

### 3.

## Eletrônicos: Montagem, princípio de funcionamento, calibração e sistema de aquisição de dados.

### 3.1.

#### Introdução

Os eletrônicos foram desenvolvidos há mais de 60 anos nos Estados Unidos como sensores para a indústria aeronáutica. Porém, sua aplicação em obras geotécnicas diretamente ligadas ao monitoramento de recalques foi feita inicialmente na Inglaterra em 1990, em trabalhos realizados pela Construction Monitoring Control Systems (CMCS), destacando-se o sistema de monitoramento instalado na Mansion House objetivando controlar os recalques oriundos da expansão do metrô de Londres (Penedo, 2012).

As medidas indicadas pelos eletrônicos são relacionadas ao fornecimento direto ou indireto de rotações e de distorções angulares que ocorrem na superfície ou no interior de um meio, devido a uma determinada solicitação.

Para se determinar a rotação de um corpo rígido, os eletrônicos são fixados na superfície isoladamente. No caso de se determinar as distorções angulares na superfície ou interior de um meio, vários eletrônicos são alinhados ao longo da superfície.

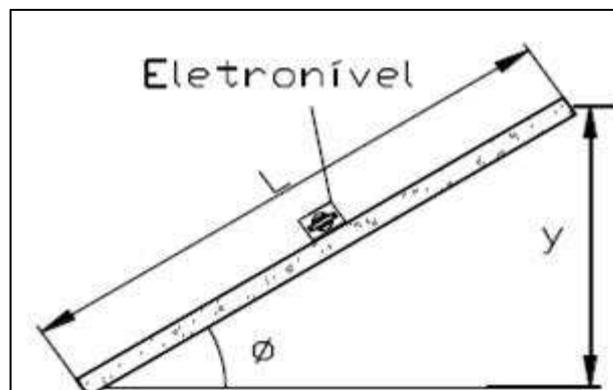


Figura 32. Rotação de um corpo rígido (Toledo, 2009)

Na Figura 32 está ilustrada a rotação ( $\theta$ ) de um corpo rígido de comprimento  $L$  e o deslocamento ( $y$ ) na extremidade, que pode ser determinado através da simples relação trigonométrica:

$$y = L * \tan\theta \quad \text{Equação 10}$$

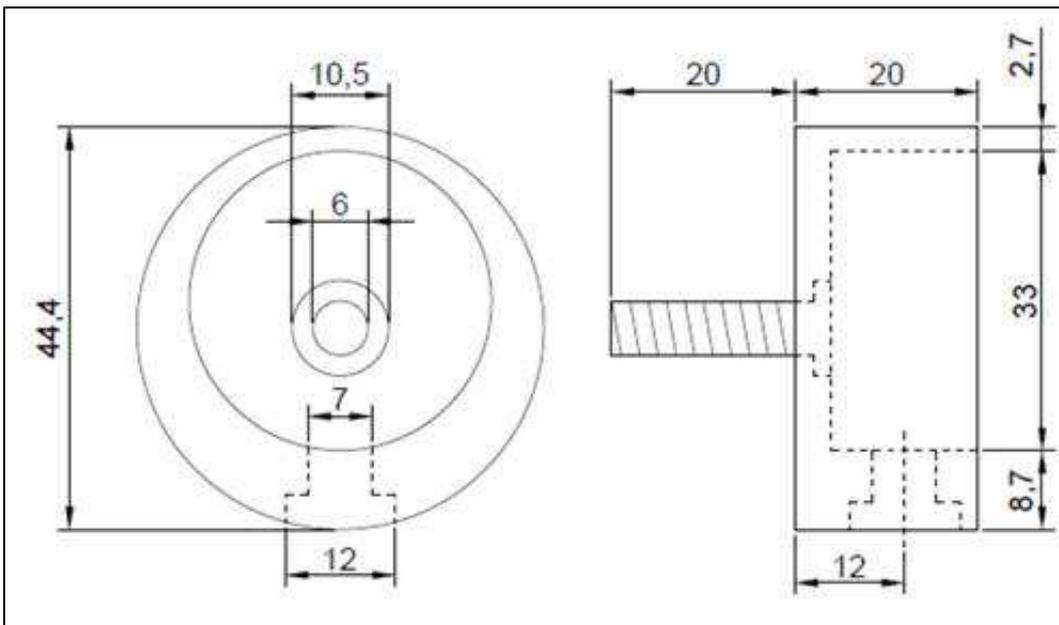
Por outro lado, a obtenção de distorções angulares através desta série de eletrônives alinhados possibilita a determinação da deformada de um meio solicitado através de duas maneiras: Incremental (somatório de deslocamentos de trechos considerados rígidos) e Sequencial (integral de uma função matemática que represente a variação das rotações).

A função matemática ajustada aos pontos de rotação obtidos através dos eletrônives também permite a determinação dos momentos fletores atuantes no meio através do produto entre a sua primeira derivada e a rigidez da estrutura, segundo a teoria de viga de Bernoulli-Euler.

### 3.2.Princípio básico de funcionamento dos eletrônives

Como mencionado anteriormente os eletrônives são sensores elétricos constituídos de uma ampola parcialmente preenchida por um líquido eletrolítico, possuindo três ou quatro pinos (eletrodos) metálicos que a penetram utilizados para medir a resistência elétrica do conjunto, formando meia ponte de Wheatstone, quanto maior numero de pinos, maior a precisão da medição do eletrônivel, devido que o volume de liquido entre pinos é menor. A resistência elétrica entre dois pinos consecutivos é inversamente proporcional ao volume de liquido entre os mesmos e o volume entre pinos é alterado de acordo com a rotação aplicada ao conjunto.

O princípio de funcionamento do eletrônivel é simples. A ampola ao sofrer uma inclinação, no plano dos eletrodos, provoca uma variação de tensão entre os eletrodos decorrentes da variação angular do eletrônivel. Assim, ao se induzir uma variação angular do eletrônivel, obtém-se uma variação de tensão elétrica. A ampola e os eletrodos ficam protegidos por um cilindro metálico como mostra a Figura 33.



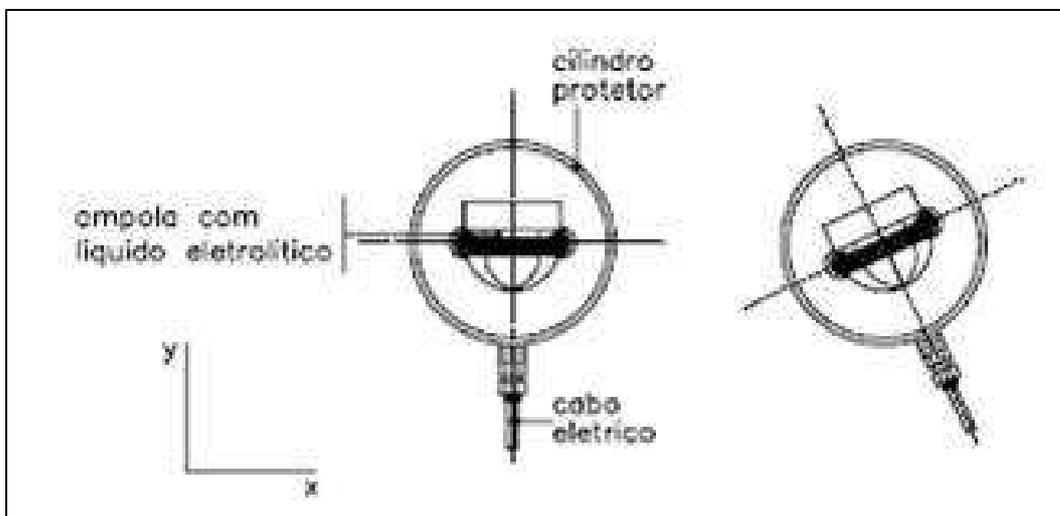
**Figura 33. Vista do cilindro protetor (Dimensões em milímetros)**

A Figura 34 mostra o interior do cilindro metálico que envolve o eletrônível. O cilindro além de ser constituído por um material resistente garante vedação ao sistema, ou seja, não permite o contato da ampola e dos eletrodos com água.



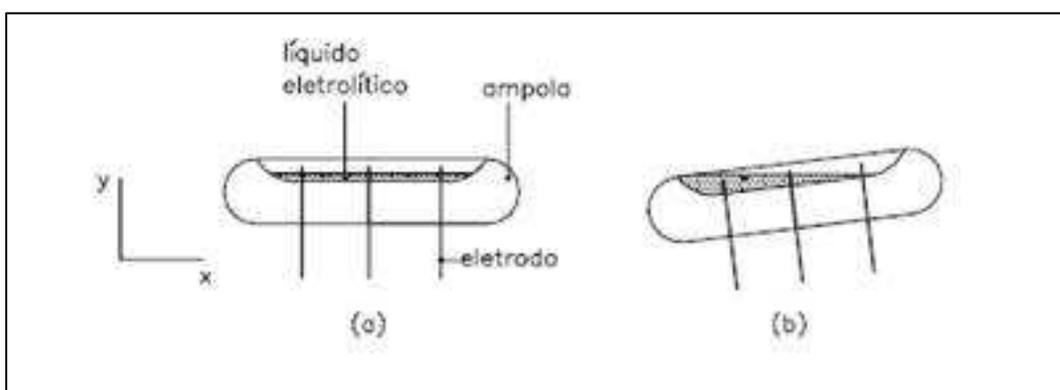
**Figura 34. Detalhe da parte interna do cilindro.**

A Figura 35 mostra o eletrônível ao sofrer uma rotação angular em torno de um eixo vertical. O cabo elétrico é conectado a um logger que permite obter esta variação angular.



**Figura 35. Funcionamento do eletrônível.**

A Figura 36 mostra a ampliação da ampola preenchida com líquido eletrolítico. Na Figura 36 (a) a ampola está em repouso em um estágio inicial tomado como referência, e a Figura 36 (b) apresenta a variação da área do eletrodo submersa no líquido eletrolítico. O circuito elétrico dos eletrôníveis é mostrado na Figura 37. Note-se que o eletrônível é utilizado como uma metade de uma ponte de Wheatstone, onde a outra metade é composta por duas resistências. A tensão de saída é tratada por um circuito adicional que fornece a leitura.



**Figura 36. Detalhe da variação da altura do líquido eletrolítico entre os eletrodos.**

A faixa de valores de saída que os eletrônives apresentam varia em função do modelo e do fabricante do eletrônível. Na Figura 38 são apresentadas curvas de dois diferentes modelos de eletrônível. Nota-se a diferença entre as faixas de valores e os trechos de linearidade, que na Figura 38 a é de  $\pm 3^\circ$ , enquanto na Figura 38 b é de  $\pm 6^\circ$ .

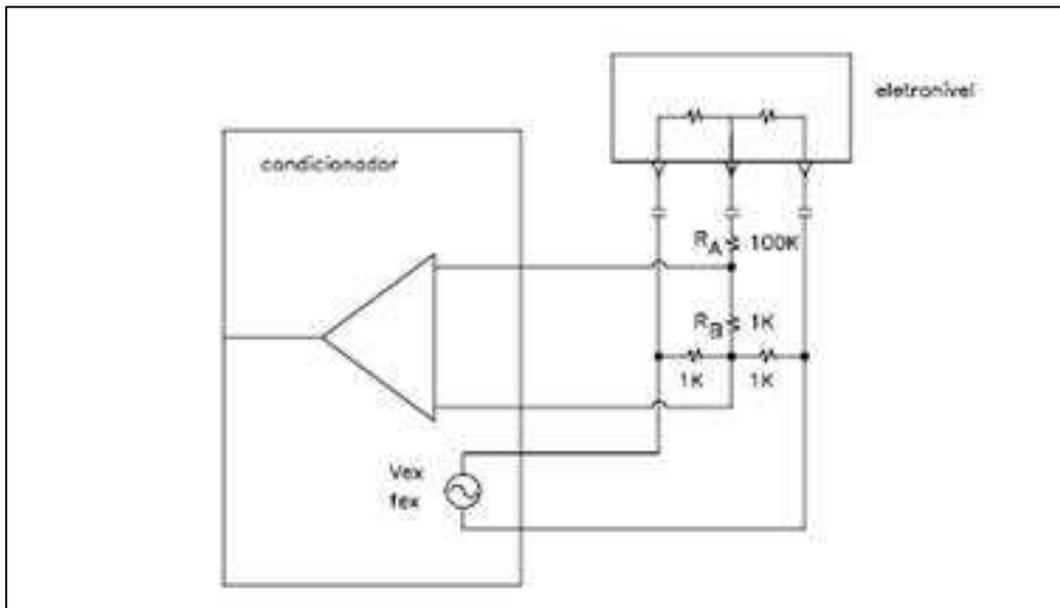


Figura 37. Circuito elétrico de conexão dos eletrônives com os condicionadores (Wha,1999).

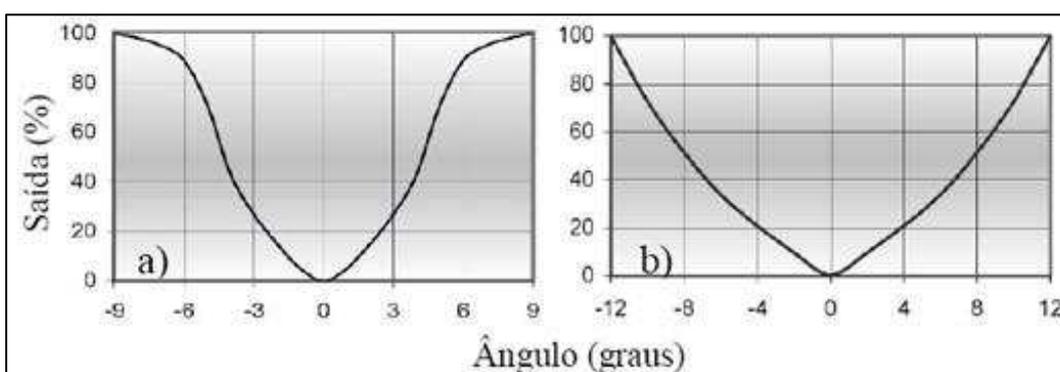


Figura 38. Curvas de sensibilidade dos eletrônives (www.frederickscom.com)

### **3.3. Montagem**

A preparação dos eletrônives para utilização em campo foi realizada no laboratório de instrumentação geotécnica de campo da PUC-Rio por Penedo em 2012 para a prova de carga instrumentada em um cais apoiado sobre estacas. Esta preparação consistiu basicamente da proteção mecânica, fixação e vedação da ampola.

Segundo Penedo, foi usinada uma cápsula cilíndrica de alumínio com uma cavidade excêntrica onde o eletrônível é posicionado e envolto por resina plástica. As cápsulas apresentam uma rosca em uma face para fixação nas cantoneiras metálicas utilizadas para fixar os eletrônives na estrutura. O detalhamento da cápsula utilizada e o eletrônível posicionado na cápsula antes da aplicação da resina foram apresentados anteriormente na Figura 33 e na Figura 34 respectivamente.

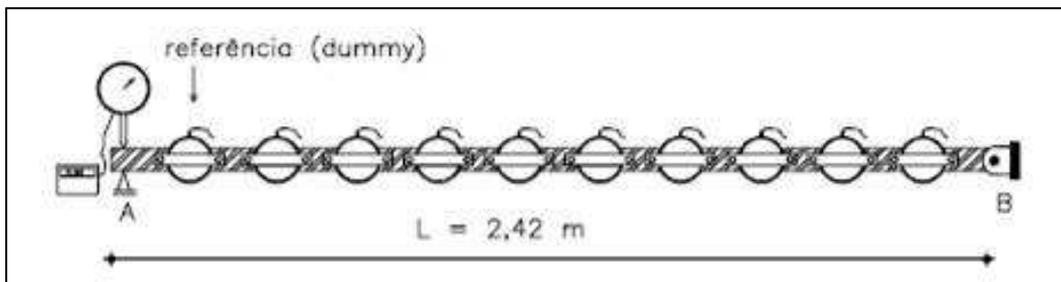
### **3.4. Procedimento de calibração**

Os eletrônives utilizados no programa de instrumentação desenvolvido neste trabalho foram inicialmente calibrados no Laboratório da PUC-Rio por Penedo em 2012, após desses trabalhos os eletrônives ficaram sem uso no laboratório de instrumentação da PUC-Rio até o início do desenvolvimento deste novo projeto, o que fez que os eletrônives fossem recalibrados a fim de conhecer se as propriedades eletrolíticas deles tenham sofrido mudanças. A finalidade do procedimento de calibração é a determinação do coeficiente de calibração ( $C_f$ ) para cada um dos eletrônives empregados nesse trabalho. Assim objetiva-se determinar uma curva que forneça a variação das leituras dos eletrônives em função da variação angular. Com isso é possível determinar um coeficiente de calibração para cada eletrônível o qual poderá ser utilizado na determinação das rotações e deflexões.

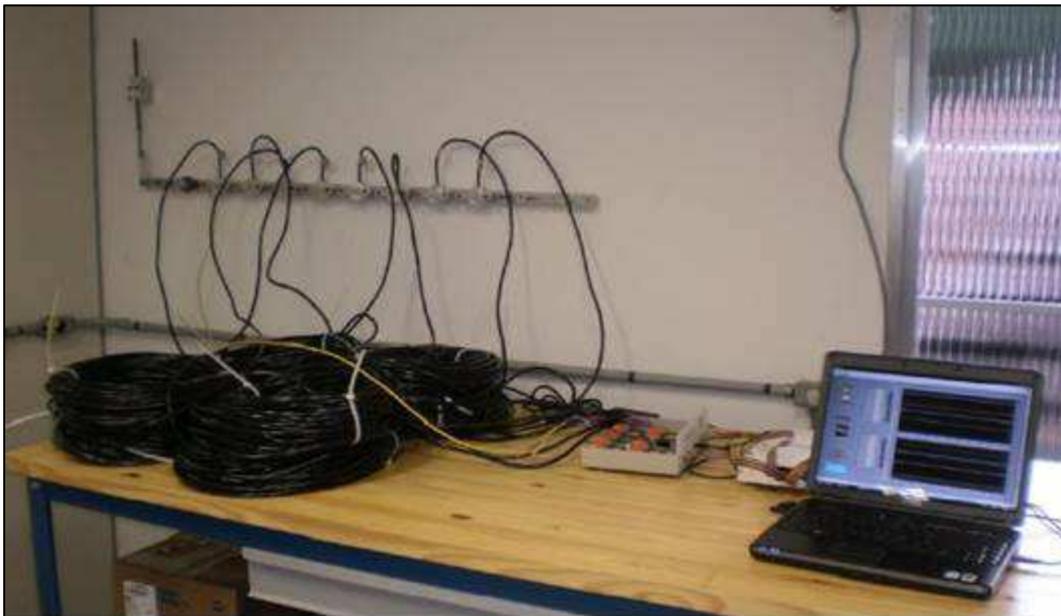
Para fazer a calibração dos eletrônives, eles são fixados juntamente com um eletrônível de referência (Fator de Calibração conhecido) numa

barra rígida de comprimento  $L$  conhecido. No laboratório da PUC-Rio adotou-se uma barra de 2,42 m como apresentado na Figura 39. Esta barra possibilita a calibração de até nove eletrônives simultaneamente.

As leituras foram feitas utilizando o Sistema de Monitoramento de Eletrônives (SME) desenvolvido na PUC-Rio, que fornece as leituras dos eletrônives em miliVolts, e pode fazer leitura até de 32 (trinta e dois) eletrônives (Figura 40).



**Figura 39. Barra de calibração dos eletrônives (Laboratório PUC-Rio)**



**Figura 40. Calibração dos eletrônives utilizando o SME.**

Os eletrônives são fixados à barra de calibração por meio de parafusos que não permitem que os mesmos se desloquem em relação à barra. A Figura 41 mostra os detalhes dessa fixação.

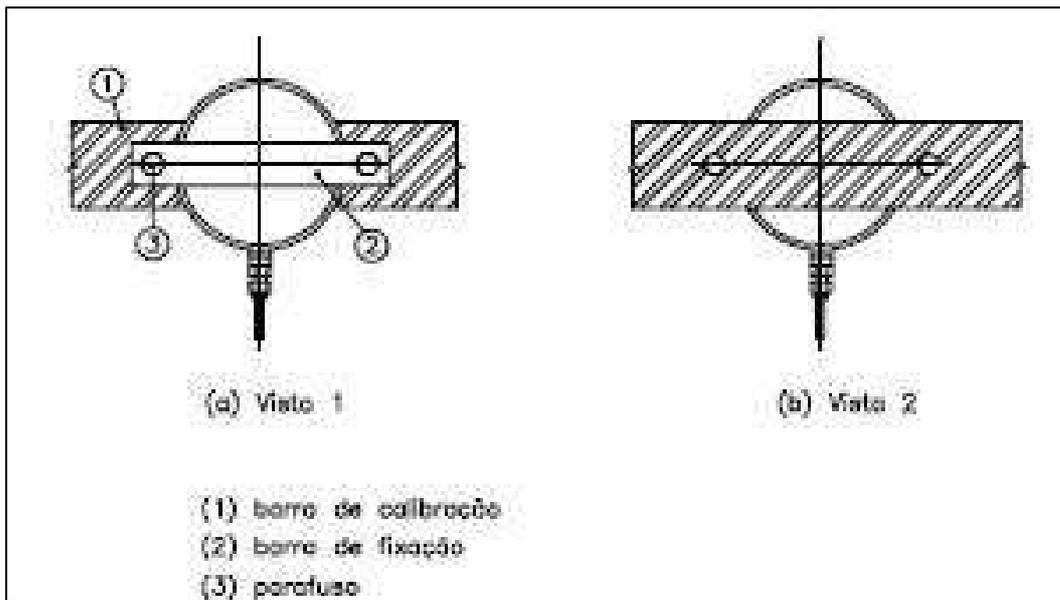


Figura 41. Detalhe da fixação do eletrônível à barra de calibração

Uma das extremidades da barra (A) é livre para se deslocar verticalmente como ilustra a Figura 42, a outra extremidade (B) possui uma rótula e é impedida de transladar. Impondo um deslocamento  $D$  (milímetros) na extremidade A da barra a extremidade B sofre uma rotação  $\theta$ .

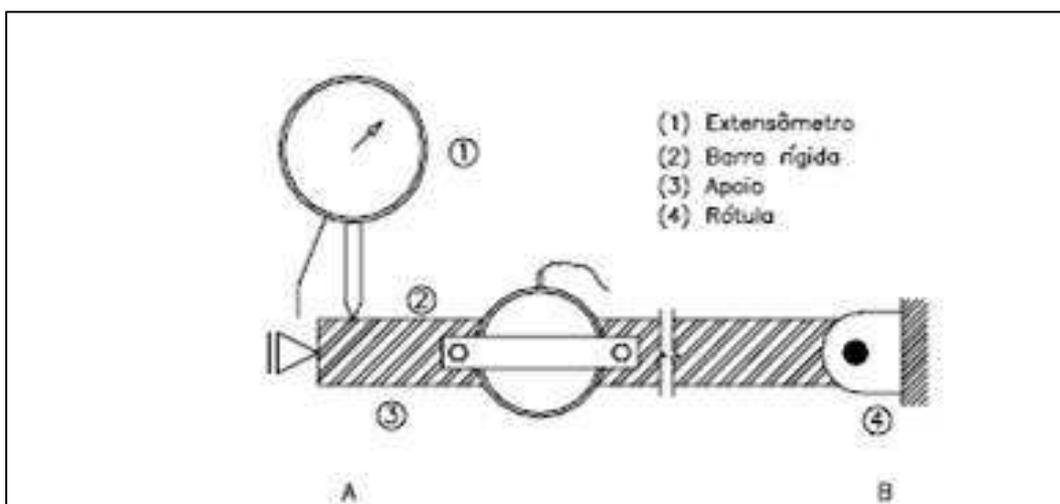


Figura 42. Detalhe do sistema de calibração do eletrônível.

Desse modo pode-se calcular a rotação angular  $\theta$  em radianos correspondente a um incremento  $y$  em milímetros através da seguinte expressão:

$$\theta = \arctan\left(\frac{Y}{L}\right) \quad \text{Equação 11}$$

A partir daí pode-se determinar o fator de calibração (FC) para cada eletrônível utilizando-se a equação:

$$FC = \frac{\theta \text{ (rad)}}{\text{leitura do eletrônível}} \quad \text{Equação 12}$$

Uma vez que a magnitude da leitura dos eletrôníveis é de uma ordem de grandeza muito pequena, pequenos erros na medição do deslocamento vertical podem resultar em erros grandes no cálculo do fator de calibração. Portanto, os ângulos de rotação da barra são obtidos a partir das leituras ( $\Delta L$ ) do eletrônível de referência e de seu respectivo fator de calibração ( $FC_{ref}$ ) da seguinte forma:

$$\theta = FC_{REF} * \Delta L \quad \text{Equação 13}$$

#### 3.4.1. Eletrônível de referência

O eletrônível de referência possui faixa de trabalho de  $\pm 1,5^\circ$ , ou seja, a faixa de linearidade de suas leituras tem metade da amplitude dos eletrôníveis utilizados na instrumentação.

Como já mencionado anteriormente, durante a calibração as leituras foram feitas utilizando o Sistema de Monitoramento de eletrôníveis. Uma vez que o eletrônível de referência apenas possui fator de calibração para leituras pelo Mini Data-Logger desenvolvido pela CMCS, foi necessário obter um fator de calibração para as leituras do SME. Portanto, para cada posição da barra de calibração correspondente a um ângulo diferente, foram feitas leituras utilizando os dois sistemas conforme a Figura 43, este procedimento foi feito em duas ocasiões, utilizando para os cálculos o valor médio.

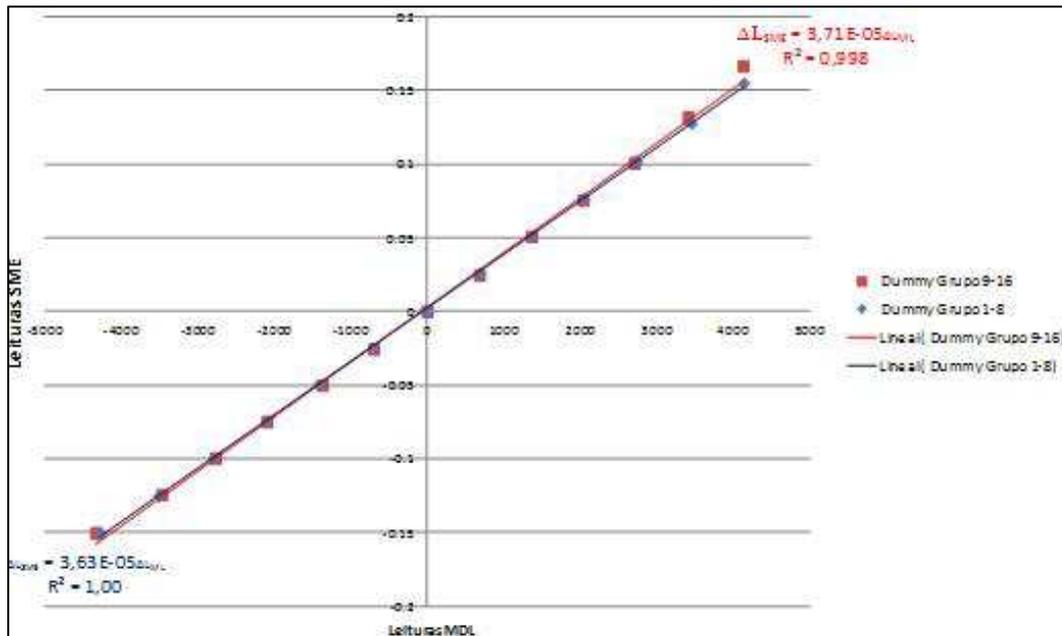


Figura 43. Relação para as leituras do SME e Mini Data-logger para o eletrônível de referência com valor médio de  $3.67E-05$

Logo, a partir da correlação obtida e conhecido o fator de calibração do eletrônível de referência para o Mini Data-Logger ( $FC_{MDL}$ ), o fator de calibração para o Sistema de Monitoramento de Eletrôníveis (SME) ( $FC_{SME}$ ) foi obtido da seguinte maneira:

$$\theta = FC_{MDL} * \Delta L_{MDL} \quad \text{Equação 14}$$

$$\theta = FC_{SME} * \Delta L_{SME} \quad \text{Equação 15}$$

$$FC_{MDL} = 4.9 \times 10^{-6} \quad \text{Equação 16}$$

$$\Delta L_{SME} = (3.67 \times 10^{-5}) \times \Delta L_{MDL} \quad \text{Equação 17}$$

$$FC_{SME} = \frac{FC_{MDL} \times \Delta L_{MDL}}{\Delta L_{SME}} \quad \text{Equação 18}$$

$$FC_{SME} = \frac{4.9 \times 10^{-6} \times \Delta L_{MDL}}{3.67 \times 10^{-5} \times \Delta L_{MDL}} \quad \text{Equação 19}$$

$$FC_{SME} = 0.1335$$

Equação 20

### 3.4.2. Eletroníveis A01 a A16

Utilizando o fator de calibração do eletronível de referência corrigido para sistema de monitoramento de Eletroníveis, é possível obter os ângulos corrigidos para a calibração dos dezesseis eletroníveis produzidos para a instrumentação realizada.

Os eletroníveis foram separados em dois grupos com oito eletroníveis cada e o eletronível de referência, uma vez que a barra de calibração só pode conter até dez elementos. Foram feitas variações angulares de aproximadamente 0,003 radianos, corroborando uma amplitude de aproximadamente  $\pm 3^\circ$  fornecida pelo fabricante. A Figura 44 mostra o resultado de calibração para os ângulos corrigidos na faixa de linearidade do eletronível de referência.

Os coeficientes de calibração em radianos para cada um dos 16 eletroníveis que foram utilizados no programa de instrumentação são apresentados na Figura 45 e na Tabela 4. Observa-se nesse gráfico a repetibilidade dos valores do fator de calibração. Encontraram-se notórias diferenças respeito aos valores obtidos por Penedo (2012), deveu-se principalmente ao número de decimais utilizados na correlação entre as leituras do SME e as leituras da Mini Data-logger, tendo utilizado nosso caso dois números decimais mais que no trabalho do Penedo, é disser quatro números decimais.

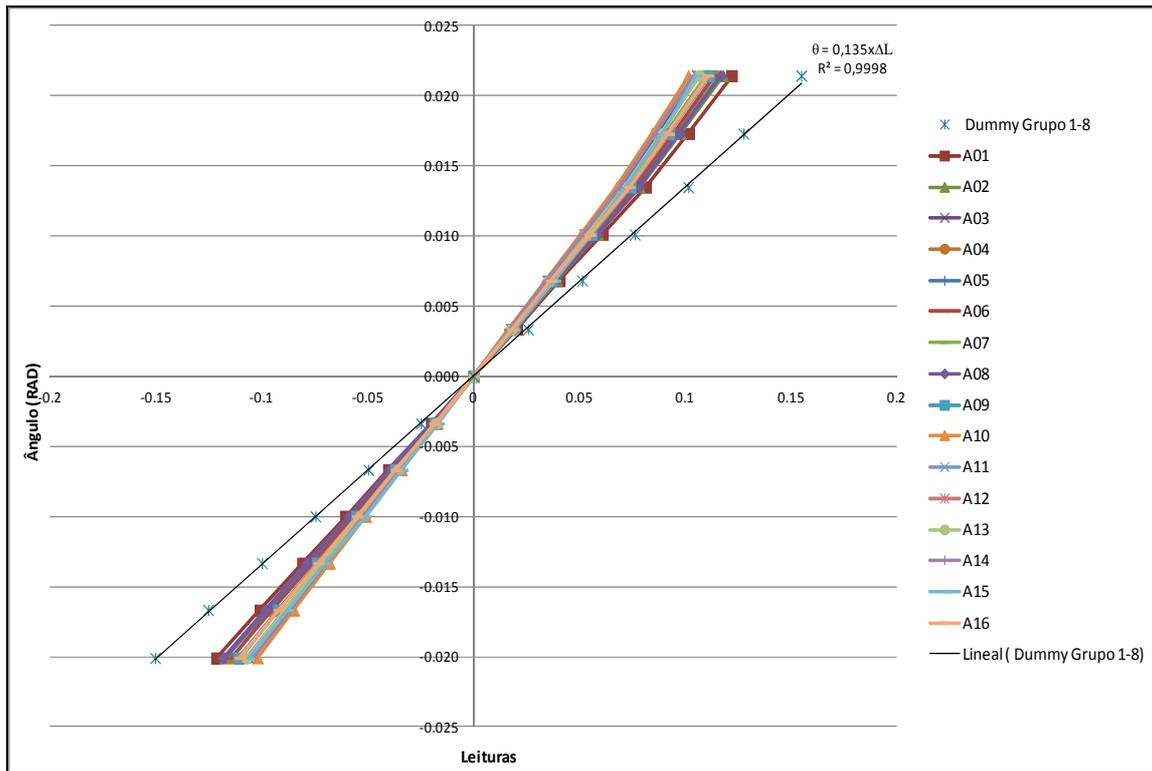


Figura 44. Curvas de calibração para os eletrônives A01 a A16

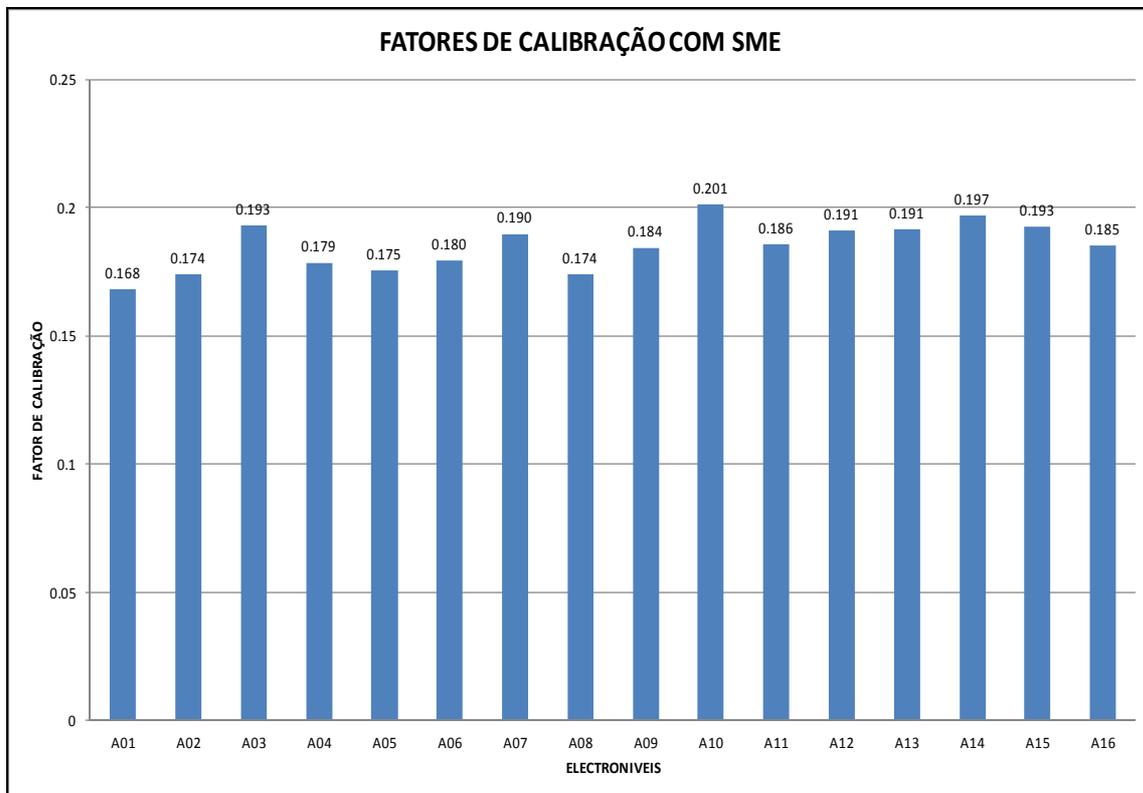


Figura 45. Fatores de calibração dos eletrônives A01 a A16

Tabela 4. Fatores de calibração dos eletrônives A01 a A16

Eletronível	Fator de Correlação
A01	0.168
A02	0.174
A03	0.193
A04	0.179
A05	0.175
A06	0.180
A07	0.190
A08	0.174
A09	0.184
A10	0.201
A11	0.186
A12	0.191
A13	0.191
A14	0.197
A15	0.193
A16	0.185
Média	0.185

### 3.5. Sistema de aquisição de dados

Como já mencionado os eletrônives são fixados na estrutura estudada e através de cabos elétricos são conectados a um sistema de aquisição de dados localizado em uma central para que uma equipe técnica possa obter as leituras. Posto isso é necessário abordar a questão de como são obtidos tais dados, ou seja, como de fato são feitas as leituras dos eletrônives. Assim a seguir se procura explicar o sistema de aquisição de dados utilizando-se um dispositivo que reconhece o sinal elétrico do eletrônível.

#### 3.5.1. Data logger

O mini data logger ou também chamado minilogger é um dispositivo de três canais de leituras que podem ser usados independentemente, ou seja, é possível instalar até três eletrônives no minilogger e obter as leituras de cada um deles separadamente. O minilogger possui um visor

de 6 dígitos e um teclado com funções de programação, mudança de canal e ajuste de data e hora. Esse equipamento funciona com 4 pilhas AA ou pode também ser ligado à corrente contínua. O sistema do minilogger reconhece o sinal elétrico gerado pelo eletrônível e mostra no visor o valor em miliVolts. Este visor possui um intervalo de 19999 divisões, onde uma divisão corresponde a cerca de 1 segundo do arco, como 6° equivalem a 21600 segundos uma divisão corresponde a cerca de 1 segundo do arco tem-se portanto 19999 divisões. Entretanto dever-se-ia ter uma faixa de operação de  $\pm 5^\circ$ , entretanto a leitura fornecida pelo minilogger é amplificada o que possibilita faixas de operação de  $\pm 6^\circ$ .

A Figura 46 apresenta o minilogger e alguns detalhes das conexões que podem ser feitas. O computador é conectado à porta paralela e à porta serial é acoplada a uma pequena caixa para três canais que possibilita a ligação de até três eletrôníveis simultaneamente. O visor do minilogger mostra a leitura do minilogger, ou seja, o valor em miliVolts, entretanto como se conhece o fator de calibração do eletrônível é possível obter a rotação em radianos para aquela grandeza. O minilogger funciona com quatro pilhas do tipo AA, mas pode também ser ligado à corrente contínua. Esse equipamento possui dimensões aproximadas de uma calculadora, portanto de fácil portabilidade além de possuir um simples sistema de conexão. Pode-se programar o minilogger para que as leituras sejam armazenadas em um intervalo de tempo pré-definido de um 1 minuto até 24 horas.

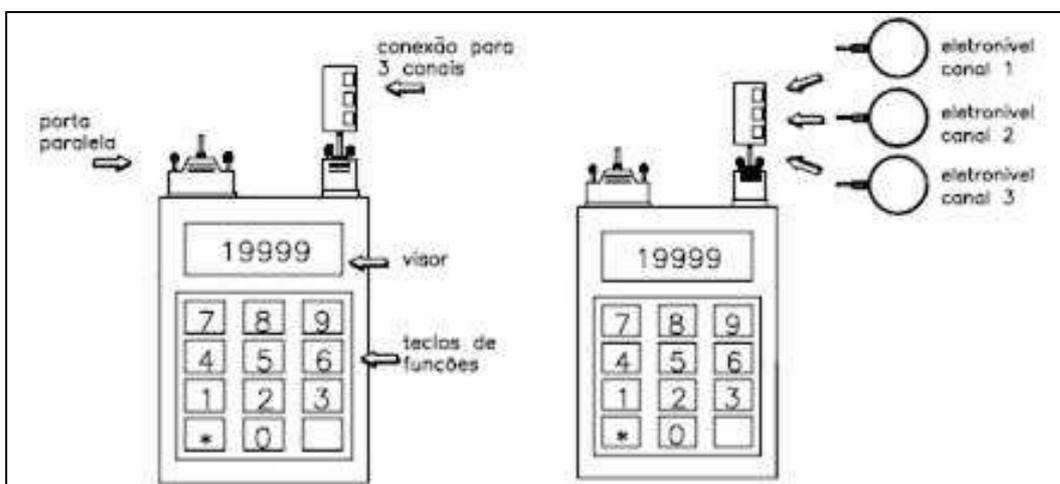


Figura 46. Detalhes do mini data logger e da conexão com os eletrôníveis.

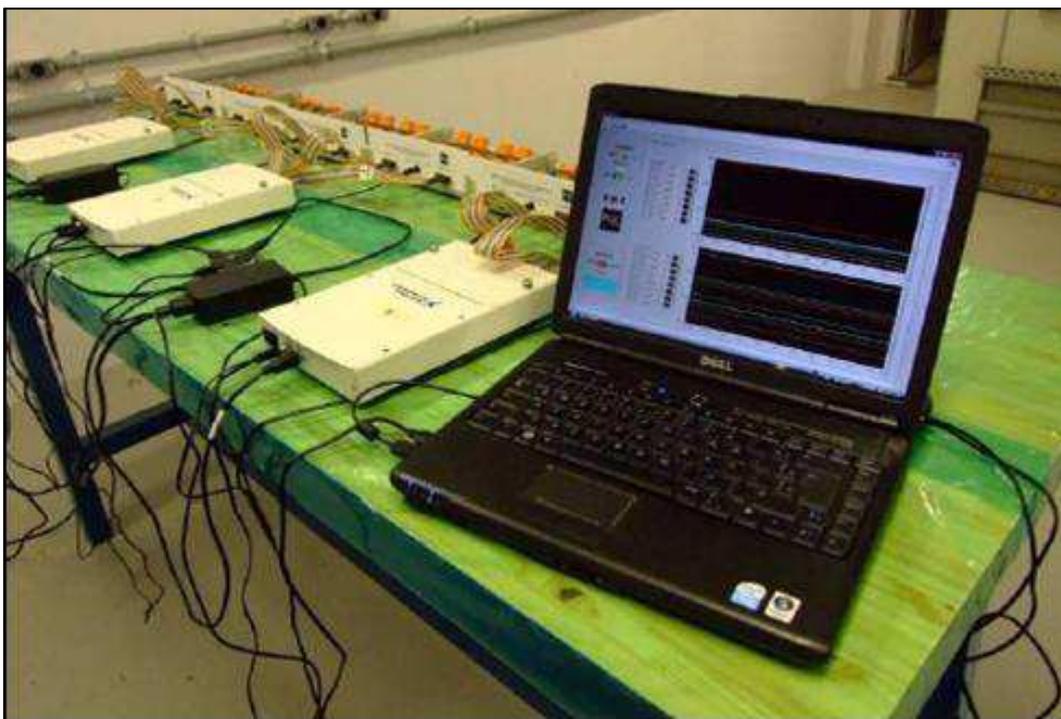
O mainlogger possui o mesmo sistema de funcionamento do minilogger, entretanto é capaz de suportar um maior número de eletrônives conectados simultaneamente, pois conta com 32 canais.

### **3.5.2. Sistema de Monitoramento de Eletrônives**

O SME é um programa auto-executável desenvolvido numa plataforma NI LabView 8.5 conjugada com o módulo de conversão A/D-D/A NI USB6229, do qual são utilizados 32 canais analógicos de entrada e 4 canais analógicos de saída. Com o objetivo de monitorar até 96 eletrônives, o sistema utiliza 3 módulos conversores, cada um deles controlado por um programa próprio e associado a 2 módulos para condicionamento de eletrônives.

Além de adquirir os dados provenientes dos eletrônives, os conversores são responsáveis pela geração dos sinais senoidais que excitam os mesmos. Os módulos de condicionamento recebem os sinais senoidais dos eletrônives e fazem a retificação, gerando níveis c.c. (corrente contínua) de tensão (proporcionais às inclinações medidas), que são então transferidos para os conversores. A Figura 47 apresenta a vista dos equipamentos do Sistema de Monitoramento de Eletrônives.

Quando ativados, os programas SME iniciam imediatamente a leitura e processamento dos dados, que são mostrados no painel nas formas numérica e gráfica e atualizados de acordo com o intervalo programado. A gravação dos dados, em arquivo .xls ou .txt, é iniciada somente após habilitada pela chave “gravação”. Qualquer alteração executada nos parâmetros do painel só é válida para a operação em curso, não sendo possível salvá-las para uso futuro.



**Figura 47. Vista dos equipamentos do Sistema de Monitoramento de Eletrônicos.**