5. Projeto e Integração dos Atuadores e Transdutores da MTT

5.1. Introdução

Neste capítulo, apresenta-se o desenvolvimento do sistema experimental da máquina MTT, organizado em três seções: o desenvolvimento de uma célula de carga e torque, a calibração dos transdutores e, finalmente, a integração dos componentes da MTT. O desenvolvimento da célula de carga e torque é subdividida em duas seções, a primeira focada na análise da integridade estrutural e a segunda na configuração dos extensômetros sobre a estrutura do transdutor. A calibração dos transdutores inclui o procedimento de calibração da célula de carga e torque e dos transdutores LVDT's, usados para medir o deslocamento linear e rotacional da garra. A integração da MTT inclui as conexões dos transdutores, motores e sistema de controle e a montagem dos componentes do sistema experimental desenvolvido no Laboratório de Fadiga da PUC – Rio.

5.2. Desenvolvimento da célula de carga e torque

Para o desenvolvimento da MTT são necessários transdutores de força e torque. Frente a seu elevado custo e às limitações econômicas, motivou-se o desenvolvimento de uma célula de carga e torque (LTC - *Load Torque Cell*), com capacidade máxima de 200 kN e 1300 N.m. O projeto da célula de carga e torque divide-se em duas seções, a primeira está focada na análise estrutural do transdutor, em seu dimensionamento para uma vida à fadiga maior que 100 milhões de ciclos e a segunda focada na configuração dos extensômetros nas pontes de *Wheatstone* e sua localização sobre a estrutura da célula.

5.2.1. Projeto estrutural da LTC

De modo geral, a célula de carga e torque é um transdutor utilizado para se

medir a força e torque aplicados sobre o corpo de prova. Portanto, a LTC é projetada para trabalhar submetida a tração/compressão, torção ou uma combinação de ambas, como é apresentado na Figura 5.1.



Figura 5.1. Seção circular oca da estrutura da LTC

Na Figura 5.1, apresenta-se o desenho da seção crítica da estrutura da LTC, que é a 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 torque *T*.

$$\sigma_z = \frac{P}{A} \tag{5.1}$$

$$\tau = \frac{T}{J} \tag{5.2}$$

onde A e J são a área da seção transversal e o momento polar de inércia da LTC, respectivamente. Na Figura 5.2 mostra-se o estado de tensões dos pontos A e B através do círculo de Mohr.



Figura 5.2. Estado de tensões típico através do Círculo de Mohr

A deformação total gerada pela combinação da carga axial *P* e do momento torçor *T* sobre a célula de torque e carga é feita utilizando-se o princípio da superposição. Na Figura 5.2, (a) os pontos A e B experimentam uma tensão axial σ_z devido à carga de tração *P* e sua representação matricial é dado por,

$$\overline{\boldsymbol{\sigma}}_{A}^{\mathrm{T}} = -\overline{\boldsymbol{\sigma}}_{B}^{\mathrm{T}} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\sigma}_{z} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}^{\mathrm{T}}$$
(5.3)

Por outro lado, na Figura 5.2 (b) representa-se o estado de tensões cisalhante τ_{zx} , gerado pelo momento torçor *T*, para os mesmos pontos A e B, e sua representação matricial é dada por

$$\overline{\sigma}_A^{\mathrm{T}} = -\overline{\sigma}_B^{\mathrm{T}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \tau_{zx} & 0 & 0 \end{pmatrix}^{\mathrm{T}}$$
(5.4)

A LTC foi projetada para se trabalhar na zona elástica, e suas deformações foram calculadas utilizando a lei de Hooke.

$$\overline{\varepsilon} = \overline{E}^{-1}.\overline{\sigma} \tag{5.5}$$

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

$$\overline{E}^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{pmatrix}$$
(5.6)

onde *E* é o módulo de elasticidade, *v* o coeficiente de Poisson e G = E / [2.(1+v)]o módulo de cisalhamento.

Na Figura 5.3 mostra-se o estado de deformação, através do círculo de Mohr para os pontos A e B, gerados pela carga axial e momento torçor.



Figura 5.3. Estado de deformações típicos, através do Círculo de Mohr

As deformações ε_1 e ε_2 na Figura 5.3 são obtidas por

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_z}{E} \tag{5.7}$$

$$\frac{\gamma_{zx}}{2} = \frac{\tau_{zx}}{2G} \tag{5.8}$$

onde E é o módulo de elasticidade e G = E / [2.(1+v)] o módulo de cisalhamento.

As deformações nas direções a 0°, 45° e 90° com relação ao eixo z, nos pontos A e B geradas pela carga axial e o momento torçor, estimam-se a partir do círculo de Mohr para deformações. Assim, para o caso de tração pura tem-se $\varepsilon_{0^\circ}^P = \varepsilon_1$, $\varepsilon_{45^\circ}^P = \varepsilon_1 \cdot (1-\nu)/2$ e $\varepsilon_{90^\circ}^P = -\nu\varepsilon_1$. Por outro lado, para o caso de torção pura tem-se $\varepsilon_{0^\circ}^T = \varepsilon_2$, $\varepsilon_{45^\circ}^T = 0$ e $\varepsilon_{90^\circ}^T = -\varepsilon_2$. Finalmente, as deformações totais são obtidas pela combinação das cargas e estimadas utilizando-se o princípio de superposição.

$$\varepsilon_{0^{\circ}}^{total} = \varepsilon_{0^{\circ}}^{P} + \varepsilon_{0^{\circ}}^{T} = \varepsilon_{1} + \varepsilon_{2}$$

$$\varepsilon_{45^{\circ}}^{total} = \varepsilon_{45^{\circ}}^{P} + \varepsilon_{45^{\circ}}^{T} = \frac{\varepsilon_{1} \cdot (1 - \nu)}{2}$$

$$\varepsilon_{90^{\circ}}^{total} = \varepsilon_{90^{\circ}}^{P} + \varepsilon_{90^{\circ}}^{T} = -(\nu \cdot \varepsilon_{1} + \varepsilon_{2})$$
(5.9)

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

Na Tabela 5, apresenta-se as propriedades do material utilizadas no desenvolvimento da LTC.

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

Tabela 5. Constantes do material utilizadas para o projeto LTC

As tensões normais e cisalhantes máximas geradas pelos carregamentos, sobre a estrutura central da LTC, são $\sigma_z = 196$ MPa e $\tau_{zx} = 42$ MPa. Assim, para o caso da tração pura a deformação experimentada pelos extensômetros a 0°, 45° e 90° é obtida utilizando-se a lei de Hooke $\varepsilon_{0^\circ}^P = 932 \ \mu\varepsilon$, $\varepsilon_{45^\circ}^P = 326 \ \mu\varepsilon$, $\varepsilon_{90^\circ}^P = -280 \ \mu\varepsilon$. Para o caso de torção pura tem-se $\varepsilon_{0^\circ}^T = 260 \ \mu\varepsilon$, $\varepsilon_{45^\circ}^T = 0 \ \mu\varepsilon$ e $\varepsilon_{90^\circ}^T = -260 \ \mu\varepsilon$.

As deformações totais experimentadas pelos extensômetros, dado a combinação das cargas de tração e torção são: $\varepsilon_{0^{\circ}}^{total} = 1192 \ \mu\varepsilon$, $\varepsilon_{45^{\circ}}^{total} = 326 \ \mu\varepsilon$ e $\varepsilon_{90^{\circ}}^{total} = -540 \ \mu\varepsilon$.

Considerando-se a carga combinada $\sigma = (196 \ 0 \ 0 \ 42 \ 0 \ 0)^{T}$ MPa, as deformações nos extensômetros são obtidas utilizando-se a lei de Hooke pelas equações (5.7) e (5.8), $\varepsilon_{x} = 933 \ \mu\varepsilon$, $\varepsilon_{y} = \varepsilon_{z} = -280 \ \mu\varepsilon$ e $\gamma/2 = 519 \ \mu\varepsilon$, e aplicando-se o critério de Von Mises, obtêm-se as deformações principais $\varepsilon_{1} = 986$ $\mu\varepsilon$, $\varepsilon_{2} = \varepsilon_{3} = -333 \ \mu\varepsilon$ e $\gamma_{max}/2 = 670 \ \mu\varepsilon$. Finalmente, as deformações totais experimentada pelos extensômetros são $\varepsilon_{0^{\circ}}^{total} = 986 \ \mu\varepsilon$, $\varepsilon_{45^{\circ}}^{total} = 326 \ \mu\varepsilon$ e $\varepsilon_{90^{\circ}}^{total} = -333 \ \mu\varepsilon$.

As deformações calculadas sobre a estrutura da LTC também foram comparadas às deformações obtidas utilizando-se o software Ansys, com o propósito de validar os resultados analíticos. As simulações no Ansys foram feitas para os mesmos carregamentos (P = 200 kN e T = 1300 N.m).



Figura 5.4. Deformações da LTC analisadas no Ansys.

A deformação total na seção central da estrutura da LTC, devido à carga de tração e torçor combinadas, foi de $\varepsilon_{0^{\circ}}^{total} = 1051 \,\mu\varepsilon$. E de acordo com as especificações técnicas da *Micro-Measurement Vishay*, qualquer extensômetro com deformação total $\varepsilon < 1500 \,\mu\varepsilon$ têm uma vida à fadiga de 100 milhões de ciclos [28][29]. Na Figura 5.5 apresenta-se o desenho geral da LTC projetada para carregamentos máximos especificados.



Figura 5.5. Esquema geral da LTC

Com a propósito de minimizar o fator de concentração de tensões e aumentar a vida à fadiga do transdutor, o perfil da LTC foi melhorado utilizando-se o método de "Otimização de Contorno", que consiste em adicionar ou retirar material, mudando-se o perfil da peça de acordo com o valor do fator de concentração [30]. Após a otimização do perfil, minimizou-se o fator de concentração de tensões devido a tração de um valor de $K_{tP} = 1,65$ para outro de $K_{tP} = 1,23$. Na torção não se obteve muita mudança absoluta, pois se diminuiu de um valor de $K_{tT} = 1,15$ para outro de $K_{tT} = 1,04$. Na Figura 5.6, apresenta-se o perfil melhorado e a comparação entre os dois perfis no entalhe.



constante, e melhorado

O fator de concentração de tensão no entalhe melhorado da LTC foi calculado utilizando-se a distribuição de tensão obtida no software Ansys para o carregamento combinado máximo, como se apresenta na Figura 5.7.



Figura 5.7. Cálculo do fator de concentração de tensão no entalhe melhorado

A otimização do fator de concentração de tensão, tanto para tração K_{tp} quanto para torção K_{tT} , é fundamental para o cálculo da vida à fadiga da LTC, projetada para uma vida à fadiga longa e teoricamente infinita. O material escolhido para a estrutura do transdutor foi uma liga de aço 4340, muito utilizada no desenvolvimento de células de carga de alta capacidade. Este material é adequado quando a estrutura do transdutor é grande, de fácil usinagem e não gera sérias distorções durante seu tratamento térmico [31]. A LTC foi usinada em um torno CNC devido à complexidade de seu perfil e, posteriormente, submetida a tratamento térmico, levando a peça a uma temperatura de 850 °C e mantendo-a durante 1 hora para se estabilizar a temperatura ao longo de sua espessura média, e logo resfriada em óleo, à temperatura ambiente. Finalmente, para aumentar sua tenacidade e ductilidade foi submetida a um processo de revenido, reduzindo-se sua dureza e resistência à ruptura a 48RHC e $S_R = 1500$ MPa, respectivamente.

A vida à fadiga da LTC foi calculada utilizando-se o método SN, dado que a célula estará submetida a uma história de tensões elásticas. Considerando-se o caso mais crítico, este será quando a LTC é submetida a um torçor totalmente alternado $T = \pm 1300$ N.m e uma carga axial alternada $P = \pm 200$ kN em fase. Uma estimativa confiável do limite de fadiga S_L para as peças de aço é dada por [32].

$$S_L(10^6) = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot 0.5 \cdot S_R; \qquad S_R \le 1400 \text{ MPa}$$
 (5.10)

O fator de acabamento é $k_a = 0,842$, calculado segundo Mischke [33] por $k_a = 1,58.(S_R)^{0.086}$. O fator de acabamento k_b , segundo Juvinall [34] para a espessura de até 8 mm, considera $k_b = 1$. E o fator do tipo de carregamento para cargas axiais, segundo Juvinall, é $k_c = 0,9$. As estimativas da resistência à fadiga em vidas curtas para peças e estruturas de aço é dada por

$$S_F(10^3) = k_{\theta} \cdot k_e \cdot 0.76 \cdot S_R; \qquad S_R \le 1400 \text{ MPa}$$
 (5.11)

onde o fator de temperatura $k_{\theta} = 1$, devido que a LTC é projetada para trabalhar a

 $\Theta_t \le 300$ °C, e o fator de confiabilidade $k_e = 1$ para trabalhar-se com uma confiabilidade de 50 %.

A combinação mais crítica das cargas em fase geram uma tensão normal $\sigma_z = 196$ MPa e uma tensão cisalhante $\tau_{zx} = 42$ N.m. A tensão equivalente para cálculo de fadiga obtém-se multiplicando o fator de concentração de tensão pela componente nominal induzida σ_z e τ_{zx} , e logo combinada pelo critério de Tresca.

$$\sigma_{\text{Tresca}} = \sqrt{\left(K_{\text{fP}}.\sigma_{Z}\right)^{2} + 4.\left(K_{\text{fT}}.\tau_{ZX}\right)^{2}}$$
(5.12)
$$\sigma_{\text{Tresca}} = 256 \text{ MPa}$$

A vida em 10³ e 10⁶ ciclos para o aço 4340 dado pelas equações (5.11) e (5.10) são $S_F(10^3) = 1140$ MPa e $S_L(10^6) = 568$ MPa, respectivamente. A vida à fadiga é calculada utilizando-se a equação de Wöhler, dada por

$$N.S_{F}^{B}=C$$
(5.13)

onde os coeficientes 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= σ_{Tresca} = 256 MPa substituindo na equação (5.13) é *N* = 240 milhões, que é maior que a recomendada pela literatura (100 milhões).

Na Tabela 6, apresenta-se a vida à fadiga da célula de carga e torque para diferentes espessuras da parede da seção tubular da estrutura da LTC.

t mm	σ Nominal (MPa)		Tensões principais (MPa)		Fator de concentração		Vida à Fadiga (bilhões)			
	$\sigma_{_{ m n}}$	$ au_{ m n}$	$\sigma_{_{1}}$	$\sigma_{_2}$	$ au_{ m max}$	K_{tP}	K_{tT}	Usinado	Retificado	Polido
5	195,9	41,9	158	-11,2	84,6	1,23	1,07	0,01	0,2	5,72
6	165,7	36,5	173,4	-7,6	90,5	1,23	1,07	0,04	1,05	49,22
7	144,4	32,6	151,4	-7	79,2	1,23	1,07	0,1	4,2	290

Tabela 5. Influência da espessura na vida à fadiga da LTC

A sensibilidade mecânica da célula de carga e torque depende do desenho da geometria e do carregamento aplicado, como é apresentado a continuação [35].

		Sensibilid	Faiya de	
Тіро	Representação elemento elástico	Mecânica µm/m	Elétrica E	carga
Tração pura		$\frac{4P}{\pi.E.(D^2-d^2)}$	2,6	10 - 10 ⁷
Torção pura		$\frac{16.T.D}{\pi.E.(D^4-d^4)}$	2,6	10 ⁰ - 10 ³

Tabela 6. Sensibilidade mecânica e elétrica e faixa de forças da LTC

5.2.2. Configuração e conexão dos extensômetros

O circuito de conexão mais comumente utilizado em transdutores de força para medir a saída dos extensômetros é a ponte de *Wheatstone*, constituída por quatro resistências R₁, R₂, R₃ e R₄ uma em cada braço da ponte, como apresentado na Figura 5.8.



Figura 5.8. Ponte de Wheatstone

A equação que relaciona a tensão de saída E, a tensão de alimentação V e suas resistências é dada por

$$E = V \cdot \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)}$$
(5.14)

A ponte é balanceada quando sua tensão de saída E é igual a zero, que ocorre quando satisfaz

$$\frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3} \tag{5.15}$$

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, pois

$$\Delta E = \frac{V}{4} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad \text{se} \quad r = \frac{R_2}{R_1} = 1$$
(5.16)

A variação da resistência é gerada pela deformação da superfície, sobre a qual são colados os extensômetros, logo

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = K.\mathcal{E} \tag{5.17}$$

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

A localização adequada dos extensômetros na estrutura da 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. Portanto, sobre a estrutura central da LTC são coladas duas pontes completas de *Wheatstone*: a primeira para mensurar a carga axial (tração / compressão) e a segunda para mensurar o momento torçor. A seguir, apresenta-se a configuração da localização dos extensômetros e as conexões da ponte *Wheatstone* para os casos de tração/compressão e torção.

5.2.2.1. 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, a carga aplicada. Na superfície exterior da seção central da LTC, com um perfil circular ôco (vide Figura 5.9), são colados os extensômetros formando-se, assim, uma ponte completa.



Figura 5.9. Seção central da LTC

Na superfície exterior da seção circular ôca 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 é conectado e localizado, segundo a configuração apresentada na Figura 5.10. Esta configuração permite compensar os efeitos de desalinhamento entre a LTC e a carga axial, efeito temperatura e o momento torçor na direção "z".



Figura 5.10. Conexão dos extensômetros na LTC, como célula de carga

Na Figura 5.10, o desalinhamento da carga F, 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 $\varepsilon_{\rm M}$ na resistência R_1 , deformação negativa $-\varepsilon_{\rm M}$ na resistência R_3 , enquanto as resistências R_2 e R_4 são insensíveis ao momento M_y por estarem localizadas sobre o eixo "y". O momento torçor M_z gera deformação positiva $\varepsilon_{\rm T}$ nas resistências R_3 e R_4 , e gera deformação negativa $-\varepsilon_{\rm T}$ nas resistências R_1 e R_2 . Finalmente, o efeito da temperatura foi eliminado pela conexão adequada das resistências na ponte de *Wheatstone*. A Equação (5.18) permite relacionar as deformações dos extensômetros e as tensão de saída na ponte *Wheatstone*.

$$\Delta E = \frac{K.V}{4} \left(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4 \right) \tag{5.18}$$

onde $\varepsilon_1 = \varepsilon + \varepsilon_M - \varepsilon_T^x + \varepsilon_{T^\circ}$, $\varepsilon_2 = -v.(\varepsilon + \varepsilon_M) - \varepsilon_T^y + \varepsilon_{T^\circ}$, $\varepsilon_3 = \varepsilon - \varepsilon_M + \varepsilon_T^x + \varepsilon_{T^\circ}$, e $\varepsilon_4 = -v.(\varepsilon - \varepsilon_M) + \varepsilon_T^y + \varepsilon_{T^\circ}$. Substituindo na Equação (5.18), obtém-se a saída ΔE proporcional à deformação uniaxial,

$$\Delta E = \frac{K.\varepsilon.(1-\nu).V}{2} \tag{5.19}$$

onde K é o fator de calibração dos extensômetros, ν o módulo de Poisson ε , $\varepsilon_{\rm M}$, $\varepsilon_{\rm T}$ e $\varepsilon_{\rm T^{\circ}}$ são as deformações geradas pelas cargas axiais, momento de flexão, momento torçor, e a temperatura, respectivamente.

5.2.2.2. Configuração da célula de torque

A adequada configuração dos extensômetros sobre a superfície central da LTC permite utilizá-la como célula de torque e medir o torque aplicado sobre corpo de prova. 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. A configuração dos 4 extensômetros que constituem a ponte de *Wheatstone* de torção, é colada em pares sobre a superfície exterior da seção circular ôca da LTC. Esta configuração permite medir o torque aplicado ao corpo de prova e compensar efeitos devido aos momentos fletores, forças axiais e efeitos da temperatura (vide Figura 5.11).



Figura 5.11. Conexão dos extensômetros na LTC como célula de carga

Na Figura 5.11, ε_{T}^{45} , ε_{σ} , ε_{Mx} , ε_{My} e $\varepsilon_{T^{\circ}}$ aparecem devido às deformações geradas pelo torçor *T*, a força axial *P*, os momentos flexores M_x, M_y e o efeito da temperatura respectivamente. Os extensômetros experimentam a combinação destas deformações que são dadas por $\varepsilon_{1} = \varepsilon_{T}^{45} + \varepsilon_{\sigma} + \varepsilon_{Mx} + \varepsilon_{My} + \varepsilon_{T^{\circ}}$, $\varepsilon_{2} = -\varepsilon_{T}^{45} + \varepsilon_{\sigma} + \varepsilon_{My} - \varepsilon_{Mx} + \varepsilon_{T^{\circ}}$, $\varepsilon_{3} = \varepsilon_{T}^{45} + \varepsilon_{\sigma} - \varepsilon_{Mx} - \varepsilon_{My} + \varepsilon_{T^{\circ}}$ e $\varepsilon_{4} = -\varepsilon_{T}^{45} + \varepsilon_{\sigma} - \varepsilon_{My} + \varepsilon_{Mx} + \varepsilon_{T^{\circ}}$. Substituindo na Equação (5.20) obtém-se:

$$\Delta E = K \mathcal{E}_{\mathrm{T}}^{45} \mathcal{N} \tag{5.20}$$

A configuração dos quatro braços da ponte Wheatstone (vide Figura 5.8)

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.

5.2.3. Fabricação da LTC

A célula de carga e torque foi feita numa liga de aço 4340, usinada num torno CNC universal ROMI - Centur 30D, dada a complexidade do perfil melhorado do entalhe e, posteriormente, levada ao tratamento térmico. Após a fabricação, foram colados os extensômetros segundo as configurações apresentadas nas Figuras 5.10 e 5.11. Duas rosetas a 90° foram utilizadas para mensurar a força axial colada com uma defasagem de 180°. Semelhantemente, duas rosetas espinha de peixe foram utilizadas para medir o torque (vide Figura 5.12).



Força axial: Rosetas a 90°

Torque: Rosetas espinha de peixe





Figura 5.12. Conexão dos extensômetros na LTC

5.3. Calibração dos transdutores da MTT

No uso de transdutores baseados em extensômetros frequentemente surge a necessidade de calibra-los. Este é um procedimento requerido periodicamente para

assegurar-se da exatidão e linearidade do próprio instrumento [36]. Para a calibração dos transdutores foi desenvolvido um sistema de leitura no software LABVIEW utilizando-se o *cRio-9004* e o módulo de excitação de extensômetros NI-9237, que permite tomar as medidas de tensão elétrica do transdutor (célula de carga, torque ou LVDT's), e relacioná-las com seu valor real (força, torque ou deslocamento), gerando-se uma curva de calibração entre o valor medido e o padrão real.

5.3.1. Calibração da célula de carga e torque

A célula de carga incorporada na LTC foi calibrada utilizando-se a máquina INSTRON modelo 8501, com capacidade máxima de \pm 100 kN. Através dela foi possível medir a força padrão com exatidão, e relacioná-la com as medições através do sistema integrado de leitura (*cRio-9004*, módulo de excitação dos extensômetros *NI- 9237* e laptop). Na Figura 5.13 mostra-se o sistema de calibração utilizado para calibrar a força axial.



Figura 5.13. Sistema de calibração da célula de carga

A tensão de saída da ponte de *Wheatstone*, medida pelo sistema de leitura para diferentes valores de carregamento aplicado pela máquina INSTRON sobre a LTC, permitiu gerar uma curva de calibração relacionando a tensão de saída e força axial real aplicadas (vide Figura 5.14). Com isto, mostra-se que a LTC tem um comportamento linear e a tensão de saída da ponte *Wheatstone* da LTC é proporcional à força axial aplicada.



Figura 5.14. Curva de Calibração da LTC - célula de carga

No entanto, a calibração da célula de torque da LTC é feita mediante a aplicação de torque através de um braço alavanca de comprimento conhecido e, assim, aplicando valores de torque padrão.



Figura 5.15. Curva de Calibração da LTC - célula de torque

5.3.2. Calibração do LVDT- linear

Para a calibração do LVDT Linear (DT-100A *_ KYOWA*) foi utilizado um módulo de calibração que consistia em uma bancada milimétrica sobre a qual foi montada o LVDT e controlado seu deslocamento. O sistema de leitura (módulo NI-9237, *cRio* e Laptop) permitiu ler-se a tensão elétrica do LVDT e relacioná-la a seu valor real de deslocamento, gerando uma curva de calibração entre o deslocamento real e o valor de tensão elétrica lida no LabVIEW. Na Figura 5.16 apresenta-se o sistema de calibração do LVDT que mede o deslocamento linear do eixo da MTT.



Figura 5.16. Sistema de calibração do LVDT Linear DT-100A

A curva de calibração do LVDT DT-100A é apresentada a seguir.



Figura 5.17. Calibração do LVDT Linear DT-100A

O LVDT-Linear DT-100A tem a função de medir o deslocamento linear do eixo da MTT (vide Figura 5.16), o qual permitiu implementar os limites de posição para uma maior segurança nos ensaios.

5.3.3. Calibração do LVDT- rotação

A medição da rotação do eixo da MTT permite implementação de limites para o deslocamento angular. Estes evitam que o atuador mecânico de rotação gire além do necessário, ou se acelere em caso de ruptura do corpo de prova por torção. Por este motivo, é necessário instalar um LVDT de rotação. Contudo, diante das limitações financeiras para adquirir um LVDT exclusivo para medir rotação, foi utilizado um outro LVDT-Linear DT-100^a, que mede indiretamente a rotação do eixo da MTT.



Figura 5.18. Calibração do LVDT Linear DT-100A para rotação

O LVDT DT-100A utilizado para medir a rotação foi calibrado de maneira semelhante ao LVDT-Linear. Na Figura 5.19 apresenta-se a curva de calibração do LVDT utilizado para medir a rotação do eixo da MTT.



Figura 5.19. Calibração do LVDT rotação DT-100A

Todos os transdutores têm comportamento linear e foram ajustados com alta precisão a uma reta, como é apresentado nas Figuras 5.14, 5.15, 5.17 e 5.19.

5.4. Desenvolvimento do sistema experimental MTT

Como já foi apresentada no capítulo quatro e Apêndice A, a MTT está composto principalmente de dois mecanismos, um para gerar força axial e outro para gerar torque, membros de transmissão de carga, transdutores para a medição das magnitudes a serem controladas, um sistema de controle provido de uma interface homem-máquina e uma estrutura rígida. Em um sistema eletromecânico, geralmente usa-se como atuador um motor DC acoplado a uma caixa redutora controlada por um *driver*, através de um sinal proporcional ou on/off. Além disso, utiliza-se um conjunto de transdutores, como célula de carga e torque, para medir a força e/ou torque aplicados no corpo de prova, LVDT's para mensurar o deslocamento do atuador e *clip gages* ou extensômetros para medir as deformações nos espécimes de prova.

Na Figura 5.20, apresenta-se a MTT desenvolvida no Laboratório de Fadiga da PUC-Rio, o sistema implementado é o modelo simplificado da MTT apresentado

e justificado no Apêndice A.



Figura 5.20. MTT desenvolvida no Laboratório de Fadiga - PUC-Rio

5.4.1. Conexões elétricas da MTT

As conexões elétricas da MTT estão constituídas de duas partes. A primeira parte é a de leitura de dados, a qual inclui a conexão da célula de carga e torque e dos dois LVDT's ao módulo de aquisição de dados NI-9237 do *CompactRio* da *National Instruments*. Já a segunda parte é a de sinal de controle dos motores, constituída pela conexão do módulo NI-9263 do cRio ao controlador AX2550, que controla os motores DC mediante um sinal de controle proporcional.



Figura 5.21. Esquema de conexões elétricas e do sistema de controle

5.4.2. Módulo de controle c*ompactRio*

O módulo de controle *CompactRio* da *National Instruments* é um controlador programável de automação, com um sistema de controle reconfigurável e aquisição de dados projetados para aplicações que requerem alto desempenho e resposta em tempo real com alta confiabilidade. Ele combina um processador em tempo real integrado a um chip FPGA de alto desempenho e robustez, com módulos de entrada/saída intercambiáveis. O FPGA é conectado ao processador em tempo real através de um bus PCI de alta velocidade, no qual cada módulo de entrada/saída conecta-se diretamente ao FPGA. O *CompactRIO* usado no sistema de controle da MTT é o cRIO 9004, apresentado na Figura 5.22.



Figura 5.22. Controlador cRIO-9004

O *cRIO*-9004 tem incorporado um processador industrial classe Pentium de 195 MHz para executar em tempo real as aplicações determinísticas desenvolvidas no software *LabVIEW* Real Time. O *cRIO* tem uma memória de 512 MB de armazenamento *CompactFlash* não volátil e *DRAM* de 64 MB, além de uma porta Ethernet para a programação pela rede. O *LabVIEW Real Time* tem funções internas para transferir dados entre o *FPGA* e o processador em tempo real dentro do sistema do *CompactRIO*.

O FPGA (Field Programmable Gate Arrays) é um chip de silício reprogramável que contém blocos de lógica pre-construídos cuja interconexão e funcionalidade podem ser configuradas e re-configuradas entre si, nas diferentes aplicações desenvolvidas (vide Figura 5.23). Aplicações com algoritmos onde se precisa resposta em tempo real, sincronização, precisão, e execução de tarefas

simultâneas de forma paralela, são desenvolvidas no FPGA. O paralelismo é conseguido devido ao fato que o módulo *LabVIEW FPGA* executa sua lógica no hardware, tendo o programa a vantagem de processar as tarefas tais como aplicações de controle, leitura e gravação de saídas analógicas e/ou digitais, em tempo real e de forma determinística.



Figura 5.23. Arquitetura interna do módulo FPGA

Para o controle da MTT utilizou-se um módulo de saída analógica e módulos de excitação de extensômetros. O módulo *NI cRIO*-9263 apresentado na Figura 5.24 (a) é o módulo de saída analógica utilizado para gerar tensões elétricas entre 0 V e +5 V. Essas saídas analógicas são utilizadas para ativar o controlador *Roboteq* AX2550, que atua como uma interface de potência entre o cRIO e os motores *Ampflow* A28-400, os motores DC adotados.

O módulo *NI cRIO* 9237 apresentado na Figura 5.24 (b) é o módulo excitador de extensômetros utilizado para excitar e medir valores da força e do torque aplicados ao corpo de prova, através da célula de carga. Também utiliza-se para medir o deslocamento linear dos LVDT's e as deformações do corpo de prova através de um *clip gage*. Pode-se programar as tensões elétricas de excitação com os valores de 2,5 volts, 3,3 volts, 5 volts e 10 volts. Este módulo utiliza uma combinação de filtros analógicos e digitais, podendo, assim, proporcionar uma representação precisa dos sinais desejados.



Figura 5.24. a) módulo NI-9263 e b) módulo NI-9237

5.4.3. Software desenvolvido em LabVIEW

A interface homem-máquina implementada para o controle da máquina tração-torção foi desenvolvida no software *LabVIEW*. Este software utiliza três ambientes de programação: um computador conectado ao cRIO mediante comunicação TCP/IP, onde são armazenados os valores de força e torque e a plotagem de gráficos; um ambiente *RealTime*, no qual se configuram os parâmetros, tanto do controle por modos deslizantes de força quanto do controle PID por modos deslizantes de torque. Os sinais de força e torque desejados definem os limites de segurança de carga, torque, deslocamento e rotação angular; e ainda, um ambiente que inclua os laços de programação do controle no FPGA, nos quais são executados os laços (*loops*) do controle de força e torque, independente um do outro, chegando a velocidades de processamento em microssegundos. Os laços independentes incluem a leitura e filtragem dos sinais, algoritmo de controle, início e parada da MTT e, finalmente, os limites de segurança (vide Figura 5.25).



Figura 5.25. Interação dos ambientes de programação do controlador

No próximo capítulo, serão apresentadas as técnicas de controle implementadas na MTT para o controle de trajetória de força e torque e para gerar histórias do carregamento desejado.