12ª Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos

COTEQ 2013 - 099
DESENVOLVIMENTO DE UMA CELULA DE CARGA E TORQUE PARA ENSAIOS DINAMICOS DE FADIGA MULTIAXIAL

Eleazar C. Mejía[1]; Juan C. Alva[2]; Marco A. Meggiolaro[3]; Jaime T. P. Castro [3].

SINOPSE

A avaliação de modelos de plasticidade incremental e a previsão da vida à fadiga multiaxial requerem o uso de transdutores de força e torque. Desenvolver um único transdutor que possa medir força e torque para ensaios dinâmicos de fadiga multiaxial é o objetivo deste trabalho. Para alcançar esse propósito, projetou-se a estrutura do transdutor para uma vida à fadiga de 200 milhões de ciclos, assim como estudou-se a configuração dos extensômetros da ponte *Wheatstone* visando eliminar o momento gerado por cargas excêntricas e pela influencia das forças nas medições de torque e vice-versa. A célula de torque e carga foi construída para ser aplicada em ensaios de fadiga multiaxial com capacidade máxima de 200 kN e 1000 Nm ou qualquer outra aplicação onde estejam presentes cargas e torques dinâmicos, com a vantagem de ter um baixo custo sem comprometer sua precisão.

[1] Mestre, Engenheiro Mecatrônico – PUC - Rio
[2] Mestre, Engenheiro Eletrônico – PUC - Rio
[3] PHD, Engenheiro Mecânico – PUC - Rio

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas os transdutores baseados em extensômetros têm crescido a um ritmo notável tanto em número e variedade. Além de sua ampla aplicação na indústria e engenharia, estes transdutores estão aparecendo com uma maior frequência em produtos para as empresas ou consumidores, e como resultado disso, atualmente não existe muito interesse em transdutores de tecnologia. Geralmente, a maioria destes transdutores são projetados para medir uma única grandeza já for força, pressão ou torque, encontrando-se no mercado a um baixo custo e com boa precisão. Por outro lado, algumas empresas dedicadas ao desenvolvimento de máquinas para ensaios mecânicos como a INSTRON ou MTS, têm já projetado transdutores especializados que medem mais de uma grandeza como as células de carga e torque. A necessidade de utilizar este tipo de transdutores para a avaliação experimental de modelos de fadiga multiaxial, frente a seu elevado custo e as limitações econômicas, motivou o desenvolvimento de uma célula de carga e torque com capacidade máxima de 200 kN e 1300 N.m. O projeto da célula de carga e torque esta dividido em duas seções, a primeira focada na análise estrutural do transdutor, seu dimensionamento para uma vida à fadiga maior a 100 milhões de ciclos e finalmente a segunda focada na configuração dos extensômetros das duas pontes de *Wheatstone* e na localização na estrutura da célula.

2. PROJETO ESTRUTURAL DA LTC

Em termos gerais a célula de carga e torque LTC "*Load Torque Cell*", é um transdutor medidor de força e torque. Assim, a LTC é projetada para trabalhar submetida à tração/compressão e torção ou uma combinação delas, como é apresentada na Figura 1.

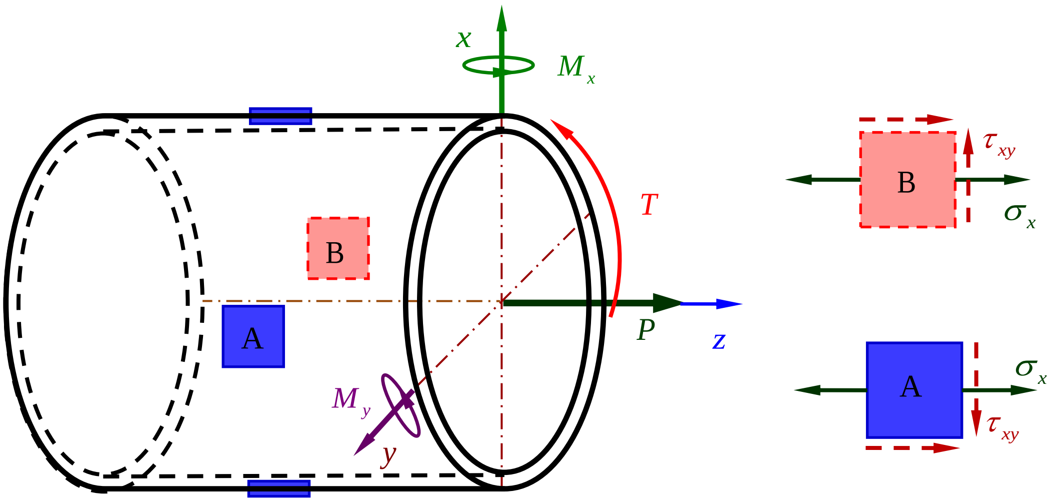


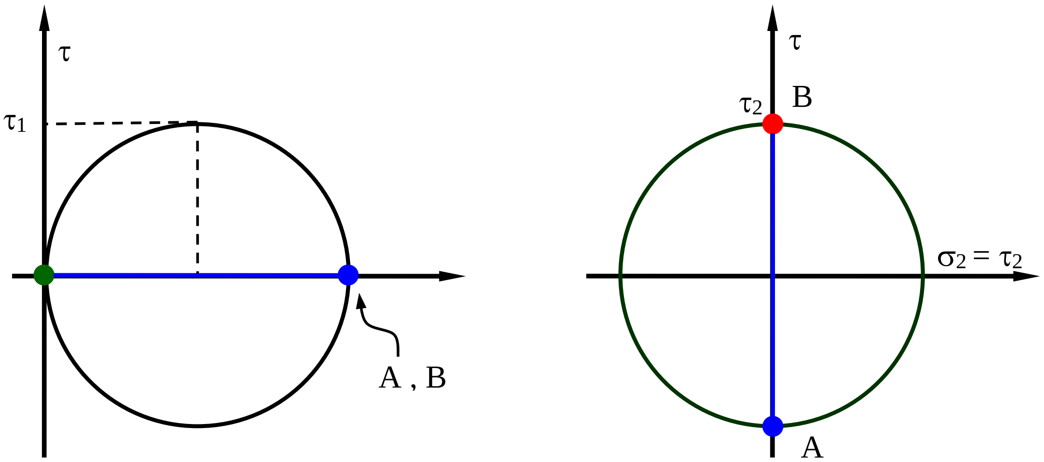
Figura 1: seção circular oco da estrutura da LTC.

Na Figura 1 apresenta-se o desenho da seção crítica da estrutura da LTC, a qual é uma seção circular oca localizada na parte central da estrutura do transdutor. Esta seção crítica é submetida a uma tensão normal σ_z e tensão cisalhante τ geradas pela carga P e o torque T, e são dadas pela seguinte equação.

$$\sigma_z = \frac{P}{A} \tag{1}$$

$$\tau = \frac{T}{J} \tag{2}$$

onde, A é a área da seção transversal e J é o momento polar de inércia. A representação do estado de tensões dos pontos A e B através do circulo de Mohr é apresentado na Figura 2.



a) Tração pura b) Torção pura

Figura 2: Estado Tensões típico através do Circulo de Mohr

Na Figura 2 (a) mostra-se o tensor de tensões devido à carga de tração P para os pontos A e B, que experimenta uma tensão axial σ_z na direção "z" e sua representação matricial.

$$\bar{\sigma}_A^P = \bar{\sigma}_B^P = \begin{pmatrix}\sigma_z & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\end{pmatrix}^T \tag{3}$$

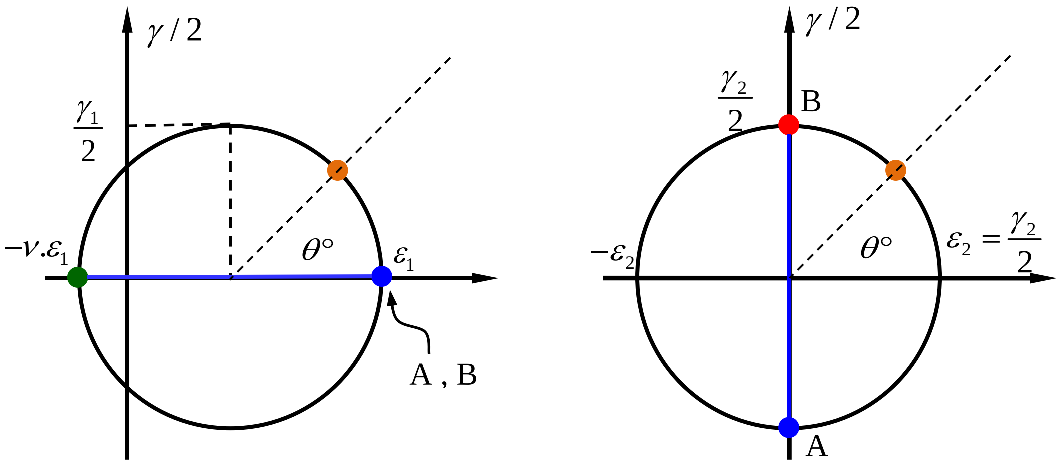
Entretanto, a Figura 2 (b) representa o estado de tensões gerado pelo torque T para os mesmos pontos A e B, os quais experimentam uma tensão cisalhante τ_{zx},

$$\bar{\sigma}_A^T = -\bar{\sigma}_B^T = \begin{pmatrix}0 & 0 & 0 & \tau_{zx} & 0 & 0\end{pmatrix}^T \tag{4}$$

A LTC foi projetada para trabalhar na zona elástica, por tanto, suas deformações são calculadas utilizando a lei de Hooke's dada pela seguinte equação.

$$\bar{\varepsilon} = \bar{E}^{-1}.\bar{\sigma} \tag{5}$$

onde, ε é o tensor de deformação, $\bar{E}^{-1}$ é a inversa da matriz de rigidez e $\bar{\sigma}$ é o tensor de tensão.



a) Tração pura b) Torção pura

Figura 3: Estado Deformações típico através do Circulo de Mohr

As deformações ε_1 e ε_2 da Figura 3 são dadas pelas seguintes equações.

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_x}{E} \tag{6}$$

$$\frac{\gamma_{zx}}{2} = \frac{\tau_{zx}}{2.G} \tag{7}$$

onde, E é o modulo de elasticidade e $G = E/[2.(1+\nu)]$ é o modulo de cisalhamento. As deformações nas direções principais e a 45° nos pontos A e B geradas pela carga axial e o momento torçor, estimam-se a partir do circulo de Mohr para deformações. Assim, para o caso de tração pura temos.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{0°}^{P} &= \varepsilon_1 \\ \varepsilon_{45°}^{P} &= \frac{\varepsilon_1.(1-\nu)}{2} \\ \varepsilon_{90°}^{P} &= -\nu.\varepsilon_1 \end{aligned} \tag{8}$$

Entretanto, para o caso de torção pura temos.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{0°}^{T} &= \varepsilon_2 \\ \varepsilon_{45°}^{T} &= 0 \\ \varepsilon_{90°}^{T} &= -\varepsilon_2 \end{aligned} \tag{9}$$

As deformações totais geradas pela combinação das cargas são estimadas utilizando o principio de superposição.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{0°}^{total} &= \varepsilon_{0°}^{P} + \varepsilon_{0°}^{T} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \\ \varepsilon_{45°}^{total} &= \varepsilon_{45°}^{P} + \varepsilon_{45°}^{T} = \frac{\varepsilon_1.(1-\nu)}{2} \\ \varepsilon_{90°}^{total} &= \varepsilon_{90°}^{P} + \varepsilon_{90°}^{T} = -(\nu.\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \end{aligned} \tag{10}$$

onde, $\varepsilon_{\theta°}^{P}\ \varepsilon_{\theta°}^{T}\ \varepsilon_{\theta°}^{total}$ são as deformações à $\theta°$ com relação ao eixo z devido à força P, ao torque T e à combinação de ambos carregamentos.

Tabela 1: Constantes do material utilizado para o projeto LTC

Modulo de Elasticidade, E	210	(GPa)
Modulo de cisalhamento, G	80,7	(GPa)
Constante de Poisson, ν	0,3	
Carga axial máxima, P	200	(kN)
Momento torçor máxima, T	1300	(N.m)

As tensões normais e cisalhantes máximas geradas pela carga axial e o momento torçor máximo sob a estrutura central da LTC, são $\sigma_z = 196$ Mpa e $\tau_{zx} = 42$ Mpa . Assim, as deformações principais geradas pela tração pura $\bar{\sigma}_P = \begin{pmatrix}196 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\end{pmatrix}^T$ MPa são obtidas utilizando a lei de Hooke's, $\varepsilon_1 = 933\ \mu\varepsilon$, $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -280\ \mu\varepsilon$ e $\gamma/2 = 606\ \mu\varepsilon$. Assim, as deformações nas direções dos extensômetros à 0°, 45° e 90° são $\varepsilon_{0°}^{P} = 933\ \mu\varepsilon$, $\varepsilon_{45°}^{P} = 326\ \mu\varepsilon$, $\varepsilon_{90°}^{P} = -280\ \mu\varepsilon$. Entretanto para o caso de torção pura $\bar{\sigma}_T = \begin{pmatrix}0 & 0 & 0 & 42 & 0 & 0\end{pmatrix}^T$ MPa as deformações nas direções dos extensômetros são, $\varepsilon_{0°}^{P} = 260\ \mu\varepsilon$, $\varepsilon_{45°}^{P} = 0\ \mu\varepsilon$, $\varepsilon_{90°}^{P} = -260\ \mu\varepsilon$.

As deformações totais experimentada pelos extensômetros devido à combinação das cargas de tração e torção são $\varepsilon_{0°}^{total} = 1192\ \mu\varepsilon$, $\varepsilon_{45°}^{P} = 326\ \mu\varepsilon$, $\varepsilon_{90°}^{P} = -540\ \mu\varepsilon$.

Do análise das deformações nos extensômetros gerada pela carga combinada $\sigma = \begin{pmatrix}196 & 0 & 0 & 42 & 0 & 0\end{pmatrix}^T$ MPa e utilizando a lei de Hooke's da equação 7 obtemos as deformações, $\varepsilon_x = 933\ \mu\varepsilon$, $\varepsilon_y = \varepsilon_z = -280\ \mu\varepsilon$ e $\gamma/2 = 519\ \mu\varepsilon$, aplicando o critério de Von Mises, obtêm-se as deformações principais, $\varepsilon_1 = 986\ \mu\varepsilon$, $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -333\ \mu\varepsilon$ e $\gamma_{\max}/2 = 670\ \mu\varepsilon$, e as deformações totais experimentada pelos extensômetros $\varepsilon_{0°}^{total} = 986\ \mu\varepsilon$, $\varepsilon_{45°}^{P} = 326\ \mu\varepsilon$, $\varepsilon_{90°}^{P} = -333\ \mu\varepsilon$.

Os cálculos das deformações na estrutura da LTC, também forem avaliados utilizando o software Ansys, com o propósito de verificar os cálculos analíticos. A analise foi feita para uma carga $P = 200$ kN e $T = 1300$ N.m.

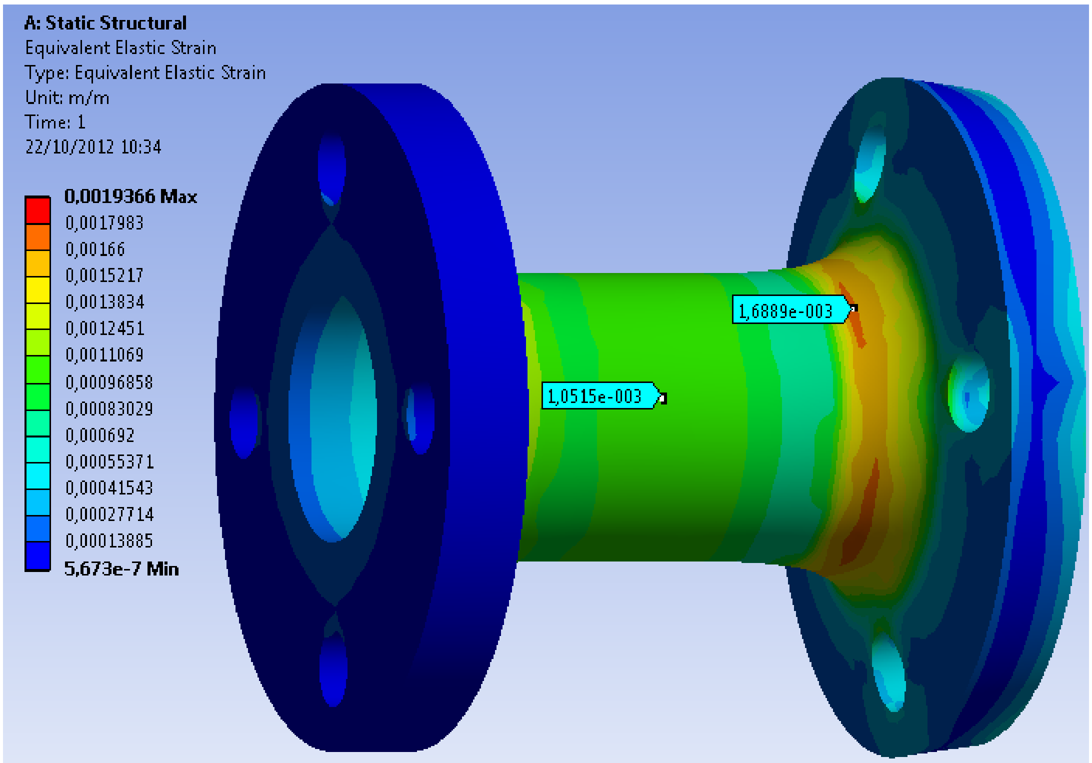


Figura 4: Deformação da LTC no Ansys

A deformação total na seção central da estrutura da LTC, devido à combinação de carga de tração e o momento torçor foi de $\varepsilon_{0°}^{total} = 1051\ \mu\varepsilon$. De acordo com as especificações técnicas da *Micro-Measurement Vishay*, para todos os tipos de extensômetros com uma deformação total $\varepsilon < 1500\ \mu\varepsilon$ têm uma vida à fadiga de 100 milhões de ciclos [1][2]. A Figura 5 apresenta o desenho geral da LTC projetada para a carga e o torque máximo especificadas.

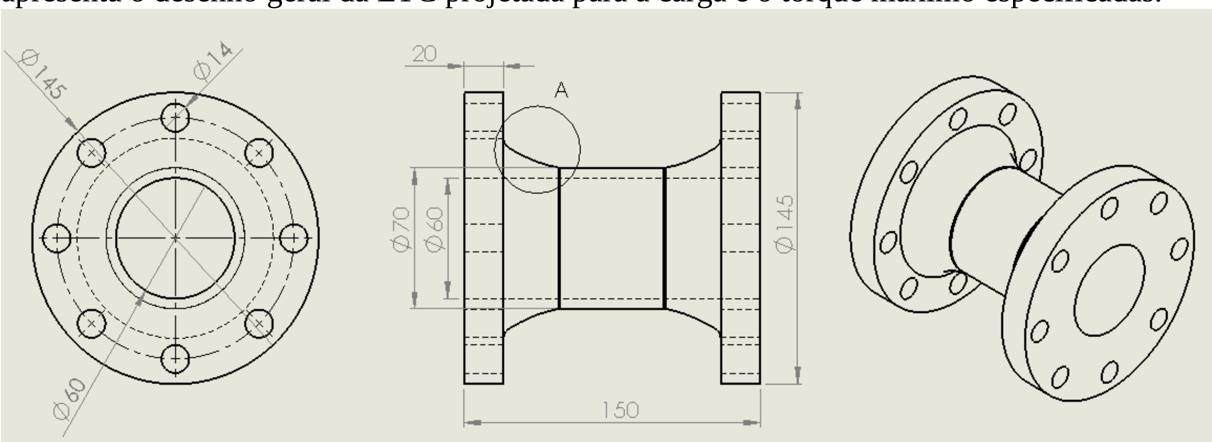
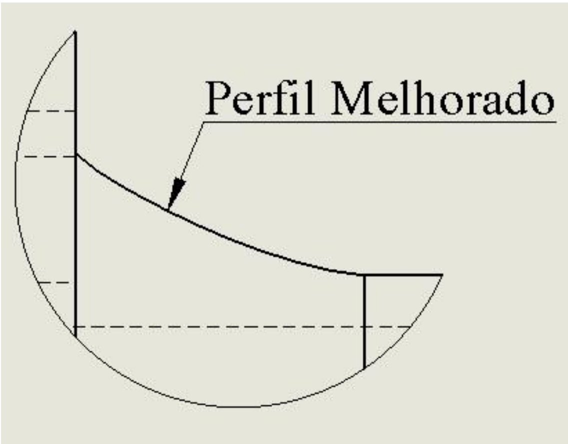
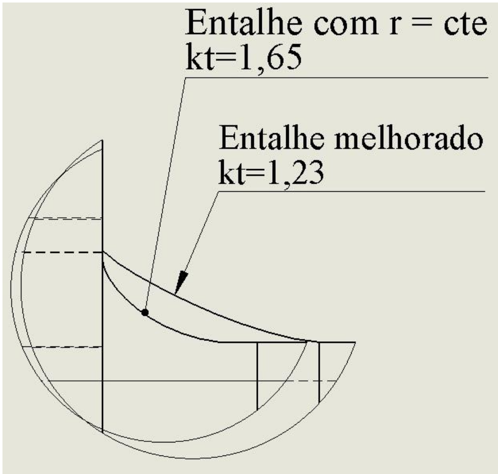


Figura 5: Esquema Geral da LTC.

Com a finalidade de minimizar o fator de concentração de tensões e aumentar a vida à fadiga do transdutor, otimizou-se o perfil da LTC utilizando o método de "Otimização de Contorno", o qual consiste em adicionar ou retirar material mudando o perfil da peça de acordo com o valor do fator de concentração [3]. Apos a otimização do perfil minimizou-se o fator de concentração de tensões de um valor de $K_{t_P} = 1,65$ para um valor de $K_{t_P} = 1,23$ em tração, e de um valor de $K_{t_T} = 1,15$ para um valor de $K_{t_T} = 1,04$ em torção. Na Figura 6 apresenta-se o perfil melhorado e uma comparação entre os entalhes.



(a) Detalhe "A"



(b) Comparação Entalhes

Figura 6: (a) perfil do entalhe melhorado (b) comparação Kt perfil r = cte, e melhorado

O calculo do fator de tensões no entalhe melhorado na LTC foi determinado utilizando o software Ansys, e os resultados da simulação são apresentados na Figura 7.

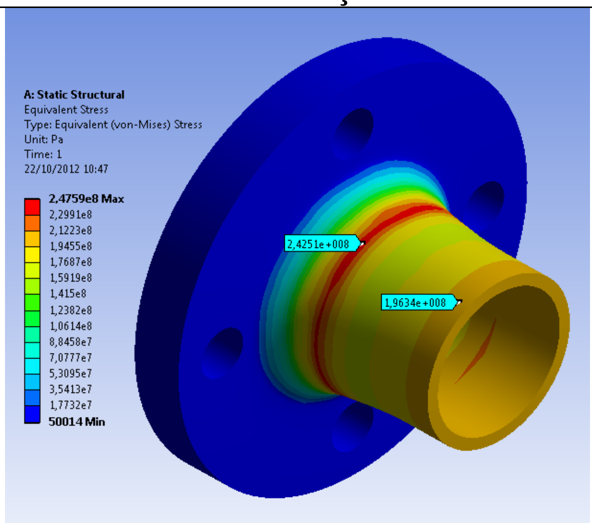
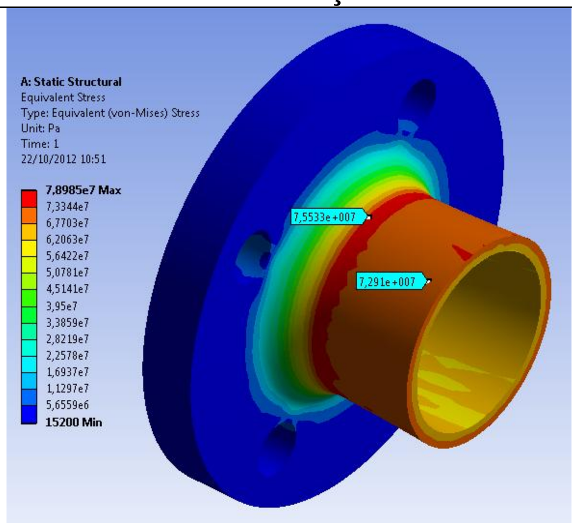
Fator de Concentração de Tensões	
Tração	**Torção**
	
$K_{t_P} = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n} = \frac{242,5}{196} = 1,23$	$K_{t_T} = \frac{\tau_{\max}}{\tau_n} = \frac{7,5533}{7,291} = 1,04$

Figura 7: Calculo do fator de concentração de tensões no Ansys

A otimização do fator de concentração de tensões para tração K_{tP} e torção K_{tT} é fundamental para o calculo da vida à fadiga da LTC, a qual é projetada para uma vida à fadiga longa teoricamente infinita. O material escolhido para a estrutura do transdutor foi uma liga de aço 4340, que tem sido muito utilizada em células de carga de alta capacidade. Este material é adequado quando a peça é grande, é facilmente usinado e não gera serias distorções durante seu tratamento térmico [4]. Após ser usinado em um torno CNC, a LTC foi submetida a tratamento térmico, levando a peça para uma temperatura de 850 °C durante 1 hora para estabilizar a temperatura ao longo de sua espessura meia, e logo resfriada em óleo a temperatura ambiente. Finalmente, para aumentar sua tenacidade e ductilidade foi submetida a um processo de revenido, reduzindo sua dureza e resistência à ruptura a 48RHC e $S_R = 1500$ MPa respectivamente.

Para prever a vida à fadiga de forma confiável foi utilizado o método SN, devido a que a célula estará submetida a uma historia de tensões macroscopicamente elásticas. Considerando o caso mais crítico quando a LTC é submetida a um torçor totalmente alternado que varia de $T_{\min} = -1300$ N.m a $T_{\max} = 1300$ N.m e uma carga axial que varia de $P_{\min} = -200$ kN a $P_{\max} = 200$ kN, quando estão em fase. Uma estimativa confiável do limite de fadiga S_L para peças de aço é dada por [5].

$$S_L(10^6) = k_a.k_b.k_c.0,5.S_R \;; \qquad \mathrm{S}_R \leq 1400 \text{ MPa} \tag{11}$$

O fator de acabamento $k_a = 0,842$, calculada segundo Mischke [6] pela seguinte equação.

$$k_a = 1,58.(S_R)^{-0,086} \tag{12}$$

O fator de acabamento k_b, segundo Juvinall [7] para espessura < 8 mm considera-se $k_b = 1$. E o fator de tipo de carregamento para cargas axiais, segundo Juvinall recomenda $k_c = 0,9$.

Entretanto, as estimativas da resistência à fadiga em vidas curtas para peças e estruturas de aço é dada pela seguinte equação,

$$S_F(10^3) = k_\theta.k_e.0,76.S_R \;; \qquad \mathrm{S}_R \leq 1400 \text{ MPa} \tag{13}$$

Onde, o fator de temperatura $k_\theta = 1$, devido que a LTC é projetada para trabalhar a $\Theta_t \leq 300$ °C, e o fator de confiabilidade $k_e = 1$ para trabalhar com uma confiabilidade de 50 %.

A combinação mais crítica das cargas em fase geram uma tensão normal $\sigma_z = 196$ MPa e tensão cisalhante $\tau_{zx} = 42$ N.m, as tensões aparentes de fadiga são obtidas multiplicando o fator de concentração de tensões pelas componentes nominais induzidas σ_z e τ_{zx}, e logo combinadas pelo critério de Tresca.

$$\sigma_{Tresca} = \sqrt{\left(K_{fP}.\sigma_z\right)^2 + 4.\left(K_{fT}.\tau_{zx}\right)^2} \tag{14}$$

$$\sigma_{Tresca} = 256 \text{ MPa}$$

A vida em 10^3 e 10^6 ciclos para o aço 4340 dado pelas equações 11 e 13 é $S_F(10^3) = 1140$ MPa e $S_L(10^6) = 568$ MPa, respectivamente. A vida à fadiga é calculado utilizando a equação de Wöhler, dado por

$$NS_F^B = C \tag{15}$$

onde, os coeficiente de Wöhler B e C, para as condições anteriores são $B = 9,931$ e $C = 2,279.10^{33}$. Assim, a vida à fadiga para $S = \sigma_{Tresca} = 256$ MPa substituindo na equação 15 é de $S(256) = 240$ milhões, a qual é maior à recomendada pela literatura (100 milhões).

3. CIRCUITO DE CONEXÃO DOS EXTENSÔMETROS

O circuito de conexão mais comumente utilizado para medir a saída dos extensômetros é a ponte de *Wheatstone*, constituída por quatro resistências R_1, R_2, R_3, R_4, uma em cada braço da ponte *Wheatstone* como é apresentado na Figura 8.

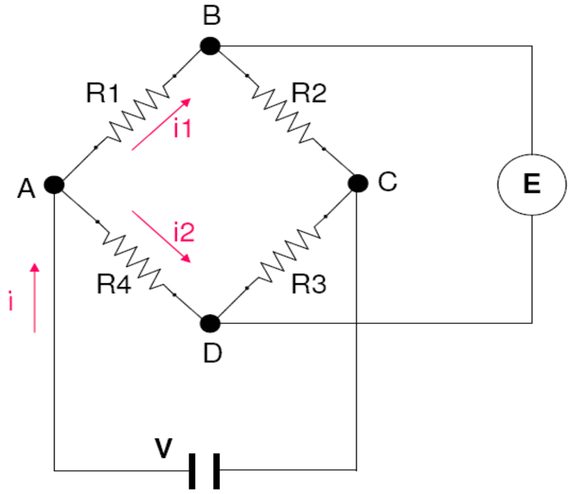


Figura 8: Ponte *Wheatstone*

A equação que relaciona a tensão de saída E com a tensão de alimentação V e suas resistências é dada pela equação 16.

$$E = V.\frac{R_1.R_3 - R_2.R_4}{(R_1 + R_2).(R_3 + R_4)} \qquad (16)$$

A ponte é balanceada (tensão de saída zero) quando sua saída E é igual a zero, a qual ocorre quando satisfaz a seguinte relação:

$$R_1 / R_4 = R_2 / R_3 \qquad (17)$$

A partir desta relação pode-se dizer que um incremento nas resistências R_1 ou R_3 fornecerá uma saída positiva para a ponte, enquanto, um incremento nas resistências R_2 ou R_4 diminuirá a saída da Ponte. A variação da tensão de saída é proporcional à variação da resistência dos extensômetros como é apresentada pela equação 18.

$$\Delta E = \frac{V}{4}.\left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad \text{se} \quad r = \frac{R_2}{R_1} = 1 \qquad (18)$$

A variação de resistência é gerada pela deformação da superfície sob o qual é colado o extensômetro e é dada pela equação 19.

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = K.\varepsilon \qquad (19)$$

onde, K é o fator de calibração do extensômetro, ε a deformação da estrutura do transdutor.

A localização adequada dos extensômetros na estrutura do LTC e a correta configuração dos extensômetros no circuito da ponte *Wheatstone*, permitem-lhe fazer medições de forças axiais, cisalhante, flexão e torção com uma precisão aceitável.

A LTC foi projetada para medir as deformações geradas pelas forças axiais e o momento torçor alinhado com o eixo "z"da célula, por tanto, sob a estrutura central da LTC são coladas duas pontes completas de *Wheatstone*; a primeira para medir a carga axial (tração e compressão) e a segunda para mensurar o momento torçor. A continuação apresenta-se a configuração da localização dos extensômetros e as conexões da ponte *Wheatstone* para os casos de tração/compressão e torção.

Configuração da célula de carga.

A célula de carga é um instrumento de medição baseado em extensômetros, cuja tensão de saída é proporcional à deformação da estrutura da LTC e consequentemente à carga aplicada. Na superfície exterior da seção central da LTC que tem um perfil circular oco, sob a qual são colados os extensômetros formando assim uma ponte completa. Na Figura 9 apresenta-se a estrutura central da LTC.

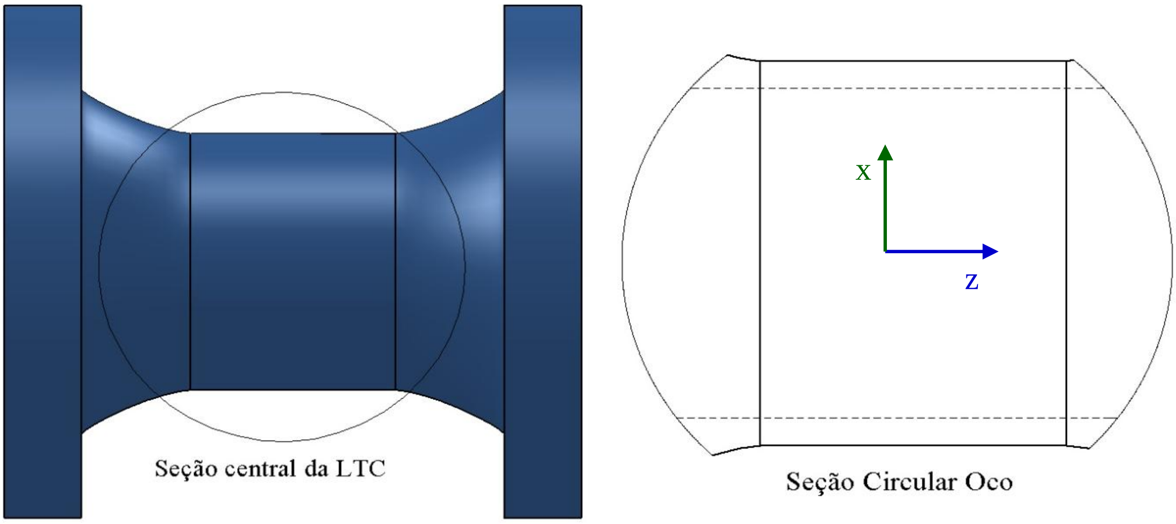


Figura 9: Seção central da LTC

Na superfície exterior da seção circular oca da LTC são colados 4 extensômetros, 2 na direção longitudinal e 2 na direção transversal os quais medem a deformação na direção "z"e "x" respectivamente. Cada par de extensômetros são localizados com uma defasagem de 180° e seguem a configuração apresentada na Figura 10, a qual permite compensar os efeitos de desalinhamento entre a LTC e a carga, temperatura e momento torçor na direção "z".

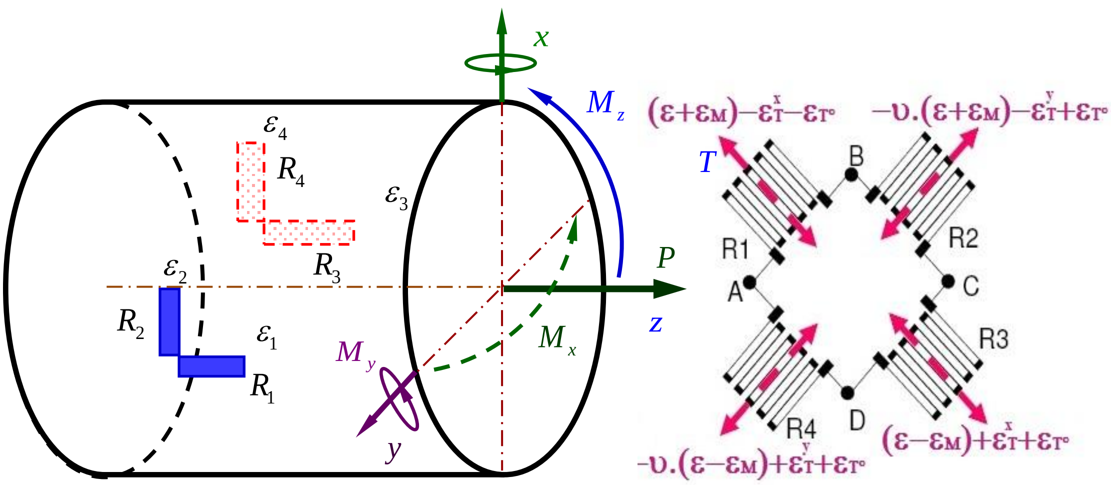


Figura 10: Conexão dos extensômetros na LTC como célula de Carga.

Na Figura 10, o desalinhamento da carga P com o eixo "z" da LTC gera os momentos M_x e M_y. A combinação destes momentos e de acordo com a localização dos extensômetros gera uma deformação positiva ε_M na resistência R_1, deformação negativa $-\varepsilon_M$ na resistência R_3, enquanto as resistências R_2 e R_4 são insensíveis ao momento M_y por estarem localizadas sob o eixo "y". O momento torçor M_z gera deformação positiva ε_T nas resistências R_3 e R_4, e gera deformação negativa $-\varepsilon_T$ nas resistências R_1 e R_2. E finalmente o efeito da temperatura foi eliminado pela conexão adequada das resistências na ponte *Wheatstone*. A equação 20 permite relacionar as deformações dos extensômetros e as tensão de saída na ponte *Wheatstone*.

$$\Delta E = \frac{K.V}{4}.\left(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4\right) \tag{20}$$

onde, $\varepsilon_1 = \varepsilon + \varepsilon_M - \varepsilon_T^x$, $\varepsilon_2 = -\nu.(\varepsilon + \varepsilon_M) - \varepsilon_T^y$, $\varepsilon_3 = \varepsilon - \varepsilon_M + \varepsilon_T^x + \varepsilon_{T^\circ}$ e $\varepsilon_4 = -\nu.(\varepsilon - \varepsilon_M) + \varepsilon_T^y + \varepsilon_{T^\circ}$, substituindo na equação 20 obtemos a saída ΔE proporcional à deformação uniaxial.

$$\Delta E = \frac{K.\varepsilon.(1+\nu).V}{2} \tag{21}$$

onde, K é o fator de calibração dos extensômetros, ν é o modulo de Poisson, ε, ε_M, ε_T, ε_{T° são as deformações geradas pelas cargas axiais, momento de flexão, momento torçor, e pela temperatura, respectivamente.

Configuração da célula de Torque

A adequada configuração dos extensômetros sob a superfície central da LTC permite utilizá-la como célula de torque e medir o torque aplicado sob a estrutura da LTC na direção "z". A tensão de saída depende da variação da resistência dos extensômetros, a qual é proporcional à deformação da estrutura da LTC e consequentemente ao torque aplicado. Os 4 extensômetros que constituem a ponte *Wheatstone* são colados em pares sob à superfície exterior da seção circular oca da LTC e defasados 180°. Os extensômetros para medição de torque com compensação dos momentos flexores, forças axiais e efeitos de temperatura, são colados a 45° e 135° com relação ao eixo de simetria "z" como é apresentado na Figura 11.

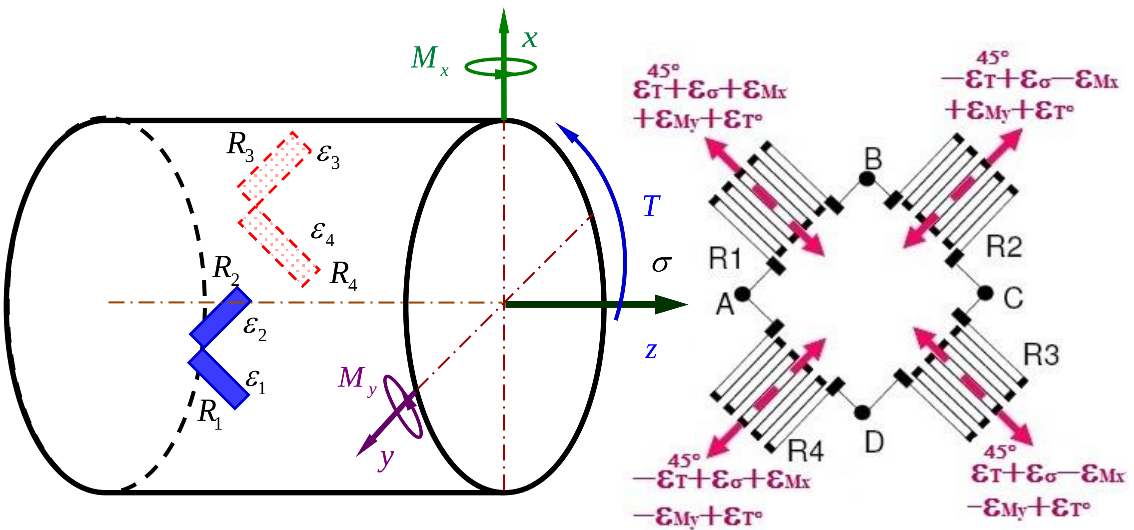


Figura 11: Conexão dos extensômetros na LTC como célula de torque

Na Figura 11, $\varepsilon_T^{45}, \varepsilon_\sigma, \varepsilon_{Mx}, \varepsilon_{My}, \varepsilon_{T^\circ}$ são as deformações geradas pelo Torçor T, a força axial P, os momentos flexores M_x, M_y e o efeito da temperatura respectivamente. Os extensômetros da ponte *Wheatstone* experimentam uma combinação destas deformações que são dadas por, $\varepsilon_1 = \varepsilon_T^{45^\circ} + \varepsilon_\sigma + \varepsilon_{My} + \varepsilon_{Mx} + \varepsilon_{T^\circ}$, $\varepsilon_2 = -\varepsilon_T^{45^\circ} + \varepsilon_\sigma + \varepsilon_{My} - \varepsilon_{Mx} + \varepsilon_{T^\circ}$, $\varepsilon_3 = \varepsilon_T^{45^\circ} + \varepsilon_\sigma - \varepsilon_{My} - \varepsilon_{Mx} + \varepsilon_{T^\circ}$ e $\varepsilon_4 = -\varepsilon_T^{45^\circ} + \varepsilon_\sigma - \varepsilon_{My} + \varepsilon_{Mx} + \varepsilon_{T^\circ}$, substituindo na equação 20 obtemos:

$$\Delta E = K.\varepsilon_T^{45}.V \tag{22}$$

A configuração dos quatro braços da ponte *Wheatstone* mostrada na Figura 8, permite a compensação da deformação causada pelas cargas excêntricas, pelo efeito de temperatura e a deformação causada pela torção nas medições de tração e vice-versa.

4. FABRICAÇÃO DA LTC

A célula de carga e torque foi feita numa liga de aço 4340, usinada num torno CNC universal ROMI - Centur 30D e posteriormente levada a tratamento térmico. Após a fabricação, foram colados os extensômetros segundo as configurações apresentadas no item 3. Duas rosetas à 90° foram utilizadas para mensurar a força axial coladas com uma defasagem de 180°, similarmente duas rosetas espinha de peixe foram utilizadas para medir o torque, como apresentada na Figura 12.

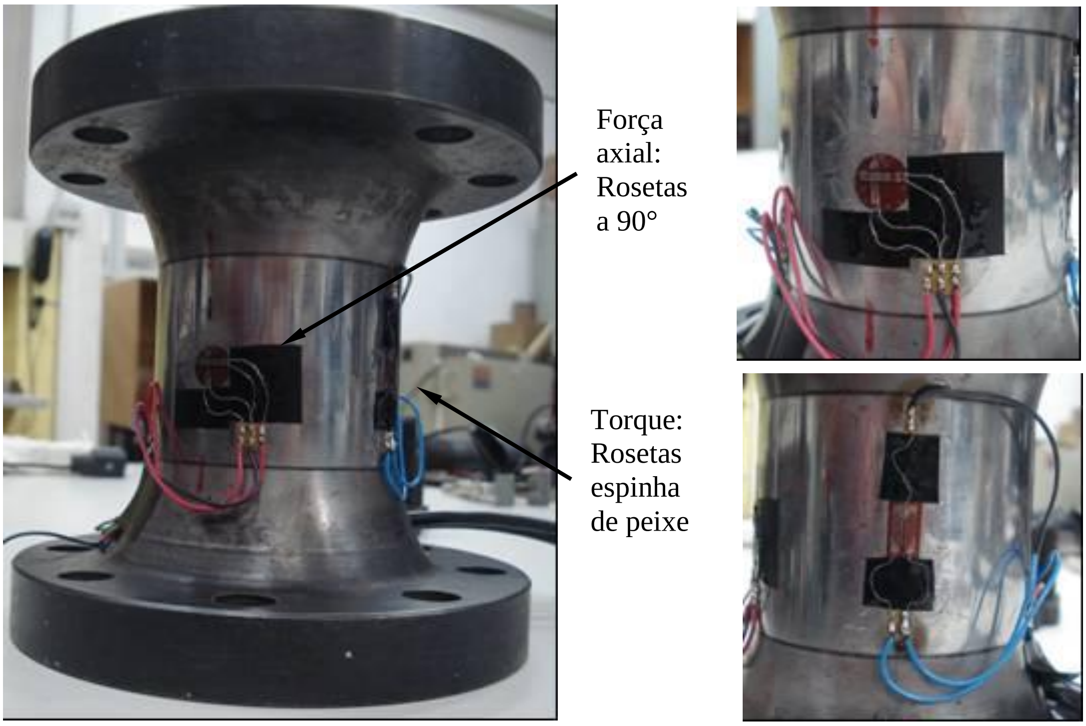


Figura 12: Conexão dos extensômetros na LTC

Uma máquina *Instron* modelo 8501 com uma capacidade máxima de 100 kN, junto a um sistema integrado *CompactRio* da *National Instrument* e um modulo excitador de extensômetros (*NI - 9237*) são utilizados para calibrar a LTC tal como é apresentado na Figura 13.

Figura 13: Calibração da LTC

A tensão de saída da ponte de *Wheatstone* é medida para diferentes valores de carregamento aplicados pela máquina Instron, obtêm-se assim uma curva de calibração que nos permite relacionar a tensão de saída e a força axial aplicada conforme a Figura 14. Nesta figura mostra-se que a LTC tem um comportamento linear, a tensão de saída da ponte Wheatstone da LTC é proporcional à força axial aplicada.

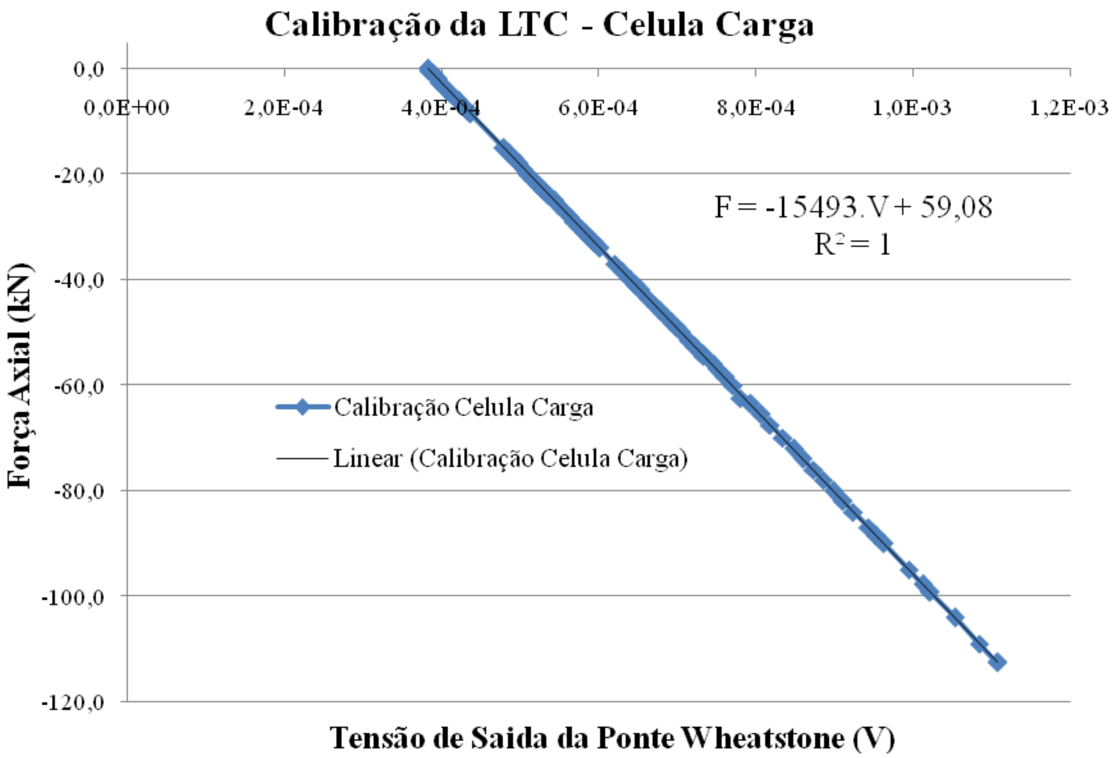


Figura 14: Curva de calibração da LTC

5. CONCLUSÕES

Através deste trabalho foi desenvolvida uma célula de carga e torque de baixo custo para ensaios de fadiga multiaxial tração/torção com carregamentos na faixa de -200 até 200 kN e torque na faixa de -1300 até 1300 N.m. A LTC foi usinada em torno CNC pela complexidade do perfil do entalhe melhorado que minimiza o fator de concentração de tensões, o qual permitiu obter uma vida à fadiga de 240 milhões de ciclos. O material escolhido para a estrutura do transdutor foi uma liga de aço 4340 de fácil usinagem, boa resposta ao tratamento térmico e pouca distorção. As configurações dos extensômetros na ponte *Wheatstone* de tração, quanto de torção levaram em conta a compensação das cargas excêntricas, efeitos de temperatura, e a influencia da torção nas medições de tração e vice-versa.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Hannah. R. L, Reed. S. E. "Straing Gage User's Handbook", London, Elseiver 1992, 294 pp.

[2] Micro-Measurements. "Transducer Class Strain Gage" Vishay Precision Group, USA 2011.

[3] Albuquerque, D. "On the Improved and the Optimum Notch Shape", Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. 56 pp.

[4] Hannah. R. L, Reed. S. E. "Straing Gage User's Handbook", London, Elseiver 1992, 327 pp.

[5] Meggiolaro. M. A, Castro. J. T. P. "Técnicas e Práticas de Dimensionamento Estrutural Sob Cargas reais de Serviço - Volume I", Rio de Janeiro, CreateSpace, 2009, 156 pp.

[6] Shigley, JE; Mischke, CR; Budynas,RG. Mechanical Engeneering design, 7^{th} ed., McGraw-Hill 2004.

[7] Juvinall. R. C. "Stress, Strain & Strengh", McGraw-Hill 1967.