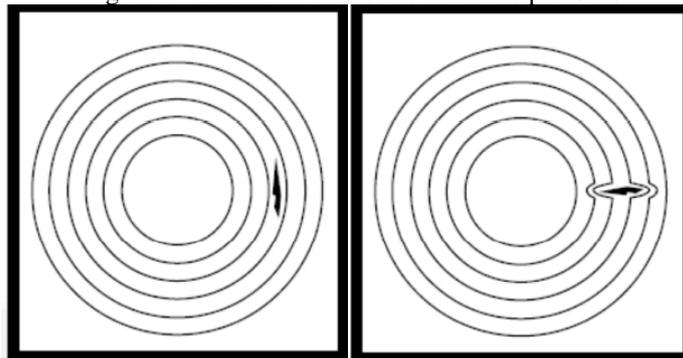
A permeabilidade magnética é a habilidade que um material tem de se magnetizar (HELLIER, 2003). Observa-se uma relação de que quanto maior for o valor da permeabilidade magnética, maior será a profundidade de penetração das correntes parasitas. Para materiais não magnéticos, como o alumínio, a permeabilidade relativa é tida como 1, então, a permeabilidade é igual à do ar. Portanto, é muito comum a utilização dessa técnica em materiais não ferrosos.

2.2.3 Geometria e posicionamento das falhas

Devemos levar em consideração também a geometria e o posicionamento das falhas para realizar uma leitura mais precisa. Quando existe uma falha no material analisado ocorre uma interrupção do fluxo normal das correntes parasitas que estão percorrendo o material, criando assim um aumento da impedância efetiva da bobina.

Conforme apresentado na Figura 2, quando temos uma falha paralela as correntes, os fluxos das correntes não serão modificados. Quando temos uma falha que não seja paralela, temos uma modificação nos fluxos das correntes parasitas.

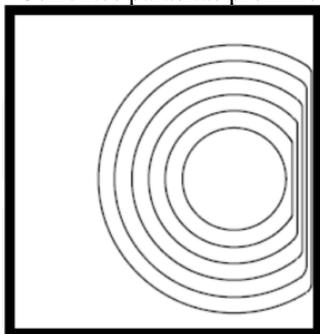
Figura 2 - Efeitos de falhas nas correntes parasitas



Fonte: (HELLIER, 2003)

Quando a corrente parasita está próxima da borda do material então temos uma modificação também das correntes apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Correntes parasitas próximo as bordas



Fonte: (HELLIER, 2003)

2.2.4 Distância da peça (lift-off)

A distância da peça para o objeto de excitação tem que ter sempre o mesmo afastamento, pois se variar essa distância pode ocorrer uma influência direta nos fluxos das correntes parasitas induzidas no material. Se o objeto de excitação estiver afastado (Lift-off) do material, irá ocorrer uma extinção dos fluxos das correntes.

Para se obter uma melhor análise das correntes, é recomendado que esse afastamento seja o menor possível, pois quanto mais próximo estiver do material de análise, maior será a sensibilidade, ou seja, maior será a densidade das correntes parasitas (HELLIER, 2003).

2.2.5 Profundidade de penetração

À medida que aumenta a profundidade de uma trinca, a penetração do campo magnético diminui e, conseqüentemente, a densidade das correntes parasitas decrescem

exponencialmente com a profundidade (skin depth). A profundidade de penetração padrão δ é definida pela equação abaixo:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\mu f \sigma \pi}}$$

Onde:

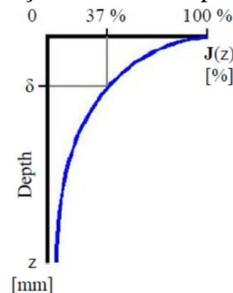
f é a frequência [Hz];

μ é a permeabilidade magnética [Tm/A];

σ é a condutividade [S/m];

Por meio desta fórmula, podemos observar que a frequência determinará a profundidade de penetração, pois à medida que aumenta a penetração diminui a densidade das correntes parasitas, fazendo com que a distribuição das correntes fique mais densa na superfície do material.

Figura 4 - Relação de força das correntes parasitas com a profundidade



Fonte: (BERNIEI; BETTA, 2012)

Além disso, materiais ferromagnéticos possuem baixa penetração, fazendo com que essa inspeção ocorra somente nas camadas superficiais.

3 METODOLOGIA

Para a realização do trabalho, fez-se o uso da técnica de correntes parasitas, “as quais ao serem induzidas em metais com falhas, apresentam uma variação em seu espectro, que pode ser lida com a utilização de sensoriamento adequado” (CANTÚ, 2013).

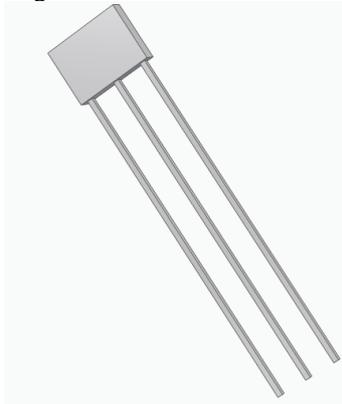
Para isso, foi desenvolvido um equipamento no qual realiza excitações no material em que será testado, ocorrendo à indução das correntes parasitas no material, permitindo que o sensor consiga ler e identificar as falhas. Essa leitura é feita pela variação da amplitude do campo magnético gerado pelas correntes de Foucault induzidas no material.

3.1 SENSOR

Foi selecionado um sensor de efeito hall modelo 49 E para este trabalho. O sensor de campo magnético hall é um sensor que utilizado para detectar a aproximação de um campo magnético, gerando em sua saída um valor analógico ou digital, dependendo do tipo de construção do módulo.

O sensor foi colocado de baixo da case para que ele tenha um contato direto com o material, o que facilita a leitura, além de os dados ficarem mais precisos e mais confiáveis.

Figura 5 - Sensor de efeito hall

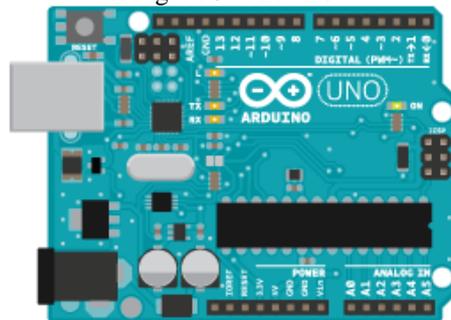


Fonte: Autor

3.2 ARDUINO

Para controlar o equipamento, foi selecionado o Arduino UNO Ver 3 devido ao seu custo e a sua simplicidade. O Arduino Uno é uma placa microcontrolada baseada no ATmega328P. Possui 14 pinos de entrada / saída digital (dos quais 6 podem ser usados como saídas PWM), 6 entradas analógicas, um ressonador de cerâmica de 16 MHz, uma conexão USB, um conector de força, um conector ICSP e um botão de reset (ARDUINO, 2021).

Figura 6 - Arduino



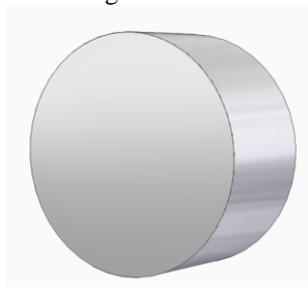
Fonte: (ARDUINO, 2021)

3.3 IMÃ

Como excitador, foi selecionado um ímã de neodímio. De acordo com NEODÍMIO (2021) “ímãs de Neodímio são um tipo de ímãs permanentes, também conhecidos como ‘ímãs de Terras Raras’, devido ao fato de que eles contêm um ou mais elementos de Terras Raras da tabela periódica”. A maioria são feitos de uma liga metálica contendo Neodímio, Ferro e Boro (Nd₂Fe₁₄B). Também chamados de “super ímã”, são mais fortes do que os ímãs comuns disponíveis no mercado.

Para esse projeto utilizaremos o ímã de neodímio em formato de disco com diâmetro de 7,5 mm e espessura de 2,5 mm, apresentado na imagem 7.

Figura 7 - Ímã



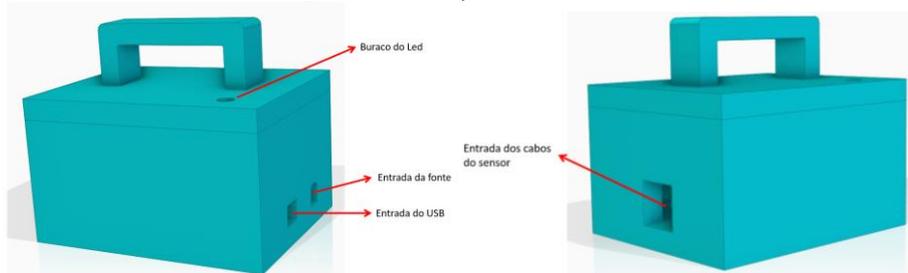
Fonte: Autor

3.4 CARCAÇA DO PROTÓTIPO

A carcaça do protótipo será desenvolvida em uma máquina de impressão 3D. Terá três partes: uma parte para abrigar o Arduino e os fios de conexão; uma parte para abrigar o sensor e o suporte do ímã; e a terceira parte que será o suporte do ímã.

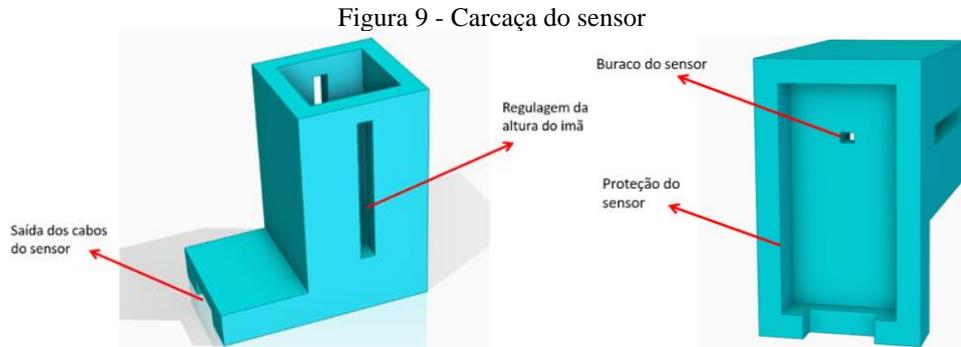
A carcaça do Arduino terá saídas para a conexão da fonte, para conexão dos cabos do sensor, para conexão do cabo USB do Arduino e uma saída para o led que indicará as descontinuidades.

Figura 8 - Carcaça do Arduino



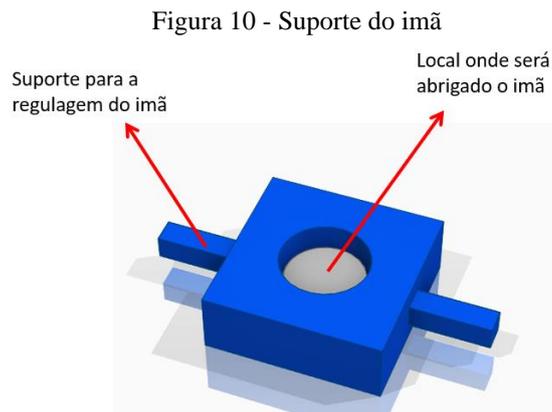
Fonte: Autor

A carcaça do sensor terá um suporte para o ímã que será regulável a altura, além de ter uma parede ao redor do sensor para proteção.



Fonte: Autor

O suporte do ímã servirá para abrigar o ímã e contará com uma guia para a regulagem.

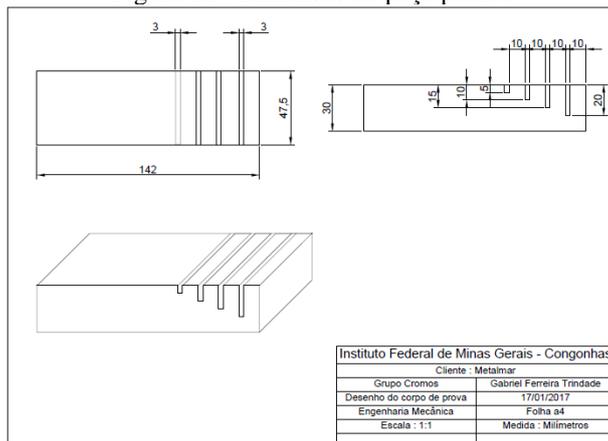


Fonte: Autor

3.5 PEÇA PADRÃO PARA TESTE

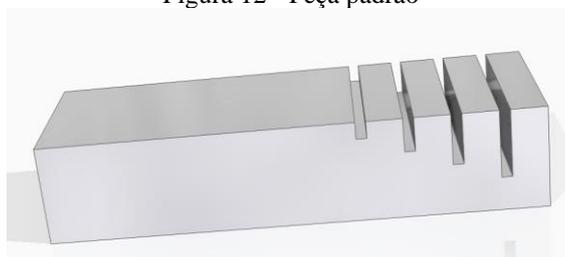
A peça padrão foi construída em bloco de alumínio com 4 fissuras com alturas diferentes para representar as trincas. A peça tem 142 milímetros de comprimento, 47,5 milímetros de largura e 30 milímetros de altura. Cada fissura tem 3 milímetros de largura e apresenta diferentes alturas que começa em 5 milímetros e vai aumentando em 5 milímetros a cada fissura.

Figura 11 - Dimensão da peça padrão



Fonte: Autor

Figura 12 - Peça padrão



Fonte: Autor

4 DESENVOLVIMENTO

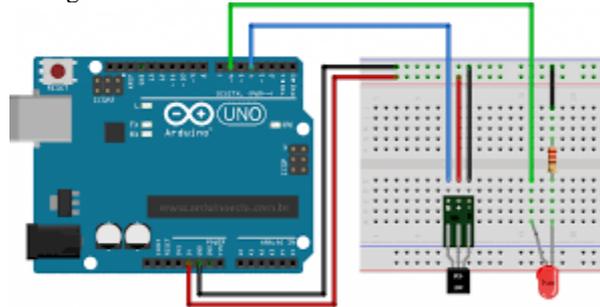
Foi realizada a montagem do sensor com o Arduino sem a case para colher as informações e os resultados iniciais. A partir dos resultados encontrados realizou-se a montagem completa para fazer a aquisição dos resultados finais.

4.1 MONTAGEM PARA TESTE

Para realizar a montagem de teste, ligou-se o sensor com o Arduino, induziu um campo magnético utilizando o ímã, fez a aquisição das informações no software do Arduino e apresentou os resultados por meio de um led. O led serve como um indicativo para informar que o nosso sistema está funcionando. Se o led ascender, significa que o sensor encontrou o campo magnético e tudo está funcionando. O led foi ligado ao um resistor de 10 K Ohm.

Na imagem 13 temos o esquema da forma que será montado o sistema. O sensor será ligado através da porta de 5 volts, o pino da direita será ligado ao GND (ground ou terra) e o pino da esquerda será ligado a porta digital 4. O led será ligado ao GND e a porta 6 do Arduino.

Figura 13 - Sistema do sensor hall com o Arduino



Fonte: (ARDUINO, 2021)

Na imagem 14 temos o código utilizado para testar o sensor.

Figura 14 - Programação do sensor hall

```
//PINO DIGITAL UTILIZADO PELO LED
const int pinoLed = 6;

//PINO DIGITAL UTILIZADO PELO SENSOR
const int pinoSensor = 4;

void setup(){

  //DEFINE O PINO COMO ENTRADA
  // "_PULLUP" É PARA ATIVAR O RESISTOR INTERNODO ARDUINO PARA GARANTIR QUE NÃO EXISTA FLUTUAÇÃO ENTRE 0 (LOW) E 1 (HIGH)
  pinMode(pinoSensor, INPUT_PULLUP);

  pinMode(pinoLed, OUTPUT); //DEFINE O PINO COMO SAÍDA
  digitalWrite(pinoLed, LOW); //LED INICIA DESLIGADO
}

void loop(){

  //SE A LEITURA DO PINO FOR IGUAL A LOW, ACENDE O LED
  if(digitalRead(pinoSensor) == LOW){
    digitalWrite(pinoLed, HIGH);

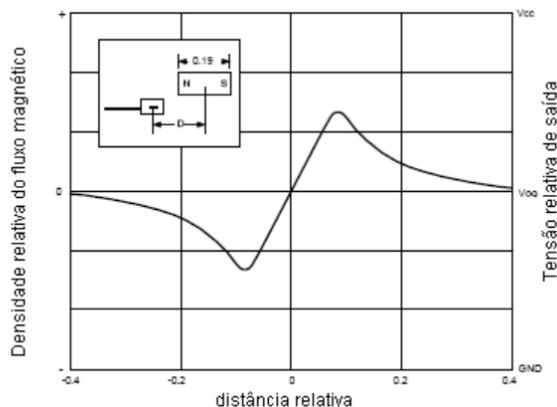
    //SENÃO, APAGA O LED
  }else{
    digitalWrite(pinoLed, LOW);
  }
}
```

Fonte: Autor

4.2 RESULTADOS DOS TESTES

Após ligar todos os circuitos conforme a imagem 13 e escrever o código apresentado na imagem 14, podemos observar que ao aproximar ou afastar o ímã a tensão relativa na saída sofre uma variação. Na imagem 15, podemos observar essa variação causado pelo ímã.

Figura 15 - Resposta do sensor hall causado pelo imã

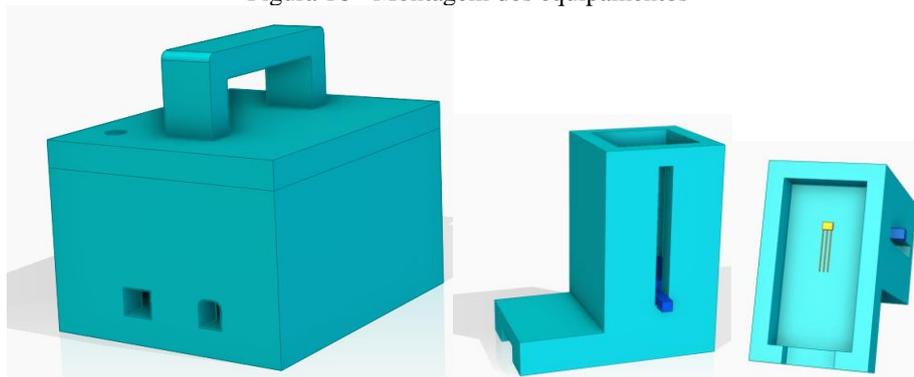


Fonte: (ARDUINO, 2021)

4.3 MONTAGEM DO EQUIPAMENTO

Após os resultados preliminares, passou para a etapa de montagem do equipamento completo. Primeiro foi produzida a carcaça utilizando uma impressora 3D. foram alocados todos os componentes e realizou um teste inicial com o equipamento.

Figura 16 - Montagem dos equipamentos

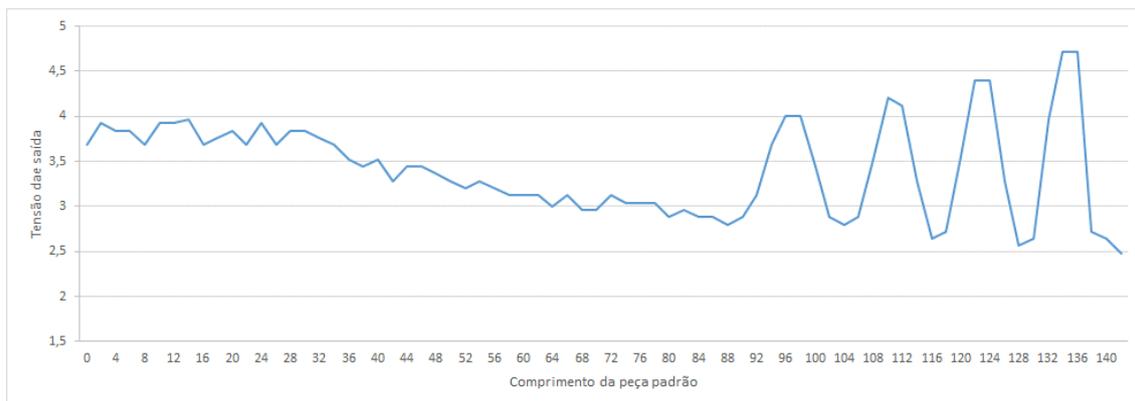


Fonte: Autor

5 RESULTADOS

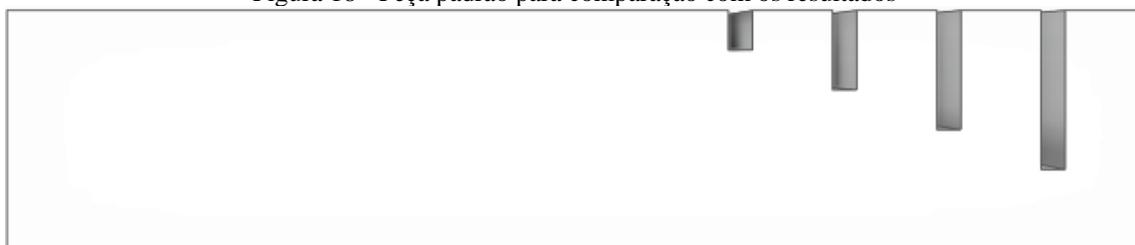
Com o equipamento final, foi realizado os testes na peça padrão, utilizando a mesma programação apresentada na imagem 14. Na imagem 17 são apresentados os resultados obtidos na forma de um gráfico. No eixo x está representado o comprimento da peça padrão e no eixo Y a tensão de saída (leitura feita pelo Arduino).

Figura 17 - Resultados obtidos pelo sensor hall



Fonte: Autor

Figura 18 - Peça padrão para comparação com os resultados



Fonte: Autor

Analisando as imagens 17 e 18, cria-se uma relação da tensão de saída capturada pela porta do Arduino com a presença das falhas no material de teste. É possível afirmar que a medida que o sensor aproxima da falha, a tensão de saída cai proporcionalmente a profundidade da falha e, quando o sensor sai da falha, tem-se um pico no valor de saída atingindo o seu valor máximo.

Esse fenômeno ocorre devido ao movimento do sensor ao se aproximar da falha, fazendo com que as linhas de campo induzidas pelo ímã apresentem maior densidade que os campos induzidos na frente da falha, gerando uma grande elevação da densidade do fluxo magnético. Isso ocorre porque a falha restringe a indução dessa corrente.

Por meio desse estudo, foi possível detectar a falha e o seu posicionamento em relação a peça utilizando um equipamento de baixo custo.

6 CONCLUSÃO

Este estudo observou o comportamento do sensor de efeito hall para a realização de ensaios não destrutivos em peças metálicas, resultando em um sistema capaz de identificar e mensurar falhas em estruturas metálicas. Pode-se concluir que o sistema está

pronto para ser utilizado para fins didáticos com sucesso devido a simplicidade dos materiais usados e os resultados obtidos.

Como pontos positivos observados durante o estudo podemos citar os seguintes pontos:

- Led para identificação das falhas. Com o led podemos identificar a falha com mais rapidez e saber o seu posicionamento.
- Simplicidade dos materiais. Como os materiais são simples e baratos, então a aplicabilidade desse estudo é viável e de fácil repetibilidade.
- Utilização do Arduino. Com a utilização do Arduino temos a criação dos gráficos instantâneos o que fornece uma melhor leitura das falhas.
- Utilização da impressora 3D. A impressora 3D facilitou bastante a criação das carcaças e, em caso de necessidade, permite fazer alguma modificação ou melhoria de forma, fácil e rápida.

Para fins de melhorias futuras, visando a aplicação em oficinas, podemos destacar as seguintes sugestões:

- Melhoria em relação ao objeto de excitação do campo magnético, utilizando uma bobina.
- Implementação de um amplificador para amplificar o sinal de saída.
- Alterar a carcaça para melhorar a proteção e disposição dos equipamentos
- Alterar o suporte do sensor para colocar um material de interface entre o sensor e o material a ser ensaiado, utilizando um material mais resistente e que forneça um melhor contato com o objeto de estudo.

REFERÊNCIAS

ABENDI. Associação brasileira de ensaios não destrutivos. Abendi, 2021. Disponível em: <<http://www.abendi.org.br/abendi/>>. Acesso em: 2021

ARDUINO. Arduino. arduino.cc, 2021. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>>. Acesso em: 2021

BUCKLEY, J. M. An introduction to eddy current testing theory and technology. American Society of Nondestructive Testing.1998.

CANTÚ, R. D. M. Desenvolvimento de um dispositivo de realização de ensaios não destrutivos em metais por corrente de foucault.Centro Universitário Univates.2013.

GARCÍA-MARTÍN, J. Non-destructive techniques based on eddy current testing. Multidisciplinary Digital Publishing Institute.2011.

HANSEN, J. The eddy current inspection method. History and electrical theory, p. 279-281. 2004.

HELLIER, C. J. Handbook of Nondestructive Evaluation. McGraw-Hill Education .2003.
MARQUES, B. S. B. Aplicação da técnica de correntes parasitas para detecção de defeitos em aço dúplex 2205 com diferentes tratamentos térmicos. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.2017.

MOORE, P. O. Nondestructive testing handbook. Amer Society for Nondestructive, v. Volume 5, 2004.

NEODÍMIO. Neodímio. neodímio.com, 2021. Disponível em: <<https://www.neodimio.com/produtos/neodimio/>>. Acesso em: 2021.

SOUZA, P. A. D. Estudo Preliminar da Aplicação da Técnica de Correntes. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. Brasil. 2007.