

DESENVOLVIMENTO DE CÉLULA DE CARGA PARA PENETRÔMETRO AGRÍCOLA DE IMPACTO

Alice Nascimento Teixeira Rocha (Universidade Federal do Amazonas - UFAM)

alice.ntr9@gmail.com

Christiano Luna Arraes (Universidade Federal do Amazonas - UFAM)

christianoarraes@yahoo.com.br

Rodrigo Bísvaro Nogueira (Universidade Federal do Amazonas - UFAM)

rodrigobiscaro@gmail.com

Resumo

O penetrômetro é um instrumento utilizado para medir a resistência do solo à penetração. A possibilidade de aplicação do penetrômetro e a necessidade contínua de proporcionar melhorias direcionam pesquisas voltadas para o desenvolvimento de novos dispositivos capazes de proporcionar sistemas automatizados, mais práticos, precisos e confiáveis. O presente trabalho propõe desenvolver um protótipo funcional de célula de carga para acoplagem em penetrômetro dinâmico agrícola modelo IAA/PLANALSUCAR-STOLF. O trabalho teve três etapas principais: a construção mecânica do protótipo, a colagem do sensor *strain gauge* ao protótipo e montagem do sistema para os testes de aplicação de carga e mensuração do sinal elétrico. A célula de carga desenvolvida apresentou como inovações: o design do dispositivo, utilização de sensor *strain gauge*, e o limitador de cargas para evitar danos por sobrecarga ao sistema. O protótipo construído é funcional e está pronto para a etapa de calibração e testes de campo.

Palavras-Chaves: Penetrômetro de solo, célula de carga, tecnologia *strain gauge*.

1. Introdução

A compactação do solo contribui fortemente para a presença de água e ar no solo, podendo causar erosões, interferência na absorção de nutrientes pelas plantas, aumento da resistência do solo à penetração e perda de produtividade (MAGALHÃES *et al*, 2009). Conhecer esses e outros fatores resultantes da presença de compactação é fundamental para a elaboração e aplicação de técnicas apropriadas que viabilizem a conservação e uso eficaz do solo (SOUZA; RAFFUL; VIEIRA, 2000), visto que o solo tem sido comumente usado de forma inadequada e que grande parte dos alimentos provém do cultivo e das pastagens (LEPSCH, 2010).

O penetrômetro é um instrumento utilizado para medir a resistência do solo à penetração amplamente solicitado em estudos acerca de compactação de solo. Dentre os tipos-base de

penetrômetros (estáticos e dinâmicos), os dinâmicos são os mais escolhidos para uso a nível nacional por apresentarem um menor custo, facilidade de operação e possibilidade de uso em solos de alta resistência (STOLF *et al*, 1998). A possibilidade de aplicação do penetrômetro e a necessidade contínua de proporcionar melhorias direcionam pesquisas voltadas para o desenvolvimento de novos dispositivos capazes de proporcionar sistemas automatizados, mais práticos, precisos e confiáveis.

Para proporcionar melhorias na precisão dos valores de força de penetração aplicada em um teste com penetrômetro dinâmico é necessário um dispositivo que permita a obtenção dos valores de carga aplicada, o que pode ser feito por meio de uma célula de carga, por esta ser um dispositivo de conversão de valores de carga mecânica em sinal elétrico capaz de proporcionar maior confiabilidade dos resultados (BONFILS, 2017). O presente trabalho propõe desenvolver um protótipo funcional de célula de carga metálica à base de tecnologia *strain gauge* específico para acoplagem em penetrômetro dinâmico agrícola modelo IAA/PLANALSUCAR-STOLF.

2. Fundamentação Teórica

2.1. Compactação do solo

A compactação de solo pode ser definida com uma alteração física no solo que implica na redução dos espaços *internos* estruturais, os quais geralmente encontram-se ocupados por água e ar. Uma das consequências da compactação do solo é a diminuição da presença de tais elementos, dificultando no ramo agrícola o desenvolvimento de algumas culturas. Um grande indicativo da existência de compactação é a resistência do solo à penetração (ASSIS *et al*, 2009; MOLIN *et al*, 2012).

2.2. Penetrometria de solo

O penetrômetro é um instrumento utilizado para medir a resistência do solo à penetração, normalmente classificado em duas principais ramificações: estáticos e dinâmicos (de impacto). Os estáticos são caracterizados pelo uso de velocidade constante de penetração, enquanto no caso de penetrômetros dinâmicos a penetração ocorre por meio de impactos causados por um êmbolo metálico (Vaz *et al*, 2002).

O penetrômetro IAA/PLANALSUCAR-STOLF (ou penetrômetro STOLF) foi criado no Brasil nos anos 80 como alternativa de penetrômetro dinâmico facilitado e de baixo custo para uso agrícola, uma vez que os penetrômetros de impacto eram até então maquinários robustos e pesados utilizados apenas em problemática civil, e os estáticos - por serem automatizados -

apresentavam custo de aquisição muito alto. Embora o penetrômetro STOLF tenha se tornado o mais utilizado no meio agrícola desde o seu surgimento, os estudos dos dados obtidos em testes de penetração ainda são um desafio, e grande parte dos estudos em penetrometria de impacto encontram-se em literatura civil (STOLF, 1991).

2.3 Célula de carga e tecnologia *strain gauge*

Célula de carga é um transdutor eletromecânico que permite a conversão de valores de carga mecânica aplicada em um sinal elétrico mensurável, proporcionando melhorias na capacidade de detectar e mensurar cargas. A célula de carga é classificada dentro de quatro classes principais conforme o modo de emissão do sinal elétrico: células de carga mecânicas, com tecnologia *strain gauge*, óptica e semicondutoras (LEE *et al.*, 2012; ADAMS, 2000).

A tecnologia *strain gauge* é uma importante ferramenta para a engenharia desde seu surgimento, devido ao baixo custo e alta precisão. Em uma célula de carga metálica com uso de *strain gauges*, os sensores são caracterizados como resistores elétricos com base usualmente feita de resina epóxi ou poliamida e um filamento metálico de liga de constantan com uma configuração em “ziguezague”, chamada de grade ou estrias. Um *strain gauge* apresenta a variação de sua resistência elétrica em função da deformação mecânica sofrida em seu filamento metálico, liberando um sinal de correspondência entre as duas grandezas. (OLIVEIRA, 2010; LEE *et al.*, 2012).

3. Materiais e métodos

O trabalho teve três etapas principais: a construção mecânica do protótipo, a colagem do sensor *strain gauge* ao protótipo e montagem do sistema para os testes de aplicação de carga e mensuração do sinal elétrico.

3.1. Construção do protótipo

O projeto conceitual do protótipo de célula de carga mostrado em Figura 1.a foi realizado por meio do *software* Inventor- AutoCAD® em desenho 3D afim de facilitar as discussões de geometria e *design* para acoplar no penetrômetro de impacto para encontrar a região de concentração de tensão para colagem do sensor *strain gauge*.

O aço escolhido para usinagem do protótipo foi o SAE 1045, com tensão limite de escoamento $\sigma = 300$ MPa e Módulo de Young $E = 210$ GPa, devido ao seu baixo custo e facilidade para aquisição.

Para dimensionamento do protótipo, inicialmente foi estimada a carga máxima aplicada em testes de campo com penetrômetro. Sabe-se que a carga é aplicada ao sistema quando o êmbolo é liberado do topo da haste do penetrômetro para chocar-se com um fixador. Considerou-se um sistema ideal, sem perdas de energia em forma de som, aquecimento, deformação permanente do sistema e resistência do ar, de modo que toda a energia do sistema é igual ao trabalho realizado para a penetração do solo. A partir desta consideração, a carga aplicada F pode ser calculada pela Equação 1:

$$F = \frac{mgh}{d} \quad (\text{Equação 1})$$

Na qual m é a massa do êmbolo (4kg), g é a força gravitacional local (9,8m/s²), h é a variação de altura do topo da haste ao fixador (0,4m) e d é a profundidade representativa do pior cenário em testes de penetração (solo com alta compactação), de acordo com Tavares (2015) considerada igual a 0,02m.

Devido a geometria curva adotada em projeto conceitual, as dimensões do protótipo foram determinadas por meio da equação da teoria das vigas curvas (Equação 2), fazendo-se uso da carga F calculada na Equação 1.

$$\sigma = \frac{FL}{bh} + \frac{FL(R-r)}{bher} \quad (\text{Equação 2})$$

Na qual F é a carga aplicada no penetrômetro, L é o comprimento total da curvatura, b a largura da secção transversal, h a altura da secção transversal, R o raio da linha neutra, r o raio externo da curvatura e e a diferença entre o raio da linha neutra e o centroide. A Equação 2 permitiu analisar as diferenças na tensão ao mudar a base e altura da secção transversal (espessura) da célula de carga.

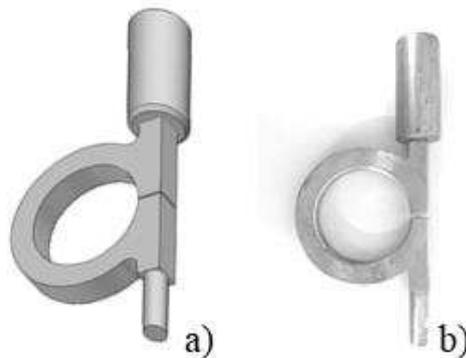
Foi proposto para o protótipo uma região que limitasse a deformação causada, de modo a não ultrapassar a zona elástica do material e assim evitar a ocorrência de deformações permanentes no protótipo. Tal região passou a ser chamada de limitador. Considerou-se que o comprimento do limitador deveria ser igual à flecha máxima sofrida, devido a curvatura do material e o sentido da carga aplicada. A Equação 3 foi usada para calcular a flecha no sistema.

$$f = \frac{FL^3}{3EJ} \quad (\text{Equação 3})$$

Sendo F a carga aplicada no penetrômetro, L o comprimento total da curvatura, E o módulo de elasticidade do material e J o momento de inércia.

Um desenho técnico foi desenvolvido em *software* AutoCAD® a partir do projeto conceitual e das dimensões calculadas com a finalidade de direcionar a etapa de usinagem do protótipo. A Figura 1.b mostra o protótipo de célula de carga usinado.

Figura 1 - Projeto conceitual e protótipo usinado



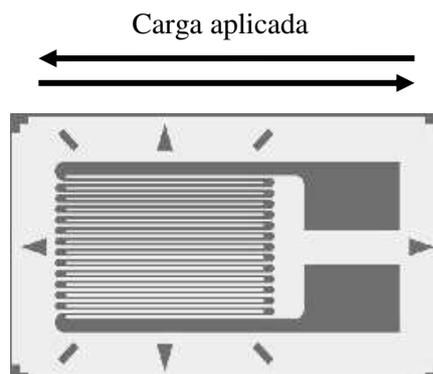
Fonte: Próprio autor

Foi realizada com *software* SolidEdge® a simulação estrutural de aplicação de tensão ao protótipo dimensionado para observar o comportamento do protótipo quando submetido à carga estimada e identificar regiões de concentração de tensão para determinação da região de colagem do sensor *strain gauge*.

3.2. Colagem do sensor *strain gauge* no protótipo

Um sensor *strain gauge* foi colado com resina epóxi aplicada uniformemente sobre a região da célula de carga mais solicitada à tensão de tração de modo a apresentar as estrias do fio metálico na direção da carga aplicada, conforme indicado em Figura 2.

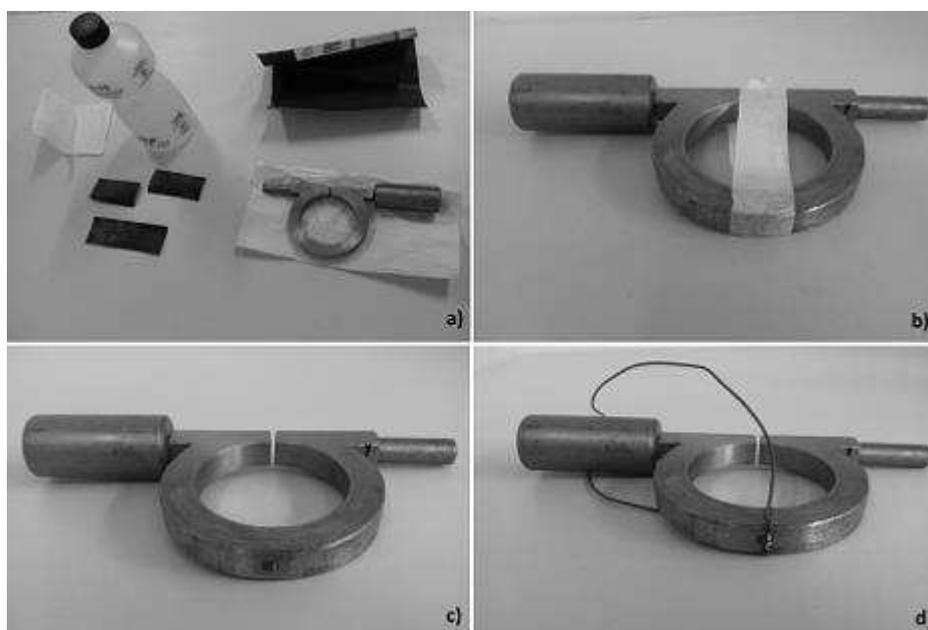
Figura 2 - Posicionamento do sensor *strain gauge* conforme a direção de carga aplicada



Fonte: Adaptado de National Eletronic Instruments (2013)

A colagem foi realizada por meio da metodologia de colagem KYOWA[®] disponível no datasheet do sensor. As etapas do processo de colagem do *strain gauge* são mostradas em Figura 3. Os materiais principais para limpeza da região de colagem indicados em Figura 3.a foram definidos na metodologia de colagem escolhida. A marcação do local exato de colagem (Figura 3.b) foi realizada com o auxílio de régua, fita adesiva e pincel marcador. Após colagem do sensor na região desejada apresentada em Figura 3.c, os fios para leitura do sinal foram soldados nas abas de solda do *strain gauge* (Figura 3.d).

Figura 3 - Etapas do processo de colagem do *strain gauge* no protótipo



Fonte: Próprio autor

3.3. Sistema de teste para aplicação de carga e mensuração do sinal elétrico

Um suporte de madeira 36,5 x 31,0 x 1,5 (cm³) foi confeccionado para utilização nos testes de aplicação de carga no protótipo. Durante os testes, o protótipo foi fixado na posição vertical em uma morsa mecânica para receber os pesos metálicos. A massa do suporte de madeira (1,300 kg) foi considerada durante o processo. Foram realizados 10 testes com 5 casos de carga aplicada ao protótipo.

Considerou-se o caso 1 sem carga aplicada ao protótipo, na qual a resistência esperada era de 350 Ω (resistência inicial do *strain gauge*). No caso 2 foi avaliada apenas a carga do suporte sobre a célula de carga para identificar a influência da massa do suporte na variação do sinal elétrico. Foram realizados também os testes 3 (10,78 kg), 4 (15,27 kg) e 5 (22,50 kg)

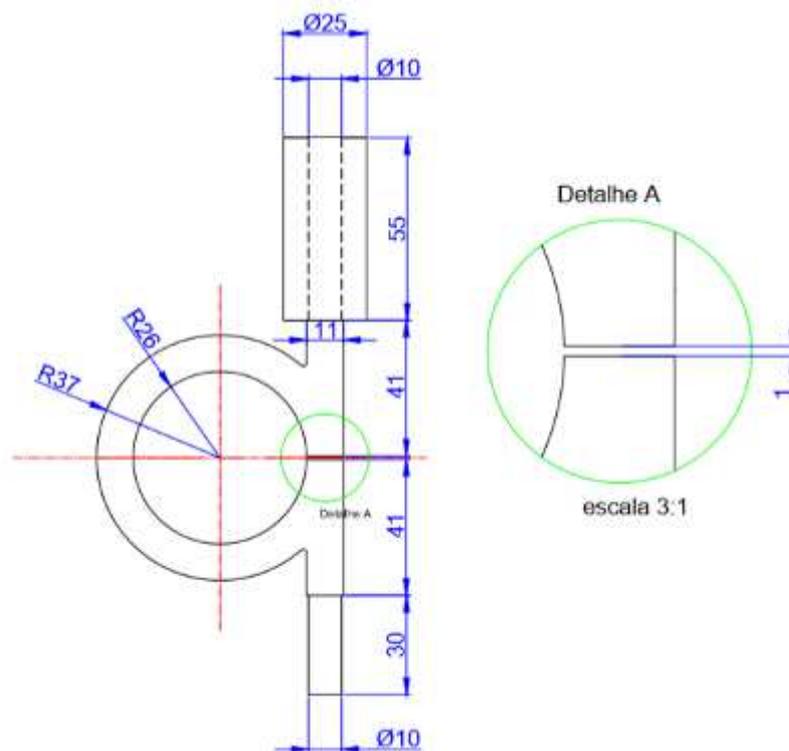
respectivamente, em que a carga total aplicada em cada caso resultou da soma da massa preparada e da massa do suporte. O sinal de resistência elétrica do sensor em função dos pesos aplicados foi medido por meio de multímetro digital ITMD3010. A média dos valores de resistência elétrica e desvio padrão foram calculados.

4. Resultados e discussão

4.1. Dimensionamento do protótipo

As dimensões determinadas por meio da Equação 2 são apresentadas em desenho técnico desenvolvido (Figura 4).

Figura 4 - Desenho técnico do protótipo de célula de carga



Fonte: Próprio autor

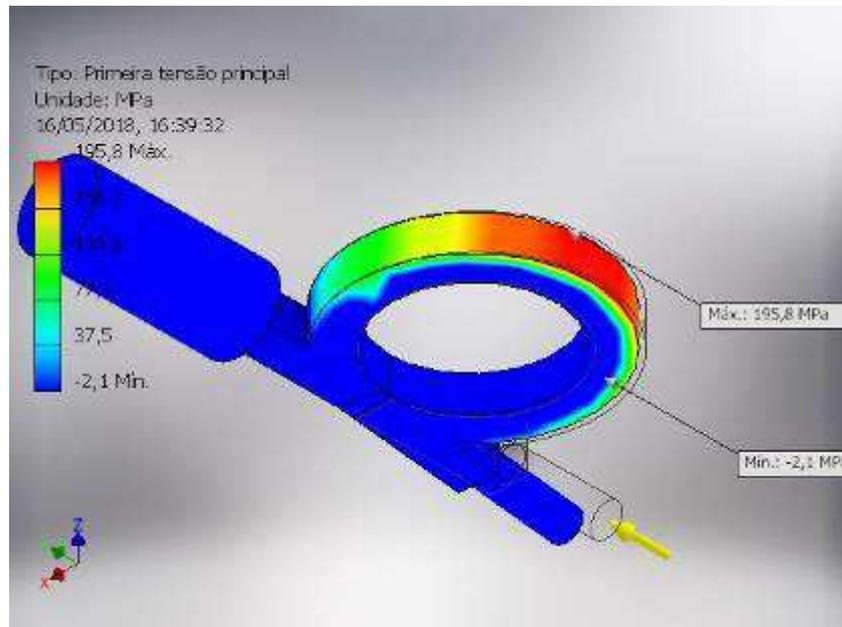
A partir da Equação 1 foi encontrada uma carga estimada aplicada para os testes com penetrômetro de: $F = 784 \text{ N}$. Foi possível dimensionar a área quadrada da secção transversal do elemento curvo de deformação da célula de carga em $11 \times 11 \text{ (mm}^2\text{)}$.

Para tais dimensões, a tensão calculada σ foi de 280,31 MPa, estando dentro do limite elástico do material. Foi encontrada por meio da Equação 3 uma flecha $f = 1 \text{ mm}$, que foi usada para determinar a altura do limitador representado em detalhe A da Figura 4.

4.2. Análise das simulações estruturais

Por meio da simulação estrutural, as regiões de concentração de tensão mecânica foram verificadas. A simulação indicou a região da curvatura externa da célula de carga como a área de tensão crítica, representada pela região avermelhada indicada em Figura 5.

Figura 5 - Simulação estrutural da célula de carga



Fonte: Próprio autor

Sendo assim, a região da curvatura externa foi escolhida para a colagem do *strain gauge*. Nesta região, o sensor sofre solicitação de tração durante o uso de penetrômetro, o que implica no alongamento do fio metálico e, por consequência, na variação da resistência elétrica.

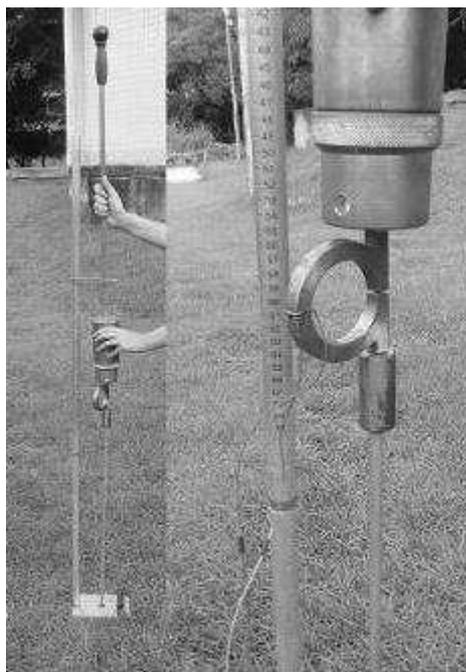
4.3. Adesão do sensor *strain gauge* à célula de carga

O sensor *strain gauge* foi colado na região crítica de tensões, com o intuito de maximizar o sinal de saída. A colagem do sensor através da metodologia adotada resultou em adesão adequada ao protótipo. Observa-se a necessidade de fixar os fios de leitura do sinal elétrico às laterais do dispositivo para evitar o rompimento da solda.

4.4. Acoplamento do protótipo ao penetrômetro

A geometria do protótipo adequou-se satisfatoriamente aos demais dispositivos do penetrômetro. O sistema completo com a acoplamento do protótipo em penetrômetro de impacto modelo IAA/PLANALSUCAR-STOLF é encontrado em Figura 6.

Figura 6 - Penetrômetro STOLF com célula de carga desenvolvida.



Fonte: Próprio autor

4.5. Testes de aplicação de carga e obtenção do sinal elétrico

A média da resistência elétrica e o desvio padrão obtidos nos testes de aplicação de carga são mostrados em Tabela 1. Inicialmente os testes permitiram identificar que a resistência elétrica do sensor sem aplicação de carga (caso 1) variou de 351,70 (Ω) a 351,80 (Ω), apresentando uma resistência elétrica média mensurada por multímetro com 5% de erro em relação ao valor indicado pelo fabricante. O desvio padrão do caso 1 foi o menor obtido, visto que, de fato, esperava-se a menor das variações de resistência por não haver condição de carga mecânica aplicada.

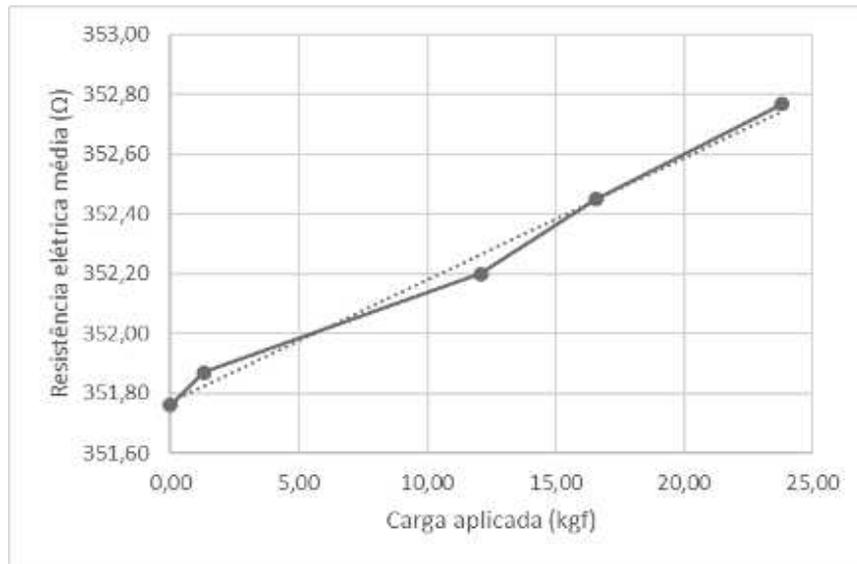
Tabela 1 - Resistência elétrica resultante dos testes de aplicação de carga ao protótipo

Caso	Carga aplicada (kgf)	Resistência Elétrica Média (Ω)	Desvio Padrão (%)
1	0,00	351,76	5,16
2	1,30	351,87	6,75
3	12,08	352,20	9,43
4	16,57	352,45	8,50
5	23,80	352,77	8,66

Fonte: Próprio autor

A Figura 7 mostra a curva obtida por meio da relação entre resistência elétrica média e carga aplicada. A linha pontilhada mostra a regressão linear $y = 0,0407x + 351,77$. O caso 3 apresentou maior desvio padrão (Tabela 1) e por consequência obteve a coordenada mais distante da linha de regressão.

Figura 7 – Comportamento do sinal de Resistência elétrica em função da carga aplicada para a célula de carga desenvolvida.



Fonte: Próprio autor

A Figura 7 exibe um comportamento linear da variação da resistência elétrica em função das cargas aplicadas, indicando a funcionalidade do protótipo, visto que o mesmo é capaz de emitir o sinal elétrico em resposta a aplicação de carga. Para tratar o erro experimental e automatizar o sistema surge como alternativa a utilização de microcontrolador para coleta dos dados e calibração do protótipo, além do uso de ferramentas para normalização do sinal como a ponte de Wheatstone.

5. Conclusão

A célula de carga desenvolvida apresentou como inovações: o design do dispositivo, utilização de sensor *strain gauge*, e o limitador de cargas para evitar danos por sobrecarga ao sistema. A geometria curva proporcionou uma região de concentração de tensão mecânica necessária ao uso do sensor e que resultou em maximização da deformação e também do sinal elétrico obtido pelo sensor.

A célula de carga para penetrometria de solo desenvolvida apresentou comportamento do sinal elétrico linear, o que torna o protótipo útil para ser utilizado em automação do sistema.

Com base nos resultados, o protótipo construído é funcional e está pronto para a etapa de calibração e testes de campo com penetrômetro de impacto de uso agrícola modelo IAA/PLANALSUCAR-STOLF o que permitirá a realização de estudo do comportamento da resistência à penetração obtidos com célula de carga, possibilitando entender e analisar de forma mais adequada a compactação do solo.

6. Referências

- ADAMS, B. A.; ST-AMOUR, G.; TOPP, G. C. Evaluation of a piezoelectric load cell or use on cone penetrometers. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.76, p.205-210, Fevereiro 2000.
- ASSIS, R. L. *et al.* Avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal - SP, v.29, n.4, p.558-568, Dezembro 2009. ISSN 0100-6916.
- BONFILS, B.; Quantifying of impact breakage of cylindrical rock particles on an impact load cell. **International Journal of Mineral Processing**. Brisbane, Australia. Fevereiro 2017.
- LEE, D. *et al.* A prototype high sensitivity load cell using single walled carbon nanotube strain gages. **Sensors and Actuators A**, Seoul – Republic of Korea, v. 160, p.120-126, 2012.
- LEPSCH, I. F.; Formação e Conservação dos Solos. 2ª ed. **Oficina de Textos**. 2010.
- MAGALHÃES, W. A. *et al.* Determinação da resistência do solo a penetração sob diferentes sistemas de cultivo em um Latossolo sob Bioma Pantanal. **Agrarian**. Cáceres - MT, v.2, n.6, p.21-32, Dezembro 2009.
- MOLIN, P. J.; DIAS, S. T. C.; CARBONERA, L. Estudos com penetrometria: Novos equipamentos e amostragem correta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande - PB, v.16, n.5, p.584–590, Fevereiro 2012.
- OLIVEIRA, A. W. C. de.; Estudo para desenvolvimento de um novo conceito de extensômetros impresso. **Faculdade De Tecnologia - Programa De Pós-Graduação Em Engenharia De Produção**. Manaus – AM, Janeiro 2010.
- SOUZA, A. M. C.; RAFULL, L. Z. L.; VIEIRA, B. L. Determinação do limite de liquidez em dois tipos de solo, utilizando-se diferentes metodologias. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande – PB, v.4, n.3, p.460-464, 2000.
- STOLF, R. *et al.* Mensuring mechanical impedance in clayey gravelly soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas – SP, v.22, p.189-196, 1998.
- STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas - SP, v.15, p.229-235, 1991.
- TAVARES, R. P. **Automação de Penetrômetro de Impacto**. Universidade Federal do Amazonas, 2015.
- Universal electronics instruments**. The twists of *strain gauge* measurements. 2013. Disponível em: <<https://ueidaq.wordpress.com/2013/08/02/the-twists-of-strain-gauge-measurements-part-1/>>. Acesso em: 13, Dez de 2017.
- VAZ, C. M. P. *et al.* Influência da umidade na resistência do solo medida com penetrômetro de impacto. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**, São Carlos – SP, Outubro 2002. ISSN 1517-4786.