

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE CÉLULAS DE CARGA DE 100 KG E 500 KG

Gustavo Vieira Lopes ¹; Éd Claudio Bordinassi ²

1 Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

2 Professor da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

Resumo. *O objetivo deste trabalho foi desenvolver duas células de carga (tração e compressão), uma de 100 kg e outra de 500 kg. A geometria foi calculada para que as leituras apresentassem boa precisão, ou seja, na carga máxima de calibração (fundo de escala) a leitura fosse 2 mV/V. As tensões e deformações foram verificadas com o método dos elementos finitos e a instrumentação foi feita utilizando extensômetros. As células foram calibradas e os resultados práticos se aproximaram bastante dos valores teóricos.*

Introdução

Células de carga:

O uso de células de carga como transdutores de medição de força abrange hoje uma vasta gama de aplicações, desde balanças comerciais até automatização e controle de processos industriais.

A célula de carga é um dispositivo eletromecânico, que tem como propriedade a medição das deformações ou a flexão de um corpo transformando-a em tensão. Para a obtenção destes sinais é utilizado o strain gage, que converte a deformação em tensão, em conjunto com um circuito, a ponte de Wheatstone, que junto com o strain gage, proporciona um sinal em micro volts que é alterada proporcionalmente à medida que se aplica maior peso ou força na estrutura. (CARER; CARRARO, 2010)

Obviamente que a forma e as características do corpo da célula de carga devem ser objeto de um meticoloso estudo, tanto no seu projeto quanto na sua execução, visando assegurar que a sua relação de proporcionalidade entre a intensidade da força atuante e a consequente deformação dos extensômetro seja preservada tanto no ciclo inicial de pesagem quanto nos ciclos subseqüentes, independentemente das condições ambientais. A forma geométrica, portanto, deve conduzir a uma "linearidade" dos resultados.

Existem diversos tipos de aplicação em uma célula de carga, como por exemplo, compressão, tração ou torque e para cada tipo de célula existem diferentes tipos e quantidades de extensômetros e configurações de circuito.

Extensômetro elétrico de resistência (strain gage)

O strain gage (extensômetro de resistência elétrica), consiste de uma grade de fio metálico sensível, ligado a uma base que se cola a peça que se pretende ensaiar. Nos extensômetros menores, as dimensões do conjunto são inferiores a um selo postal, assim não necessitando mais do que uma boa cola para se montar (FIALHO, 1982).

O fio sensível, tem na maioria dos extensômetros um diâmetro aproximado de 0,001mm e é constituído por ligas metálicas especiais, tais como: Constantan, Nicrome, Nanganin. A grade fica entre duas folhas de papel ou dentro de uma fina película de plástico, havendo também alguns tipos de extensômetro em que de um lado fica uma folha de papel e do outro um retângulo de feltro protetor.

As dimensões da base e da grade devem ser tais que o fio sensível acompanhe sem rigidez as deformações do elemento a que está colado. Por esta razão, as dimensões da base e da grade estão ligadas proporcionalmente em cada tipo de extensômetro. Nas extremidades dos fios estão soldados dois outros de maior diâmetro para permitir a ligação deste ao resto do circuito. Pode-se ver um exemplo de extensômetro na Figura 1.

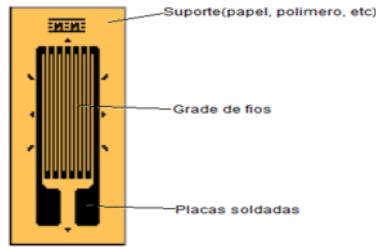


Figura 1-Strain gage (CARER; CARRARO, 2010)

Ponte de Wheatstone

A ponte de Wheatstone é um circuito elétrico utilizado como medidor de resistências elétricas, sendo ideal para medição de pequenas variações de uma resistência, como a de um extensômetro, que converte deformação em tensão.

Existem alguns tipos de ponte, a ponte $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ e ponte inteira, sendo que a inteira (Figura 2) possue maior sensibilidade a pequenas variações e sendo assim é o mais apropriado para a célula de carga.

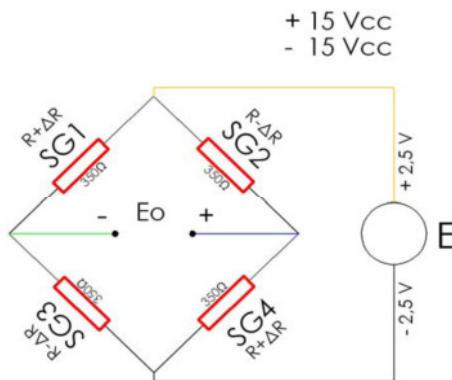


Figura 2 - Ponte completa de Wheatstone. (CARER; CARRARO, 2010)

No caso da ponte completa o circuito é formado por quatro resistores, uma fonte de tensão e um galvanômetro, sendo que destes quatro resistores, apenas três destes sejam conhecidos e para se conhecer a resistência do ultimo resistor, os outros três devem ser ajustados até que sua corrente no galvanômetro caia a zero.

Este tipo de circuito é o mais apropriado para ser utilizado para determinar a deformação de um corpo, tanto em compressão quanto em tração.

Para a obtenção da corrente da resistência desconhecida (E_o), pode se dizer que: (CARER; CARRARO, 2010)

$$— \quad (1)$$

$\varepsilon = \Delta l/l = \text{deformação relativa} = \mu\text{m/m} = \text{microstrain};$

$K = \text{fator do extensômetro};$

$R = X\Omega;$

Como o sinal de saída do extensômetro é muito pequeno, é necessário amplificá-lo para posteriormente efetuar sua medição.

Material e Métodos

A matéria prima utilizada na célula é o alumínio ABNT 7075-T6, já que possui grande resistência mecânica e um alto modulo de elasticidade se encaixando perfeitamente às necessidades para uma boa leitura. Foi comprada uma chapa de dimensões 70x120x35(mm), que foi cortada ao meio e usinada na geometria calculada respectivamente para cada célula.

Para se encontrar uma geometria ideal para a célula de carga de 100 kg, tendo uma alta sensibilidade, é necessário o cálculo interligando a parte mecânica (corpo da célula), e a parte elétrica (circuitos). Para a leitura da deformação foram utilizados quatro strain gages Excell sensor® PA-06-125BA-120L assim fechando uma ponte de wheatstone, conforme Equação 2:

$$— - \quad (2)$$

Onde K é o fator do Strain Gage e σ é a tensão. A célula de carga funciona com tração e compressão, conforme Figura 3, onde as marcações em vermelho são os locais de tração (+) e compressão (-) onde os gages foram colados.

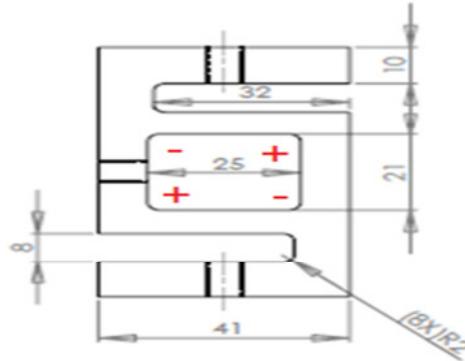


Figura 3- Tração e compressão célula de carga

Como foram utilizados strain gages com fator igual a 2,1 e sabendo que uma boa leitura de um strain gage, é quando sua tensão é de aproximadamente 2 mV/V (DALLY; RILEY, 1965), foram feitos os cálculos a seguir:

$$— \quad \rightarrow \quad (3)$$

Seguindo a lei de Hooke:

$$(4)$$

E sabendo que o módulo de elasticidade do alumínio é de 71.7 GPa.

$$\sigma = 68 \text{ MPa}$$

Como a tensão é igual a:

$$— \quad (5)$$

Para o cálculo do módulo de resistência deve-se achar o momento fletor, e considerar o local de colagem dos strain gages como uma viga bi engastada. As medidas de sua seção são encontradas, sabendo que $\underline{\underline{—}}$ e que o momento de inércia de uma barra é $\underline{\underline{—}}$ pode-se obter (HIBBEKER, 2008):

$$\underline{\underline{—}} \rightarrow \underline{\underline{—}} \rightarrow W = 89,4 \text{ mm} \quad (6)$$

Substituindo os resultados na Equação 5:

$$— \rightarrow M = 6079,2 \text{ N.mm} \quad (7)$$

Como o comportamento da célula assemelha-se a duas vigas bi engastadas, de acordo com a Figura 4.



Figura 4 - viga bi engastada (BORDINASSI, 2002)

Logo,

$$- \quad \quad \quad (8)$$

Para calcular o momento fletor não se usa mais a seção da barra, mais sim o comprimento real da barra da célula. Sabendo que o momento dessa barra é $M = 6079,2 \text{ N.mm}$ e que seu comprimento é de 25 mm:

$$- \rightarrow P = 971,5 \text{ N} \quad (9)$$

Para que o strain gage de uma leitura de 2 mV/V é necessário aplicar uma força de aproximadamente 971,5 N 99,06 kg, sendo que a célula em questão esta sendo projetada para uma carga de 100 kg, isto demonstra que a geometria esta próxima da ideal.

Levando em consideração a usinagem da célula de carga, não é possível deixar presente um canto vivo e serão feitos raios de 2 mm, conforme Figura 3assim é necessário o cálculo da nova deformação no local de colagem dos strain gages, conforme Figura 5.

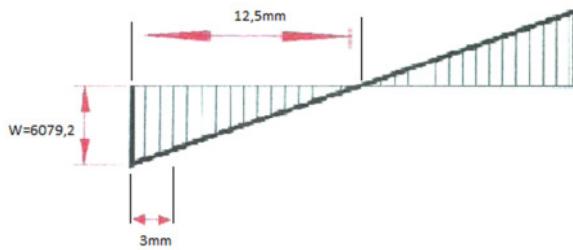


Figura 5 - Cálculo do novo momento

O novo momento na seção é:

$$M = 4921,25 \text{ N.mm}$$

Sabendo que o módulo de resistência não se modifica e substituindo os resultados na Equação 4:

Seguindo a lei de Hooke (equação 3), pode-se descobrir a deformação no novo ponto:

A deformação encontrada para o novo ponto é de :

Para a confirmação do resultado foi feito uma simulação de elementos finitos que será mostrado posteriormente.

Para a célula de 500 kg foi utilizado uma nova geometria o que favorece a leitura do gage que será colado a 45° na linha de deformação da célula, como pode ser visto na Figura 6.

Como esta nova geometria é totalmente diferente da de 100 kg é necessário um novo ϵ , sendo assim, pode-se igualar a formula de Hooke com $-$:

— (10)

Isolando o ε :

— (11)

Substituindo as Equações 6 e 7 em 11 e sabendo que a parede interna do círculo tem espessura "e" e diâmetro "d", conforme a Figura 6:

— (12)

Logo,

Assim sabe-se que para uma boa leitura dos strain gages é necessário uma deformação específica de ε . A Figura 6 mostra um esboço da nova geometria.

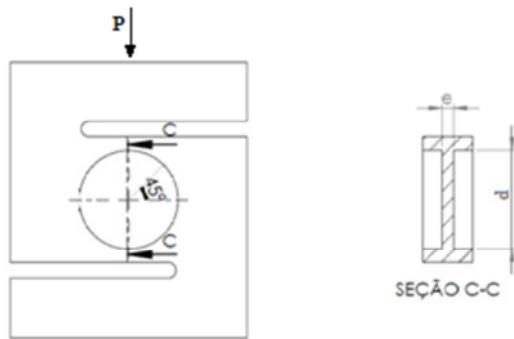


Figura 6 - Esboço célula de carga 500 kg

Por cisalhamento pode-se dizer que:

— (13)

Onde:

— (14)

Para se descobrir o α com a maior tensão de cisalhamento pode-se dizer que:

— (15)

Sabendo que $\alpha = 45^\circ$, pode-se dizer que:

— (16)

Sabendo o valor de G , (Equação 14), e do γ , pode-se substituí-los na Equação 9:

— (17)

Como o coeficiente de Poisson (v) do alumínio é 0,3:

— (18)

Também pode-se dizer que:

$$\tau = \frac{1,5P}{A} \quad (19)$$

Onde P é a carga aplicada e A a área da seção da parede interna ao círculo, conforme a Figura 4, pode-se dizer que A=ed, assim:

$$\tau = \frac{1,5P}{ed} \quad (20)$$

Com isso pode-se igualar as τ , das Equações 18 e 20, tendo assim:

$$\frac{1,5P}{ed} = \frac{E}{0,7} \varepsilon \quad (21)$$

Onde:

$$\varepsilon = 1000 \cdot 10^{-6}$$

$$E = 71,7 \text{ GPa}$$

$$P = 5000 \text{ N}$$

Substituindo os valores:

$$\frac{7500}{ed} = 102,42$$

Para a determinação da geometria perfeita para uma carga de 500 kg, foi achado e = 3 mm e d = 25 mm, sendo estes os valores que mais aproximaram da igualdade.

Resultados e Discussões

Para a validação dos cálculos teóricos a célula foi modelada em um software de CAD, no caso o SolidWorks® e foi feita uma simulação através do método dos elementos finitos (Cosmos Works®). A simulação foi feita utilizando-se um elemento tetraédrico parabólico de 2,2 mm de tamanho. Foi colocada uma restrição do tipo "fixa" na base da célula (região de diâmetro 12,7 ao redor do centro da base, e uma força de 1000 N na parte superior considerando a mesma região.

Na Figura 7 se tem uma ampliação da região onde será colado o strain gage. Foram feitas 2 medições, a primeira logo no final do raio e a segunda 1 mm distante deste, já que o extensômetro tem a distância de 1mm entre o final da base e a grade. Nota-se uma diferença entre a deformação calculada e a simulada, sendo que a calculada foi de 0,000767, e a encontrada na segunda medição foi de 0,00103. Percebe-se que ambos os valores (calculados e simulados) proverão uma deformação suficiente para uma boa leitura, sendo que a deformação necessária é de 0,001. Ocorrendo essa diferença de 26% devido à utilizar-se nos cálculos teóricos uma viga como a geometria da célula de carga, e na simulação de elementos finitos o modelo real é uma geometria mais complexa. Sendo assim, esta diferença já era esperada, como a célula não se comporta da mesma forma que uma viga bi engastada.

Na Figura 8 uma ampliação da região onde será colado o strain gage. Foram feitas 2 medições com as mesmas indicações da Figura 7. Na tensão nota-se uma diferença proporcional à deformação, sendo que a tensão encontrada teoricamente foi de 55 MPa e a encontrada pela simulação foi de aproximadamente 77 MPa. Esta diferença também está relacionada aos cálculos teóricos ter se utilizado uma viga como geometria e na simulação de elementos finitos ter-se utilizado a real geometria da célula de carga.

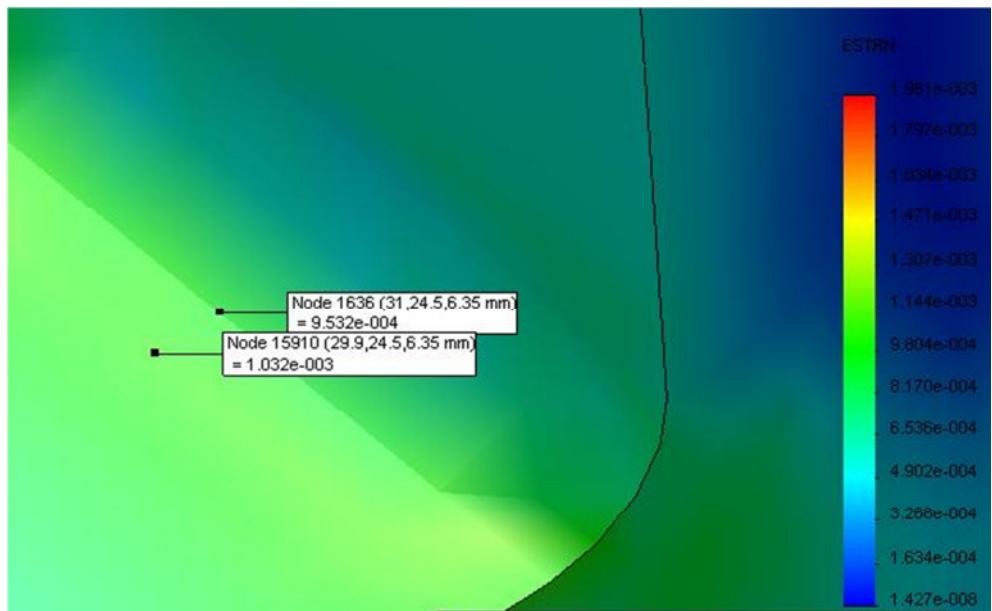


Figura 7 - Deformação específica do local de colagem strain gage.

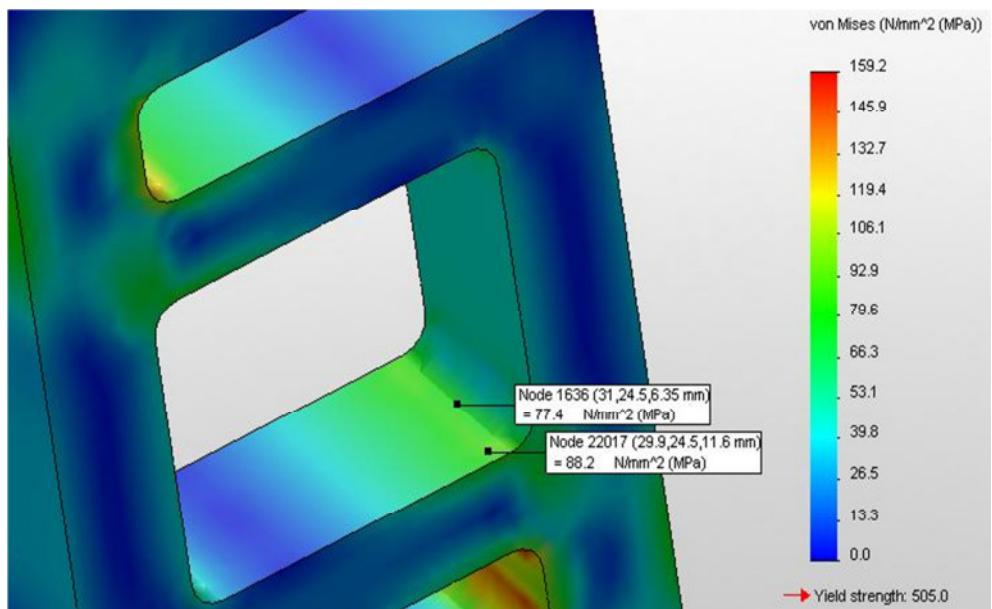


Figura 8 - Tensão no ponto de colagem do strain gage

Para a calibração desta célula de carga, apoiou-se esta em uma bancada, colocou-se uma porca simulando o pino que é fixado nas faces superior e inferior, e desta forma a calibração se aproxima o máximo possível do real funcionamento de uma célula de carga.

Foi se apoiando pesos de 5 em 5 kg e o sinais dos strain gages foram amplificados e lidos através indicador digital de deformações Kyowa modelo SMD-10A, fornecendo a Tabela 1.

Tabela1 - Calibração célula 100 kg

kg	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
μe	120	241	364	485	606	728	853	977	1096	1216	1334
kg	60	65	70	75	80	85	90	95	100		
μe	1463	1585	1706	1828	1950	2071	2194	2315	2437		

Com os dados foi possível fazer o gráfico mostrado na Figura 9.



Figura 9 - Calibração célula de 100 kg

Relacionando os resultados encontrados pelos cálculos teóricos, simulados por elementos finitos e os encontrados pela calibração, nota-se uma diferença dos resultados calculados e simulados dos valores encontrados através da calibração. Devido à posição de colagem dos strain gage, dos raios existentes na célula que não foram considerados nos cálculos teóricos e fenômenos como temperatura e aderência do adesivo, estas diferenças eram esperadas. As diferenças foram de 35% entre o calculado que era aproximadamente $4000\mu\epsilon$ e o que foi achado pela calibração que foi de $2606\mu\epsilon$. Nesta célula à medida que a geometria do vazio (espaço onde o gage foi colado) caminha em direção ao centro, as deformações diminuem conforme a variação do momento fletor mostrado na Figura 4. Acredita-se que esta diferença entre o valor teórico e medido também se deve a este fato, pois o gage está colado ao longo destas diferenças e mesmo considerando um valor médio das deformações, a leitura não foi exatamente esta.

Nota-se que mesmo com estas diferenças os resultados finais foram muito bons, sendo que a célula de carga possui um bom equilíbrio entre tamanho, capacidade e sensibilidade.

Para a célula de 500 kg a simulação foi feita utilizando-se um elemento tetraédrico parabólico de 2,2 mm de tamanho. Foi colocada uma restrição do tipo "fixa" na base da célula (região de diâmetro 12,7 ao redor do centro da base, e uma força de 5000 N na parte superior considerando a mesma região, pode-se ver na Figura 10 um "caminho" de deformação, ou seja, uma linha exatamente a 45° cortando o centro da célula, sendo assim o local perfeito para a colagem dos strain gages. Esta é a principal vantagem deste tipo de geometria, com relação à anterior, uma vez que não existem diferenças significativas nas regiões de colagem do gage, o que permite cálculos com maior precisão.

Foram feitas 5 medições, todas pegando diferentes pontos do caminho de deformação, área esverdeada na Figura 10. Nota-se uma diferença entre a deformação calculada e a simulada, sendo que a calculada foi de $1 \times 10^{-3}\mu\epsilon$ e a encontrada na primeira medição da esquerda feita por elementos finitos, mais aproximada do ponto de colagem dos strain gage, foi de $1,504 \times 10^{-3}$. Percebe-se que ambos os valores (calculados e simulados) proverão uma deformação suficiente para uma boa leitura, sendo que a deformação necessária para uma boa leitura é de 0,001, conforme calculado.

Na Figura 11 uma ampliação da região onde será colado o strain gage. Foram feitas 5 medições com as mesmas indicações da Figura 10. Na tensão nota-se uma diferença proporcional à deformação, sendo que a tensão encontrada teoricamente foi de 100 MPa e a encontrada pela simulação foi de aproximadamente 115 MPa, sendo que a simulação é mais próxima da realidade. Para se obter uma maior precisão de resultados é necessário a comparação com a calibração da célula.

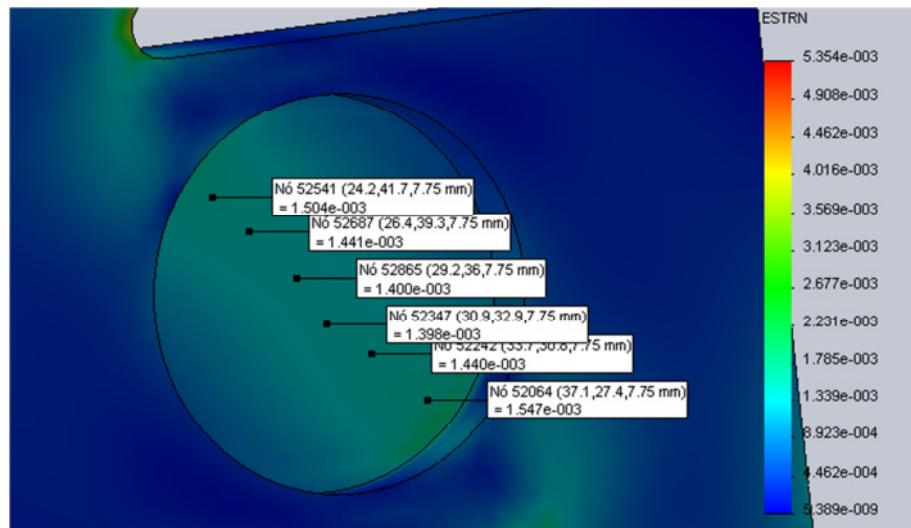


Figura 10- Deformação específica do local de colagem strain gage.

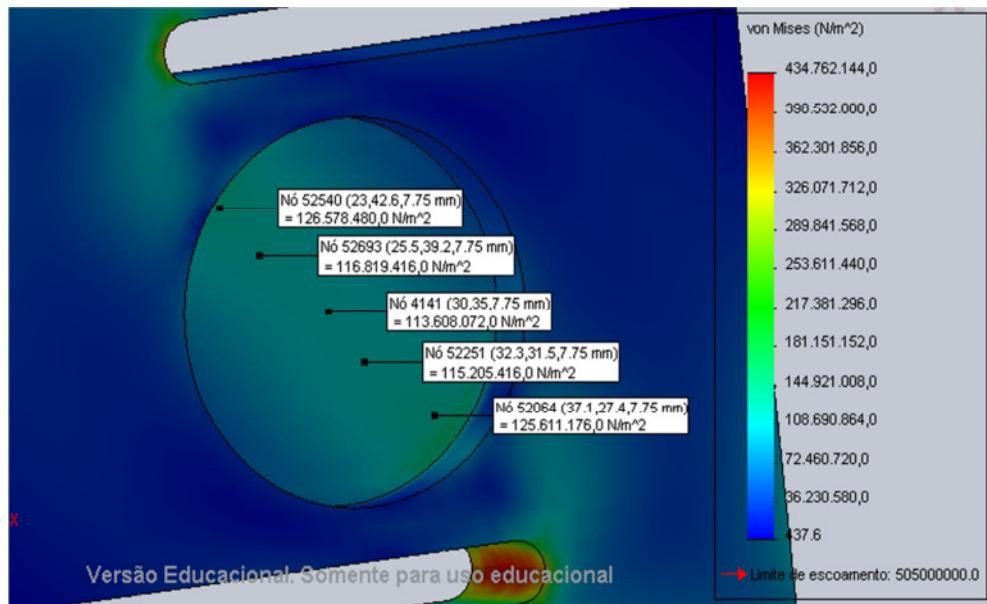


Figura 11 - Tensão no ponto de colagem do strain gage.

Para a calibração desta célula de carga foi necessário a utilização de um dinamômetro devido a carga aplicada, foi pego um suporte que foi apoiado no braço do dinamômetro e os pesos eram aplicados neste suporte de forma que era aplicada uma força de compressão na célula de carga. Os dados eram lidos pelo indicador digital de deformações Kyowa modelo SMD-10A, que formaram a Tabela 2.

Tabela 2 - Calibração célula 500 kg

kg	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260
μ e	168	339	504	677	846	1014	1184	1354	1523	1692	1862	2031	2200
kg	280	300	320	340	360	380	400	420	440	460	480	500	
μ e	2369	2539	2708	2887	3046	3216	3385	3554	3723	3893	4062	4231	

Relacionando os resultados encontrados pelos cálculos teóricos, simulados por elementos finitos e os encontrados pela calibração, nota-se uma diferença dos resultados calculados e simulados dos valores encontrados através da calibração.

Com os dados foi possível fazer o gráfico, ilustrado pela Figura 12:

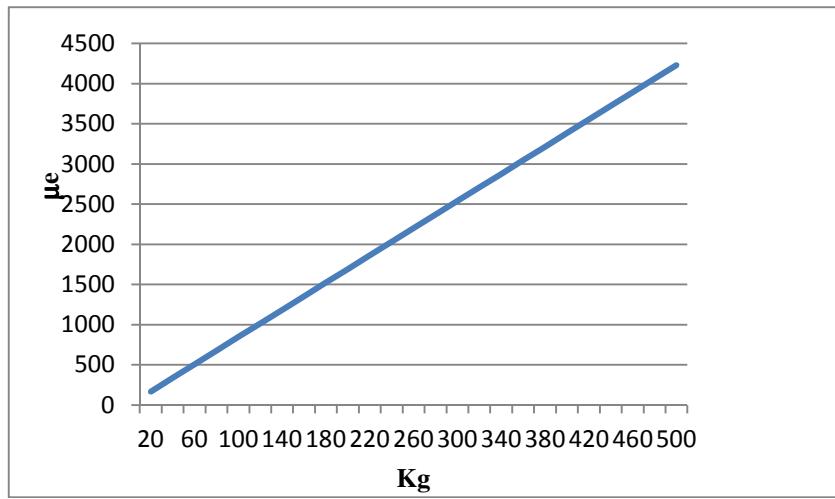


Figura 12 - Gráfico calibração célula de 500 Kg

Os resultados encontrados na calibração, possuem esta diferença de resultados devido a colagem dos gages, sendo que é muito difícil a colagem perfeita do gage, além de haver os fenômenos como temperatura, módulo de elasticidade, aderência do adesivo utilizado na colagem, que aumentam ainda mais a diferença dos resultados.

Nota-se que mesmo com estas diferenças os resultados finais foram muito bons, sendo que a célula de carga possui um bom equilíbrio entre tamanho, capacidade e sensibilidade, já que com uma carga de 500 kg era esperado 4000 $\mu\epsilon$ e se obteve 4231 $\mu\epsilon$, uma diferença de apenas 5%.

Conclusões

Os resultados encontrados apresentam uma diferença com relação ao cálculo teórico, devido ao posicionamento de colagem dos strain gages, incertezas dos equipamentos utilizados, além de haver diversos fatores como impurezas que podem ter ficado entre o gage e a superfície da célula, além de uma blindagem fraca do cabo AWG 26, dentre outros fatores que podem interferir no resultado final de leitura do sinal emitido pelos strain gages. O grande desafio deste trabalho foi achar um equilíbrio entre capacidade, tamanho e sensibilidade, que foram atingidos conforme os resultados encontrados, tanto na célula de carga de 100 kg quanto na de 500 kg, conforme pode ser visto na sensibilidade esperada e a encontrada com a calibração.

Referências Bibliográficas

- Bordinassi, É. C. (2002) *Estudo do processo de furação em aço com brocas helicoidais de aço rápido*, São Paulo.
- Carer, M.; Carraro, E. (2010) *Célula de carga*. Disponível em: <<http://hermes.ucs.br/ccet/demc/vjbrusam/inst/cel61.pdf>>
- Dally, J. W; Riley, W. F. (1965) *Experimental stress analysis*. New York: McGrawhill.
- Fialho, J. F. (1982) *Extensômetros elétricos de resistência: descrição e técnica de medida*. Lisboa.
- Hibbeler, R.C. (2008) *Resistência dos Materiais*. 5º ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall.